

Liderando el conocimiento, la innovación
y el desarrollo tecnológico de los
pavimentos asfálticos en Centroamérica...

DOCUMENTO TÉCNICO ICA-01-2026

Origen de los umbrales de los modelos clásicos de módulo resiliente vs. CBR utilizados en Centroamérica

*Reconstrucción histórica y análisis técnico de las correlaciones CBR- M_R , a partir del testimonio del
Dr. Augusto Jugo*

Ing. Luis Guillermo Loría-Salazar, MSc, PhD

Director, Escuela de Ingeniería de Materiales — ULACIT
Director, Comité Científico ICA

Setiembre de 2026

Ficha Técnica y Resumen

1. SERIE Documentos Técnicos del Instituto Centroamericano del Asfalto (ICA)	
2. DOCUMENTO ICA-01-2026	3. FECHA Setiembre de 2026
4. TÍTULO Origen de los umbrales de los modelos clásicos de módulo resiliente vs. CBR utilizados en Centroamérica	
5. SUBTÍTULO Reconstrucción histórica y análisis técnico de las correlaciones CBR- M_R , a partir del testimonio del Dr. Augusto Jugo	
6. AUTOR(ES) Ing. Luis Guillermo Loría-Salazar, MSc, PhD	7. AFILIACIÓN INSTITUCIONAL Director, Escuela de Ingeniería de Materiales, ULACIT · Director, Comité Científico ICA
8. ÁREAS TEMÁTICAS Diseño de pavimentos; Geotecnia vial; Caracterización de materiales; Módulo resiliente	
9. RESUMEN En la práctica de diseño de pavimentos de Centroamérica se utilizan, desde hace varias décadas, tres expresiones para estimar el módulo resiliente (M_R) a partir del CBR —una relación lineal, una relación potencial y una relación logarítmica— junto con un valor de CBR = 7,2 que opera como criterio de transición entre las dos primeras. La procedencia conjunta de estos criterios no se encontraba documentada con precisión en la literatura técnica de uso corriente en la región, y su atribución genérica a la guía AASHTO resultaba, ante una revisión directa, solo parcialmente sostenible. Este Documento Técnico reconstruye el origen de dichos criterios combinando revisión bibliográfica internacional con el testimonio del Dr. Augusto Jugo, ingeniero venezolano a quien se atribuye el desarrollo de dos de ellos, tratado en todo momento como comunicación personal y distinguido explícitamente de la evidencia documental verificable. La investigación permite establecer, con distintos grados de certeza, que la relación lineal corresponde a la expresión de Heukelom y Klomp (1962) incorporada en la guía AASHTO de 1993; que la relación potencial es consistente con la familia de correlaciones sudafricanas del CSIR, aunque su fuente primaria no pudo verificarse; que el valor CBR = 7,2 se reproduce matemáticamente como punto de intersección entre ambas expresiones; y que la ecuación logarítmica fue desarrollada, según el testimonio recogido, con un dominio de aplicación limitado cuya extrapolación resulta problemática. Estas expresiones se exigían y empleaban en Centroamérica sin que su origen fuera conocido. La investigación determinó que la relación lineal y la potencial provienen de fuentes extranjeras no centroamericanas (Heukelom y Klomp, 1962; familia CSIR de Sudáfrica), mientras que el límite de transición CBR = 7,2 y la ecuación logarítmica se originan en los trabajos del Dr. Jugo en Venezuela. El hallazgo más significativo de la investigación es la identificación de la expresión mecanicista $M_R = 2555 \cdot CBR^{0.64}$ —percibida en la región como la más reciente y de origen menos claro— como la relación publicada por Powell et al. (1984) y adoptada por la guía NCHRP 1-37A, resultando así la de trazabilidad documental más sólida de las tres. El documento discute las implicaciones de estos hallazgos para la caracterización moderna de suelos y materiales granulares, y recomienda avanzar hacia la calibración local y la caracterización directa mediante ensayo triaxial de carga repetida cuando las condiciones del proyecto lo permitan.	
10. PALABRAS CLAVE CBR, módulo resiliente, correlaciones empíricas, AASHTO 1993, diseño mecanicista-empírico, calibración local, Centroamérica, trazabilidad histórica	
11. REFERENCIA SUGERIDA (APA) Loría-Salazar, L. G. (2026). Origen de los umbrales de los modelos clásicos de módulo resiliente vs. CBR utilizados en Centroamérica (Documento Técnico ICA-01-2026). Instituto Centroamericano del Asfalto (ICA).	



Junta Directiva ICA 2026

La Junta Directiva del Instituto Centroamericano del Asfalto para el período 2025–2027 está integrada de la siguiente manera:

Cargo	Nombre	País
Presidente	Ing. Rodrigo Rubio Haasler	 Guatemala
Vicepresidente	Ing. Luis Guillermo Loría-Salazar	 Costa Rica
Tesorero	Ing. Oswaldo Chávez Arévalo	 Nicaragua
Secretario	Ing. Óscar Corbera Castillo	 Honduras
Presidente Pasado	Ing. Carlos Mata Ascoli	 El Salvador
Director Ejecutivo	Ing. José Manuel Cuadrado Valbuena	 Panamá

Junta Directiva del Instituto Centroamericano del Asfalto, período 2025–2027.



Comité Científico ICA 2026

El Comité Científico del Instituto Centroamericano del Asfalto (ICA) está integrado por profesionales de la región que han confirmado su participación como parte del proceso de revisión técnica de las publicaciones del ICA. Se presenta a continuación por país, en orden alfabético, y dentro de cada país por apellido.

 **Coordinador del Comité Científico:** Ing. Luis Guillermo Loría-Salazar, MSc, PhD (Costa Rica)

Costa Rica

Ing. José Pablo Aguiar Moya, MSc, PhD
Ing. Alejandra Baldi Sevilla, MSc, candidata a doctora
Ing. Jorge Salazar Delgado
Ing. Ernesto Villegas-Villegas, MSc, PhD

Guatemala

Ing. Dina Avellán
Ing. Rodrigo Rubio Haasler, MSc

Nicaragua

Ing. Oscar Noel Cerda Hernández, MSc
Ing. Pedro Oswaldo Chávez Arévalo, MSc
Ing. Germán Ahmed Cruz Ramírez
Ing. Marjorie Vanessa Manzanarez Moran
Ing. Sergio Fabricio Montenegro Jimenez, MSc
Ing. Pedro Joaquín Morales Cárdenas, MSc

El Salvador

Ing. Fritz Alvarado
Ing. Ricardo Flores
Ing. Christa Mata de Lara
Ing. Pablo Alberto Torres Linares

Honduras

Ing. Ramiro Alfonso Aguilera Aguilar
Ing. Oscar Corbera
Ing. Oscar Moncada Buezo
Ing. Carlos Alberto Urcina Benavides, MSc

Panamá

Ing. Allen Camacho
Ing. Elvis Castillo Camarena, MSc, PhD
Ing. Airam Morales Vega, MSc, PhD
Ing. Ka Lai Ng Puga, MSc, PhD





Palabras de Bienvenida

Para el Instituto Centroamericano del Asfalto, este primer Documento Técnico representa mucho más que una publicación: es la manera en que decidimos honrar el conocimiento acumulado por generaciones de ingenieros centroamericanos. Reconstruir el origen de los criterios que empleamos a diario nos recuerda que la técnica también tiene memoria, y que cuidarla es una forma de servir mejor a nuestra región.

Ing. Rodrigo Rubio Haasler

Presidente, Instituto Centroamericano del Asfalto

Impulsar esta serie de Documentos Técnicos ha sido, desde el inicio, una apuesta por el rigor y por la memoria institucional del gremio asfáltico centroamericano. En este primer número, el ejercicio de trazabilidad histórica que aquí se presenta demuestra que las herramientas que empleamos todos los días —a veces sin preguntarnos su origen— merecen el mismo cuidado que exigimos en el diseño y la construcción de nuestros pavimentos. Detrás de cada correlación, de cada valor umbral que damos por sentado en una hoja de cálculo, hay una historia de personas, de circunstancias y de decisiones técnicas concretas, y ese es precisamente el tipo de memoria institucional que el ICA se propone preservar con esta serie. Agradezco al Ing. Loría-Salazar por sentar, con este trabajo, un estándar editorial que esperamos inspire a toda la comunidad técnica de la región, y confío en que este sea apenas el primero de muchos documentos que devuelvan a nuestra práctica profesional el rigor y la trazabilidad que merece.

Ing. José Manuel Cuadrado Valbuena

Director Ejecutivo, Instituto Centroamericano del Asfalto





Nota editorial

Este documento inaugura la serie de Documentos Técnicos del Instituto Centroamericano del Asfalto (ICA). Su propósito es doble: por una parte, ofrecer una reconstrucción rigurosa del origen de los criterios CBR- M_R examinados en las secciones siguientes; por otra, establecer la línea editorial —de contenido, redacción y diseño— que orientará las publicaciones técnicas futuras del Instituto. Esa doble función explica el cuidado puesto en la trazabilidad de cada afirmación histórica y en la distinción explícita entre evidencia documental, comunicación personal e interpretación técnica del autor, criterio que el ICA adopta como estándar editorial permanente.

Como referencia complementaria sobre el estado actual de la caracterización de materiales en la región, cabe mencionar que el autor documentó, en un trabajo independiente presentado en el XXIII Congreso Ibero-Latinoamericano del Asfalto (CILA, Asunción, Paraguay, 2025), la calibración integral de la primera guía mecanicista-empírica de diseño de pavimentos completa para Costa Rica, desarrollada con base en ensayos acelerados de pavimentos (Loría-Salazar, 2026).



Resumen

En la práctica de diseño de pavimentos de Centroamérica se utilizan, desde hace varias décadas, tres expresiones para estimar el módulo resiliente (M_R) a partir del CBR —una relación lineal, una relación potencial y una relación logarítmica— junto con un valor de $CBR = 7,2$ que opera como criterio de transición entre las dos primeras. La procedencia conjunta de estos criterios no se encontraba documentada con precisión en la literatura técnica de uso corriente en la región, y su atribución genérica a la guía AASHTO resultaba, ante una revisión directa, solo parcialmente sostenible. Este Documento Técnico reconstruye el origen de dichos criterios combinando revisión bibliográfica internacional con el testimonio del Dr. Augusto Jugo, ingeniero venezolano a quien se atribuye el desarrollo de dos de ellos, tratado en todo momento como comunicación personal y distinguido explícitamente de la evidencia documental verificable. La investigación permite establecer, con distintos grados de certeza, que la relación lineal corresponde a la expresión de Heukelom y Klomp (1962) incorporada en la guía AASHTO de 1993; que la relación potencial es consistente con la familia de correlaciones sudafricanas del CSIR, aunque su fuente primaria no pudo verificarse; que el valor $CBR = 7,2$ se reproduce matemáticamente como punto de intersección entre ambas expresiones; y que la ecuación logarítmica fue desarrollada, según el testimonio recogido, con un dominio de aplicación limitado cuya extrapolación resulta problemática. Estas expresiones se exigían y empleaban en Centroamérica sin que su origen fuera conocido. La investigación determinó que la relación lineal y la potencial provienen de fuentes extranjeras no centroamericanas (Heukelom y Klomp, 1962; familia CSIR de Sudáfrica), mientras que el límite de transición $CBR = 7,2$ y la ecuación logarítmica se originan en los trabajos del Dr. Jugo en Venezuela. El hallazgo más significativo de la investigación es la identificación de la expresión mecanicista $M_R = 2555 \cdot CBR^{0,64}$ —percibida en la región como la más reciente y de origen menos claro— como la relación publicada por Powell et al. (1984) y adoptada por la guía NCHRP 1-37A, resultando así la de trazabilidad documental más sólida de las tres. El documento discute las implicaciones de estos hallazgos para la caracterización moderna de suelos y materiales granulares, y recomienda avanzar hacia la calibración local y la caracterización directa mediante ensayo triaxial de carga repetida cuando las condiciones del proyecto lo permitan.

Palabras clave: CBR, módulo resiliente, correlaciones empíricas, AASHTO 1993, diseño mecanicista-empírico, calibración local, Centroamérica, trazabilidad histórica

Abstract

For several decades, pavement design practice in Central America has relied on three empirical expressions to estimate resilient modulus (M_R) from the California Bearing Ratio (CBR)—a linear relationship, a power relationship, and a logarithmic relationship—together with a CBR value of 7.2 used as a transition criterion between the first two. The joint provenance of these criteria was not precisely documented in the region's standard technical literature, and their generic attribution to the AASHTO guide proved only partially defensible under direct review. This Technical Document reconstructs the origin of these criteria by combining an international literature review with the testimony of Dr. Augusto Jugo, a Venezuelan engineer credited with developing two of them, treated throughout as personal communication and explicitly distinguished from verifiable documentary evidence. The investigation establishes, with varying degrees of certainty, that the linear relationship corresponds to the Heukelom and Klomp (1962) expression incorporated into the 1993 AASHTO Guide; that the power relationship is consistent with the South African CSIR family of correlations, although its primary source could not be verified; that the $\text{CBR} = 7.2$ value is mathematically reproduced as the intersection point between both expressions; and that the logarithmic equation was developed, per the testimony gathered, with a limited domain of applicability whose extrapolation proves problematic. These expressions were required and used in Central America without their origin being known. The investigation determined that the linear and power relationships trace to foreign, non-Central American sources (Heukelom and Klomp, 1962; the South African CSIR family), while the $\text{CBR} = 7.2$ transition limit and the logarithmic equation originate in Dr. Jugo's work in Venezuela. The investigation's most significant finding is the identification of the mechanistic expression $M_R = 2555 \cdot \text{CBR}^{0.64}$ —perceived regionally as the most recent and least clearly sourced—as the relationship published by Powell et al. (1984) and later adopted by the NCHRP 1-37A guide, making it the best documented of the three. The document discusses the implications of these findings for the modern characterization of soils and granular materials, and recommends progress toward local calibration and direct characterization via repeated-load triaxial testing whenever project conditions allow.

Keywords: CBR, resilient modulus, empirical correlations, AASHTO 1993, mechanistic-empirical design, local calibration, Central America, historical traceability

Índice de Contenido

Ficha Técnica y Resumen.....	i
Junta Directiva ICA 2026.....	ii
Comité Científico ICA 2026.....	iii
Palabras de Bienvenida.....	iv
Nota editorial.....	v
Resumen.....	vi
Abstract.....	vii
Índice de Contenido.....	viii
Índice de Figuras.....	x
Índice de Tablas.....	xi
1. Introducción.....	1
1.1. Motivación técnica.....	1
2. Antecedentes: el CBR y el módulo resiliente como ensayos distintos.....	4
2.1. El ensayo CBR.....	4
2.2. El ensayo triaxial dinámico de módulo resiliente.....	6
2.3. Ensayos monotónicos frente a ensayos de carga repetida.....	7
3. Desarrollo histórico de las correlaciones CBR- M_R	8
3.1. La correlación de Heukelom y Klomp.....	8
3.2. Otras relaciones desarrolladas entre 1960 y 1990.....	9
3.3. La relación de Powell, Potter, Mayhew y Nunn (1984).....	10
3.4. Una observación de conjunto.....	10
4. Umbrales y ecuaciones utilizadas en la práctica centroamericana.....	11
5. Reconstrucción del origen de los criterios atribuidos a Augusto Jugo.....	12
5.1. El problema de la discontinuidad y el origen del valor CBR = 7,2.....	12
5.2. La correlación logarítmica y su dominio de aplicación.....	15
5.3. Los coeficientes estructurales a_2 y a_3 y la dependencia del estado de esfuerzos.....	16

5.4. Difusión regional y pérdida del contexto original.....	17
6. Comparación con las relaciones clásicas reportadas en la literatura.....	17
7. Alcance, limitaciones y transferibilidad de las correlaciones.....	19
8. Discusión.....	21
9. Conclusiones.....	22
10. Recomendaciones.....	25
Referencias.....	26
Anexo A. Transcripción depurada de los mensajes de voz del Dr. Augusto Jugo.....	28
Mensaje 1. Origen del valor CBR = 7,2.....	28
Mensaje 2. Aclaración sobre la discontinuidad.....	29
Mensaje 3. Corrección puntual.....	29
Mensaje 4. Origen de la ecuación logarítmica.....	29
Mensaje 5. Ampliación sobre CBR mayores de 20.....	30
Mensaje 6. Sobre la falta de publicación formal.....	30
Mensaje 7. Complemento y disponibilidad para conversar.....	30



Índice de Figuras

Figura 1. Esquema conceptual del ensayo CBR (ASTM D1883 / AASHTO T193). La resistencia a la penetración de un pistón normalizado se aplica de manera esencialmente monotónica, sin ciclos de carga y descarga.....	5
Figura 2. Esquema conceptual del ensayo triaxial dinámico de módulo resiliente (AASHTO T 307). El módulo se define como el cociente entre el esfuerzo desviador cíclico aplicado y la deformación axial recuperable, bajo un esfuerzo de confinamiento controlado.....	6
Figura 3. Representación gráfica del criterio de intersección entre $M_R = 1500 \cdot \text{CBR}$ y $M_R = 3000 \cdot \text{CBR}^{0.65}$, según la reconstrucción del Dr. Augusto Jugo. El valor $\text{CBR} = 7,2$ corresponde al punto de cambio que evita una discontinuidad entre ambas correlaciones.....	14
Figura 4. Esbozo manuscrito original enviado por el Dr. Augusto Jugo durante la reconstrucción del criterio de intersección $\text{CBR} = 7,2$. Se incorpora por su valor documental e histórico.....	15
Figura 5. Síntesis docente de los tres modelos de correlación M_R -CBR y sus rangos de validez, elaborada por el autor (Loría-Salazar, Micro-máster Internacional en Diseño Estructural y de Materiales para Pavimentos, Módulo 1, Semana 5), consistente con los criterios reconstruidos a partir del testimonio del Dr. Jugo.....	24





Índice de Tablas

Tabla 1. Comparación de las correlaciones M_R -CBR examinadas en este documento.....18

Tabla 2. Criterios de correlación M_R -CBR propuestos a partir del testimonio del Dr. Augusto Jugo, con sus límites de validez.....23



1. Introducción

En la práctica del diseño de pavimentos en Centroamérica, la conversión de un valor de razón de soporte de California (CBR) en un módulo resiliente (M_R) es una operación tan frecuente que rara vez se examina. Aparece en hojas de cálculo, en el respaldo de manuales institucionales, en cursos de actualización profesional y, en algunos países de la región, en el texto mismo de especificaciones de diseño. Su empleo cotidiano ha tenido, sin embargo, un efecto paradójico: cuanto más se repite una ecuación, menos se pregunta de dónde proviene. Este Documento Técnico nace precisamente de esa pregunta, formulada primero de manera casi incidental y desarrollada después como una investigación histórico-técnica por derecho propio.

El objeto de estudio son tres expresiones concretas que circulan en la práctica centroamericana para estimar M_R a partir del CBR: una relación lineal, una relación potencial y una relación logarítmica, junto con un valor de CBR que opera como frontera de transición entre las dos primeras. Ninguna de ellas resultó, al indagar su origen, ser una invención regional; todas provienen de la literatura internacional de mecánica de pavimentos de las décadas de 1960 a 1980. Lo que sí es propiamente centroamericano —y por tanto merece documentarse con el mismo cuidado— es la manera en que esas expresiones llegaron a la región, la forma en que se combinaron entre sí y el grado, desigual, en que su procedencia se conservó o se perdió en el trayecto.

1.1. Motivación técnica

La pregunta que da origen a este documento no surgió de un ejercicio bibliográfico programado, sino de una inquietud acumulada a lo largo del ejercicio profesional y académico del autor en diseño de pavimentos, caracterización de materiales y transferencia tecnológica. Es común, en ese ejercicio, encontrar correlaciones, factores de conversión, valores límite y criterios de aceptación que se emplean de manera rutinaria sin que resulte evidente, para quien los aplica, bajo qué materiales fueron desarrollados o qué limitaciones llevan implícitas. Esa situación no es exclusiva de Centroamérica ni de la relación CBR- M_R ; es, más bien, una condición estructural de cualquier disciplina de ingeniería que construye sobre el trabajo acumulado de generaciones anteriores. Pero adquiere una relevancia particular cuando la correlación en cuestión se emplea para asignar una propiedad mecánica que alimenta directamente el análisis estructural de un pavimento.

La repetición histórica de una ecuación no la convierte en una ley física, como tampoco la ausencia de una fuente identificable la convierte necesariamente en un error. Ambas afirmaciones, llevadas al extremo, serían igual de injustificadas. Lo que sí resulta insostenible es la situación intermedia, con mucho la más frecuente: una ecuación que se usa como si fuera universal sin que su población de calibración, su rango de validez o las condiciones de ensayo que le dieron origen sean conocidas por quien la aplica. En el caso del CBR y el módulo resiliente, ese riesgo se agrava porque ambas magnitudes, aunque suelen tratarse como intercambiables en la práctica de diseño, no representan la misma respuesta mecánica del

material. El CBR es un índice de resistencia obtenido bajo penetración cuasiestática; el módulo resiliente pretende caracterizar la relación entre un esfuerzo repetido y la deformación recuperable que dicho esfuerzo produce, bajo un estado de confinamiento definido. Una correlación estadística razonable entre ambas magnitudes, dentro de la población de materiales para la que fue desarrollada, no equivale a una transformación física entre propiedades equivalentes.

Conviene ser preciso sobre el alcance de esta observación, porque admite una lectura más simple —y menos útil— que la que aquí se pretende. No se trata de oponer, de manera dicotómica, el ensayo directo de módulo resiliente a la correlación empírica, como si el primero fuera necesariamente correcto y la segunda necesariamente deficiente. El razonamiento que estructura este documento es más gradual: existe una secuencia que va de la medición a la caracterización, de la caracterización a la calibración, de la calibración a la correlación y de la correlación a la aplicación de diseño, y en cada tránsito se pierde información sobre las condiciones originales del material ensayado. Cuanto más consciente sea el diseñador de en qué punto de esa secuencia se encuentra la relación que está utilizando, con mayor criterio podrá decidir si su empleo es razonable para el proyecto que tiene entre manos.

Existen, además, circunstancias en las que un ensayo especializado de módulo resiliente — que requiere equipo triaxial dinámico, procedimientos de acondicionamiento y personal capacitado en su ejecución e interpretación— no está disponible por razones de infraestructura, tiempo, escala del proyecto o acceso a laboratorios acreditados. En esos casos, una correlación empírica bien documentada puede constituir una herramienta de diseño razonable, siempre que se conozcan su procedencia, su dominio de calibración y su incertidumbre asociada. El problema no reside en recurrir a una correlación; reside en hacerlo sin ese conocimiento, o en extender su aplicación mucho más allá de los materiales y las condiciones para las cuales fue desarrollada.

Sobre la disponibilidad tecnológica actual conviene hacer una precisión adicional, formulada aquí con la prudencia que el tema exige. Los equipos de ensayo triaxial cíclico, los sistemas de adquisición de datos y los procedimientos normalizados —como el AASHTO T 307— para caracterizar el módulo resiliente de suelos y materiales granulares existen desde hace más de tres décadas y se encuentran ampliamente documentados. Esto no significa que todo laboratorio, institución o proyecto de la región disponga hoy de esos equipos, ni que su adquisición y operación estén libres de costo o de dificultad logística; significa, más bien, que la disponibilidad de la tecnología necesaria ha dejado de ser, por sí sola, la principal limitación para avanzar hacia una caracterización más representativa de los materiales locales. El reto contemporáneo se desplaza entonces hacia el acceso efectivo a esos equipos, la formación técnica para operarlos e interpretar sus resultados, y la incorporación de sus productos en las especificaciones y los criterios de decisión que efectivamente se utilizan en los proyectos.

Ese desplazamiento del reto técnico hacia el terreno de las capacidades y las prácticas institucionales conecta con una segunda inquietud, más delicada de formular, que también

motivó este documento. La experiencia profesional acumulada, el criterio ingenieril y la observación del comportamiento de las obras construidas constituyen un componente legítimo y valioso del ejercicio de la ingeniería; ningún cuerpo de evidencia experimental sustituye por completo al juicio de quien ha visto fallar y comportarse adecuadamente distintos materiales en distintas condiciones. Lo que resulta preocupante —y aquí conviene ser cuidadoso para no convertir la observación en un juicio hacia personas, instituciones o laboratorios concretos— es que una decisión sobre el comportamiento mecánico de un material llegue a fundamentarse predominantemente en preferencias históricas o en percepciones individuales que no han sido contrastadas con propiedades medibles ni con principios de mecánica de materiales. La experiencia alcanza su mayor valor cuando puede interpretarse a la luz de la evidencia experimental disponible, y un resultado de laboratorio aislado tampoco sustituye el criterio de quien debe decidir su aplicación en un proyecto real. La ingeniería de calidad no elige entre ambos componentes; los integra.

De esa integración surgió la pregunta concreta que dio origen a esta investigación: ¿de dónde provienen realmente los umbrales de CBR y las correlaciones $CBR-M_R$ que, durante décadas, se han reproducido en proyectos, cursos y documentos técnicos de Centroamérica? La búsqueda, dirigida inicialmente a localizar una referencia bibliográfica puntual, se convirtió progresivamente en un ejercicio de trazabilidad histórica que combinó literatura técnica internacional, documentos regionales y, finalmente, el contacto directo con el Dr. Augusto Jugo, ingeniero venezolano a quien se atribuye el desarrollo de dos de los criterios examinados. Su testimonio, registrado en varios mensajes de voz que se transcriben íntegramente en el Anexo A, aporta un nivel de detalle histórico que la literatura publicada no ofrece por sí sola, y se trata en este documento con el cuidado metodológico que una fuente oral de este tipo exige: como una reconstrucción valiosa que orienta la investigación, no como una demostración que la sustituye.

El resultado no es una respuesta cerrada. Como se explicará en las secciones siguientes, algunos de los criterios examinados admiten una verificación matemática directa; otros dependen del testimonio del Dr. Jugo y no han podido corroborarse todavía mediante documentación contemporánea; y al menos uno de ellos, la relación que en la región suele considerarse la más reciente y mecanicista, resultó tener una procedencia documentada en la literatura internacional que ninguno de los profesionales consultados durante esta investigación había identificado previamente. Esa combinación de hallazgos —parte verificable, parte testimonial, parte redescubierta— es, en sí misma, uno de los resultados de este trabajo: una muestra concreta de cómo una herramienta de diseño ampliamente utilizada puede circular durante décadas con su genealogía solo parcialmente documentada, sin que ello la invalide, pero sí obligue a utilizarla con mayor conocimiento de causa.

Las secciones que siguen desarrollan este argumento en un orden que va de lo conceptual a lo específico. La Sección 2 examina la naturaleza mecánica del CBR y del módulo resiliente como ensayos distintos, apoyándose en dos figuras técnicas elaboradas para esta publicación. La Sección 3 reconstruye el desarrollo histórico internacional de las correlaciones $CBR-M_R$. La Sección 4 describe cómo estos criterios se incorporaron a la práctica centroamericana. La

Sección 5 presenta la reconstrucción del testimonio del Dr. Jugo. La Sección 6 contrasta ese testimonio con las fuentes documentadas en la literatura clásica. Las secciones 7 y 8 discuten el alcance, las limitaciones y las implicaciones de estos hallazgos para la caracterización moderna de materiales, antes de cerrar con la discusión, las conclusiones y las recomendaciones.

2. Antecedentes: el CBR y el módulo resiliente como ensayos distintos

Antes de examinar el origen histórico de las correlaciones que vinculan al CBR con el módulo resiliente, es necesario fijar con precisión qué mide cada ensayo, porque buena parte de la confusión que rodea a estas correlaciones proviene de tratarlas como dos maneras equivalentes de cuantificar la misma propiedad. No lo son. Esta sección describe brevemente ambos procedimientos, apoyándose en dos figuras elaboradas específicamente para esta publicación, y establece la distinción conceptual que se utilizará como referencia a lo largo del documento.

2.1. El ensayo CBR

El ensayo de razón de soporte de California, normalizado internacionalmente como ASTM D1883 y como AASHTO T193 en su variante de laboratorio sobre suelos compactados, mide la resistencia que ofrece una muestra de suelo a la penetración de un pistón normalizado, a una velocidad de deformación constante, y expresa esa resistencia como un porcentaje de la resistencia que ofrece, bajo la misma penetración, una muestra patrón de piedra triturada bien graduada. Es, por construcción, un índice comparativo y empírico: no pretende medir un módulo elástico ni una propiedad constitutiva del material, sino ordenar distintos suelos y materiales granulares según su capacidad relativa de soportar cargas de penetración bajo condiciones de compactación, densidad y humedad específicas.

La Figura 1 esquematiza el principio del ensayo. La muestra, compactada dentro de un molde normalizado, recibe la penetración de un pistón bajo una carga que se aplica de manera esencialmente monotónica y cuasiestática; es decir, la carga crece de forma continua hasta alcanzar la penetración de interés, sin ciclos de carga y descarga que permitan distinguir una componente de deformación recuperable de una componente permanente. Esta característica —ensayo de penetración bajo carga creciente, no bajo carga repetida— es la que en definitiva distingue al CBR del módulo resiliente y explica buena parte de las limitaciones que se discuten más adelante.

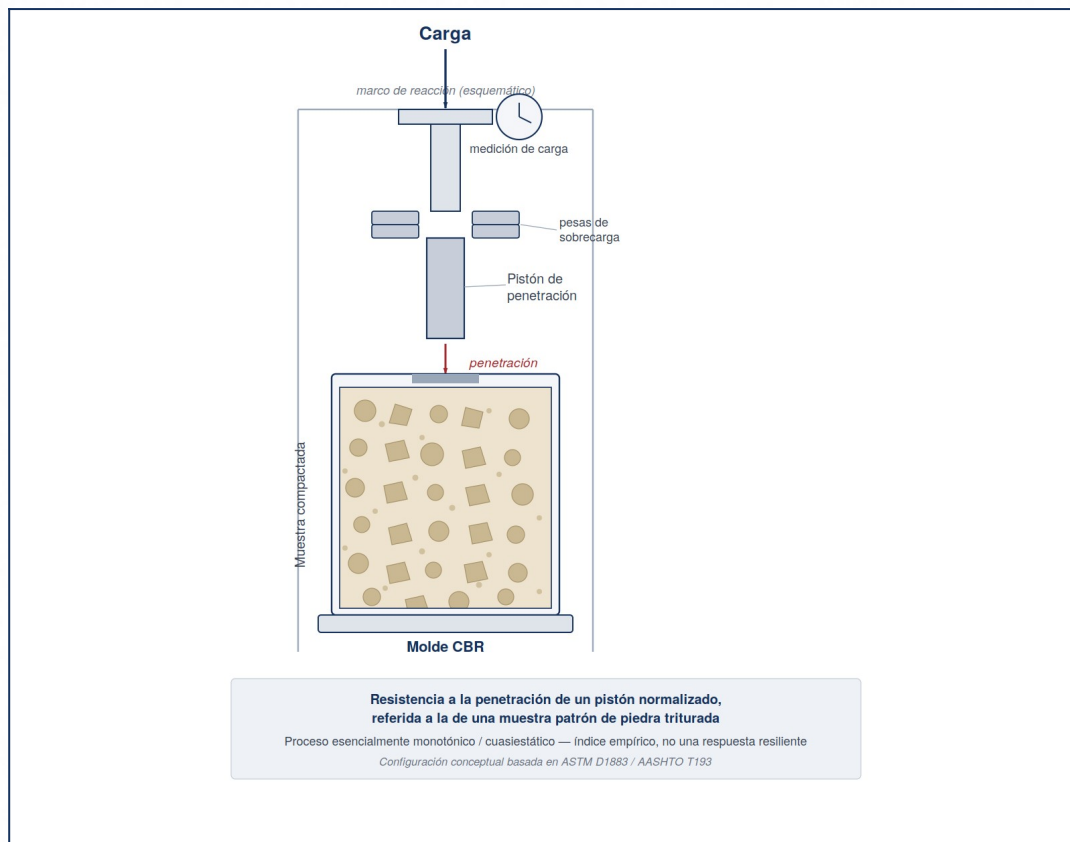


Figura 1. Esquema conceptual del ensayo CBR (ASTM D1883 / AASHTO T193). La resistencia a la penetración de un pistón normalizado se aplica de manera esencialmente monotónica, sin ciclos de carga y descarga.

Ninguna de estas observaciones pretende restar mérito al CBR como herramienta de ingeniería. Durante más de setenta años, el ensayo ha permitido clasificar materiales, comparar su capacidad relativa, establecer especificaciones de aceptación y alimentar procedimientos empíricos de diseño de pavimentos con una sencillez de ejecución que explica su persistencia en la práctica profesional de todo el mundo. La observación pertinente para los efectos de este documento es más específica: el valor de CBR, por su naturaleza empírica y por las condiciones bajo las cuales se determina, no fue concebido como una medida directa de un módulo elástico o resiliente, y su empleo con ese propósito depende enteramente de la calidad y el alcance de la correlación estadística que se utilice para ese fin. El resultado de un CBR es además sensible a variables que no siempre se documentan con el mismo cuidado — densidad de compactación, contenido de humedad al momento del ensayo, condición remojada o no remojada de la muestra— y esa sensibilidad se traslada, sin corrección, a cualquier módulo resiliente que se derive de él mediante una ecuación.

2.2. El ensayo triaxial dinámico de módulo resiliente

El módulo resiliente, tal como se determina mediante ensayo triaxial cíclico según el procedimiento AASHTO T 307, caracteriza una respuesta distinta: la relación entre un esfuerzo desviador aplicado de manera repetida y la deformación axial recuperable que ese esfuerzo produce, bajo un estado de esfuerzo de confinamiento controlado. La Figura 2 esquematiza esta configuración. La probeta, cilíndrica y confinada lateralmente dentro de una cámara triaxial, recibe una secuencia de pulsos de carga axial superpuestos a un esfuerzo de confinamiento constante; de cada ciclo de carga y descarga se registra la deformación axial recuperable, y el módulo resiliente se define, en su expresión más simple, como el cociente entre el esfuerzo desviador cíclico aplicado y esa deformación recuperable:

$$M_R = \frac{\sigma_d}{\epsilon_r} \quad (1)$$

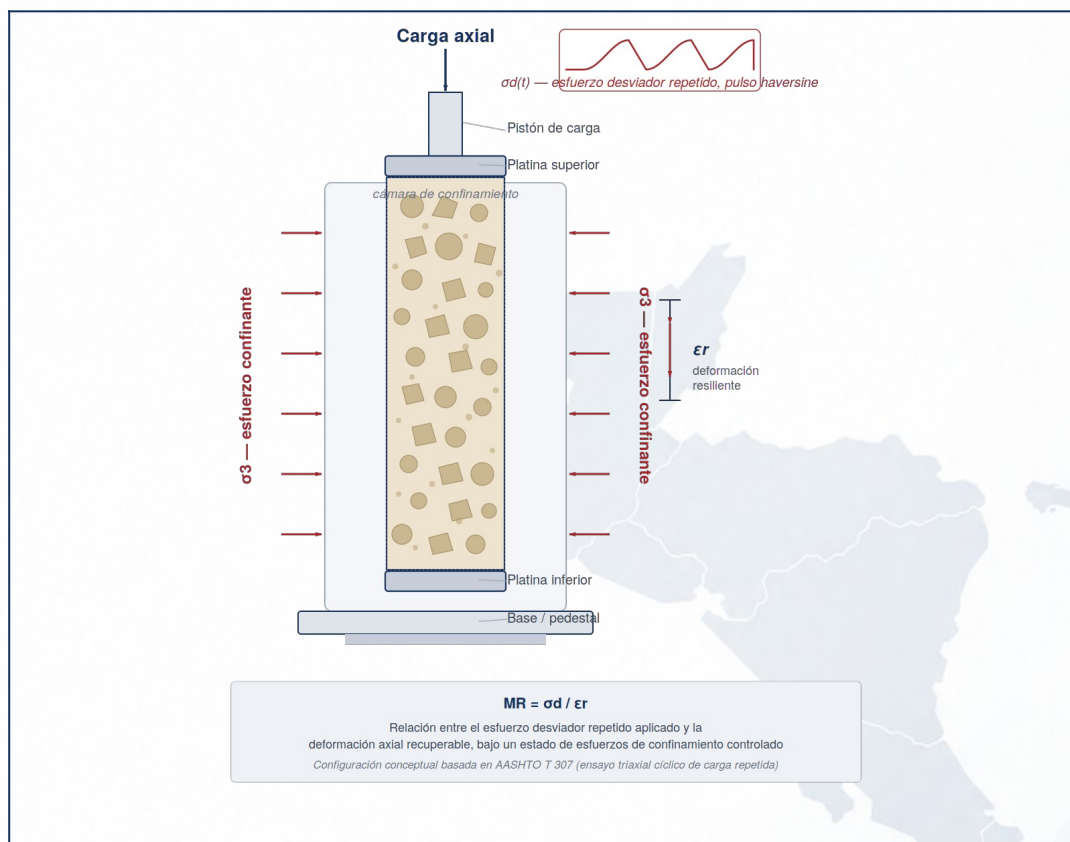


Figura 2. Esquema conceptual del ensayo triaxial dinámico de módulo resiliente (AASHTO T 307). El módulo se define como el cociente entre el esfuerzo desviador cíclico aplicado y la deformación axial recuperable, bajo un esfuerzo de confinamiento controlado.

Este procedimiento no busca llevar la muestra a la falla, como sí ocurre —al menos conceptualmente— en un ensayo de penetración llevado a valores altos de carga; busca caracterizar la rigidez del material bajo condiciones de esfuerzo repetido que se aproximan a las que efectivamente experimenta una capa de pavimento bajo el paso repetido de cargas de tránsito. Esa diferencia de propósito tiene una consecuencia importante para materiales granulares y suelos de comportamiento no lineal: el módulo resiliente no es, en general, una propiedad constante del material, sino una función del estado de esfuerzos —del esfuerzo de confinamiento y del esfuerzo desviador— bajo el cual se determina. Los modelos de caracterización mecanicista contemporáneos, como el propuesto por Uzan (1985), representan explícitamente esta dependencia mediante formulaciones del tipo

$$M_R = k_1 \cdot p_a \cdot (\theta / p_a)^{k_2} \cdot (\tau_{oct} / p_a + 1)^{k_3} \quad (2)$$

donde θ representa el esfuerzo volumétrico o *bulk stress*, τ_{oct} el esfuerzo cortante octaédrico, p_a una presión atmosférica de normalización y k_1 , k_2 y k_3 parámetros de ajuste específicos del material. Una consecuencia directa de esta dependencia es que un mismo material puede exhibir módulos resilientes distintos según se encuentre confinado como capa de base, como capa de subbase o como subrasante, simplemente porque el estado de esfuerzos al que está sometido cambia con la posición de la capa dentro de la estructura del pavimento. Esta observación, que se retomará al examinar los coeficientes estructurales a_2 y a_3 en la Sección 5, es una de las razones por las cuales una correlación univariada $M_R = f(\text{CBR})$ —que no incorpora el estado de esfuerzos como variable— pierde capacidad de representación precisamente en los materiales granulares de mejor calidad, donde esa dependencia es más pronunciada.

2.3. Ensayos monotónicos frente a ensayos de carga repetida

La distinción anterior puede resumirse en un contraste más general, útil para interpretar el resto de este documento. Los ensayos de penetración o de carga monotónica, como el CBR, aplican una sollicitación que crece de manera continua y quedan definidos por un único evento de carga; los ensayos orientados a caracterizar la respuesta resiliente aplican, en cambio, una secuencia de pulsos de carga y descarga diseñada para separar la componente de deformación recuperable —relevante para el diseño estructural bajo cargas de tránsito repetidas— de la componente de deformación permanente, que se asocia más bien con el ahuellamiento y otros mecanismos de deterioro acumulado. Ninguno de los dos tipos de ensayo es, en abstracto, superior al otro; miden magnitudes distintas y responden a propósitos distintos. El problema surge únicamente cuando el resultado de un ensayo del primer tipo se traduce, mediante una ecuación desarrollada para un conjunto específico de materiales, en un valor que se presenta y se utiliza como si fuera el resultado del segundo.

Esta distinción es la que permite formular con precisión la pregunta central de este documento. Una correlación $M_R = f(\text{CBR})$ no vincula dos formas alternativas de medir la misma propiedad; vincula la respuesta de un material bajo un ensayo empírico de penetración con su respuesta bajo un ensayo mecánico de carga repetida, a través de un ajuste estadístico

desarrollado sobre una población de materiales, unas condiciones de ensayo y un rango de valores específicos. Cuanto mejor se conozcan esa población, esas condiciones y ese rango, con mayor criterio podrá el ingeniero decidir si la correlación es aplicable al material que tiene frente a sí. Las secciones siguientes reconstruyen, en la medida en que la evidencia disponible lo permite, esa historia para las tres expresiones que motivaron esta investigación.

3. Desarrollo histórico de las correlaciones CBR- M_R

La necesidad de estimar un módulo de rigidez a partir de un ensayo de CBR no es un problema centroamericano ni reciente; es tan antigua como la generalización del propio CBR como criterio de diseño, en la década de 1940, y tan persistente como la brecha que durante décadas separó la disponibilidad práctica del ensayo de penetración de la disponibilidad, mucho más limitada, del equipo triaxial dinámico necesario para medir directamente un módulo resiliente. Esta sección reconstruye, apoyándose en la literatura internacional identificada durante esta investigación, el desarrollo de las expresiones que después se incorporarían a la práctica centroamericana.

3.1. La correlación de Heukelom y Klomp

La referencia más antigua y más citada en la literatura de pavimentos para relacionar el CBR con un módulo elástico o resiliente es el trabajo de Heukelom y Klomp (1962), desarrollado a partir de ensayos de propagación de ondas —no de ensayos triaxiales de carga repetida— sobre suelos de los Países Bajos y el Reino Unido. Su resultado, expresado de manera compacta, es

$$E = 10 \cdot \text{CBR} \text{ (MPa ; válida para CBR < 10, aprox.)} \quad (3)$$

para valores de CBR inferiores a aproximadamente 10, con E y CBR expresados en unidades consistentes (la forma en unidades inglesas, $E = 1500 \cdot \text{CBR}$ con E en psi, es la que reproduce la guía AASHTO de 1993). Conviene subrayar dos aspectos de este resultado que suelen perderse quienes lo citan de segunda mano. El primero es metodológico: al derivarse de ensayos de propagación de ondas, a deformaciones muy pequeñas, la relación de Heukelom y Klomp caracteriza una rigidez cercana a la de pequeñas deformaciones, no necesariamente la rigidez que un material exhibe bajo los niveles de esfuerzo y deformación propios de un ensayo triaxial de carga repetida a escala de laboratorio para diseño de pavimentos; distintas revisiones posteriores —entre ellas la de Austroads (de Carteret y Jameson, 2009)— han documentado que los módulos medidos mediante ensayo de carga repetida resultan, para un mismo material, sistemáticamente distintos de los que predice esta relación, con factores de proporcionalidad reportados en la literatura que varían entre aproximadamente 5 y 20 veces el CBR, en lugar del factor 10 (en unidades métricas) originalmente propuesto. El segundo aspecto es el rango de aplicación: aunque la relación fue calibrada sobre una población de suelos con CBR entre 2 y 200, aproximadamente, su uso extendido en la práctica de diseño

para valores de CBR bajos —típicamente inferiores a 10 o 12— excede en rigor el propósito con el que fue concebida, y la guía de diseño mecanicista-empírico NCHRP 1-37A llegó a recomendar explícitamente que se evitara su uso como insumo de nivel 2 en favor de relaciones desarrolladas específicamente a partir de ensayos de carga repetida (Christopher, Schwartz y Boudreau, 2006).

Esta precaución no es una desacreditación retrospectiva de un trabajo pionero, sino una constatación que la propia comunidad técnica internacional documentó décadas después de su publicación: una correlación desarrollada bajo un procedimiento de ensayo determinado —propagación de ondas a pequeña deformación— fue adoptada masivamente como sustituto general de un ensayo con un propósito distinto —caracterización de la deformación resiliente bajo carga repetida—, y esa sustitución permaneció vigente en la práctica de diseño mucho después de que la evidencia experimental disponible sugiriera revisarla.

3.2. Otras relaciones desarrolladas entre 1960 y 1990

La relación de Heukelom y Klomp no fue la única propuesta en ese período, y el hecho de que la práctica centroamericana haya terminado empleando más de una de estas expresiones —sin que su relación entre sí fuera necesariamente evidente para quienes las utilizaban— es en sí mismo parte de la historia que este documento busca reconstruir. La revisión de Austroads (de Carteret y Jameson, 2009) documenta, entre otras, las relaciones de Heukelom y Foster (1960), Jeuffroy y Bachelez (1962), Croney (1977) y Sparks y Potter (1982), cada una desarrollada sobre poblaciones de materiales y bajo procedimientos experimentales propios, con formas funcionales que oscilan entre relaciones lineales y relaciones potenciales de exponente variable. Ninguna de ellas alcanzó, sin embargo, la difusión internacional de la relación de Heukelom y Klomp ni de la que se describe a continuación.

En el sur de África, y de manera paralela al desarrollo europeo, distintos programas de investigación vinculados al Council for Scientific and Industrial Research (CSIR) desarrollaron relaciones potenciales entre el CBR y el módulo, de la forma general

$$M_R = 3000 \cdot CBR^{0,65} (psi) \quad (4)$$

Estas relaciones se incorporaron a los procedimientos de diseño mecanicista sudafricanos y se difundieron, a través de publicaciones técnicas y cursos de actualización profesional, a otras regiones. No fue posible, durante esta investigación, localizar con precisión el informe primario del CSIR que fija el valor de los coeficientes 3000 y 0,65 citados por el Dr. Jugo en su testimonio (véase la Sección 5); la evidencia disponible proviene de compilaciones posteriores —Dione, Fall, Berthaud, Benboudjema y Michou (2014); de Carteret y Jameson (2009)— que documentan la existencia de esta familia de relaciones sudafricanas sin remitir, en todos los casos, a la publicación original. Esta limitación se señala explícitamente, en lugar de presentarse como resuelta, siguiendo el principio de trazabilidad que rige este Documento Técnico: la coincidencia entre la forma funcional reportada por estas fuentes secundarias y la ecuación que el Dr. Jugo recuerda haber recibido de su profesor en la Universidad

Metropolitana de Caracas es consistente con un origen sudafricano, pero la atribución definitiva a un informe concreto del CSIR queda pendiente de verificación documental primaria.

3.3. La relación de Powell, Potter, Mayhew y Nunn (1984)

La tercera relación relevante para este documento tiene un origen que la investigación logró establecer con un grado de precisión considerablemente mayor. En 1984, W. D. Powell, J. E. Potter, H. C. Mayhew y M. E. Nunn publicaron, a través del entonces Transport and Road Research Laboratory (TRRL) del Reino Unido, el informe *The Structural Design of Bituminous Roads* (TRRL Report LR 1132), en el cual proponen, a partir de una base de datos propia de ensayos sobre subrasantes británicas, la relación potencial

$$M_R = 2555 \cdot CBR^{0,64} (\text{psi}) = 17,6 \cdot CBR^{0,64} (\text{MPa}) \quad (5)$$

con M_R en unidades inglesas (equivalente a $M_R = 17,6 \cdot CBR^{0,64}$ en megapascuales), calibrada para un rango de CBR aproximadamente entre 1 y 12. Esta relación fue adoptada posteriormente como insumo por defecto de nivel 2 en la guía de diseño mecanicista-empírico desarrollada bajo el proyecto NCHRP 1-37A —antecedente directo del actual *Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide* (MEPDG)—, cuya documentación técnica señala expresamente que las correlaciones entre CBR y módulo resiliente cuentan, entre las distintas alternativas disponibles, con la trayectoria histórica y el respaldo de datos más extenso (Christopher, Schwartz y Boudreau, 2006).

La relevancia de esta relación para el argumento central de este documento se aclara en la Sección 6: la expresión mecanicista que, según el testimonio del Dr. Jugo, se emplea en la actualidad en diversos documentos de la región como una versión mejorada de las correlaciones más antiguas —aproximadamente $M_R = 2555 \cdot CBR^{0,64}$ — corresponde, con una coincidencia numérica que no admite razonablemente otra explicación, a la relación de Powell et al. (1984) adoptada por la guía NCHRP 1-37A. Se trata de un hallazgo que ninguno de los documentos técnicos centroamericanos revisados durante esta investigación había establecido explícitamente, y que permite cerrar, para esta expresión en particular, una cadena de trazabilidad que va de una publicación británica de 1984 a su adopción como estándar mecanicista de referencia en Norteamérica, y de allí a su empleo, sin esa referencia explícita, en la práctica de diseño centroamericana contemporánea.

3.4. Una observación de conjunto

Las tres familias de relaciones reseñadas en esta sección —la de Heukelom y Klomp, la sudafricana del CSIR y la de Powell et al.— comparten una misma estructura lógica que conviene hacer explícita antes de avanzar hacia la reconstrucción centroamericana. Cada una fue desarrollada a partir de una población de materiales geográficamente acotada, bajo un procedimiento experimental particular —propagación de ondas en un caso, ensayos de penetración correlacionados con mediciones de módulo en los otros— y con un rango de

validez que sus propios autores definieron, explícita o implícitamente, en función de esa población. Su posterior generalización como herramientas de diseño de alcance prácticamente universal no responde a una demostración de que esa generalización sea válida, sino a la utilidad práctica que ofrecían frente a la escasez de ensayos triaxiales de módulo resiliente disponibles en la mayoría de los proyectos de diseño de pavimentos durante las décadas en que se popularizaron. Esa misma dinámica —utilidad práctica que precede y en ocasiones sustituye a la verificación de aplicabilidad— es la que se observa, con matices propios, en la incorporación de estas relaciones a la práctica centroamericana que se describe a continuación.

4. Umbrales y ecuaciones utilizadas en la práctica centroamericana

La llegada de estas correlaciones a Centroamérica no se documentó, hasta donde pudo establecer esta investigación, mediante una decisión normativa única ni mediante la adopción formal de una fuente primaria identificada. Se produjo, más bien, a través de los canales habituales de transferencia tecnológica en la ingeniería de pavimentos de la región durante las últimas décadas del siglo pasado: cursos de actualización profesional, programas de posgrado cursados en el extranjero por ingenieros que después ejercieron docencia en universidades latinoamericanas, manuales técnicos elaborados a partir de esos cursos y, progresivamente, su incorporación a especificaciones institucionales que en algunos países llegaron a exigir el uso de estos criterios como parte de los procedimientos aceptados de diseño.

Este patrón de difusión explica una observación recurrente entre los profesionales consultados durante la investigación que dio origen a este documento: la atribución genérica de las tres expresiones a la guía AASHTO, sin que existiera claridad sobre si se trataba de una atribución correcta para el conjunto de los criterios o solamente para uno de ellos. La atribución no carece por completo de fundamento —la relación de Heukelom y Klomp, en efecto, aparece reproducida en la guía AASHTO de 1993 como una de las correlaciones aceptadas para estimar el módulo resiliente de subrasantes—, pero extenderla a las otras dos expresiones examinadas en este documento no encuentra respaldo en una revisión directa de esa guía ni en la literatura técnica consultada. Esta imprecisión en la atribución es, en sí misma, un síntoma de la pérdida de trazabilidad que este documento busca corregir: cuando el origen preciso de una herramienta deja de transmitirse junto con la herramienta misma, la atribución tiende a simplificarse hacia la fuente más prestigiosa y más generalmente conocida, incluso si esa fuente no es, en rigor, la que corresponde a cada criterio específico.

El testimonio recogido para este documento —que se presenta con el detalle metodológico que merece en la Sección 5— sitúa el origen de dos de estos criterios en un contexto académico concreto: una tesis de grado desarrollada a finales de la década de 1980 en la Universidad Metropolitana de Caracas, y su posterior difusión regional a través de cursos impartidos, entre otros, por el ingeniero venezolano Gustavo Corredor, autor reconocido de

materiales de enseñanza en ingeniería de pavimentos ampliamente utilizados en la región (Corredor, 2021). Esta ruta de difusión —de una tesis de posgrado a cursos profesionales itinerantes por varios países— es consistente con la ausencia de una publicación científica formal que documente el desarrollo original de estos criterios, y ayuda a explicar por qué su trazabilidad documental resulta hoy más difícil de reconstruir que la de relaciones publicadas directamente en informes técnicos institucionales, como la de Powell et al. (1984).

5. Reconstrucción del origen de los criterios atribuidos a Augusto Jugo

Ante la dificultad de establecer, mediante revisión bibliográfica, una fuente primaria que documentara de manera conjunta las tres expresiones examinadas en este documento, la investigación recurrió a un contacto directo con el Dr. Augusto Jugo, ingeniero venezolano cuyo nombre había surgido de manera recurrente, aunque informal, como posible origen de al menos dos de los criterios. La consulta se realizó por mensajería instantánea, y el Dr. Jugo respondió mediante una serie de mensajes de voz cuya transcripción depurada se incorpora íntegramente como Anexo A de este documento. Lo que sigue es una reconstrucción organizada de ese testimonio, acompañada del análisis matemático e ingenieril que permite contrastarlo.

Antes de presentar esa reconstrucción, es necesario fijar su estatuto metodológico. Se trata de una comunicación personal, en el sentido que ese término tiene en las normas de citación académica: no es una publicación revisada por pares, no ha sido sometida a un proceso editorial independiente y depende de la memoria de un solo participante sobre eventos ocurridos hace más de tres décadas. Ninguna de estas características invalida su valor como fuente histórica —los mensajes son notablemente coherentes entre sí y, como se mostrará, consistentes con evidencia documental independiente localizada durante esta investigación—, pero exige que se distinga con precisión entre lo que el testimonio afirma, lo que puede verificarse de manera independiente y lo que permanece como una atribución pendiente de respaldo documental primario. Este documento no convierte, en ningún punto, la reconstrucción oral del Dr. Jugo en una referencia bibliográfica publicada; se cita, cuando corresponde, como comunicación personal (A. Jugo, comunicación personal, 2026).

5.1. El problema de la discontinuidad y el origen del valor $CBR = 7,2$

Según relata el Dr. Jugo, a finales de la década de 1980 cursaba estudios de posgrado en la Universidad Metropolitana de Caracas, tras regresar de completar su doctorado, cuando tuvo acceso a la primera edición de la guía AASHTO de 1986, que incorporaba la relación de Heukelom y Klomp — $M_R = 1500 \cdot CBR$, en psi— con una limitación explícita de aplicación hasta $CBR = 10$. En ese mismo período, un profesor de su programa de posgrado, cuyo apellido el propio Dr. Jugo no pudo precisar con certeza en su testimonio, presentó a su grupo una segunda relación, de forma potencial, que se le describió como de origen sudafricano: $M_R = 3000 \cdot CBR^{0,65}$, también en psi.

La coexistencia de ambas relaciones planteaba un problema práctico e inmediato para cualquier implementación computacional de los criterios de diseño: si el cambio de una ecuación a otra se fijaba de manera rígida en $CBR = 10$ —el límite de aplicación indicado por la guía AASHTO para la primera relación—, podía producirse una discontinuidad físicamente inconsistente en la que un material con un CBR ligeramente superior a 10 recibiera, por efecto exclusivo del cambio de ecuación, un módulo resiliente menor que un material con un CBR ligeramente inferior. Un programa de diseño no puede tolerar esa clase de inconsistencia sin generar resultados contraintuitivos para el usuario.

La solución que el Dr. Jugo describe —desarrollada, según su testimonio, junto con estudiantes de la Universidad Metropolitana de Caracas como parte de un programa de cálculo elaborado en lenguaje BASIC— consistió en abandonar el límite fijo de $CBR = 10$ y sustituirlo por el punto exacto en el que ambas expresiones producen el mismo valor de módulo resiliente. Ese punto se obtiene igualando la relación lineal y la relación potencial descritas en el párrafo anterior:

$$\begin{aligned} 1500 \cdot CBR &= 3000 \cdot CBR^{0,65} \\ CBR^{0,35} &= 2 \\ CBR &= 2^{1/0,35} = 7,2458 \approx 7,2 \end{aligned} \quad (6)$$

Este resultado puede verificarse de manera enteramente independiente del testimonio que lo origina, y esa verificación es uno de los pocos puntos de este documento en los que la evidencia matemática es, por sí sola, concluyente: el valor $CBR = 7,2$ no constituye una frontera geotécnica identificada mediante una campaña experimental propia, sino el punto de empalme entre dos correlaciones preexistentes, calculado para preservar la continuidad —y, más precisamente, la monotonía— de la estimación de módulo resiliente al pasar de una expresión a la otra. En la intersección, ambas relaciones producen aproximadamente 10 870 psi, y el criterio de diseño resultante puede expresarse como una función definida por tramos:

$$\begin{aligned} M_R &= 1500 \cdot CBR, CBR \leq 7,2 \\ M_R &= 3000 \cdot CBR^{0,65}, CBR > 7,2 \end{aligned} \quad (7)$$

La Figura 3, reproducida a partir del material gráfico elaborado por el propio Dr. Jugo para ilustrar este razonamiento, muestra la intersección de ambas curvas.

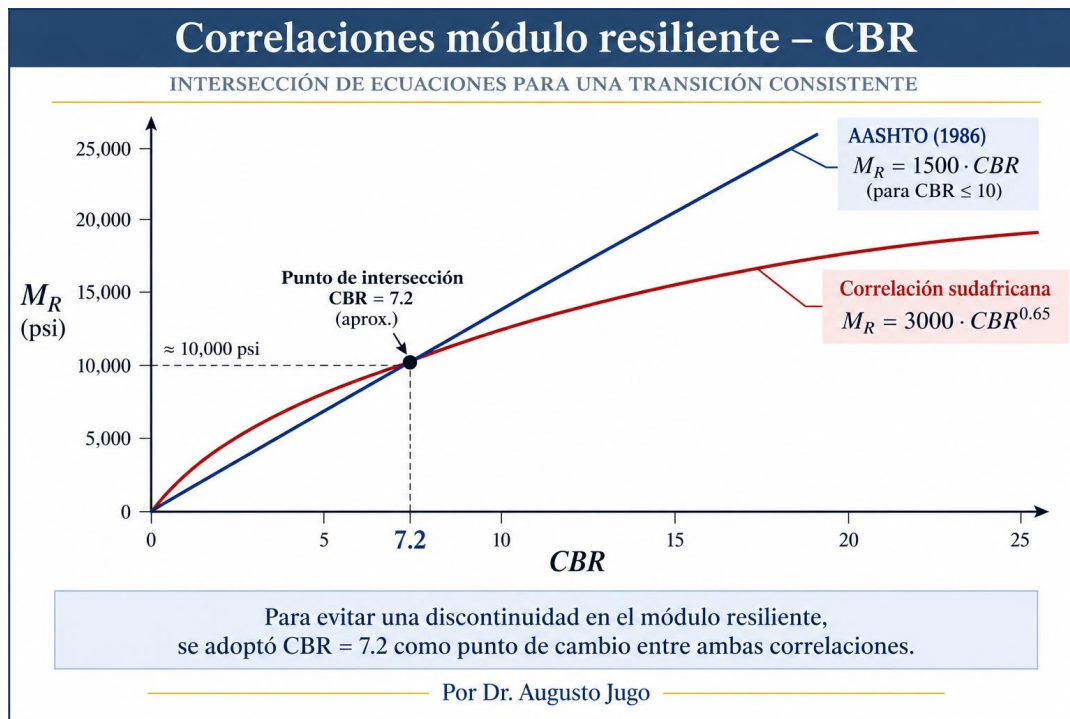


Figura 3. Representación gráfica del criterio de intersección entre $M_R = 1500 \cdot CBR$ y $M_R = 3000 \cdot CBR^{0.65}$, según la reconstrucción del Dr. Augusto Jugo. El valor $CBR = 7.2$ corresponde al punto de cambio que evita una discontinuidad entre ambas correlaciones.

El esbozo manuscrito original que acompañó su explicación —incorporado como Figura 4, con valor documental e histórico más que ilustrativo— confirma que el razonamiento geométrico detrás del criterio es, en su forma esencial, el mismo que se reproduce en la versión depurada.

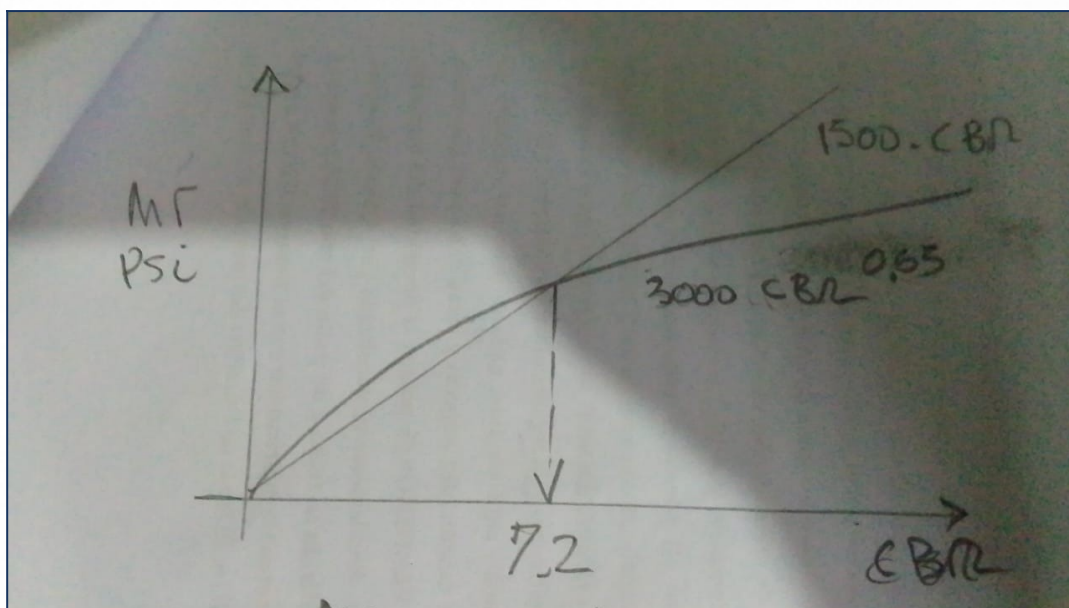


Figura 4. Esbozo manuscrito original enviado por el Dr. Augusto Jugo durante la reconstrucción del criterio de intersección $\text{CBR} = 7,2$. Se incorpora por su valor documental e histórico.

Conviene subrayar el significado ingenieril preciso de este hallazgo, porque su lectura apresurada podría llevar a una conclusión incorrecta en cualquiera de dos direcciones. No sería correcto interpretar el valor 7,2 como una clasificación universal de suelos, con algún significado físico independiente de las dos ecuaciones que lo originan; tampoco sería correcto, sin embargo, desestimarlos como una construcción arbitraria, porque responde a un razonamiento de consistencia numérica perfectamente defendible dentro del contexto para el que fue diseñado —evitar una discontinuidad artificial en una implementación computacional de criterios de diseño existentes. El valor 7,2 es, en el sentido más preciso del término, un artefacto de empalme entre dos modelos, y su utilidad depende enteramente de que quien lo aplique comprenda esa naturaleza. Cuando ese contexto se pierde en la transmisión del criterio —como parece haber ocurrido en buena parte de su difusión regional, a juzgar por la ausencia de esa explicación en los documentos centroamericanos revisados durante esta investigación— el número puede terminar interpretándose como un umbral experimental u normativo con entidad propia, lectura que este documento busca corregir explícitamente.

5.2. La correlación logarítmica y su dominio de aplicación

El tercer criterio examinado en este documento tiene, según el mismo testimonio, un origen distinto e independiente del anterior. El Dr. Jugo relata haber tenido acceso, durante su estancia de posgrado en Maryland, a una base de datos original asociada con ensayos de la extinta American Association of State Highway Officials (AASHO) —antecesora de la actual AASHTO—, que posteriormente llevó consigo a Venezuela para continuar su análisis. De ese análisis estadístico surgió la relación

$$M_R = 4326 \cdot \ln(CBR) + 241 \text{ (psi)} \quad (8)$$

con M_R en psi, que —siempre según el testimonio— se empleó en el contexto del análisis para determinar el coeficiente estructural a_3 de materiales granulares de subbase, y que el propio Dr. Jugo describe como la de mejor ajuste estadístico entre las distintas formas funcionales que exploró sobre esos datos.

El testimonio incluye, sobre esta relación, una advertencia que merece tratarse con el mismo rigor que la ecuación misma, porque constituye una de las contribuciones más valiosas del testimonio para los fines de este documento. El propio Dr. Jugo reconoce que la relación se consideró aplicable, en su concepción original, hasta valores de CBR del orden de 20 —el límite práctico que asocia con el comportamiento de subrasantes— y que su extensión posterior a materiales granulares de base y subbase, de CBR considerablemente mayor, excede el dominio para el que fue desarrollada. La justificación matemática de esta advertencia es directa: al despejar el CBR de la ecuación logarítmica,

$$CBR = \exp\left(\frac{M_R - 241}{4326}\right) \quad (9)$$

el crecimiento de CBR resulta exponencial en función de M_R , de modo que valores de módulo resiliente propios de materiales granulares de buena calidad —del orden de 25 000 a 35 000 psi, según el propio testimonio— producen, al invertir la ecuación, valores de CBR sin significado físico razonable, del orden de cientos. El problema, como señala con precisión el propio Dr. Jugo, no es algebraico: la ecuación hace exactamente lo que su forma funcional establece; el problema es utilizarla fuera de la población de datos y del intervalo de CBR para los cuales fue ajustada.

Este es, quizás, el punto en el que el testimonio ofrece la lección de ingeniería más directamente aplicable a la práctica centroamericana contemporánea. Una regresión estadística puede exhibir un ajuste satisfactorio dentro de la muestra sobre la que se calculó y, simultáneamente, producir resultados sin sentido físico cuando se extrapola más allá de esa muestra. La calidad de un coeficiente de determinación no es, por sí sola, garantía de aplicabilidad general, y el reconocimiento explícito de esta limitación por parte de quien desarrolló la ecuación —lejos de restarle valor al testimonio— fortalece su credibilidad como fuente histórica.

5.3. Los coeficientes estructurales a_2 y a_3 y la dependencia del estado de esfuerzos

El testimonio del Dr. Jugo introduce, además, una observación que conecta directamente con la distinción conceptual desarrollada en la Sección 2 de este documento. Según su relato, en los marcos de referencia utilizados para los coeficientes estructurales a_2 (base granular) y a_3 (subbase granular) del método AASHTO, un mismo valor nominal de CBR —del orden de 100, propio de materiales de base de alta calidad— podía asociarse con módulos resilientes distintos según el material se considerara como base o como subbase: aproximadamente 30

000 psi en el primer caso y 20 000 psi en el segundo. El propio Dr. Jugo atribuye esta diferencia al estado de esfuerzos —específicamente, al esfuerzo volumétrico o *bulk stress*— que corresponde a cada posición dentro de la estructura del pavimento.

Esta observación, formulada por el Dr. Jugo como una anécdota derivada de su experiencia práctica, es plenamente consistente con la formulación de Uzan (1985) presentada en la Sección 2: si el módulo resiliente de un material granular depende del esfuerzo de confinamiento y del esfuerzo desviador a los que está sometido, entonces no existe, en rigor, un único módulo resiliente asociado a un material dado, sino una familia de valores que depende de la posición de la capa dentro de la estructura y de las cargas que sobre ella actúan. Una correlación $M_R = f(CBR)$ que no incorpora esta dependencia solo puede representar, en el mejor de los casos, un valor promedio o representativo para un conjunto acotado de condiciones de esfuerzo, y pierde capacidad de representación precisamente en los materiales granulares de mejor calidad, donde la dependencia del estado de esfuerzos es más pronunciada.

5.4. Difusión regional y pérdida del contexto original

El testimonio concluye con una descripción de cómo estos criterios se difundieron más allá del contexto académico en el que se originaron: a través de tesis de grado, de un programa de cálculo elaborado en BASIC y, de manera decisiva para su alcance regional, de los cursos que el ingeniero Gustavo Corredor impartió posteriormente en Chile, Argentina y Colombia. El propio Dr. Jugo es explícito en señalar que nunca publicó estos desarrollos de manera formal —ni en un artículo científico ni en un libro—, y que su difusión ocurrió a través de materiales de curso y de la reproducción que terceros hicieron de ellos.

Esta ruta de difusión, coherente con la ausencia de una publicación primaria localizable, es la explicación más plausible de por qué las tres expresiones llegaron a Centroamérica desprovistas del contexto que aquí se ha reconstruido. Cuando un criterio se transmite a través de cursos, manuales derivados y programas de cómputo, en lugar de a través de una publicación citable, cada nueva reproducción tiene una oportunidad de omitir, simplificar o generalizar el contexto original sin que exista un documento de referencia que permita corregir esa simplificación. La atribución genérica a la guía AASHTO, discutida en la Sección 4, es probablemente uno de los productos de ese proceso: una simplificación razonable, en ausencia de mejor información, que sin embargo no resiste el contraste con la evidencia reunida en este documento.

6. Comparación con las relaciones clásicas reportadas en la literatura

La reconstrucción presentada en la Sección 5 adquiere un significado adicional cuando se contrasta con la revisión histórica desarrollada en la Sección 3. Esa comparación permite distinguir, para cada una de las tres expresiones examinadas, entre lo que el testimonio del

Dr. Jugo aporta como reconstrucción histórica y lo que la literatura internacional permite documentar de manera independiente. La Tabla 1 resume esta comparación.

Tabla 1. Comparación de las correlaciones M_R -CBR examinadas en este documento

Expresión	Ecuación	Autor / fuente documentada	Año	Rango de CBR	Estatus de verificación
Lineal	$M_R = 1500 \cdot \text{CBR} \text{ (psi)}$	Heukelom y Klomp (1962), incorporada en AASHTO (1993)	1962	≤ 10 (original); extendida en la práctica	Verificado bibliográficamente
Potencial ("sudafricana")	$M_R = 3000 \cdot \text{CBR}^{0.65} \text{ (psi)}$	Familia CSIR (Sudáfrica); fuente primaria no localizada	s.f.	No establecido con certeza	Consistente con literatura secundaria; verificación primaria pendiente
Transición	CBR = 7,2 (intersección de las dos anteriores)	A. Jugo, comunicación personal (2026)	$\approx$ 1987-1988	Punto de empalme, no un rango	Verificado matemáticamente; atribución histórica testimonial
Logarítmica	$M_R = 4326 \cdot \ln(\text{CBR}) + 241 \text{ (psi)}$	A. Jugo, comunicación personal (2026)	$\approx$ 1986-1988	Hasta CBR ≈ 20 (subrasantes)	Testimonial; no corroborado documentalmente
Mecanicista	$M_R = 2555 \cdot \text{CBR}^{0.64} \text{ (psi)}$	Powell, Potter, Mayhew y Nunn (1984); adoptada por NCHRP 1-37A	1984	1-12 (calibración original)	Verificado bibliográficamente

La relación lineal $M_R = 1500 \cdot \text{CBR}$, primera de las tres, corresponde sin ambigüedad a la expresión de Heukelom y Klomp (1962) tal como se incorpora en la guía AASHTO de 1993, con el mismo límite de aplicación —CBR hasta 10, aproximadamente— que el propio Dr. Jugo recuerda haber encontrado en la edición de 1986. En este caso, el testimonio y la literatura publicada coinciden plenamente, y la única precisión que aporta el testimonio, no disponible en la guía AASHTO por sí sola, es el relato de cómo esta relación específica llegó a manos de un ingeniero venezolano en un programa de posgrado a mediados de la década de 1980, información que pertenece al ámbito de la difusión regional más que al de la validez técnica de la expresión.

La segunda relación, la potencial atribuida a origen sudafricano, es consistente en su forma funcional $M_R = 3000 \cdot CBR^{0.65}$ con la familia de correlaciones desarrolladas en el sur de África y documentadas por fuentes secundarias como Dione et al. (2014) y de Carteret y Jameson (2009). La investigación no logró, sin embargo, localizar el informe primario del CSIR que fija estos coeficientes exactos, de modo que la correspondencia entre el testimonio y la literatura se sostiene en la coincidencia de la forma funcional y el origen regional atribuido, pero no en la identificación de una publicación específica citable. Este es, de las tres expresiones, la que permanece con la trazabilidad documental más débil, y este documento la señala expresamente como una tarea pendiente de verificación primaria.

La tercera relación es la que ofrece el hallazgo más significativo de esta investigación. El propio Dr. Jugo describe, en su testimonio, la existencia de una expresión más reciente y de naturaleza mecanicista —aproximadamente $M_R = 2555 \cdot CBR^{0.64}$ — que, según su relato, ha sustituido en la práctica actual a las dos relaciones más antiguas por considerarse de mejor calidad, sin atribuirle a una fuente específica más allá de reconocer que no es de su autoría. La revisión bibliográfica desarrollada para este documento permite identificar esa expresión, con una coincidencia numérica en los tres primeros dígitos significativos del coeficiente y en el exponente que no admite razonablemente atribuirse al azar, como la relación publicada por Powell, Potter, Mayhew y Nunn en 1984 a través del Transport and Road Research Laboratory del Reino Unido, adoptada después como insumo de nivel 2 en la guía de diseño mecanicista-empírico desarrollada bajo el proyecto NCHRP 1-37A.

Este hallazgo tiene una implicación que trasciende el caso particular de esta ecuación. La expresión que en el imaginario técnico centroamericano se percibe como la evolución más reciente y más rigurosa de las correlaciones CBR- M_R —precisamente por contraste con las dos relaciones más antiguas, cuyo origen resultaba difícil de precisar— tiene, en realidad, una trazabilidad documental más sólida y más antigua de lo que esa percepción sugiere: un informe técnico británico de 1984, incorporado formalmente al principal marco de diseño mecanicista-empírico de Norteamérica. La ironía es instructiva: la relación que se percibía como la menos documentada de las tres resultó ser la mejor documentada de todas, mientras que la que se atribuía genéricamente a AASHTO —atribución que, como se discutió en la Sección 4, no resiste un contraste riguroso para el conjunto de los tres criterios— es, en rigor, solo parcialmente correcta.

7. Alcance, limitaciones y transferibilidad de las correlaciones

Ninguna de las tres relaciones examinadas en este documento fue desarrollada a partir de materiales centroamericanos. Esta observación, que podría parecer obvia una vez enunciada, tiene implicaciones que la práctica de diseño no siempre incorpora con el cuidado debido. Los suelos residuales tropicales, las gravas volcánicas y los materiales calcáreos que predominan en buena parte de la región presentan mineralogías, distribuciones granulométricas y comportamientos de compactación que difieren, en ocasiones de manera significativa, de los

suelos de origen glacial o sedimentario templado sobre los que se calibraron las relaciones de Heukelom y Klomp, del CSIR sudafricano o de Powell et al. Una correlación estadística conserva su validez dentro de la población de materiales para la que fue ajustada; su transferencia a una población distinta —distinta mineralogía, distinta génesis geológica, distinto régimen de humedad— constituye, en sentido estricto, una extrapolación, incluso cuando el rango numérico de CBR de los materiales locales coincida con el rango original de calibración.

La evidencia experimental generada específicamente sobre materiales granulares costarricenses respalda esta precaución. Munera Miranda y Aguiar Moya (2019), en un estudio desarrollado en el Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales de la Universidad de Costa Rica sobre trece materiales granulares nacionales, encontraron que la relación de Heukelom y Klomp presenta un sesgo apreciable y tiende a sobrestimar el módulo resiliente de esos materiales cuando se contrasta con determinaciones directas mediante ensayo triaxial cíclico. El modelo que esos autores calibraron específicamente para materiales costarricenses, que incorpora el esfuerzo volumétrico, el contenido óptimo de humedad y el porcentaje de material que pasa el tamiz No. 200 como variables explicativas, alcanzó un coeficiente de determinación ajustado sustancialmente superior al que ofrece la correlación univariada con el CBR. Este resultado no invalida las relaciones clásicas como herramientas de estimación preliminar; documenta, con datos locales y de manera cuantitativa, la magnitud del error que puede introducirse al aplicarlas sin calibración regional.

La experiencia de calibración de la guía de diseño mecanicista-empírico para pavimentos de Costa Rica, en cuyo desarrollo participó el propio autor de este documento (Loría Salazar, Badilla Vargas, Elizondo Arrieta, Jiménez Acuña y Aguiar Moya, 2011), ofrece una lección complementaria. El proceso de calibración local de un método de diseño mecanicista-empírico no consiste en sustituir una correlación importada por otra igualmente importada, sino en generar, mediante caracterización directa de los materiales representativos de cada región, los parámetros que el modelo estructural requiere para reproducir con fidelidad razonable el comportamiento observado en campo. Esa caracterización directa —que incluye, entre otros ensayos, la determinación de módulo resiliente mediante procedimiento triaxial cíclico— es la que permite, en última instancia, decidir con fundamento cuantitativo si una correlación empírica resulta o no adecuada para un proyecto específico, en lugar de asumir su validez por defecto.

Conviene precisar el alcance de esta recomendación para evitar una lectura excesivamente restrictiva. No se sostiene aquí que toda aplicación de una correlación CBR- M_R en un proyecto centroamericano sea técnicamente inadecuada; se sostiene que su aplicación sin conocimiento de su procedencia, sin verificación de que el material en cuestión se aproxima a la población para la que fue calibrada y sin cuantificación de la incertidumbre asociada constituye una práctica de diseño que puede mejorarse de manera sustancial con el conocimiento hoy disponible. Cuando las condiciones del proyecto —escala, presupuesto, disponibilidad de laboratorio— no permitan una caracterización directa mediante ensayo triaxial cíclico, el uso de una correlación documentada, acompañado de un criterio

conservador que reconozca su incertidumbre, sigue constituyendo una decisión de ingeniería razonable. Lo que este documento cuestiona no es la existencia de esa decisión, sino su adopción sin el conocimiento de causa que aquí se ha intentado reconstruir.

8. Discusión

Los hilos desarrollados en las secciones anteriores convergen en una conclusión de alcance más general que la que corresponde a cualquiera de las tres ecuaciones examinadas por separado. La investigación que dio origen a este documento partió de una pregunta puntual — el origen de un valor de CBR y de dos ecuaciones de uso corriente en la región— y terminó por revelar un patrón que probablemente se repite, con variaciones, en otras herramientas de diseño ampliamente utilizadas en la ingeniería centroamericana: criterios desarrollados en contextos académicos y profesionales específicos, difundidos a través de canales informales de transferencia tecnológica —cursos, manuales derivados, programas de cómputo— y adoptados, con el tiempo, como parte de la práctica aceptada sin que su procedencia se documentara con el mismo cuidado que su aplicación.

Este patrón no es privativo de Centroamérica ni, en rigor, exclusivo de la ingeniería de pavimentos; es una característica reconocible de cómo el conocimiento técnico se transmite en cualquier disciplina que combina investigación académica con práctica profesional itinerante. Lo que sí resulta específico del caso examinado en este documento es la magnitud de las consecuencias que puede tener esa pérdida de trazabilidad cuando el criterio en cuestión alimenta directamente el análisis estructural de un pavimento: una correlación aplicada fuera de su dominio de calibración, o interpretada como una relación física universal en lugar de un ajuste estadístico acotado, puede introducir en el diseño una incertidumbre que ningún factor de seguridad convencional está diseñado para absorber, precisamente porque esa incertidumbre no se reconoce como tal.

El hallazgo más significativo de esta investigación —la identificación de la ecuación $M_R = 2555 \cdot CBR^{0.64}$ como la relación de Powell et al. (1984), adoptada por la guía NCHRP 1-37A— ilustra este punto desde un ángulo particular. La expresión que la práctica centroamericana percibía como la más reciente y mejor fundamentada de las tres, precisamente por no poder atribuirse con precisión a una fuente conocida, resultó tener la trazabilidad documental más sólida. La lección no es que las expresiones sin atribución clara sean necesariamente más confiables; es que la ausencia de una atribución clara no es, en sí misma, evidencia de que esa atribución no exista o no pueda encontrarse. La investigación bibliográfica sistemática —el tipo de trabajo que este documento se propuso realizar y que rara vez se justifica emprender para una sola ecuación dentro de un proyecto de diseño convencional— puede, en ocasiones, resolver en cuestión de días lo que la práctica profesional había dejado sin resolver durante décadas.

El testimonio del Dr. Jugo, por su parte, cumple una función que la literatura publicada no podría haber cumplido por sí sola: reconstruir el razonamiento ingenieril concreto —la necesidad de evitar una discontinuidad computacional, la disponibilidad de una base de datos

particular durante una estancia de posgrado— que llevó al desarrollo de dos de estos criterios, con un nivel de detalle humano y contextual que ninguna publicación formal suele conservar. Ese testimonio no sustituye la verificación documental primaria que este documento señala como pendiente para la relación sudafricana; la complementa, y en el caso del valor $CBR = 7,2$, la verificación matemática independiente que este documento realiza confirma la coherencia interna del relato con una precisión que refuerza, sin demostrarla de manera absoluta, la fiabilidad del resto del testimonio.

9. Conclusiones

De la investigación desarrollada para este Documento Técnico se derivan las siguientes conclusiones, formuladas con el grado de certeza que la evidencia disponible permite en cada caso.

El valor $CBR = 7,2$, utilizado en diversos documentos y prácticas de diseño centroamericanas como criterio de transición entre dos correlaciones $CBR-M_R$, se reproduce matemáticamente al intersectar las relaciones $M_R = 1500 \cdot CBR$ y $M_R = 3000 \cdot CBR^{0,65}$, con un resultado de $CBR = 7,2458$. Esta verificación es independiente del testimonio que la origina y puede considerarse demostrada. Su función es exclusivamente la de asegurar una transición numéricamente consistente entre ambas expresiones, y no corresponde a un umbral geotécnico ni normativo con significado físico propio.

Según el testimonio del Dr. Augusto Jugo, ese criterio de transición fue desarrollado por él junto con estudiantes de la Universidad Metropolitana de Caracas a finales de la década de 1980, en el contexto de una tesis de grado y de un programa de cálculo elaborado en lenguaje BASIC. Esta atribución descansa en una comunicación personal y no ha podido corroborarse todavía mediante documentación contemporánea, aunque resulta consistente con la evidencia matemática disponible.

La relación lineal $M_R = 1500 \cdot CBR$ corresponde, con evidencia bibliográfica directa, a la expresión de Heukelom y Klomp (1962), incorporada a la guía AASHTO de 1993 con un límite de aplicación de CBR hasta aproximadamente 10. La literatura técnica internacional posterior, incluida la guía de diseño mecanicista-empírico NCHRP 1-37A, ha documentado que esta relación tiende a sobrestimar el módulo resiliente cuando se aplica fuera de ese rango o se contrasta con determinaciones directas mediante ensayo de carga repetida.

La relación potencial $M_R = 3000 \cdot CBR^{0,65}$, atribuida por el testimonio a un origen sudafricano, es consistente en su forma funcional con la familia de correlaciones desarrolladas por el CSIR de Sudáfrica y documentadas por fuentes secundarias, pero esta investigación no logró localizar el informe primario que fija sus coeficientes exactos. Esta relación permanece, de las tres examinadas, como la que requiere mayor esfuerzo adicional de verificación documental.

La ecuación logarítmica $M_R = 4326 \cdot \ln(\text{CBR}) + 241$, según el mismo testimonio desarrollada por el Dr. Jugo a partir de una base de datos original de AASHO analizada durante su estancia en Maryland, fue concebida para un dominio de aplicación limitado —hasta aproximadamente $\text{CBR} = 20$ — y su extrapolación a materiales granulares de mayor calidad puede producir valores de CBR sin significado físico razonable, tal como el propio desarrollador de la ecuación reconoce en su testimonio.

La ecuación mecanicista $M_R = 2555 \cdot \text{CBR}^{0.64}$, que en la práctica centroamericana actual suele considerarse una versión más reciente y confiable de las correlaciones $\text{CBR}-M_R$, corresponde con alta probabilidad a la relación publicada por Powell, Potter, Mayhew y Nunn en 1984 y adoptada posteriormente como insumo de nivel 2 en la guía NCHRP 1-37A. Se trata de la relación con la trazabilidad documental más sólida de las tres examinadas, en contraste con la percepción regional de que era la de origen menos claro.

Ninguna de las tres relaciones fue calibrada sobre materiales centroamericanos, y la evidencia local disponible, aunque todavía escasa, respalda la cautela con la que deben emplearse. Munera Miranda y Aguiar Moya (2019), sobre trece materiales granulares costarricenses ensayados en el Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales de la Universidad de Costa Rica, encontraron que la relación de Heukelom y Klomp sobrestima el módulo resiliente de esos materiales frente a determinaciones directas mediante ensayo triaxial cíclico, y calibraron un modelo propio de mejor ajuste con variables explicativas adicionales. Esta comprobación puntual, referida a un conjunto acotado de materiales, no permite generalizar una magnitud de error para las tres relaciones examinadas en todo tipo de material de la región, pero sí respalda la recomendación general de no asumir la validez de estas correlaciones sin verificación local cuando las condiciones del proyecto lo permitan.

El módulo resiliente de suelos y materiales granulares es, por su naturaleza mecánica, dependiente del estado de esfuerzos de confinamiento y desviador, condición que ninguna correlación univariada con el CBR puede representar. Esta limitación conceptual, independiente de cualquier consideración histórica sobre el origen de las ecuaciones, constituye la razón técnica más directa para preferir, cuando sea posible, la caracterización mediante ensayo triaxial de carga repetida.

Las tres relaciones examinadas en este documento pueden sintetizarse, a partir de lo reconstruido del testimonio del Dr. Jugo, en un criterio único por tramos de CBR que resume su dominio de validez respectivo. La Tabla 2 presenta esa síntesis, y la Figura 5 reproduce el material docente del autor del que se deriva esta organización por tramos.

Tabla 2. Criterios de correlación M_R -CBR propuestos a partir del testimonio del Dr. Augusto Jugo, con sus límites de validez

Modelo	Rango de validez (CBR)	Expresión (M_R en psi)	Naturaleza del comportamiento
Lineal	$\text{CBR} < 7,2$	$M_R = 1500 \cdot \text{CBR}$	Relación lineal directa — suelos finos, plásticos,

Modelo	Rango de validez (CBR)	Expresión (M_R en psi)	Naturaleza del comportamiento
			sensibles a la humedad
Potencial	$7,2 \leq \text{CBR} \leq 20$	$M_R = 3000 \cdot \text{CBR}^{0,65}$	Transición entre el comportamiento fino y el granular
Logarítmica (*)	$\text{CBR} > 20$	$M_R = 4326 \cdot \ln(\text{CBR}) + 241$	Crecimiento logarítmico — materiales granulares de base/subbase

MÓDULO RESILIENTE DE DISEÑO

Correlaciones M_R -CBR para materiales no ligados (AASHTO 93 y otros)

Suelos finos

$\text{CBR} < 7,2 \%$

$M_R \text{ (psi)} = 1500 \times \text{CBR}$

Relación lineal directa — suelos plásticos, sensibles a la humedad.

Suelos con CBR intermedio

$7,2 \% \leq \text{CBR} \leq 20 \%$

$M_R \text{ (psi)} = 3000 \times (\text{CBR})^{0,65}$

Transición entre el comportamiento fino y el granular.

Suelos granulares

$\text{CBR} > 20 \%$

$M_R \text{ (psi)} = 4326 \times \ln(\text{CBR}) + 241$

Crecimiento logarítmico — materiales granulares de base/subbase.

Nota: CBR en porcentaje (%); M_R resultante en psi. Correlaciones empíricas — válidas para la estimación preliminar del módulo resiliente de subrasante y materiales granulares no ligados (AASHTO 93, cap. 3).
Micro-máster Internacional en Diseño Estructural y de Materiales para Pavimentos - Módulo 1, Semana 5

Ing. Luis Guillermo Loria
CIENCIA VINCI OMNIA

Figura 5. Síntesis docente de los tres modelos de correlación M_R -CBR y sus rangos de validez, elaborada por el autor (Loría-Salazar, Micro-máster Internacional en Diseño Estructural y de Materiales para Pavimentos, Módulo 1, Semana 5), consistente con los criterios reconstruidos a partir del testimonio del Dr. Jugo.

(*) Como se precisa en las Recomendaciones de este documento, el tramo logarítmico ($\text{CBR} > 20$) debe emplearse con cautela en materiales granulares de base y subbase: su dominio de calibración original, según el propio testimonio de su desarrollador, no se extendió a esos materiales, por lo que su extrapolación puede producir valores sin significado físico razonable.

10. Recomendaciones

De las conclusiones anteriores se derivan las siguientes recomendaciones, dirigidas a los profesionales, instituciones académicas y entidades normativas de la región que participan en el diseño y la especificación de estructuras de pavimento.

Cuando se emplee una correlación $\text{CBR}-M_R$ en un proyecto de diseño, debe documentarse explícitamente su fuente, su rango de calibración y las limitaciones conocidas de su aplicación, en lugar de utilizarla como un dato de entrada sin trazabilidad. Los manuales institucionales y las especificaciones que actualmente exigen o recomiendan estas correlaciones deberían incorporar esa documentación como parte del criterio de diseño mismo, no como una nota al margen.

Debe evitarse, en particular, la extrapolación de la ecuación logarítmica examinada en este documento a materiales granulares de base y subbase con CBR muy superior a 20, dado que su dominio de calibración original, según el testimonio de su propio desarrollador, no incluye esos materiales.

Las instituciones de investigación y las universidades de la región deberían promover la localización de la documentación primaria correspondiente a la relación sudafricana examinada en este documento, así como de cualquier registro contemporáneo —tesis, programas de cómputo, apuntes de curso— que permita corroborar de manera independiente el testimonio del Dr. Jugo sobre el origen de los otros dos criterios.

Se recomienda ampliar, en la medida de las capacidades institucionales de cada país, el acceso a equipos de ensayo triaxial cíclico para la determinación directa del módulo resiliente de suelos y materiales granulares representativos de cada región, y priorizar esa caracterización directa sobre el uso de correlaciones importadas en proyectos de escala suficiente para justificar el costo adicional.

Los procesos de calibración local de guías de diseño mecanicista-empírico en curso o futuros en la región deberían incorporar, como parte de su alcance, la generación de correlaciones $\text{CBR}-M_R$ propias para los materiales predominantes de cada país, siguiendo el precedente metodológico del trabajo de calibración de Costa Rica (Loría Salazar et al., 2011) y del estudio de Munera Miranda y Aguiar Moya (2019) sobre materiales granulares nacionales, en lugar de continuar dependiendo exclusivamente de relaciones desarrolladas para poblaciones de materiales geográficamente distantes.

Finalmente, se recomienda que el Instituto Centroamericano del Asfalto adopte la trazabilidad histórica y documental de los criterios técnicos de uso corriente en la región como una línea editorial permanente de sus publicaciones, dado que la experiencia de este primer Documento Técnico sugiere que un número indeterminado de herramientas de diseño adicionales podría beneficiarse de un ejercicio de reconstrucción similar al aquí realizado.

Referencias

- American Association of State Highway and Transportation Officials. (1993). *AASHTO guide for design of pavement structures*. AASHTO.
- American Association of State Highway and Transportation Officials. (2020). *T 193: Standard method of test for the California bearing ratio*. AASHTO.
- American Association of State Highway and Transportation Officials. (2021). *T 307: Standard method of test for determining the resilient modulus of soils and aggregate materials*. AASHTO.
- ASTM International. (2021). *D1883-21: Standard test method for California bearing ratio (CBR) of laboratory-compacted soils*. ASTM International. <https://doi.org/10.1520/D1883-21>
- Christopher, B. R., Schwartz, C., & Boudreau, R. (2006). *Geotechnical aspects of pavements* (Reference Manual, FHWA NHI-05-037). U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, National Highway Institute.
- Corredor, G. (2021). *Apuntes de pavimentos* (Vol. 1, 2.^a ed.) [Material de uso académico].
- de Carteret, R., & Jameson, G. (2009). *Review of relationship to predict subgrade modulus from CBR (California Bearing Ratio)* (Austroads Technical Report AP-T130/09). Austroads.
- Dione, A., Fall, M., Berthaud, Y., Benboudjema, F., & Michou, A. (2014). Implementation of resilient modulus-CBR relationship in mechanistic-empirical (M-E.) pavement design. *Revue du CAMES - Sciences Appliquées et de l'Ingénieur*, 1(2), 65-71.
- Heukelom, W., & Klomp, A. J. G. (1962). Dynamic testing as a means of controlling pavements during and after construction. *Proceedings of the International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements* (pp. 495-510). University of Michigan, Department of Civil Engineering.
- Jugo, A. (2026). *Seis audios sobre el origen de las correlaciones CBR- M_R en Centroamérica* [Mensajes de voz transcritos] (6 archivos). Comunicación personal recibida por L. G. Loría-Salazar. Transcripción íntegra en el Anexo A de este documento.
- Loría Salazar, L. G., Badilla Vargas, G., Elizondo Arrieta, F., Jiménez Acuña, M., & Aguiar Moya, J. P. (2011). *Experiences in the characterization of materials used in the calibration of the AASHTO mechanistic-empirical pavement design guide (MEPDG) for flexible pavement for Costa Rica*. Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales, Universidad de Costa Rica.
- Loría-Salazar, L. G. (2026). Calibración integral de la primera mecanicista-empírica de diseño de pavimentos completa para Latinoamérica: experiencia costarricense con simulación acelerada (APT): CR-ME. En *Memoria Técnica del XXIII Congreso Ibero-Latinoamericano*

del Asfalto (CILA), Asunción, Paraguay (pp. 1-12). Asociación Paraguaya de Carreteras (APC). ISBN 978-99989-1-919-8.

Munera Miranda, J. C., & Aguiar Moya, J. P. (2019). Estimación del módulo resiliente para materiales granulares de Costa Rica. *Infraestructura Vial*, 21(37), 12-20.

Powell, W. D., Potter, J. E., Mayhew, H. C., & Nunn, M. E. (1984). *The structural design of bituminous roads* (TRRL Report LR1132). Transport and Road Research Laboratory.

Uzan, J. (1985). Characterization of granular material. *Transportation Research Record*, 1022, 52-59.



Anexo A. Transcripción depurada de los mensajes de voz del Dr. Augusto Jugo

Se incorpora a continuación la transcripción depurada utilizada como fuente para la reconstrucción técnica presentada en la Sección 5 de este documento. Se eliminaron muletillas, interrupciones propias de la conversación y fragmentos sin contenido técnico, procurando conservar el sentido, la secuencia argumental y las precisiones expresadas por el Dr. Augusto Jugo. Se trata, en su totalidad, de una comunicación personal (A. Jugo, comunicación personal, 2026); el nombre o apellido cuya identificación no pudo confirmarse con seguridad se mantiene señalado para verificación futura.

Mensaje 1. Origen del valor CBR = 7,2

Hola, Luis Guillermo. Buenas tardes o noches. ¿Cómo estás? Mira, te comento: la primera expresión que pones allí, donde aparece $CBR = 7,2$ como punto de separación entre las dos curvas, la desarrollé yo en una tesis de grado, a finales de los años ochenta, con unos alumnos de la Universidad Metropolitana de Caracas, después de regresar de mi doctorado. Para poner las cosas en contexto, la primera versión de la nueva guía AASHTO salió en 1986 y posteriormente se publicó la versión final de 1993. El concepto de diseño de pavimentos nuevos no cambió sustancialmente; lo que se modificó fue el diseño de rehabilitación, porque existía un factor denominado remaining life que no gustó mucho, no parecía muy lógico y fue eliminado en la segunda versión. Yo estaba terminando mi doctorado en 1986 y adquirí una de aquellas guías AASHTO. Esa versión incorporaba la confiabilidad y presentaba algunos cambios en la ecuación. La expresión indicada por AASHTO para estimar el módulo a partir del CBR era $M_R = 1500 \cdot CBR$, pero señalaba su aplicación hasta un CBR de 10. Recuerdo que el Dr. [apellido por verificar], quien fue mi profesor en esa época, nos mostró otra expresión: $M_R = 3000 \cdot CBR^{0,65}$. Según nos explicó, esa ecuación había sido desarrollada en Sudáfrica. Se producía entonces un conflicto. Si el límite de la expresión AASHTO era $CBR = 10$ y se cambiaba de ecuación exactamente allí, un CBR de 9,9 calculado mediante $1500 \cdot CBR$ podía producir un módulo mayor que un CBR de 10,1 o 10,2 calculado mediante $3000 \cdot CBR^{0,65}$. Eso era ilógico. Cuando comenzamos la tesis y elaboramos un programa de computación —en BASIC, como se hacía en aquella época—, lo que hice fue intersectar ambas curvas. El punto de intersección resultó aproximadamente $CBR = 7,2$. Por eso propusimos trabajar con $M_R = 1500 \cdot CBR$ hasta 7,2 y, a partir de allí, utilizar la otra ecuación. Ese fue exactamente el criterio. Posteriormente, Gustavo Corredor llevó el procedimiento a cursos en Chile, Argentina y Colombia, y el valor terminó institucionalizándose durante un tiempo. Más adelante apareció una expresión posterior, descrita como mecanicista, aproximadamente $M_R = 2555 \cdot CBR^{0,64}$, que es mejor y es la que se utiliza actualmente en diversos documentos. Pero quería

que supieras de dónde salió el 7,2 y cuál fue el concepto original: lo desarrollé en aquella tesis con estudiantes de la Universidad Metropolitana de Caracas.

Mensaje 2. Aclaración sobre la discontinuidad

Te repito que el valor 7,2 es la intersección de las dos ecuaciones. Se necesitaba para poder trabajar con el programa de computadora, porque no se podía establecer simplemente el cambio en $CBR = 10$. Podían aparecer errores como el que mencioné: para $CBR = 9,9$ y $CBR = 10,1$, el módulo calculado para el valor mayor de CBR podía resultar más bajo, lo cual era absolutamente ilógico.

Mensaje 3. Corrección puntual

Corrijo: el módulo calculado para $CBR = 10,1$ era más bajo que el obtenido para $CBR = 9,9$ —o 9,8—, lo cual era ilógico. Me refiero al módulo resiliente.

Mensaje 4. Origen de la ecuación logarítmica

Ahora te explico la otra ecuación, porque su historia es todavía más curiosa. La expresión $M_R = 4326 \cdot \ln(CBR) + 241$ la desarrollé yo. La obtuve a partir de una base de datos original asociada con AASHO/AASHTO a la cual tuve acceso cuando estaba en Maryland. Me llevé esos datos a Venezuela, los analicé y obtuve la correlación. Esa fue la ecuación que se utilizó en el análisis para determinar el coeficiente estructural a_3 de las subbases granulares. Tuve acceso a esa información original y realicé diferentes correlaciones; la que produjo el mejor ajuste fue la expresión con el logaritmo neperiano del CBR . Estadísticamente, la correlación era buena con los datos disponibles. La consideré aplicable aproximadamente hasta $CBR = 20$, que es más o menos el límite práctico de lo que normalmente concebimos como una subrasante. A partir de allí, en materiales granulares de subbase o base, la respuesta depende mucho más del estado total de esfuerzos y una relación sencilla con el CBR deja de representar adecuadamente el comportamiento. Como existía un vacío entre los rangos usuales de aplicación, propuse esa ecuación. Sin embargo, tiene un problema: si se invierte y se introduce un módulo de 25 000 o 35 000 psi, propio de una subbase o una base, el CBR resultante puede ser del orden de cientos. Matemáticamente la ecuación produce ese resultado, pero físicamente ya no tiene sentido. Ese fue un error mío: permitir o no impedir que la expresión se extrapolara fuera del rango para el que la había analizado. La ecuación la hice yo y luego Gustavo Corredor la llevó también a Colombia y a otros lugares. Empezó a utilizarse e incluso apareció en algunas publicaciones. Las dos historias que te comento surgieron como soluciones prácticas para aclarar vacíos específicos. No fueron planteadas como leyes universales. Me gustaría conocer tus comentarios, pero espero que esta explicación aclare el origen de ambas.

Mensaje 5. Ampliación sobre CBR mayores de 20

Voy a ampliar un poco el concepto relativo a la ecuación para CBR mayores de 20. Lo que más se parecía al comportamiento de una subrasante era el comportamiento granular de un suelo de subbase; por eso utilicé esa ecuación para manejar aproximadamente los valores. En una subrasante es muy difícil que el módulo pase de 20 000 o 25 000 psi. La ecuación se encontraba aproximadamente en ese entorno. Como ya te indiqué, salió de los datos originales analizados. Si se revisa el coeficiente estructural a_3 , para un CBR de 100 se asocia aproximadamente un módulo de 20 000 psi; en el caso de a_2 , un CBR de 100 se asocia con un módulo de alrededor de 30 000 psi. La diferencia se explica por el estado de esfuerzos, particularmente por el esfuerzo volumétrico o bulk stress, θ . Eso resume de dónde salió la expresión. La otra historia, la del 7,2, es simplemente la intersección de las dos ecuaciones disponibles en 1987 u 1988.

Mensaje 6. Sobre la falta de publicación formal

Entiendo que todo esto puede resultar curioso y anecdótico. Me gustaría conocer tus comentarios. Lo que ocurre es que nunca publiqué formalmente estas cosas. Otros las utilizaron y las publicaron, pero yo no preparé una publicación científica específica. Aparecieron en manuales y materiales de mis cursos, aunque no en un libro o artículo formal.

Mensaje 7. Complemento y disponibilidad para conversar

Te envío una fotografía como complemento, aunque probablemente no haga falta. No sé si me expliqué completamente, pero como eres especialista vas a entender el razonamiento. Actualmente estoy en la isla de Margarita y permaneceré aquí durante septiembre, quizá algunos días de octubre. Si quieres conversar con mayor detalle, avísame y busco un momento. No estoy demasiado ocupado, salvo algunos compromisos y unos talleres sobre mezclas asfálticas.