

1. Introducción

Históricamente, la caracterización mecánica de los suelos se ha efectuado a través del Valor Soporte Relativo CBR, y basándose en la clasificación de los suelos, o la respuesta de la estructura del pavimento a la carga estática, posteriormente se comenzó a investigar sobre el efecto de la carga móvil del tránsito en el comportamiento de los materiales que constituían el pavimento. Esto conllevó a la consideración de la acción de una carga dinámica aplicada en la estructura del pavimento, y a la introducción del concepto de resiliencia y a una nueva manera de diseñar teniendo en cuenta sistemas multicapas que interactúan entre sí.

El módulo resiliente (M_r) se basa en el concepto de que, bajo distintos estados de tensiones, el suelo alcanzara una deformación total con una componente elástica, recuperable o resiliente, y otra plástica, teniendo en cuenta el comportamiento no lineal del material. Esto permite establecer la presunción de que, siempre y cuando el tensor desviador no supere la tensión de corte, luego de un gran número de repeticiones la única componente de la deformación es elástica.

Como la realización del ensayo triaxial, no es de fácil obtención o no se dispone de los equipos de ensayos requeridos para determinarlo, la Guía de Diseño Empírico – Mecánica de Pavimentos (AASHTO 2002) con el fin de reducir los datos de diseño, sugiere la adopción de algunas simplificaciones y ajustes para considerar las condiciones locales relacionadas con las características de los materiales, el clima, y las técnicas de construcción.

Para el caso de este proyecto se realizará mediciones del Módulo Resiliente con una cámara Triaxial para establecer un análisis de relación entre las propiedades físicas y el valor del Módulo Resiliente, que nos proporcionará relaciones entre esfuerzo - deformación del terreno de fundación de las vías de nuestro territorio. Además, como complemento y bajo ciertas condiciones, presentar con los resultados del Ensayo Triaxial, un análisis de relación con las propiedades físicas de los suelos ensayados en laboratorio. Se propone un reajuste a los modelos estudiados basándose en ensayos locales para suelos finos.

2. Fundamentación Teórica

2.1. Presentación Conocimiento Científico

El valor del módulo resiliente se calcula mediante el cociente entre la tensión cíclica y la deformación cíclica específica, siendo la primera igual al 90% de la tensión máxima aplicada en forma dinámica y la deformación resiliente la respuesta recuperable del material frente a las cargas:

$$M_r = \frac{\sigma_c}{\epsilon_r}$$

La necesidad de mejorar la modelización de los suelos ante las cargas dinámicas determinó una evolución en las ecuaciones constitutivas de estos materiales, hasta arribar a la que actualmente ha adoptado la Guía de Diseño Empírico – Mecánica de Pavimentos (NCHRP 1 37 A) conocida como AASHTO 2002.

$$M_r = K_1 * P_a * \left(\frac{\Theta}{P_a}\right)^{K_2} * \left(\frac{\tau_{oct}}{P_a} + 1\right)^{K_3}$$

Ante la dificultad que conlleva la realización del ensayo triaxial para medir el módulo resiliente, tanto por falta de equipos, o por el tiempo que demora, diferentes modelos de predicción fueron propuestos por varios investigadores, para así poder correlacionar ensayos rutinarios que brindan las características físicas de los suelos, con el ensayo del módulo resiliente.

2.2. Análisis Investigaciones Anteriores

Se han retenido como más significativos los modelos propuestos por la Federal Highway Administration (FHWA) de los Estados Unidos, y de la Universidad de Wisconsin del mismo país, ya que estos modelos correlacionan el módulo resiliente con parámetros físicos de los suelos, cuyos ensayos son de fácil realización.

Investigación: FHWA-RD-02-051

Los modelos propuestos por la FHWA que se presentan a continuación, resultan de los análisis realizados durante más de 20 años en los tramos de pavimentos para el estudio del desempeño de los mismos a largo plazo LTTP, Long Term Pavement Performance.

Suelos finos cohesivos

$$K_1 = 1,3577 + 0,0106 * (\% \text{Arcilla}) - 0,0437 * w$$

$$K_2 = 0,5193 - 0,0073 * P_4 + 0,0095 * P_{40} - 0,0027 * P_{200} - 0,0030 * LL - 0,0049 * W_{opt}$$

$$K_3 = 1,4258 - 0,0288 * P_4 + 0,0303 * P_{40} - 0,0521 * P_{200} + 0,0251 * (\% \text{Limo}) + 0,0535 * LL - 0,0672 * W_{opt} - 0,0026 * Y_{dmax} + 0,0025 * Y_d - 0,6055 * \left(\frac{W}{W_{opt}} \right)$$

Suelos de granos finos

$$K_1 = -0,8409 + 0,0004 * P_{40} + 0,0161 * IP$$

$$K_2 = 0,668 - 0,0007 * P_{40} - 0,0139 * IP$$

$$K_3 = -0,1667 - 0,0207 * IP$$

Investigación: SPR # 0092-08-12

La universidad de Wisconsin a través de su Department of Civil Engineering and Mechanics ha propuesto los modelos siguientes para el Wisconsin Department Of Transportation.

Para suelos Finos

$$K_1 = 404,166 + 42,933 * IP + 52,260 * Y_d - 987,353 * \left(\frac{W}{W_{opt}} \right)$$

$$K_2 = 0,25113 - 0,0292 * IP + 0,5573 * \left(\frac{W}{W_{opt}} \right) * \left(\frac{Y_d}{Y_{dmax}} \right)$$

$$K_3 = -0,20772 + 0,23088 * IP + 0,00367 * Y_d - 5,4238 * \left(\frac{W}{W_{opt}} \right)$$

3. Diseño Teórico

3.1. Determinación del Problema

3.1.1. Situación Problemática

El problema planteado en el trabajo, se refiere al costo y tiempo para la realización de los ensayos para hallar el módulo resiliente del terreno, lo que nos lleva a desarrollar el siguiente trabajo, usando las correlaciones propuestas entre el módulo resiliente y las propiedades físicas de los suelos, las cuales se determinan con ensayos de fácil realización, para así caracterizar la subrasante, y será una herramienta de gran utilidad en el trabajo de campo.

3.1.2. Problema

¿Se puede estimar el valor del módulo resiliente de suelos finos mediante modelos que correlacionen sus propiedades físicas, y aplicarlos a las condiciones y suelos locales?

4. Hipótesis

Es posible aplicar directamente los modelos propuestos en estudios realizados en otros países a los suelos finos y las condiciones particulares que se presentan en nuestra región.

5. Campo de acción

El campo de acción del presente trabajo está definido por:

- Laboratorio de suelos.
- Análisis estadístico.

Utilizaremos el laboratorio de suelos para poder desarrollar todos los ensayos necesarios para así determinar o encontrar los datos que necesitamos de la práctica de tema planteado.

El análisis estadístico para poder ajustar los modelos estudiados por medio de regresión, que se ajuste a nuestros datos, para poder obtener su ecuación, teniendo en cuenta los valores de los coeficientes de correlación y de determinación.

6. Justificación

Por la dificultad de la realización del ensayo triaxial para determinar el módulo resiliente, se pretende hallar una solución mucho más económica y con menos dificultad, la cual sería realizar un análisis de relación, mediante ajustes a diferentes modelos matemáticos, escogiendo el que tenga una mejor relación entre sus variables, en dónde la información de las propiedades físicas del suelo sea correlacionada con valores medidos del módulo resiliente, y aplicar los modelos seleccionados, de los cuales nos interesa la ecuación de dicho análisis.

En esta investigación se compararan los valores de las propiedades físicas de los suelos estudiados, como ser la granulometría, los límites de atterberg, y las relaciones entre contenido de humedad y densidad, reduciendo el trabajo y el costo de manera significativa.

Este estudio se realizará en suelos finos. Los cuales tienen una clasificación: A-6, y A-7-6, sobre los cuales el sistema AASHTO nos recomienda su uso como subrasantes, y lo que se busca en este estudio es evaluar modelos que correlacionan el módulo resiliente con las propiedades físicas, para poder adoptarlos a condiciones locales.

7. Objetivos

7.1. Objetivo General

- Evaluar la capacidad de predicción del módulo resiliente de distintos modelos respecto a los resultados experimentalmente medidos, y eventualmente, proceder a un reajuste de los mismos para usarlos en suelos y condiciones de la región.

7.2. Objetivos Específicos

- Recopilar información para realizar el análisis de relación y ensayos de laboratorio.
- Realizar ensayos de los suelos estudiados de acuerdo a la norma AASHTO.
- Determinar los parámetros necesarios para el cálculo del módulo resiliente.
- Comparar los valores medidos en laboratorio con los estimados por los modelos.
- Evaluar la capacidad de predicción del módulo resiliente de distintos modelos.
- Ajustar los modelos para su uso en suelos y características locales.
- Interpretar y evaluar los resultados obtenidos.

8. Alcance

Este trabajo pretende realizar una evaluación de diferentes modelos de predicción del módulo resiliente comparando valores estimados por los mismos y aquellos experimentalmente obtenidos a través del ensayo triaxial.

Adicionalmente se realizará un análisis de relación mediante el ajuste a modelos matemáticos de regresión, con el que obtendremos ecuaciones ajustadas que se aplicarán solamente a nuestra información, tomando en cuenta como variables independientes a las propiedades físicas, y como variable dependiente al módulo resiliente, su alcance estará limitado a los siguientes puntos considerados necesarios y suficientes, para el cumplimiento a cabalidad de su objetivo:

Se deberán identificar los lugares de muestreo, que estén en la provincia Cercado, realizar los ensayos para determinar propiedades físicas como ser: granulometría, límites de atterberg, relación entre contenido de humedad y densidad, realizar el ensayo triaxial para medir el módulo resiliente en laboratorio.

Con los resultados de las prácticas se deberá realizar ajustes de nuestros datos a diferentes modelos estudiados y seleccionar los modelo que tengan un mejor ajuste a nuestros datos, con el fin de reajustar las ecuaciones estudiadas, y se verifica por

medio del coeficiente de correlación y el coeficiente de determinación, la cual se aplicaría solamente a este tipo de suelos finos en la provincia Cercado.

9. Medios

Este trabajo de investigación constara de dos partes:

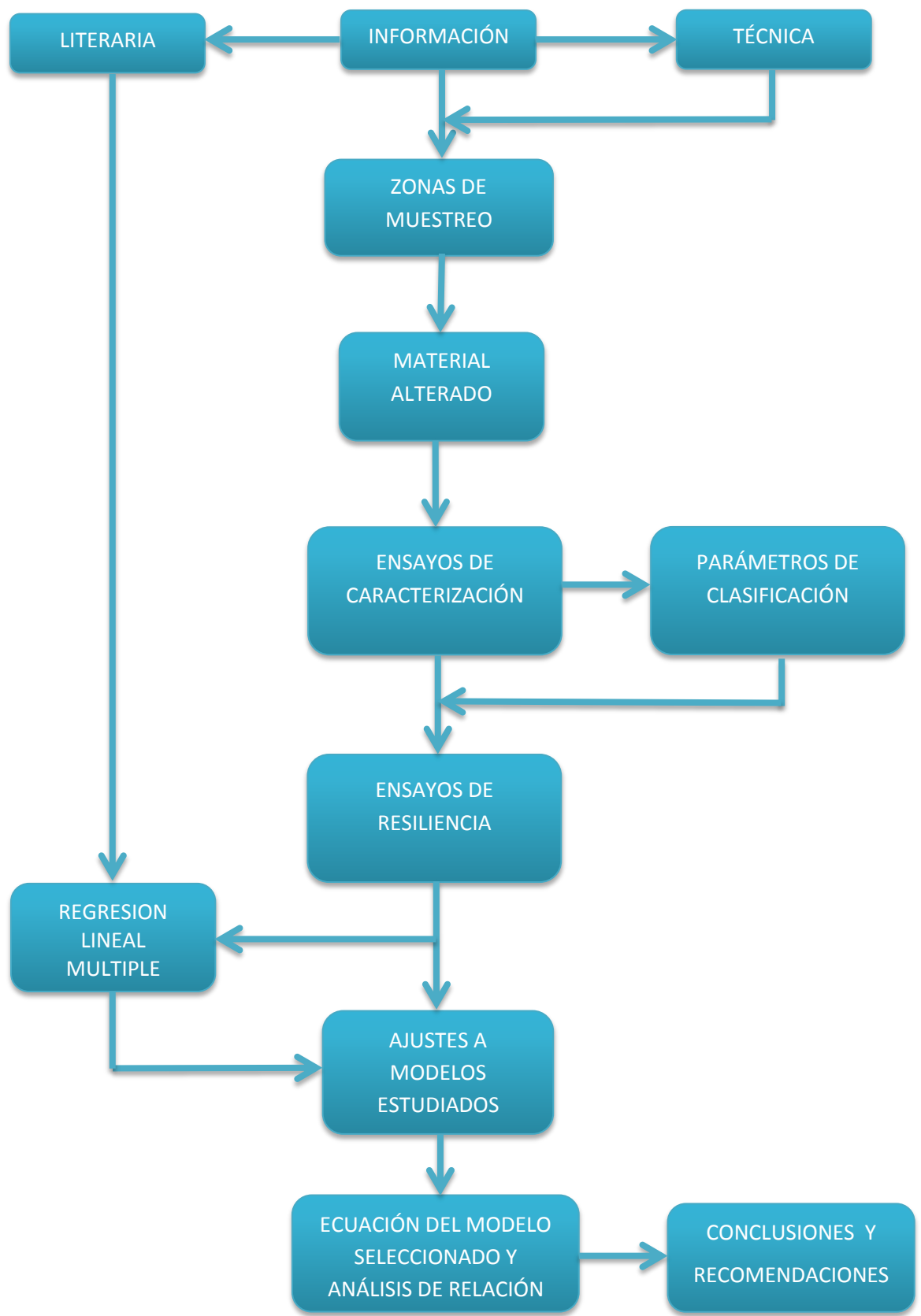
- Primero la parte teórica, donde se recolectara la información necesaria de diferentes bibliografías para realizar la investigación.
- Segundo la parte práctica, en la cual se realizará los ensayos de laboratorio de: Módulo Resiliente, clasificación de suelos y compactación.

Se recolectarán las muestras de la provincia Cercado.

Para esta investigación se trabajará con suelos finos.

El equipo que se utilizará será suministrado por el laboratorio de suelos y hormigones de la carrera de Ing. Civil de la facultad de Ciencias y Tecnología en la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho, y el laboratorio de mecánica de suelos de la carrera de Ing. Civil de la facultad de Ingeniería en la Universidad Autónoma Tomás Frías.

10. Diseño Teórico-Metodológico



1. Introducción

La subrasante es definida como el suelo preparado y compactado para soportar la estructura de un sistema de pavimento. De la calidad de ésta depende en gran parte el espesor que deba tener un pavimento, sea rígido o flexible.

Es una parte esencial en el diseño de pavimentos. Tiene la particularidad de otorgar la respuesta estructural y el comportamiento del pavimento en construcción y operación.

Como parámetro de evaluación de esta capa se emplea la capacidad de soporte o resistencia a la deformación por esfuerzo cortante bajo las cargas del tránsito.

La subrasante puede estar constituida por suelos en su estado natural, o por estos con algún proceso de mejoramiento tal como la estabilización mecánica, estabilización físico - química con aditivos tales como el cemento Portland, la cal, el asfalto entre otros.

2. Funciones

Las principales funciones de la capa subrasante son:

- 1.- recibir y resistir las cargas del tránsito que le son permitidas por el pavimento.
- 2.- transmitir y distribuir de modo adecuado las cargas del tránsito al cuerpo del terraplén.

Estas dos funciones son estructurales y comunes a todas las capas de las secciones transversales de una vía terrestre. La parte superior de la capa subrasante coincide con la línea subrasante del proyecto geométrico la cual debe cumplir con las especificaciones de pendiente longitudinal para la obra. Esta línea marca la altura de las terracerías y por tanto su espesor, que la mayoría de las veces es mayor que el necesario en la estructura. En los procedimientos de construcción, los materiales se deben compactar con el equipo más adecuado, de acuerdo con sus características. Cuando los materiales encontrados en las zonas cercanas a la obra no cumplen con las características marcadas en las normas, se requiere estabilizarlos mecánica y químicamente.

3. Forma de las Partículas

Independientemente del origen del suelo, los tamaños de las partículas, en general, que conforman un suelo, varían en un amplio rango. Los suelos en general son llamados grava, arena, limo o arcilla, dependiendo del tamaño predominante de las partículas. Para describir los suelos por el tamaño de sus partículas, varias organizaciones desarrollaron límites de tamaño de suelo separado. La tabla 1 muestra los límites de tamaño de suelo separado desarrollados por el Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT), el Departamento de agricultura de Estados Unidos (USDA), la Asociación Americana de Funcionarios de Carreteras Estatales y del Transporte (AASHTO), el cuerpo de Ingenieros del Ejército de Estados Unidos, y la Oficina de Restauración de Estados Unidos.

Las gravas son fragmentos de rocas ocasionalmente con partículas de cuarzo, feldespato y otros materiales. Las partículas de arena están formadas principalmente de cuarzo y feldespatos, aunque también están presentes, a veces, otros granos minerales. Los limos son fracciones microscópicas de suelo que consisten en granos muy finos de cuarzo y algunas partículas en forma de escamas (hojuelas) que son fragmentos de minerales micáceos.

Tabla 1. Límites de tamaño de suelos separados.

Nombre de la organización	Tamaño del Grano (mm)			
	Grava	Arena	Limo	Arcilla
Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT)	>2	2 a 0,06	0,06 a 0,002	<0,002
Departamento de Agricultura de Estados Unidos (USDA)	>2	2 a 0,05	0,005 a 0,002	<0,002
Asociación Americana de Funcionarios del Transporte y Carreteras Estatales (AASHTO)	76,2 a 2	2 a 0,075	0,075 a 0,002	<0,002
Sistema Unificado de Clasificación de suelos (U.S. Army Corps of Engineers; U.S. Bureau of Reclamation; American Society for Testing and Materials)	76,2 a 4,75	4,75 a 0,075	Finos (es decir, limos y arcillas) <0,075	

Fuente: Braja M. Das.

La forma de las partículas es consecuencia de su meteorización física como mecánica en un tiempo geológica el cual influye directamente en su comportamiento.

4. Caracterización de la Subrasante

4.1. Propiedades Físicas

4.1.1. Límites de Atterberg.

Se define Límites de Atterberg o Límites de Consistencia como las diferentes fronteras convencionales entre cualquier de los estados o fases que un suelo pueda estar, según su contenido de agua en orden decreciente; los estados de consistencia definidos por Atterberg son: estado líquido, estado semilíquido, estado plástico, estado semisólido y estado sólido. Llamándose límites de plasticidad a las fronteras (límite líquido y límite plástico) que definen el intervalo plástico.

Existen suelos que al ser remoldeados, cambiando su contenido de agua si es necesario, adoptan una consistencia característica, que desde épocas antiguas se ha denominado Plástica. Estos suelos han sido llamados arcillas, originalmente por los hombres dedicados a la cerámica; la palabra pasó a la Mecánica de Suelos, en épocas recientes, con idéntico significado. La plasticidad es en este sentido, una propiedad tan evidente que ha servido desde antaño para clasificar suelos en forma puramente descriptiva. En Mecánica de Suelos puede definirse la plasticidad como la propiedad de un material por la cual es capaz de soportar deformaciones rápidas, sin rebote elástico, sin variación volumétrica apreciable y sin desmoronarse ni agrietarse.

Con el presente ensayo el cual se denomina “Límites de Atterberg” es posible estudiar más a fondo el suelo designado, es decir con la información del análisis granulométrico y los límites líquido y plástico poder clasificar un suelo por cualquier sistema de clasificación.

En Mecánica de Suelos el concepto de plasticidad se ha introducido a partir como queda dicho, de ideas antiguas, resultando muy útil manejar en nuestros días dicho concepto simple de plasticidad, basado en ideas con un sentido físico inmediato, pero

al tratar de definir en términos simples la plasticidad de un suelo, no resulta suficiente decir que un suelo plástico puede deformarse y remodelarse sin agrietamiento, pues una arena fina y húmeda tiene esas características cuando la deformación se produce lentamente y sin embargo no es plástica en un sentido más amplio de la palabra; hay entre el comportamiento de la arcilla y el de la arena en cuestión una importante diferencia: el volumen de la arcilla permanece constante durante la deformación, mientras que el de la arena varía, además la arena se desmorona en deformación rápida.

Según su contenido de agua en orden decreciente, un suelo susceptible de ser plástico puede estar en cualquiera de los siguientes estados de consistencia:

Estado líquido, con las propiedades y apariencia de una suspensión.

Estado semilíquido, con las propiedades de un fluido viscoso.

Estado plástico, en que el suelo se comporta plásticamente.

Estado semisólido, en que el suelo tiene la apariencia de un sólido, pero aún disminuye de volumen al estar sujeto a secado.

Estado sólido, en que el volumen del suelo no varía con el secado.

Los anteriores estados son fases generales por las que pasa el suelo al irse secando y no existen criterios estrictos para distinguir sus fronteras. El establecimiento de éstas ha de hacerse en forma puramente convencional. Atterberg estableció las primeras convenciones para ello, bajo el nombre general de límites de consistencia.

4.1.1.1. Límite Líquido

La frontera convencional entre los estados semilíquido y plástico fue llamada por Atterberg límite líquido, nombre que hoy se conserva. Atterberg lo definió en términos de una cierta técnica de laboratorio que consistía en colocar el suelo remodelado en una cápsula, formando en él una ranura y en hacer cerrar la ranura golpeando secamente la cápsula contra una superficie dura, el suelo tenía el contenido de agua correspondiente al límite líquido, según Atterberg, cuando los bordes

inferiores de la ranura se tocaban, sin mezclarse al cabo de un cierto número de golpes.

4.1.1.2. Límite Plástico

La frontera convencional entre los estados plástico y semisólido fue llamada por Atterberg límite plástico y está definido también en términos de una manipulación de laboratorio. Atterberg colaba un fragmento de suelo hasta convertirlo en un cilindro de espesor no especificado; el agrietamiento y desmoronamiento del rollito, en un cierto momento, indicaba que se había alcanzado el límite plástico y el contenido de agua en tal momento era la frontera deseada.

El límite plástico se define como el contenido de humedad, expresado en porcentaje, cuando comienza a grietarse un rollo formado con el suelo de 3 milímetros de diámetro, al rodarlo con la mano sobre una superficie lisa y absorbente.

4.1.1.3. Índice de Plasticidad

A las fronteras anteriores, que definen el intervalo plástico del suelo se les ha llamado límites de plasticidad. Atterberg consideraba que la plasticidad del suelo quedaba determinada por el límite líquido y por la cantidad máxima de una cierta arena, que podía ser agregada al suelo, estando este con el contenido de agua correspondiente al límite líquido, sin que perdiera por completo su plasticidad. Además encontró que la diferencia entre los valores de los límites de plasticidad, llamada índice plástico, se relacionaba fácilmente con la cantidad de arena añadida, siendo de más fácil determinación, por lo que sugirió su uso en lugar de la arena, como segundo parámetro para definir la plasticidad.

$$I_p = LL - LP$$

Además de los límites de plasticidad (líquido y plástico) ya señalados, Atterberg definió otros límites de consistencia, que se mencionan a continuación:

El límite de adhesión: definido como el contenido de agua con el que la arcilla pierde sus propiedades de adherencia con una hoja metálica, por ejemplo una espátula. Es de importancia en agricultura.

El límite de cohesión: definido como el contenido de agua con el que los grumos de arcilla ya no se adhieren entre sí.

El límite de contracción: frontera entre los estados de consistencia semisólido y sólido, definido con el contenido de agua con el que el suelo ya no disminuye su volumen al seguirse secando.

La diferencia que existe entre el límite líquido y límite plástico es que, el límite plástico es el contenido de humedad por debajo del cual se puede considerar el suelo como material no plástico. Y límite líquido es el contenido de humedad por debajo del cual el suelo se comporta como un material plástico.

Tanto el límite líquido como el límite plástico dependen de la calidad y tipo de arcilla presente en la muestra, sin embargo el índice de plasticidad depende generalmente, de la cantidad de arcilla en el suelo.

Los límites líquidos y plásticos han sido ampliamente utilizados en las regiones del mundo, principalmente con el objetivo de identificar y clasificar los suelos. El límite de contracción ha sido utilizado en varias áreas geográficas, donde el suelo sufre grandes cambios de volumen entre el estado seco y su estado húmedo.

4.1.2. Granulometría

El análisis granulométrico consiste en pasar el suelo por una serie de tamices, previo conocimiento del peso total de la muestra; la parte del suelo retenido por cada tamiz se calcula en forma individual con relación al peso total y seguidamente se determinan los porcentajes que pasan por cada tamiz. En los comienzos de la investigación de las propiedades de los suelos se creyó que las propiedades mecánicas dependían directamente de la distribución de las partículas constituyentes según sus tamaños; por ello era preocupación especial de los ingenieros la búsqueda de métodos adecuados para obtener tal distribución. Aún hoy, tal parece que todo técnico

interesado en suelos debe pasar a modo de etapa de iniciación, por una época en que se siente obligado a creer que, con suficiente experiencia, es posible deducir las propiedades mecánicas de los suelos a partir de su distribución granulométrica o descripción por tamaños. Solamente en suelos gruesos, cuya granulometría puede determinarse por mallas, la distribución por tamaños puede revelar algo de lo referente a las propiedades físicas del material; en efecto, la experiencia indica que los suelos gruesos bien graduados, o sea con amplia gama de tamaños, tienen comportamiento ingenieril más favorable, en lo que concierne a algunas propiedades importantes, que los suelos de granulometría muy uniforme. En suelos finos en estado inalterado, las propiedades mecánicas e hidráulicas dependen en tal grado de su estructuración e historia geológica, que el conocimiento de su granulometría, resulta totalmente inútil.

Tamaño patrón de tamices

Todos los tamices de tipo U. S. pueden conseguirse en un diámetro de 20 cm. la mayoría en 30.5 cm. Los tamices son hechos de malla de alambre forjado con aberturas rectangulares que varían en tamaños desde 101.6 mm. (4") en la serie más gruesa hasta el No 400 (0.038 mm.) en la serie correspondiente al suelo fino.

Tabla 2. Aberturas de Tamices.

Tamiz	3"	2"	1 1/2"	1"	3/4"	1/2"	3/8"	Nº4	Nº10	Nº40	Nº200
φ mm	75,00	50,00	37,50	25,00	19,00	12,50	9,50	4,75	2,00	0,425	0,075

Fuente: Braja M. Das

4.1.3. Clasificación de Suelos

En general, la textura de un suelo se refiere a su apariencia superficial, la cual es influenciada por el tamaño de los granos presentes en el. La clasificación por texturas permite dividir el suelo en categorías básicas dependiendo del tamaño presente: grava, arena, limo y arcilla, pero en la naturaleza en la presentación habitual de los suelos es una mezcla de ellos, en este caso el nombre del suelo depende de los componentes principales o según el tamaño de grano que predomina en cantidad,

según el caso el suelo se puede clasificar como arcillo limoso, areno arcilloso, franco arenoso.

La existencia de esta variedad de sistemas de clasificación de suelos se debe, al hecho de que tanto el ingeniero civil como el geólogo y el agrónomo analizan el suelo desde diferentes puntos de vista. Sin embargo, lo que es fundamental es el hecho de que cualquier clasificación que quiera abarcar las necesidades correspondientes, debe estar basada en las propiedades mecánicas de los suelos, ya que estas son fundamentales en las variadas aplicaciones de la ingeniería.

En nuestro medio se utilizan los siguientes métodos: el sistema de clasificación de los suelos AASHTO (American Association of Atate High-way and Transportation Officials) y el sistema unificado de clasificación de los suelos SUCS o USCS (Unified Soil Clasification System) también llamado sistema de clasificación ASTM.

4.1.3.1. Sistema de Clasificación de suelos AASHTO

Está destinada principalmente a clasificar los suelos de acuerdo a su adaptabilidad para ser usados en la construcción de pavimentos de carreteras y caminos. El sistema AASHTO se usa principalmente para la clasificación de las capas de carreteras. No se usa en la construcción de cimentaciones.

Este sistema describe un procedimiento para clasificar suelos en 7 grupos principales: Desde A-1 hasta A-7, basado en el tamaño del grano (granulometría), en la plasticidad (límite líquido e índice de plasticidad). Para sub-rasante de un camino, se desarrolló también un número denominado índice de grupo (IG).

Suelos Granulares

Son relativamente inertes, y no se influyen significativamente por la estanqueidad del agua, los suelos granulares pueden ser: Gravas y Arenas.

Son aquellos que tienen 35% o menos, del material fino que pasa el tamiz No. 200.

Estos suelos forman los grupos A – 1, A – 2 y A -3.

Grupo A – 1: El material de este grupo comprende las mezclas bien graduadas, compuestas de fragmentos de piedra, grava, arena y material ligante poco plástico. Se incluyen también en este grupo mezclas bien graduadas que no tienen material ligante.

Subgrupo A – 1 a: Comprende aquellos materiales formados predominantemente por piedra o grava, con un material ligante bien graduado.

Subgrupo A – 1 b: Incluye aquellos materiales formados predominantemente por arena gruesa bien graduada con o sin ligante.

Grupo A – 2: Comprende una gran variedad de material granular que contiene menos del 35 % de material fino que pasa por la malla N°200 y que no pueden clasificarse en los grupos A-1 y A-3, por sobrepasar las limitaciones de dichos grupos debido a un exceso en la proporción de finos, en la plasticidad o en ambas.

Subgrupos A – 2 – 4 y A – 2 – 5: Pertenecen a estos subgrupos aquellos materiales cuyo contenido de material fino es igual o menor del 35%, y cuya fracción que pasa el tamiz número 40 tiene las mismas características de los suelos A – 4 y A – 5, respectivamente. Estos grupos incluyen aquellos suelos gravosos y arenosos (arena gruesa), que tengan un contenido de limo, o índices de Grupo, en exceso a los indicados por el grupo A – 1. Los valores del índice de grupo van desde 0 a 4 (materiales limo-arcillosos).

Así mismo, incluyen aquellas arenas finas con un contenido de limo no plástico en exceso al indicado para el grupo A – 3.

Subgrupos A – 2 – 6 y A – 2 – 7: Los materiales de estos subgrupos son semejantes a los anteriores, pero la fracción que pasa el tamiz número 40 tiene las mismas características de los suelos A – 6 y A – 7, respectivamente.

Grupo A – 3: En este grupo se encuentran incluidas las arenas finas, de playa y aquellas con poca cantidad de limo que no tengan plasticidad. Este grupo incluye, además, las arenas de río que contengan poca grava y arena gruesa.

Suelos Finos

Grupo A – 4: Pertenecen a este grupo los suelos poco o nada plásticos, que tienen un 75% o más del material fino que pasa el tamiz número 200. Además se incluyen en este grupo las mezclas de limo con grava y arenas hasta en un 64% que carecen de la fracción que pasa de la malla N°200. El índice de grupo varía de 1 a 8, notándose un aumento en el porcentaje de material grueso a medida que se reduce el índice de grupo.

Grupo A – 5: Los suelos comprendidos en este grupo son semejantes a los del anterior, pero contienen material micáceo o diatomáceo. Son elásticos y tienen un límite líquido elevado. Su índice de grupo varía de 1 a 12, indicando los valores crecientes, el efecto combinado de la disminución del porcentaje de material grueso y el aumento de su límite líquido.

Grupo A – 6: El material típico de este grupo es la arcilla plástica. Por lo menos el 75% de estos suelos debe pasar el tamiz número 200, pero se incluyen también las mezclas arcillo-arenosas cuyo porcentaje de arena y grava sea inferior al 64%. Estos materiales presentan, generalmente grandes cambios de volumen entre los estados seco y húmedo. Su índice de grupo varía de 1 a 16, indican los valores crecientes el efecto del aumento de índice plástico y la disminución del porcentaje del material grueso.

Grupo A – 7: Los suelos de este grupo son semejantes a los suelo A – 6, pero son elásticos. Sus límites líquidos son elevados, estos suelos tienen un índice de grupo que varía de 1 a 20.

Subgrupo A – 7 – 5: Incluye aquellos materiales cuyos índices de plasticidad no son muy altos con respecto a sus límites líquidos. Los cuales pueden ser muy elásticos y están sujetos a grandes cambios de volumen.

Subgrupo A – 7 – 6: Comprende aquellos suelos cuyos índices de plasticidad son muy elevados con respecto a sus límites líquidos y que, además, experimentan cambios de volumen extremadamente grandes.

En la clasificación AASHTO se describe las propiedades de los suelos descritos anteriormente y donde además se muestran algunas recomendaciones para el uso adecuado en carreteras.

Tamaño de grano grueso: Se distinguen 3 tamaños principales; grava, arena y finos (limo y arcilla). Los bloques de roca (tamaño superior a los 75 mm) encontrados dentro de la muestra de suelo, se excluyen de la porción de análisis para la clasificación, pero se registra la cantidad presente.

Plasticidad: El término limo es aplicado a aquellas fracciones finas donde el índice de plasticidad es inferior o igual a 10, el término arcilloso a las fracciones con plasticidad superior o igual a 11.

Índice de grupo: El índice de grupo incluyendo el grupo de clasificación, se usa para determinar la calidad relativa de suelos de terraplenes, material de la sub-rasante, sub-bases y bases.

El índice de grupo se determina a través de la evaluación en cada grupo, mediante el cálculo de la fórmula empírica:

$$IG = (F_{200} - 35)(0.2 + 0.005(LL - 40)) + 0.01(F_{200} - 15)(IP - 10)$$

F_{200} = porcentaje que pasa la malla N°200, expresado como un número entero.

LL = Límite líquido.; IP = Índice de plasticidad.

Si el porcentaje que pasa por la malla N°200, menos 35, es mayor de 75, se anotará 75 y si es menor de 35, se anotará 0.

Si el porcentaje de material que pasa por la malla N°200, menos 15, es mayor de 55, se anotará 55, si es menor de 15, se anotará 0.

Valor del límite líquido, menos 40, si el LL es mayor de 60, se anotará 60 y si es menor de 40 se anotará 0.

Valor del índice de plasticidad, menos 10, si el IP es mayor a 30, se anotará 30 y si es menor de 10 se anotará 0.

Al calcular el índice de grupo para un suelo de los grupos A-2-6 o A-2-7, se debe usar la ecuación del índice de grupo parcial relativa al índice de plasticidad:

$$IG = 0.01(F_{200} - 15)(IP - 10)$$

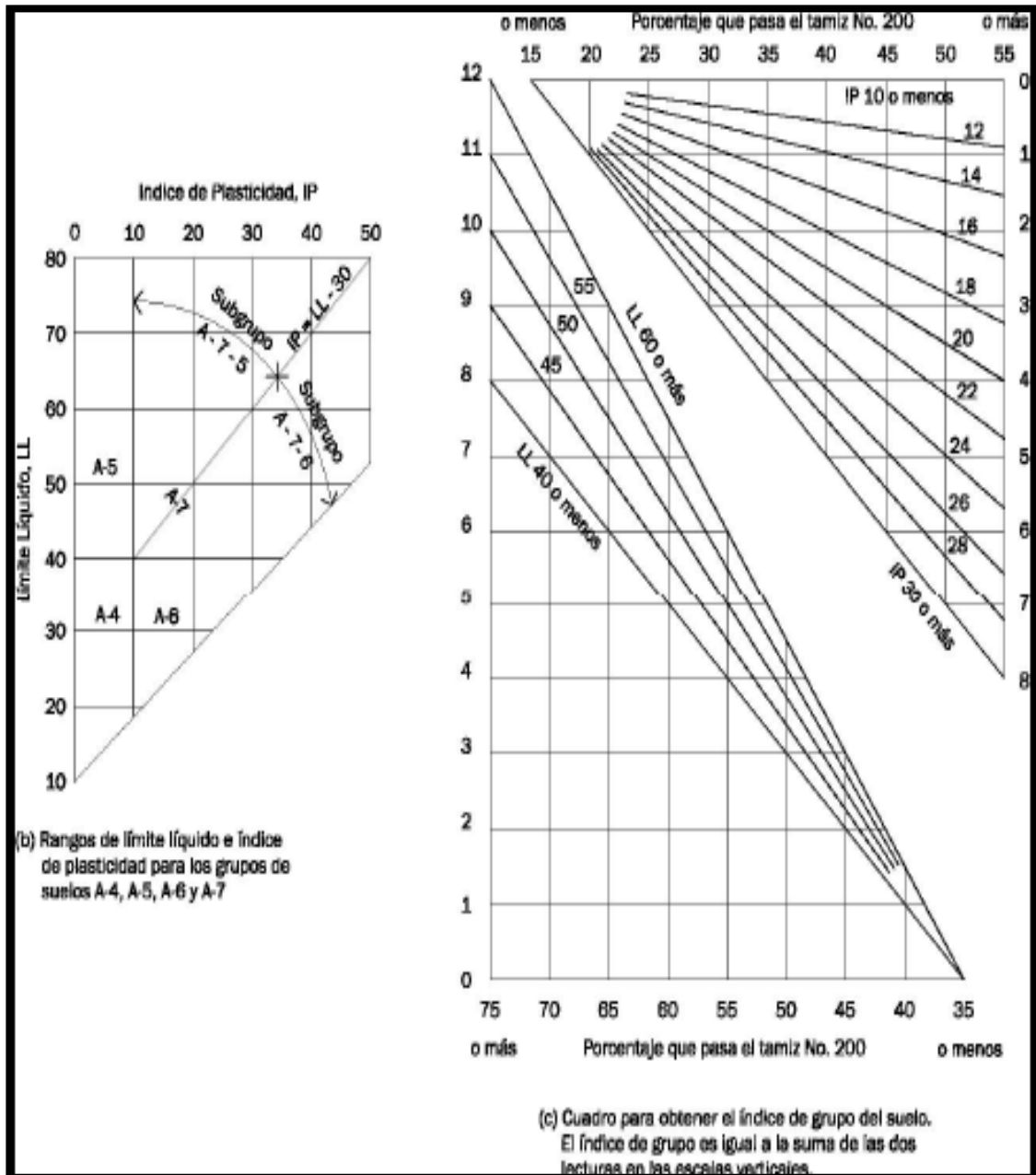
Cuando el suelo es NP o cuando el límite líquido no puede ser determinado, el índice de grupo se debe considerar 0. Si un suelo es altamente orgánico (turba) puede ser clasificada como A-8 solo con una inspección visual generalmente, es de color oscuro, fibroso y olor putrefacto.

Algunas reglas con respecto al uso de estas ecuaciones, son las siguientes:

- 1.- Si el valor obtenido es negativo, se debe asumir como IG=0.
- 2.- No hay un límite superior para el índice de grupo.
- 3.- El IG debe recordarse a valores enteros: por ejemplo, si el valor obtenido es IG=3.3 realmente es IG=3 o si es IG=3.5 realmente es IG=4.
- 4.- El índice de grupo de A-1, A-3, A-2-4 y A-2-5 siempre es =0.
- 5.- Para los grupos A-2-6 y A-2-7, el índice de grupo se calcula con la segunda parte de la ecuación, dependiendo sólo del IP.
- 6.- El valor del índice de grupo debe ser siempre en paréntesis después del símbolo del grupo, como: A-2-6(3), A-7-5(17), etc.

En general, la calidad en el comportamiento de un suelo cuando esta como sub-base es inversamente proporcional al índice de grupo.

Figura 1. Carta de Plasticidad AASHTO.



Fuente: AASHTO – 93.

Tabla 3. Tabla AASHTO para clasificación.

SISTEMA DE CLASIFICACIÓN DE SUELOS AASHTO											
Clasificación general	Materiales granulares (35% o menos pasa por el tamiz Nº 200)							Materiales limoso arcilloso (más del 35% pasa el tamiz Nº 200)			
Grupo:	A-1		A-3	A-2				A-4	A-5	A-6	A-7 A-7-5 A-7-6
	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				
Porcentaje que pasa: Nº 10 (2mm) Nº 40 (0,425mm) Nº 200 (0,075mm)	50 máx	-	-	-				-			
	30 máx	50 máx	51 mín	-				-			
	15 máx	25 máx	10 máx	35 máx				36 mín			
Características de la fracción que pasa por el tamiz Nº 40 Límite líquido Índice de plasticidad	-	-	-	40 máx	41 mín	40 máx	41 mín	40 máx	41 mín	40 máx	41 mín (2)
	6 máx		NP (1)	10 máx	10 máx	11 mín	11 mín	10 máx	10 máx	11 mín	11 mín
Índice de grupo	0	0	0	0			4 max	8 max	12 max	16 max	20 max
Constituyentes principales	Fracmentos de roca, grava y arena		Arena fina	Grava y arena arcillosa o limosa				Suelos limosos		Suelos arcillosos	
Características como subgrado	Excelente a bueno							Pobre a malo			
(1):	No plástico										
(2):	El índice de plasticidad del subgrupo A-7-5 es igual o menor al LL menos 30										
	El índice de plasticidad del subgrupo A-7-6 es mayor que LL menos 30										

Fuente: AASHTO - 93

4.1.3.2. Sistema de Clasificación de suelos SUCS

La clasificación se basa en las propiedades de plasticidad y en la distribución del tamaño de grano, según esta última, el sistema divide el suelo en dos grandes categorías:

Suelos de grano grueso (granulares): Son aquellos materiales en los cuáles el porcentaje retenido en la malla N°200 es superior al 50 %.

Dentro de ellos están las fracciones de arena y grava, son suelos donde la distribución del tamaño y la forma de los granos influye notablemente en las propiedades físico-mecánicas del suelo. El símbolo de cada grupo está formado por letras mayúsculas, que son las iniciales de los nombres ingleses de los suelos más típicos de ese grupo. El significado se especifica a continuación:

- G=Del término inglés Gravel, fracción de suelo más grueso o tamaño grava.
- S=Del término inglés Sand, fracción del suelo con tamaño de grano comprendido entre la malla N°4 y malla N°200.

Las gravas y arenas se separan por la malla N°4, de manera que un suelo pertenece al grupo genérico G, si más del 50% de su fracción gruesa (retenida en la malla N°200) no pasa por la malla N°40 y es del grupo genérico S, en caso contrario.

Las gravas y las arenas se sub-dividen en 4 tipos:

- a) materiales prácticamente limpios de finos, bien gradados.
 - W=Del término inglés Well, buena gradación del suelo, o sea que dentro de la masa de suelo hay predominio de un tamaño de grano. En combinación con los símbolos genéricos, se obtienen los grupos GW y SW.
- b) Materiales prácticamente limpios de finos, mal gradados.
 - P=del término inglés Poorly, mala gradación. Significa que dentro de la masa de suelo hay variedad en el tamaño de grano, aunque haya predominio de uno de ellos. Da lugar a los grupos GP y SP.
- c) Materiales con cantidad apreciable de finos no plásticos.

- M=Del término sueco Mo, fracción fina del suelo que no posee propiedades de plasticidad, o de tener, es muy baja. Da lugar a los grupos GM y SM.
- d) Materiales con cantidad apreciable de finos plásticos.
- C=Del término inglés Clay, fracción fina del suelo que posee propiedades de plasticidad. Da lugar a los grupos GC y SC.

Suelos de grano fino: También en este caso el sistema considera a los suelos agrupados, formándose el símbolo de cada grupo por dos letras mayúsculas, elegidas con un criterio similar al usado para los suelos gruesos y dando lugar a las siguientes divisiones:

- a) materiales orgánicos
 - M=Del término sueco Mo, fracción fina del suelo que no posee propiedades de plasticidad o de tener, es muy baja.
- b) Arcillas inorgánicas.
 - C=Del término inglés Clay, fracción fina del suelo que posee propiedades de plasticidad.
- c) Limos y arcillas orgánicas.
 - O=Del término inglés Organic, define a los suelos que tiene propiedades orgánicas como turba, Suelos no aptos para ingeniería.

Cada uno de estos 3 tipos de suelo se sub-dividen, según su límite líquido, en dos grupos. Si este es menor del 50%, es decir, si son suelos de compresibilidad baja o media, se añade el símbolo genérico.

- L=Del término inglés Low, suelos con baja plasticidad, son aquellos donde $LL < 50$. Obteniéndose de esta combinación los grupos ML, CL y OL.

Si los suelos son finos con límite líquido mayor del 50% o sea de alta compresibilidad, llevan tras el símbolo genérico:

- H=Del término inglés High, suelos con alta plasticidad, aquellos donde $LL > 50$. Teniéndose así los grupos MH, CH y OH.

Ha de notarse que las letras L y H no se refieren a alta o baja plasticidad, pues esta propiedad del suelo ha de expresarse en función de 2 parámetros (LL e IP), mientras que en el caso actual solo el valor del límite líquido interviene. En la tabla XXV se presentan los factores a considerar en la clasificación de un suelo de acuerdo con el Sistema Unificado de Clasificación de los suelos (SUCS).

- Gravos o arenas son: GW, GP, SW, SP, si menos del 5% del material que pasa a través del tamiz N°200, la designación bien graduada o grada depende de los valores característicos para Cu y Cc.
- Gravos y arenas son: GM, GC, SM, SC, si más del 12% del material que pasa a través del tamiz N°200; la designación limo o arcilla se determina después de obtener los valores de los límites líquido y plástico de la fracción menor al tamiz N°40 y utilizando los criterios de carta de plasticidad.
- Las gravas y las arenas se pueden clasificar así:

Tabla 4. Tabla AASHTO para clasificación.

GW-GC	SW-SC	GP-GC	SP-SC
GW-GM	SW-SM	GP-GM	SP-SM

Fuente: ASTM

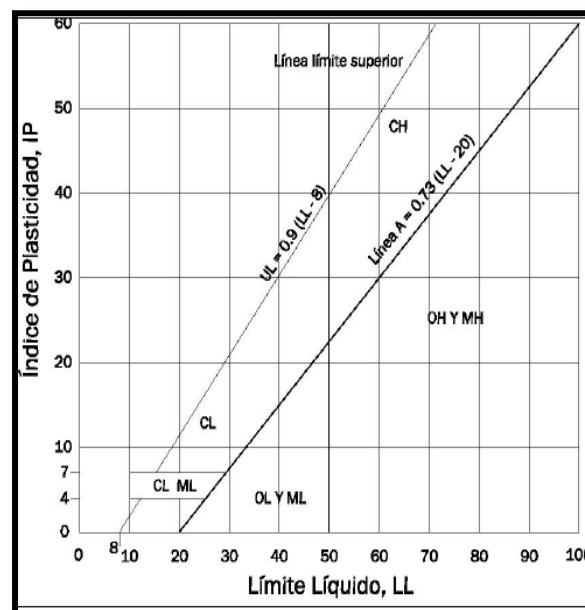
Si entre 5 y 12 % del material pasa a través del tamiz N°200.

- Los suelos de grano fino (más del 50% pasa por el tamiz N°200) son: ML, OL, o CL. Si los límites líquidos son menores que 50%.
- Los suelos de grano fino son: MH, OH o CH, si los límites líquidos son superiores a 50%. Los límite líquido y plástico se ejecutan sobre material correspondiente a la fracción menor del tamiz N°40 de todos los suelos, incluyendo gravas, arenas y suelos finos, utilizando en la ejecución los procedimientos del ensayo del límite y plástico.

- Estos límites se utilizan con la carta de plasticidad, para determinar el prefijo M, O o C, dependiendo de la localización de las coordenadas de plasticidad del suelo dentro de la carta.

Una descripción visual del suelo debe siempre incluirse conjuntamente con el símbolo unificado para completar la clasificación igualmente para el sistema de clasificación AASHTO, se presenta también una carta de plasticidad para el SUCS, este cuadro es otra contribución de Casagrande al sistema y la línea A que se encuentra en él, es conocida como línea A de Casagrande. De acuerdo con la sugerencia del cuerpo de ingenieros en el sentido de que no se han encontrado suelos con coordenadas superiores a las determinadas por la línea “límite superior” mostrada. Para la clasificación de los suelos de grano fino y suelos de granos gruesos con parte de finos. Los límites de Atterberg que se grafican en el área sombreada son clasificaciones de frontera y requieren el símbolo de símbolos duales. La designación limo o arcilla se determina después de obtener los valores de los límites líquido y plástico de la fracción menor al tamiz N°40 y utilizando los criterios de la carta de plasticidad:

Figura 2. Carta de Plasticidad SUCS.



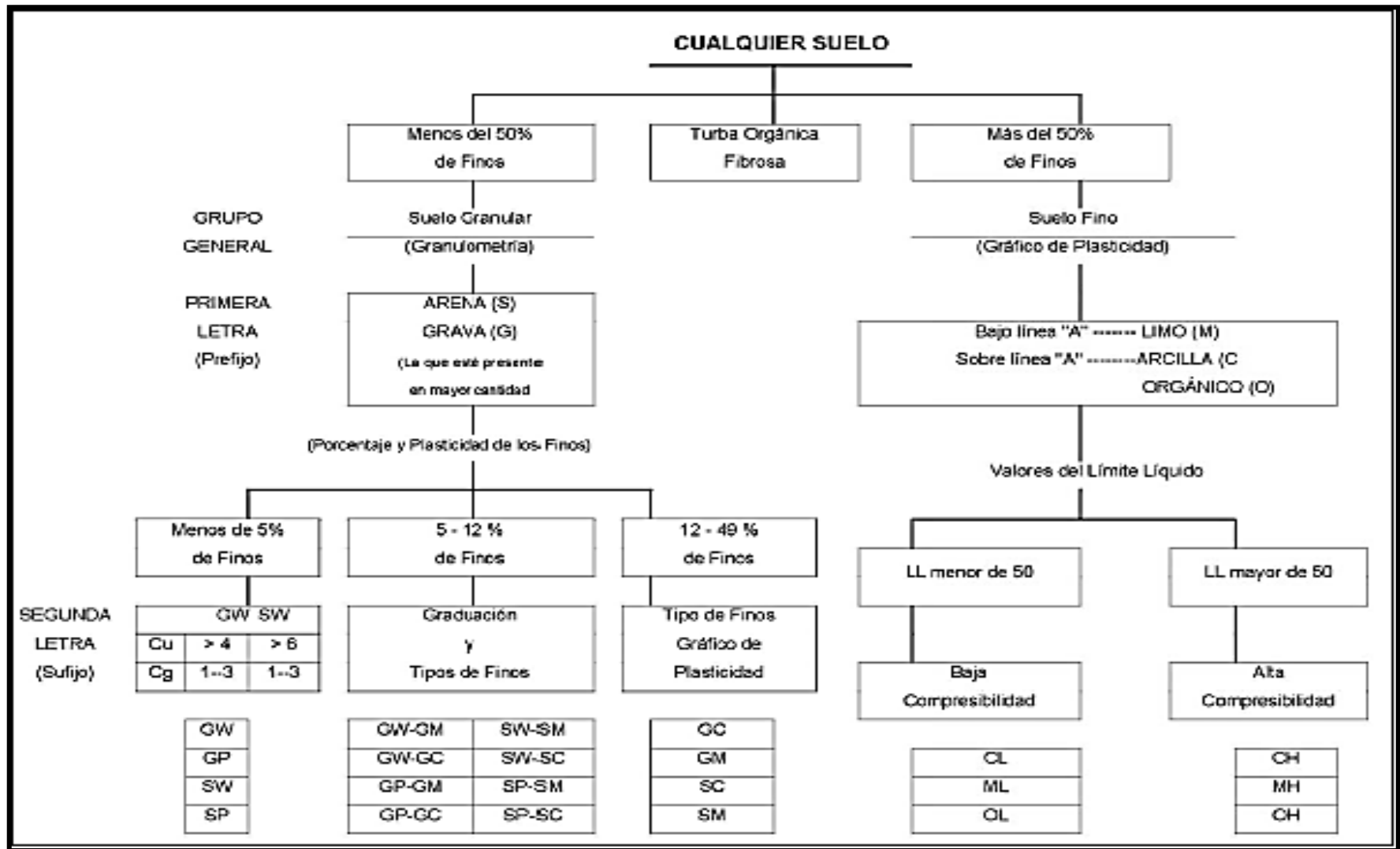
Fuente: ASTM

Tabla 5. Tabla SUCS para clasificación

SISTEMA DE CLASIFICACIÓN DE SUELOS UNIFICADO "U.S.C.S."							
DIVISIONES PRINCIPALES		Símbolos del grupo	NOMBRES TÍPICOS	IDENTIFICACIÓN DE LABORATORIO			
SUELOS DE GRANO GRUESO	GRAVAS	Gravas limpias	GW	Gravas, bien graduadas, mezclas grava-arena, pocos finos o sin finos.	Determinar porcentaje de grava y arena en la curva granulométrica. Cu=D60/D10>4 Cc=(D30)/D10xD60 entre 1 y 3		
		(sin o con pocos finos)	GP	Gravas mal graduadas, mezclas grava-arena, pocos finos o sin finos.		No cumplen con las especificaciones de granulometría para GW.	
		Más de la mitad de la fracción gruesa es retenida por el tamiz número 4 (4,76 mm)	Gravas con finos (apreciable cantidad de finos)	GM	Gravas limosas, mezclas grava-arena-limo.		Límites de Atterberg debajo de la línea A o IP<4.
				GC	Gravas arcillosas, mezclas grava-arena-arcilla.	Límites de Atterberg sobre la línea A con IP>7.	
	ARENAS	Arenas limpias	SW	Arenas bien graduadas, arenas con grava, pocos finos o sin finos.	<5% ->GW,GP,SW,SP. >12% ->GM,GC,SM,SC.	Cu=D60/D10>6 Cc=(D30)/D10xD60 entre 1 y 3	
			(pocos o sin finos)	SP			Arenas mal graduadas, arenas con grava, pocos finos o sin finos.
		Más de la mitad de la fracción gruesa pasa por el tamiz número 4 (4,76 mm)	Arenas con finos (apreciable cantidad de finos)	SM	Arenas limosas, mezclas de arena y limo.	Los límites situados en la zona rayada con IP entre 4 y 7 son casos intermedios que precisan de símbolo doble.	
				SC	Arenas arcillosas, mezclas arena-arcilla.		
			Limos y arcillas:	ML	Limos inorgánicos y arenas muy finas, limos limpios, arenas finas, limosas o arcillosas, o limos arcillosos con ligera plasticidad.		
				CL	Arcillas inorgánicas de plasticidad baja a media, arcillas con grava, arcillas arenosas, arcillas limosas.		
Limos y arcillas:	OL	Limos orgánicos y arcillas orgánicas limosas de baja plasticidad.					
	MH	Limos inorgánicos, suelos arenosos finos o limosos con mica o diatomeas, limos elásticos.					
	CH	Arcillas inorgánicas de plasticidad alta.					
	OH	Arcillas orgánicas de plasticidad media a elevada; limos orgánicos.					
Sueles muy orgánicos		PT	Turba y otros suelos de alto contenido orgánico.				

Fuente: ASTM

Figura 3. Modelo de Clasificación SUCS



Fuente: ASTM

Representación de la distribución granulométrica

Siempre que se cuente con suficiente número de puntos, la representación gráfica de la distribución granulométrica debe estimarse preferible a la numérica en tablas. La gráfica granulométrica suele dibujarse con porcentajes como ordenadas y tamaños de las partículas como abscisas. Las ordenadas se refieren al porcentaje, en peso de las partículas menores que el tamaño correspondiente.

La representación en escala semi-logarítmica (eje de abscisas en escala logarítmica) resulta preferible a la simple representación natural, en la primera se dispone de mayor amplitud en los tamaños finos y muy finos, que en escala natural resultan muy comprimidos usando un módulo práctico de escala.

La forma de la curva da inmediata idea de la distribución granulométrica del suelo; un suelo constituido por partículas de un solo tamaño, estará representado por una línea vertical (pues el 100% de sus partículas, en peso, es de menor tamaño que cualquier mayor que el que el suelo posea); una curva muy tendida indica gran variedad en tamaños (suelo bien graduado).

Como una medida simple de la uniformidad de un suelo, Allen Hazen propuso el coeficiente de uniformidad.

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$$

Dónde:

D₆₀: Tamaño tal que, el 60% en peso del suelo, sea igual o menor.

D₁₀: Llamado por Hazen diámetro efectivo; es el tamaño tal que sea igual o mayor que el 10%, en peso del suelo.

En realidad es un coeficiente de no uniformidad, ya que su valor numérico decrece cuando la uniformidad aumenta. Los suelos con $C_u < 3$ se considera muy uniforme; aún las arenas naturales muy uniformes rara vez presentan $C_u < 2$.

Como dato complementario, necesario para definir la uniformidad, se define el coeficiente de curvatura del suelo con la expresión.

$$C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{60} \cdot D_{10}}$$

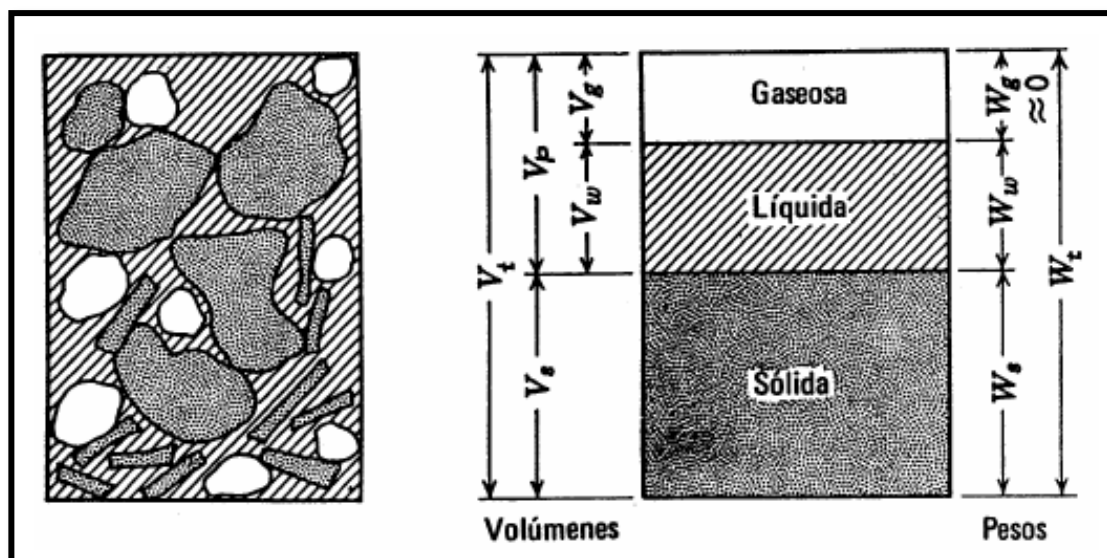
Esta relación tiene un valor entre 1 y 3 en suelos bien graduados, con amplio margen de tamaños de partículas y cantidades apreciables de cada tamaño intermedio.

4.1.4. Relación de Fases

En los suelos se distinguen tres fases: la sólida, constituida por las partículas minerales, la líquida que generalmente es el agua contenida en la masa de suelo, y la gaseosa que es el aire que se encuentra dentro de los poros.

Entre estas fases es necesario definir un conjunto de relaciones que están vinculadas a sus pesos y volúmenes. Las cuales permiten establecer el comportamiento del suelo desde el punto de vista geotécnico. En la figura 4 se presenta un esquema de una muestra de suelo con sus tres fases y en ella se acotan las siglas de los pesos y volúmenes cuyo uso es de interés.

Figura 4. Esquema de un suelo parcialmente saturado.



Las relaciones entre los pesos y volúmenes más utilizados en el estudio de los pavimentos son los siguientes:

- a) Peso unitario total o densidad húmeda del suelo

$$\gamma_t = \frac{W_t}{V_t} = \frac{W_s + W_w}{V_t}$$

- b) Peso unitario de las partículas sólidas

$$\gamma_s = \frac{W_s}{V_s}$$

- c) Peso unitario seco o densidad del suelo

$$\gamma_d = \frac{W_s}{V_t}$$

- d) La expresión anterior también se puede anotar de la siguiente forma:

$$\gamma_d = \frac{\gamma_t}{1 + \frac{w}{100}}$$

- e) Peso específico relativo de los sólidos del suelo o gravedad específica.

$$S_s = \frac{\gamma_s}{\gamma_w} = \frac{W_s}{V_s * \gamma_w}$$

- f) Relación de vacíos.

$$e = \frac{V_v}{V_s}$$

En teoría se puede variar de 0 a infinito (vacío perfecto), sin embargo, en la práctica sus límites están comprendidos entre 0.25 para arenas muy compactas con finos, y 15 para arcillas altamente compresibles.

- g) Porosidad

$$n = \frac{V_v}{V_t}$$

h) Grado de saturación.

$$G_w (\%) = \frac{V_w}{V_v} * 100$$

El grado de saturación varía de 0% en suelos secos a 100% en un suelo en el que todos los vacíos estuvieran llenos de agua, al que se llama suelo saturado.

i) Contenido de humedad.

$$W (\%) = \frac{W_w}{W_v} * 100$$

En teoría el contenido de agua varía de 0 a infinito, sin embargo, en la práctica es difícil encontrar valores superiores a 100%.

4.2. Propiedades ingenieriles

4.2.1. Valor Soporte del Suelo (CBR)

El ensayo CBR mide la resistencia al corte de un suelo bajo condiciones de humedad y densidad controladas. El ensayo permite obtener un número de la relación de soporte, pero de la aseveración anterior es evidente que este número no es constante para un suelo dado sino que se aplica solo al estado en el cual se encontraba el suelo durante el ensayo. De paso, es interesante comentar que el experimento puede hacerse en el terreno o en un suelo compactado.

La explicación de la resistencia al esfuerzo cortante de los suelos friccionantes parte de los mecanismos de la fricción mecánica, para una aplicación más estricta de esta ley a una masa de partículas discretas, se las considera actuando en los puntos de contacto, si todas las demás circunstancias prevalecen y, por lo tanto, mayores serán las concentraciones de presión en ellos.

Análogamente, los puntos de contacto aumentan con la mejor distribución granulométrica. Las presiones en los puntos de contacto cobran importancia si se

relacionan con la resistencia individual de los granos del material, pues bajo aquellas, estos pueden llegar a deformarse o a romperse.

La resistencia al esfuerzo cortante de una masa de suelo friccionante depende de las siguientes características del propio material:

- Compacidad
- Forma de los granos
- Distribución granulométrica
- Resistencia individual de las partículas
- Tamaño de las partículas.

El método de CBR fue propuesto en 1929 por los ingenieros T. Staton y D. J. Porter, del departamento de Carreteras del Estado de California, como una forma de clasificación de la capacidad de un suelo para ser utilizado como sub-rasante o material de base en construcción de carreteras (pavimentos flexibles). Durante la segunda guerra mundial, el Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos adoptó este ensayo para utilizarlo en la construcción de aeropuertos.

El número CBR (o simplemente, CBR) se obtiene como la relación de la carga unitaria (en libras por pulgada cuadrada) necesaria para lograr una cierta profundidad de penetración del pistón de penetración dentro de la muestra compactada de suelo a un contenido de humedad y densidad dadas con respecto a la carga unitaria patrón requerida para obtener la misma profundidad de penetración en una muestra estándar de material triturado. En forma de ecuación esto es:

$$\text{CBR} = \frac{\text{carga unitaria del ensayo}}{\text{carga unitaria patrón}} * 100$$

De esta ecuación se puede ver que el número CBR es un porcentaje de la carga unitaria patrón. En la práctica, el símbolo de porcentaje se quita y la relación se presenta simplemente por el número entero, como 3, 45, 98.

El número CBR usualmente se basa en la relación de carga para una penetración de 2.5 mm. Sin embargo, si el valor de CBR a una penetración de 5.0 mm. es mayor, el ensayo deberá repetirse (ordinariamente). Si un segundo ensayo produce nuevamente un valor de CBR mayor de 5.0 mm. de penetración, dicho valor debe aceptarse como valor final del ensayo.

Para determinar el CBR se toma como material de comparación la piedra triturada. Las resistencias a la penetración que presenta ésta son los siguientes:

<i>Para 0.1" pulgadas de penetración.....</i>	<i>1000 lb. /pulg2 ó 70 Kg. /cm2.</i>
<i>Para 0.2" pulgadas de penetración.....</i>	<i>1500 lb. /pulg2 ó 105 Kg. /cm2.</i>
<i>Para 0.3" pulgadas de penetración.....</i>	<i>1900 lb. /pulg2 ó 133 Kg. /cm2.</i>
<i>Para 0.4" pulgadas de penetración.....</i>	<i>2300 lb. /pulg2 ó 161 Kg. /cm2.</i>
<i>Para 0.5" pulgadas de penetración.....</i>	<i>2600 lb. /pulg2 ó 182 Kg. /cm2.</i>

Los ensayos de CBR se hacen usualmente sobre muestras compactadas al contenido de humedad óptimo para el suelo específico, determinado utilizando el ensayo de compactación estándar (o modificada).

A menudo se compactan dos moldes de suelo, uno para penetración inmediata y otro para penetración después de dejado saturar por un período de 96 horas. El segundo espécimen es saturado durante 96 horas con una sobrecarga aproximadamente igual al peso del pavimento que se utilizará en el campo pero en ningún caso el peso de la sobrecarga será menor de 4.5 Kg. Es necesario durante este período tomar registros de expansión para instantes escogidos arbitrariamente y al final del período de saturación se hace la penetración para obtener el valor de CBR para el suelo en condición de saturación completa. En ambos ensayos de penetración para determinar los valores de CBR se coloca una sobrecarga sobre la muestra de la misma magnitud de la que se utilizó durante el ensayo de expansión. El ensayo sobre la muestra saturada cumple dos propósitos:

1. Dar información sobre la expansión esperada en el suelo bajo la estructura de pavimento cuando el suelo se satura.
2. Dar indicación de la pérdida de resistencia debida a la saturación en el campo.

El ensayo de penetración se lleva a cabo en una máquina de compresión utilizando una tasa de deformación unitaria de 1.27 mm./min. Se toman lecturas de carga contra penetración a cada 0.5 mm. de penetración hasta llegar a un valor de 5.0 mm. a partir del cual se toman lecturas con incrementos de 2.5 mm. Hasta obtener una penetración total de 12.7 mm.

El valor de CBR se utiliza para establecer una relación entre el comportamiento de los suelos principalmente con fines de utilización con base y sub-rasante bajo pavimentos de carreteras y aeropuertos. La tabla siguiente da calificaciones típicas.

Tabla 6. CBR y clasificación.

No CBR	Clasificación General	Usos	SISTEMA DE CLASIFICACIÓN	
			Unificado	AASHTO
0-3	Muy pobre	Subrasante	OH, CH, MH, OL	A5, A6, A7
3-7	Pobre a regular	Subrasante	OH, CH, MH, OL	A1, A5, A6, A7
7-20	Regular	Sub-base	OL, CL, ML, SC, SM, SP	A2, A4, A6, A7
20-50	Bueno	Base, sub-base	CM, GC, SW, SM, SP, GP	A1b, A2 5, A3, A2 6
> 50	Excelente	Base	GW, GM	A1a, A2 1, A3

Fuente: Braja M. Das

Para diferentes valores de CBR y cargas por rueda o por eje, se han determinado los respectivos espesores de pavimentos, en base a datos experimentales. Los diferentes organismos viales y técnicos, han elaborado curvas para la determinación de espesores de pavimentos flexibles, en función CBR.

4.2.2. Módulo Resiliente

Seed introdujo el término módulo resiliente (M_r), como la relación que existe entre la magnitud del esfuerzo desviador cíclico ($q = \sigma_1 - \sigma_3$) en compresión triaxial y la deformación axial recuperable (elástica) o resiliente (ϵ_{1r}):

$$M_r = \frac{q}{\epsilon_{1r}} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\epsilon_{1r}} \quad (1)$$

σ_1 es el esfuerzo cíclico axial, σ_3 es la presión de confinamiento y ε_{3r} es la deformación horizontal resiliente.

La ecuación (1) es aplicable para el caso en el cual la presión de confinamiento se mantiene constante. Cuando esta presión varía, se usa la ecuación elástica generalizada de Hooke obteniendo:

$$M_r = \frac{\Delta(\sigma_1 - \sigma_3)\Delta(\sigma_1 + 2\sigma_3)}{\varepsilon_{1r}\Delta(\sigma_1 + \sigma_3)2\varepsilon_{3r}\Delta\sigma_3} \quad (2)$$

Los materiales que se utilizan para carreteras, representados por las terracerías o el propio terreno de cimentación de éstas, e inclusive el cuerpo del pavimento se somete a cargas de tipo dinámico de diversas magnitudes. Por lo que para tomar en cuenta la naturaleza cíclica de las cargas que actúan en los materiales de la estructura del pavimento y de la misma forma del comportamiento no lineal y “resiliente” de los materiales, se han llevado a cabo investigaciones experimentales con el fin de rescatar información valiosa sobre el comportamiento esfuerzo-deformación de los materiales.

Estas deformaciones resilientes o elásticas son de recuperación instantánea. Denominándose deformaciones plásticas las que permanecen en el pavimento una vez que ha cesado la acción de las cargas; no obstante, al tenerse cargas móviles las deformaciones permanentes se van acumulando, no antes sin denotar que en ciclos intermedios la deformación permanente para cada ciclo disminuye, hasta que prácticamente desaparece en los ciclos finales. La muestra llega así a un estado tal en que toda la deformación es recuperable; es en ese momento en el que se tiene un comportamiento resiliente.

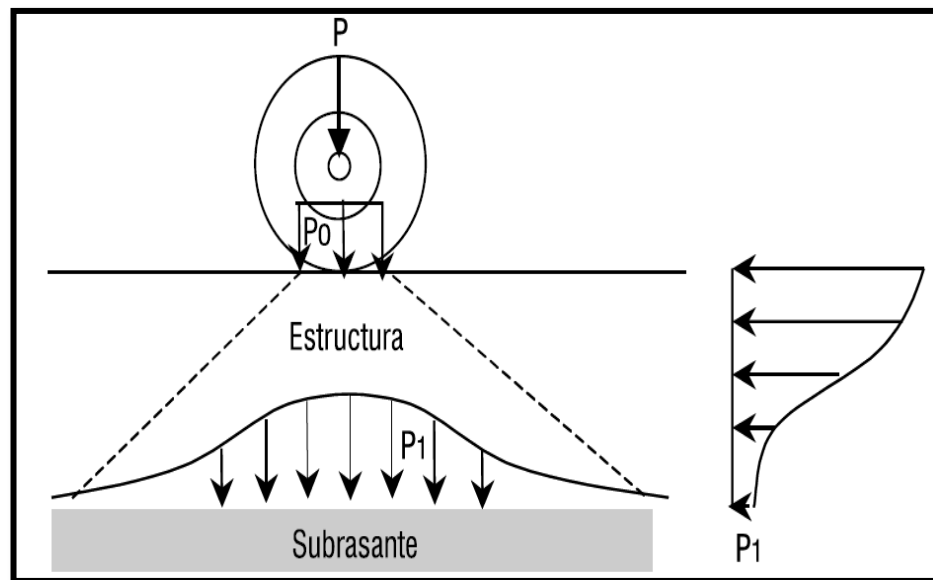
La metodología actual para diseño de pavimentos utilizada por el método AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials) considera que la propiedad fundamental para caracterizar los materiales constitutivos de la sección de una carretera es el parámetro denominado módulo resiliente.

Es por ello que el especialista encargado del diseño, construcción y conservación de tales estructuras, debe de tener el conocimiento básico de lo que el parámetro módulo

resiliente representa, de la prueba de laboratorio a partir de la cual se obtiene y de los factores que hay que considerar para la selección del valor adecuado para su uso en una determinada metodología de diseño.

Las estructura de los pavimentos para calles, carreteras y autopistas están sometidas a cargas repetidas impuestas por los vehículos. Este tipo de cargas son dinámicas de corta duración que llevan a la fatiga a la estructura del pavimento en un periodo de tiempo, el cual también depende de las propiedades geométricas y dinámicas de los materiales, además del proceso constructivo. La transmisión de las cargas está en función a la presión de inflado de las llantas de los vehículos, las cuales oscilan de 0.2 MPa a 0.7 MPa en la figura 5 se presenta un esquema sobre dicha transferencia de cargas.

Figura 5. Transmisión de cargas



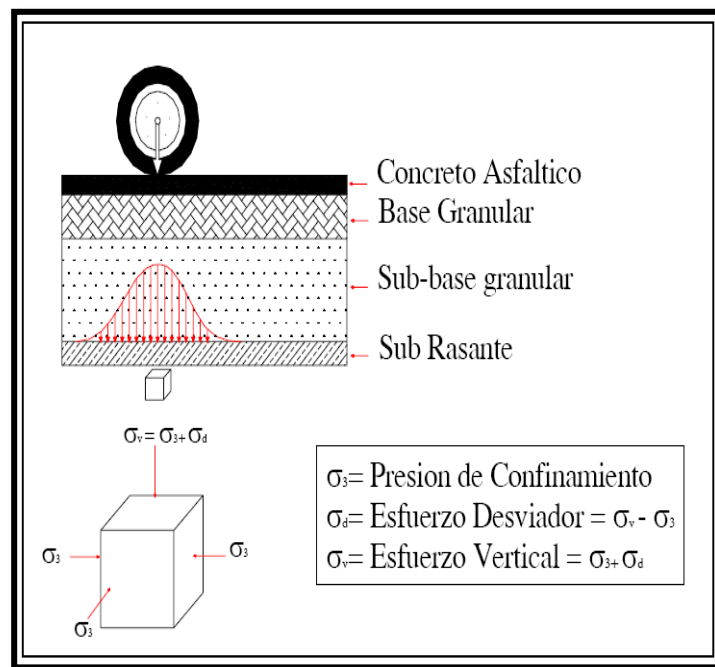
Fuente: Módulo Resiliente de Suelos Fino-Granulares

El parámetro “módulo de resiliencia” de los suelos se desarrolló en California (U.S.A.) en la década de los cincuentas gracias a las investigaciones de Francis Hveem en la Universidad de California, en Berkeley, siendo el primero en reconocer la importancia de las propiedades resilientes de las estructuras de pavimento, y efectuar la identificación de estas propiedades con la aparición de grietas sobre la

superficie de los pavimentos, siendo éstas por influencia de las cargas repetidas como resultado del tráfico.

Una prueba triaxial de carga cíclica o repetida es por efecto de una serie de pulsos de presión axial, separados por un intervalo de descarga, y aplicado a una muestra de suelo compactado con la inclusión de una presión de confinamiento constante. No obstante, desde varias décadas han existido ensayos en los que se ha considerado la importancia de las pruebas del tipo triaxial. Estos ensayos se realizaron siguiendo el procedimiento de la norma Resilient Modulus of Uriband Granular Base/Sub base Materials and Subgrade Soils – AASHTO. T294-92I propuesto en 1992, método que originalmente fue desarrollado por S.H.R.P. (Strategic Highway Research Program), conocido como “Protocolo 846”, y que es una modificación del ensayo AASHTO. T274. Cuando un vehículo circula sobre el pavimento, los neumáticos transmiten cargas que son absorbidas por la estructura, entonces un elemento diferencial de suelo ubicado en la subrasante, estará sometido a esfuerzos que a su vez inducen un estado de deformaciones, tal como se muestra en la Fig. 6.

Figura 6. Estado de esfuerzos provocados en la sub rasante por el paso de un vehículo en movimiento.



Fuente: Ensayo de Módulo Resiliente

Si se considera al material de subrasante, con un comportamiento elástico, isótropo y homogéneo, hipótesis básicas de la mecánica de suelos, los esfuerzos y las deformaciones se relacionarán con el módulo de elasticidad y la relación Poisson, propios del material. Pero la respuesta real, está en función de las características propias de los materiales que conforman el pavimento y donde las cargas impuestas por el tránsito tienen un carácter dinámico con muy cortos tiempos de aplicación. Luego la deformación total inducida, se recupera al cesar la carga aplicada. Esto implica, que en estricto rigor, los materiales no presentan un comportamiento elástico, y por ello se introduce el término de módulo resiliente, que corresponde a un “módulo elástico supuesto”, el cual relaciona las sollicitaciones de cargas aplicadas con las deformaciones recuperables.

La determinación del módulo resiliente en los suelos, se realiza mediante ensayos triaxiales dinámicos de cargas repetidas en probetas cilíndricas que simulan un elemento de suelo. Estas probetas de suelo, confeccionadas o talladas de muestras inalteradas, serán ensayadas luego de proporcionarles condiciones representativas que se espera tener en el campo.

Las probetas se someten a una presión de confinamiento σ_3 y a un esfuerzo desviador σ_d , este estado de esfuerzos pretende reproducir la condición del suelo cuando es sometido a las cargas sucesivas del tráfico. La respuesta típica esperada de este ensayo, se puede observar en la Fig. 7 y a partir de este ensayo se puede definir matemáticamente el módulo resiliente del material, según la expresión indicada en la ecuación Ec.3.

$$M_r = \frac{\sigma_d}{\epsilon_r} \quad (3)$$

Dónde:

M_r = Módulo resiliente.

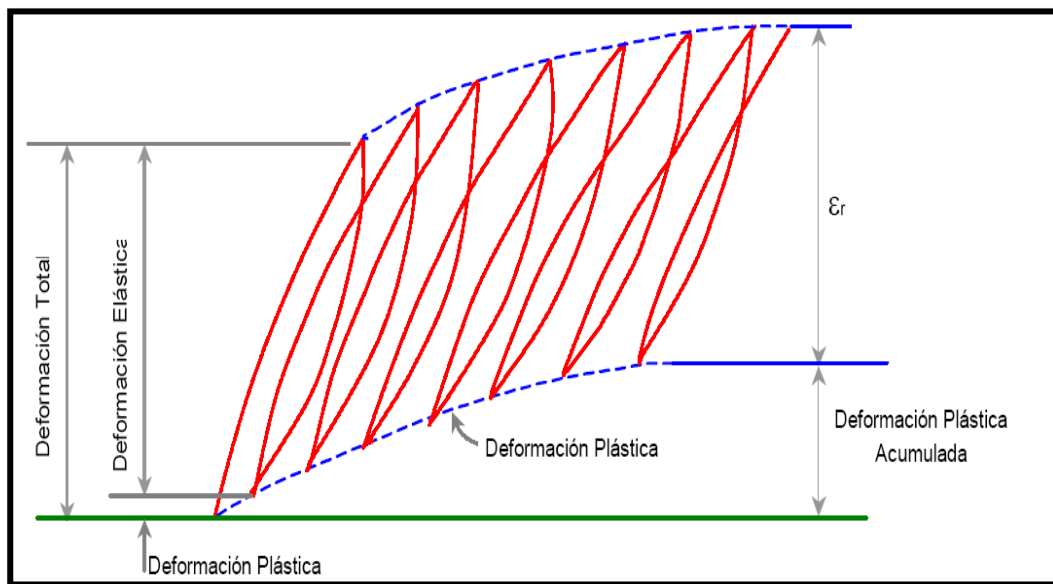
σ_d = Esfuerzo desviador.

ϵ_r = Deformación recuperable medida en la dirección axial.

Luego de un determinado número de repeticiones, cabe anotar que los resultados de módulo resiliente, son influenciados principalmente por tres factores:

- Estado de tensiones (esfuerzo confinamiento y esfuerzo desviador).
- Tipo de suelo y estructura interparticular (métodos de compactación).
- Estado físico del suelo (humedad y densidad).

Figura 7. Deformaciones bajo carga repetidas.



Fuente: Ensayo de Módulo Resiliente

4.2.2.1. Principios del Módulo Resiliente

La necesidad de mejorar la modelización de los suelos ante las cargas dinámicas determinó una evolución en las ecuaciones constitutivas de estos materiales, hasta arribar a la que actualmente ha adoptado la AASHTO 2002

$$M_r = k_1 P_a \left(\frac{\theta}{P_a} \right)^{k_2} \left(\frac{\tau_{oct}}{P_a} + 1 \right)^{k_3} \quad (4)$$

Dónde:

M_r : Módulo Resiliente (MPa)

$\Theta = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$: Primer invariante de tensiones (MPa)

$$T_{\text{oct}} = \frac{\sqrt{2}}{3} \sigma_d: \text{Tensión octaédrica (MPa)}$$

Pa : Presión atmosférica (MPa)

K₁, K₂, K₃: Constantes experimentales

Los procedimientos de diseño de pavimentos flexibles de base empírico – mecanicistas basados en la filosofía de la Guía de Diseño Empírico – Mecanística de Pavimentos (NCHRP Project 1 37) conocida como AASHTO 2002, requieren la adopción de algunas simplificaciones y ajustes para considerar las condiciones locales relacionadas con las características de los materiales, el clima y las técnicas de construcción. Como las ecuaciones constitutivas y las leyes de falla no son de fácil obtención o no se dispone de los equipos de ensayos requeridas para determinarlas, la Guía citada, establece para la determinación de las Propiedades de los Materiales, NIVELES JERARQUICOS de acuerdo a la categoría de la ruta, o sea la importancia, costo y dificultades del proyecto en estudio con el fin de reducir los datos de diseño. Los niveles van del 1 al 3 en orden decreciente a la importancia de la obra como:

NIVEL 1: Se llevan a cabo ensayos de laboratorio o in situ para determinar las ecuaciones constitutivas midiendo el módulo resiliente Mr y estableciendo la ecuación constitutiva.

NIVEL 2: Se usan correlaciones con otras propiedades de los materiales determinados en laboratorio o in situ, para determinar las ecuaciones constitutivas (Se estima el Módulo Resiliente Mr).

NIVEL 3: Se adoptan valores apropiados basados en la experiencia con muy pocos ensayos (Se adopta un valor de Módulo Resiliente Mr).

Para el NIVEL 1 se determina la ecuación constitutiva (4) a través del ensayo triaxial dinámico mediante los procedimientos descritos en la norma AASHTO T274: Módulo Resiliente de Suelos de Subrasante. El mismo consiste en someter a una probeta cilíndrica de suelos a diferentes estados de carga (distintas presiones de confinamiento y distintos tensores desviadores) de acuerdo a un protocolo establecido. Durante el ensayo se mide para cada ciclo de carga, el nivel de

solicitud aplicada y la deformación resultante, en forma automática a través de un equipo de adquisición de datos, resultando el módulo resiliente M_r como:

$$M_r = \frac{\sigma_d * L}{\Delta L} \quad (5)$$

Dónde:

σ_d : Esfuerzo desviador pulsante (MPa)

ΔL : Diferencia de longitud en la dirección axial

L : Longitud del espécimen en laboratorio

Para el NIVEL 2, distintos autores han propuesto varios modelos de predicción para estimar las constantes experimentales de la ecuación (4) correlacionando estas con otras propiedades de los suelos cuando no es posible la ejecución del ensayo triaxial dinámico.

Para el NIVEL 3, la Guía de Diseño de Pavimentos presenta una tabla con algunos rangos de valores posibles y usuales del módulo resiliente en función de la clasificación AASHTO de los suelos, con una significación meramente orientativa, e independientes del estado de tensiones actuantes y de las condiciones de servicio como por ejemplo, el contenido de humedad o la densidad del suelo como se muestra en la tabla 7:

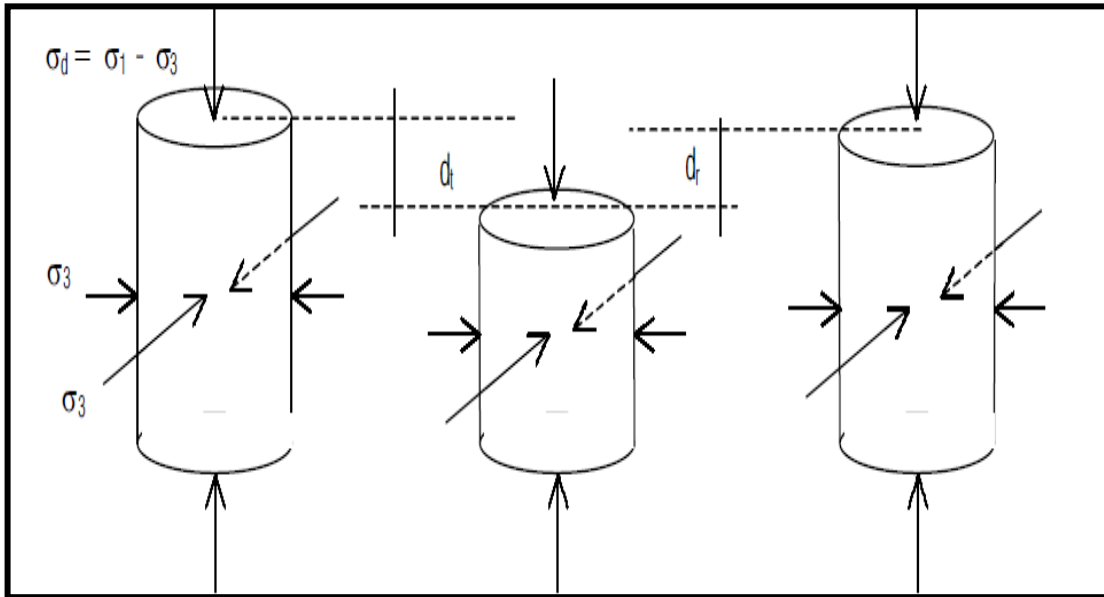
Tabla 7. Valores representativos del M_r según la guía AASHTO.

Tipo de Suelo	Rango M_r (MPa)		M_r Típico (MPa)
	Mínimo	Máximo	
A-1-a	265	289	276
A-1-b	245	276	262
A-2-4	193	258	220
A-2-5	165	227	193
A-2-6	148	214	179
A-2-7	148	193	165
A-3	169	245	200
A-4	148	200	165
A-5	117	176	138
A-6	93	165	117
A-7-5	55	121	83
A-7-6	34	93	55

Fuente: Módulo Resiliente de Suelos Finogranulares.

Al aplicar una carga creciente se incrementa la deformación; cuando la carga se reduce la deformación también se reduce, pero no toda ella se recupera. Figura 8.

Figura 8. Esquema de esfuerzos al que son sometidas las muestras de ensayo



Fuente: Módulo Resiliente de Suelos Finogranulares.

Dónde:

σ_3 = Esfuerzo de confinamiento

σ_1 = Esfuerzo axial

$\sigma_d = \sigma_1 - \sigma_3$ = Esfuerzo desviador

d_t = Deformación total

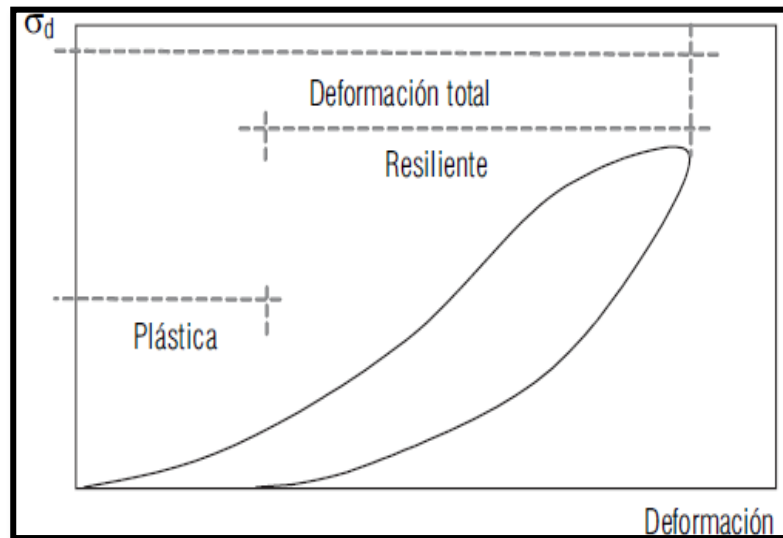
d_r = Deformación recuperada

$d_t - d_r$ = Deformación remanente

Por lo tanto la deformación total se compone de dos partes: una plástica o permanente, y una elástica o resiliente. Únicamente, la resiliente o recuperada se utiliza para calcular el módulo resiliente.

En la figura 9 se presenta una secuencia de carga y descarga y los parámetros asociados.

Figura 9. Deformación total: plástica más elástica o resiliente



Fuente: Módulo Resiliente de Suelos Finogranulares.

5. Determinación del Módulo Resiliente

5.1. Método de Ensayo

El método de ensayo para determinar el Módulo Resiliente, basado en la norma AASHTO T274 es presentado en el manual de ensayos de suelos y materiales de la ABC. El ensayo consiste en construir una probeta cilíndrica correspondiente a una muestra de suelo tratado o no tratado, remoldeada la cual se confina en una celda triaxial que permite aplicar una variedad de presiones de confinamiento a la muestra con el objeto de simular las condiciones a las que estará sometido el suelo como parte sustentable de la estructura del pavimento.

Luego, a través de un adecuado sistema de aplicación de carga, se somete a la probeta aun gran número de pulsos de magnitud y duración determinadas.

En este ensayo se registra tanto la fuerza como las deformaciones producidas en la muestra

5.1.1. Objeto

Este método cubre los procedimientos normalizados para la determinación del módulo elástico-dinámico (de resiliencia) de los suelos. Incluye la preparación y ensayo de suelos no tratados, bajo condiciones que representan una simulación razonable de las características físicas y de los estados de esfuerzos de los materiales de la subrasante, bajo pavimentos flexibles sometidos a las cargas debidas al tránsito.

Los métodos descritos, son aplicables a muestras inalteradas de materiales naturales, a muestras compactadas de sub-rasante y a muestras transportadas, preparadas para ser ensayadas, por compactación en el laboratorio.

Los valores del módulo resiliente (elástico-dinámico) determinados con estos procedimientos, pueden ser empleados en las teorías de sistema de capas elástico-lineales y elástico-no lineales, para calcular la respuesta física de las estructuras de pavimentos.

5.1.2. Uso y significado

El ensayo de módulo resiliente, proporciona la relación básica constitutiva entre esfuerzo y deformación, de los materiales de construcción de pavimentos flexibles para su empleo en el análisis del sistema de capas en pavimentos.

También, proporciona un medio de evaluación de los materiales de construcción de pavimentos, incluyendo suelos de subrasante, bajo una variedad de condiciones ambientales y de estado de esfuerzos, que simulen realísticamente las situaciones existentes en pavimentos sometidos a cargas móviles del tránsito.

5.1.3. Equipos y Materiales

Cámara de compresión triaxial: MODELO: T - 130 SOILTEST, INC – EVANSTON, USA.

Ultima Calibración: 27/05/10 TÉCNICAS CB S.A.C. SANTA CRUZ, BOLIVIA.

Cámara de compresión triaxial.- La cámara de compresión triaxial se utiliza para contener la muestra y el fluido de confinamiento durante el ensayo. En la Figura 10 se muestra una cámara adecuada para emplear en el ensayo de resiliencia de suelos.

Figura 10. Cámara Triaxial



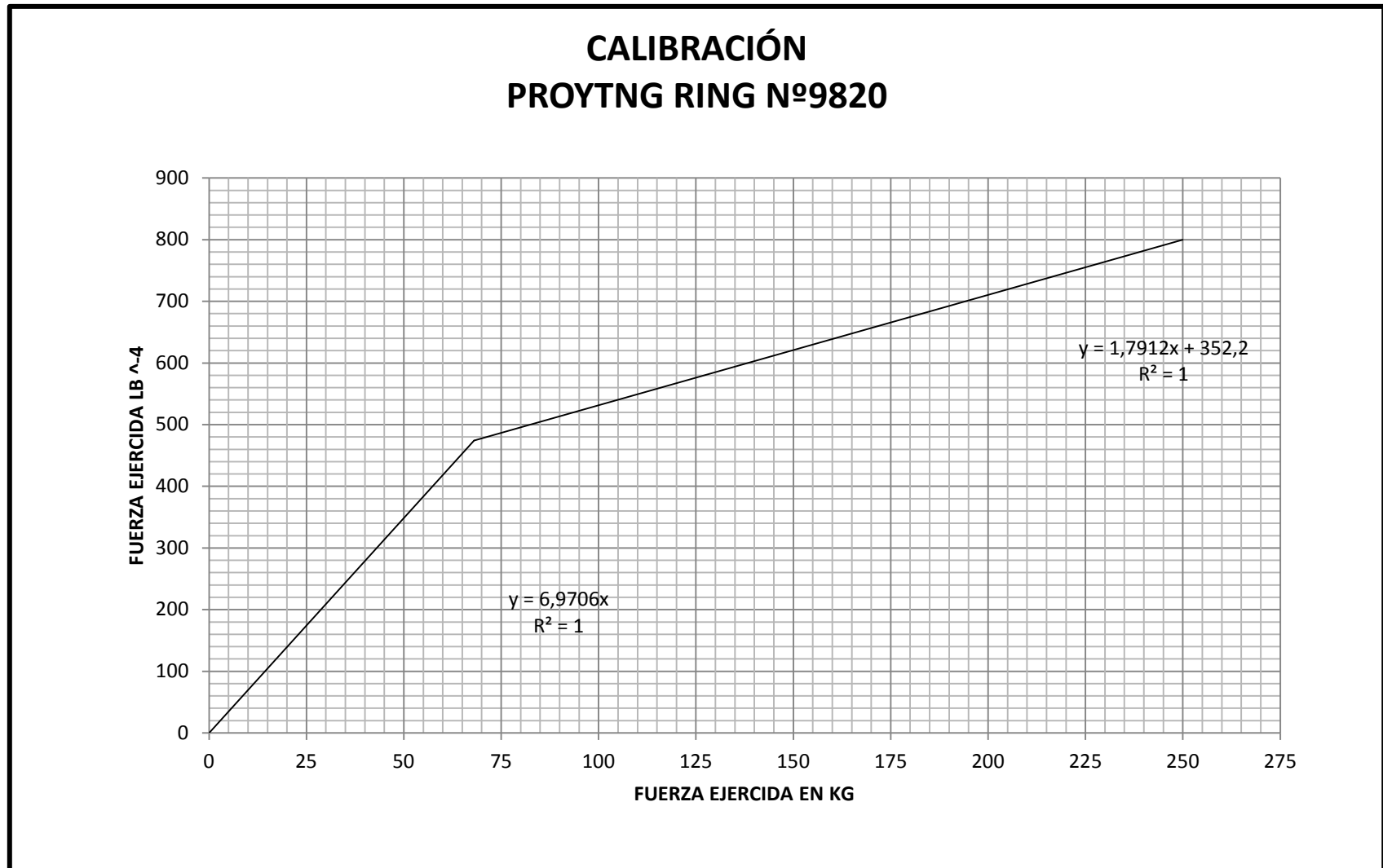
Fuente: Propia

Dispositivo de aplicación de carga.- La fuente externa de carga puede ser cualquier dispositivo capaz de producir carga repetida, que varíe en ciclos fijos de carga y de alivio. Estos dispositivos varían desde ejes de levas simples e interruptores de carga estática o pistones de aire, hasta sistemas electrohidráulicos de abrazaderas de cierre. Se necesita una duración de la carga, de 0.1 s y una duración del ciclo, de 1 a 3 s.

Equipo de medida de la carga y de la respuesta del espécimen:

- a) El dispositivo para medir la carga axial se realiza mediante un anillo de carga calibrado (PROYTNG RING N° 9820). que indicará la carga axial ejercida sobre el espécimen.

Figura 11. Curva Calibración Anillo de la Cámara Triaxial



Fuente: Laboratorio de Mecánica de Suelos – U.A.T.F.

- b) Un deformímetro de carga calibrado con precisión de 0.0001” a 0.1”, que indicara la carga axial ejercida sobre el espécimen.
- c) Las presiones de la cámara de ensayo son controladas con manómetros convencionales de presión o transductores (aparatos medidores de presión) con graduaciones de sensibilidad convenientes.

Se puede emplear celdas triaxiales normales con un equipo de carga montada exteriormente, al igual que los dispositivos para medir las deformaciones en materiales cuyo módulo resiliente sea menor de 104000 KPa (15000 lb/plg²).

- d) La carga de la propia relación fuerza-deformación del anillo, se utiliza para establecer la magnitud de la carga representada por la traza registrada en el cuadrante de carga.

Equipo para la preparación del espécimen.- Se requiere gran variedad de equipos para la preparación de muestras inalteradas para ensayos, y para obtener especímenes compactados que sean representativos de las condiciones en el terreno. El empleo de diferentes materiales y de distintos métodos de compactación en el terreno, implican el uso de técnicas variadas de compactación en el laboratorio. El equipo típico requerido se enumera a continuación:

- a) Equipo para recortar especímenes de ensayo. Este equipo incluye un marco, herramientas apropiadas para desbastar y tallar, calibrador Vernier que pueda medir las dimensiones de la muestra con precisión de 0,01 mm, un cortador de muestras, un dispositivo para cortar los extremos, y un extractor de muestras.
- b) Equipo para compactación:

Molde de 100 mm de Diámetro Nominal, debe tener una capacidad (V) de $0,903 \pm 0,008$ l, un diámetro interno de $101,6 \pm 0,4$ mm y altura de $116,4 \pm 0,1$ mm.

Pisón Metálico, debe tener una cara circular de $50 \pm 0,2$ mm de diámetro y una masa de 4536 ± 10 g. Debe estar equipado con una guía tubular para controlar la altura de caída a 457.2 ± 2 mm. La guía debe tener a lo menos cuatro perforaciones no menores que 10 mm ubicadas a 20 mm de cada

extremo, separadas en 90° entre sí y dejar una holgura suficiente para no restringir la libre caída del pisón.

Aparatos y elementos misceláneos requeridos.- Estos incluyen calibradores, manómetros micrométricos, regla de acero (calibrada a 0.5 mm (0.02")), membranas de caucho de 0.254 a 0.635 mm (0.01" a 0.025") de espesor, anillos de caucho en O, fuente de vacío con cámara y regulador de burbujas, dilatador de membrana, piedras porosas, reglas, recipientes para contenidos de agua, así como formatos para informe.

3.1.4. Preparación de especímenes de ensayo

El ensayo puede realizarse sobre muestras inalteradas o compactadas, saturadas o parcialmente saturadas, de acuerdo con las condiciones del proyecto.

Tamaño del espécimen.- La longitud del espécimen no deberá ser menor de dos veces el diámetro. El diámetro del espécimen viene dado por el tamaño de la cámara triaxial, en este caso serán preparadas para diámetros de $3,60 \pm 0.1$ cm.

Preparación del suelo para especímenes compactados de laboratorio.- El procedimiento siguiente es empleado para preparar las muestras de suelos para compactación en el laboratorio:

Si la muestra de suelo está húmeda cuando se recibe del terreno, se secará hasta que sea disgregable con un palustre. El secado puede ser al aire o mediante el empleo de un aparato para secar, en tal forma, que la temperatura no exceda de 60°C (140°F). La disgregación se hará evitando la reducción del tamaño natural de las partículas individuales.

Determinese el volumen V, del espécimen compactado que se va a preparar. Para métodos diferentes al de compactación estática, la altura del espécimen compactado, deberá ser ligeramente mayor que la requerida para el ensayo de resiliencia, para permitir el recorte de los extremos del mismo. Un exceso de 13 mm (0.5") es adecuado para este propósito.

5.1.5. Relaciones entre humedad y masa unitaria

Cuando son conocidas las variaciones de las condiciones de compactación y de las condiciones en el servicio, se escogerá el método de compactación requerido en el laboratorio, entre los diferentes métodos. Si las condiciones en servicio no están bien definidas, se prepararan y ensayaran especímenes dentro de una variación de pesos secos y contenidos de agua.

Se establece la relación densidad seca - humedad para el suelo con martillo de 4.536 Kg (10 lb) y caída de 457.2 mmm (18”) (Equipo Proctor Modificado).

5.1.6. Series de Prueba para suelos de Subrasante

Las series de prueba se dan según el tipo de material a ensayar, y pueden ser clasificados como tipo 1 o tipo 2.

Material Tipo 1.- O también “gruesos”, incluye todos los granulares sin tratar de base y subbase y todos los de subrasante sin tratar que cumplan los siguientes requisitos: menos de 70 %pasa el tamiz de 2,00 mm. (Nº 10), menos del 20% pasa el tamiz de 75 µm (Nº 200) y el índice de plasticidad es menor o igual a 10 %.

Estos suelos presentan clasificación AASHTO iguales a A-1, A-1-b, A-2 o A-3.

Material Tipo 2.- O también “finos”, para el propósito de pruebas de módulo resiliente, material tipo 1 incluye todos los granulares sin tratar de base y subbase y todos los de subrasante sin tratar que no cumplan los criterios para los suelos Tipo 1. Las muestras de Tipo 2 deberán moldearse respetando una relación mínima para la altura del espécimen de 2 veces el diámetro de dicho espécimen, es decir una esbeltez de 2 a 3.

Estos suelos presentan clasificación AASHTO iguales a A-4, A-5, A-6 y A-7.

Tabla 8. Series de prueba para materiales tipo 1.

Serie	Presión de cámara, σ_3		Máximo esfuerzo axial desviador, σ_d		Esfuerzo cíclico, σ_c		Esfuerzo constante, $0.1\sigma_d$		No. de aplicaciones de carga
	kPa	psi	kPa	psi	kPa	psi	kPa	psi	
0	103.4	15	103.4	15	93.1	13.5	10.3	1.5	500-1000
1	20.7	3	20.7	3	18.6	2.7	2.1	.3	100
2	20.7	3	41.4	6	37.3	5.4	4.1	.6	100
3	20.7	3	62.1	9	55.9	8.1	6.2	.9	100
4	34.5	5	34.5	5	31.0	4.5	3.5	.5	100
5	34.5	5	68.9	10	62.0	9.0	6.9	1.0	100
6	34.5	5	103.4	15	93.1	13.5	10.3	1.5	100
7	68.9	10	68.9	10	62.0	9.0	6.9	1.0	100
8	68.9	10	137.9	20	124.1	18.0	13.8	2.0	100
9	68.9	10	206.8	30	186.1	27.0	20.7	3.0	100
10	103.4	15	68.9	10	62.0	9.0	6.9	1.0	100
11	103.4	15	103.4	15	93.1	13.5	10.3	1.5	100
12	103.4	15	206.8	30	186.1	27.0	20.7	3.0	100
13	137.9	20	103.4	15	93.1	13.5	10.3	1.5	100
14	137.9	20	137.9	20	124.1	18.0	13.8	2.0	100
15	137.9	20	275.8	40	248.2	36.0	27.6	4.0	100

Fuente: Manual de Ensayos de Suelos y Materiales – ABC

Tabla 9. Series de prueba para materiales tipo 2.

Serie	Presión de cámara, σ_3		Máximo esfuerzo axial desviador, σ_d		Esfuerzo cíclico, σ_c		Esfuerzo constante, $0.1\sigma_d$		No. de aplicaciones de carga
	kPa	psi	kPa	psi	kPa	psi	kPa	psi	
0	41.4	6	27.6	4	24.8	3.6	2.8	.4	500-1000
1	41.4	6	13.8	2	12.4	1.8	1.4	.2	100
2	41.4	6	27.6	4	24.8	3.6	2.8	.4	100
3	41.4	6	41.4	6	37.3	5.4	4.1	.6	100
4	41.4	6	55.2	8	49.7	7.2	5.5	.8	100
5	41.4	6	68.9	10	62.0	9.0	6.9	1.0	100
6	27.6	4	13.8	2	12.4	1.8	1.4	.2	100
7	27.6	4	27.6	4	24.8	3.6	2.8	.4	100
8	27.6	4	41.4	6	37.3	5.4	4.1	.6	100
9	27.6	4	55.2	8	49.7	7.2	5.5	.8	100
10	27.6	4	68.9	10	62.0	9.0	6.9	1.0	100
11	13.8	2	13.8	2	12.4	1.8	1.4	.2	100
12	13.8	2	27.6	4	24.8	3.6	2.8	.4	100
13	13.8	2	41.4	6	37.3	5.4	4.1	.6	100
14	13.8	2	55.2	8	49.7	7.2	5.5	.8	100
15	13.8	2	68.9	10	62.0	9.0	6.9	1.0	100

Fuente: Manual de Ensayos de Suelos y Materiales – ABC

6. Factores que afectan el Modulo Resiliente

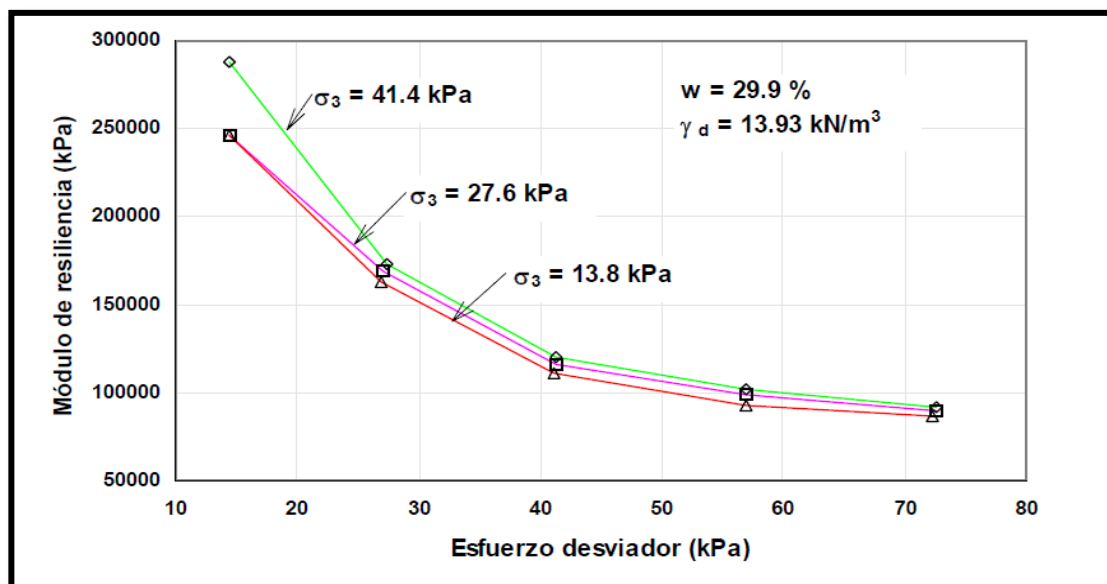
La mayor parte de las investigaciones realizadas sobre materiales de subrasante han demostrado que el módulo resiliente depende principalmente de la magnitud del esfuerzo aplicado. Otros factores que los afectan son: el contenido de agua; la densidad; el número, duración y frecuencia de cargas cíclicas; el tipo de ensayo; la graduación, naturaleza mineralógica y contenido de finos del material; el tamaño máximo y la forma de las partículas sólidas.

6.1. Magnitud del Esfuerzo Desviador

Se ha demostrado ampliamente que el valor del módulo resiliente (M_r) depende principalmente de la presión de confinamiento y mantiene una relación de proporcionalidad directa con la suma de esfuerzos principales ($\Theta = \sigma_1 + 2\sigma_3$).

En los suelos finos empleados como subrasantes donde el confinamiento es mucho menos significativo que el esfuerzo desviador, el módulo resiliente presenta una disminución en su magnitud cuando se aplica un incremento en el esfuerzo desviador, principalmente para materiales de tipo arcilloso.

Figura 12. Variacion del módulo resiliente en función del estado de esfuerzos para suelos finos.

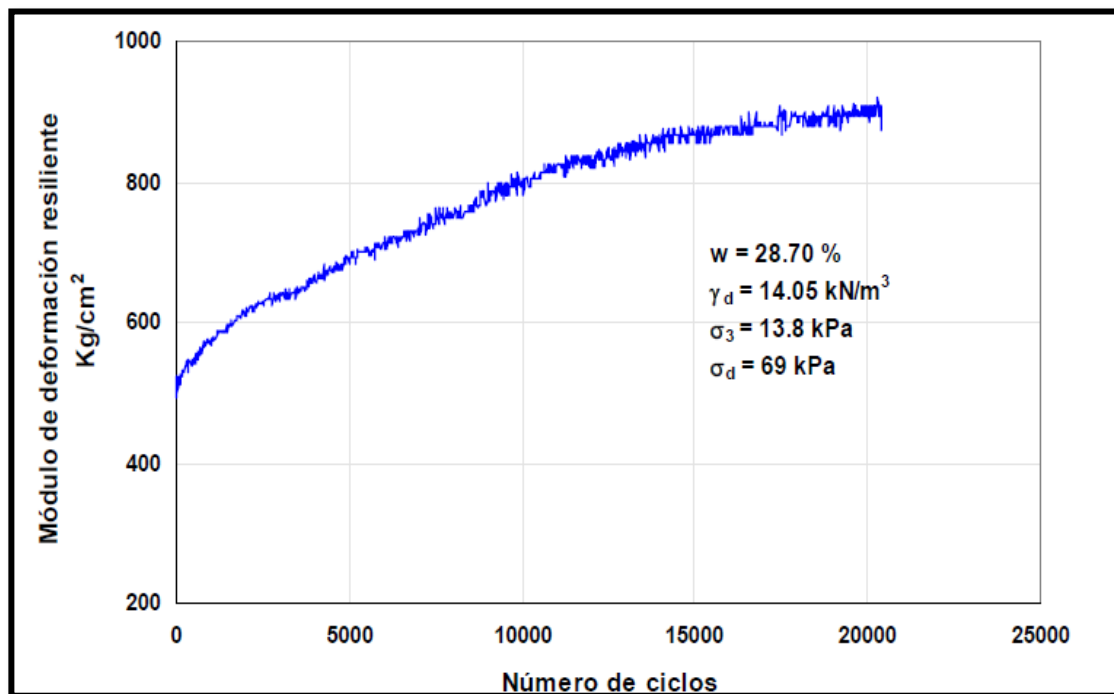


Fuente: Fundamentos Teóricos Y Desarrollo Del Procedimiento De Ensayo De Módulo Resiliente

6.2. Numero de Aplicaciones del Esfuerzo

Para analizar el comportamiento del módulo de resiliencia de un suelo, se sometieron varios especímenes de arcilla compactada a pruebas de módulo de resiliencia, todos los ensayos se llevaron a cabo utilizando onda tipo senoidal, la figura 13 muestra un ensayo realizado sobre una muestra de arcilla compactada con un peso volumétrico seco de 12.31 KN/m^3 y contenido de agua de $20,10 \%$. Se puede notar una variación importante del módulo durante todo el proceso de carga, al aumentar el número de ciclos parece tener un valor constante.

Figura 13. Variación del módulo resiliente con el número de ciclos.



Fuente: Fundamentos Teóricos Y Desarrollo Del Procedimiento De Ensayo De Módulo Resiliente.

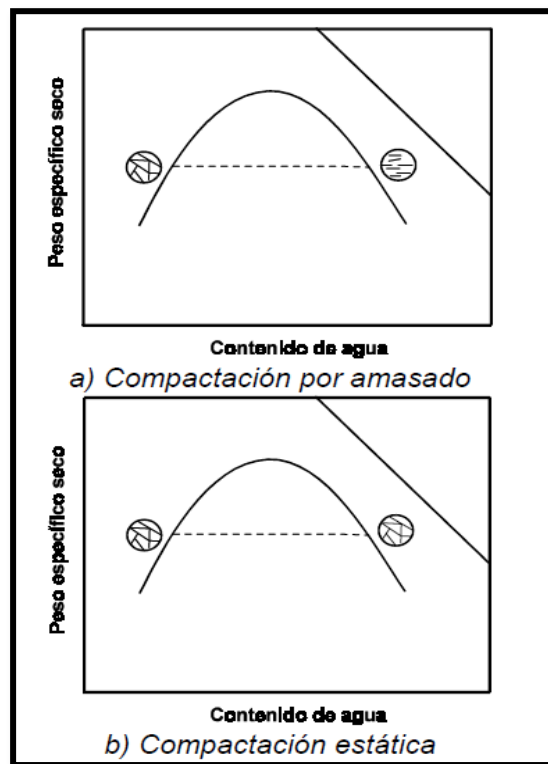
6.3. Método de Compactación

Los cambios en la estructura parecen ser debidos, en gran medida, al cortante inducido en el suelo durante la compactación. Por ejemplo, cuando las muestras se compactan a bajos grados de saturación no hay una deformación apreciable inducida

por el método de compactación, y las partículas de arcilla asumen un arreglo al azar, como se indica en la figura 14. Este tipo de arreglo de las partículas ha sido llamado estructura floculada. Sin embargo, cuando las muestras son compactadas a altos grados de saturación (arriba de 85%), como ocurre en el lado húmedo de la curva de compactación, la resistencia al esfuerzo cortante inducida durante la compactación puede variar considerablemente. Para suelos compactados por medio de amasado, el pistón penetra en el suelo y causa levantamiento adyacente de la superficie del suelo como resultado de las deformaciones.

Las partículas de arcilla tienden a alinearse en forma paralela, como se indica en la figura 14(a). Este tipo de estructura es llamada estructura dispersa. Sin embargo si el mismo suelo es compactado estáticamente no hay posibilidad de que exista ningún desplazamiento lateral y las partículas tienden a conservar su estructura floculada, como se muestra en la figura 14(b).

Figura 14. Orientación de las partículas en arcillas compactadas.



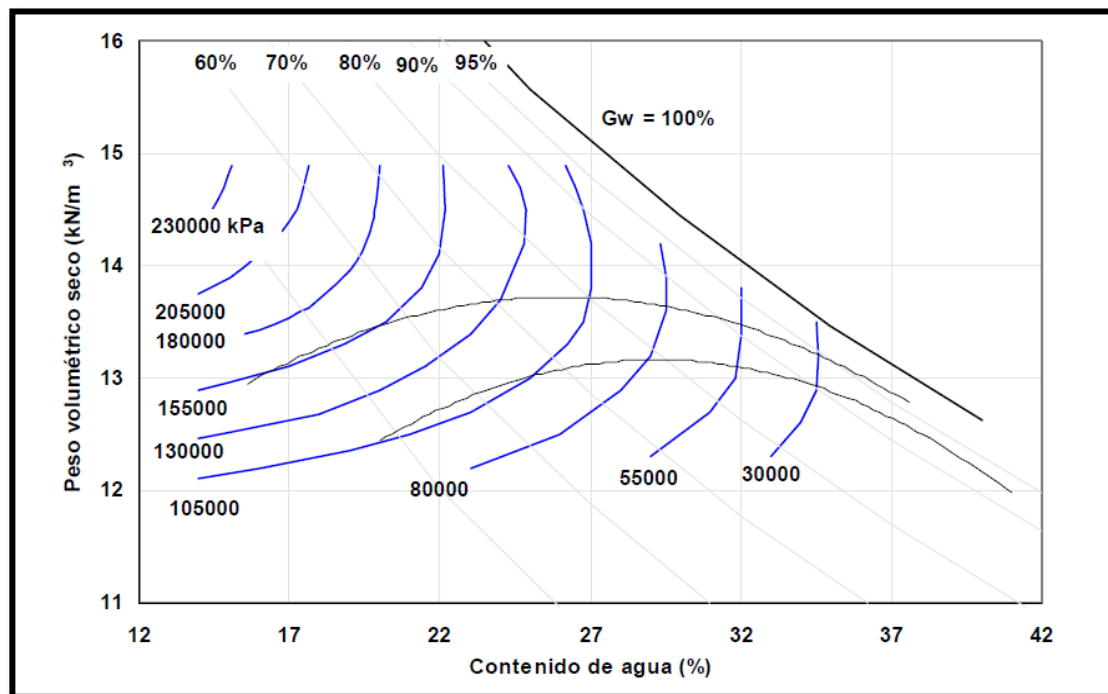
Fuente: Fundamentos Teóricos Y Desarrollo Del Procedimiento De Ensayo De Módulo Resiliente.

6.4. Densidad y Contenido de Humedad

Se sabe que el módulo resiliente de los suelos no es una propiedad constante, sino que es dependiente de varios factores, entre estos la densidad seca máxima y el contenido de humedad. Se llevó a cabo un estudio, en el cual se probaron 35 muestras de arcilla de alta compresibilidad. Los pesos volumétricos variaron entre 12 y 18 KN/m³ y los contenidos de agua entre 14% y 36 %, con esfuerzos desviadores de 69 KPa y presiones de confinamiento de 13,8 KPa.

El rango de variación del parámetro módulo de resiliencia fue de 23800 Kpa a 186000 Kpa, para los rangos de contenido de agua y densidad seca utilizados. Tomando como base los datos de módulo de resiliencia obtenidos, se trazaron líneas isocaracterísticas de igual valor de módulo de resiliencia y así observar su comportamiento en el espacio de compactación. Dicho comportamiento se muestra en la figura 15.

Figura 15. Líneas isocaracterísticas para las condiciones de $\sigma_d = 69$ KPa y $\sigma_3 = 13.8$ KPa.

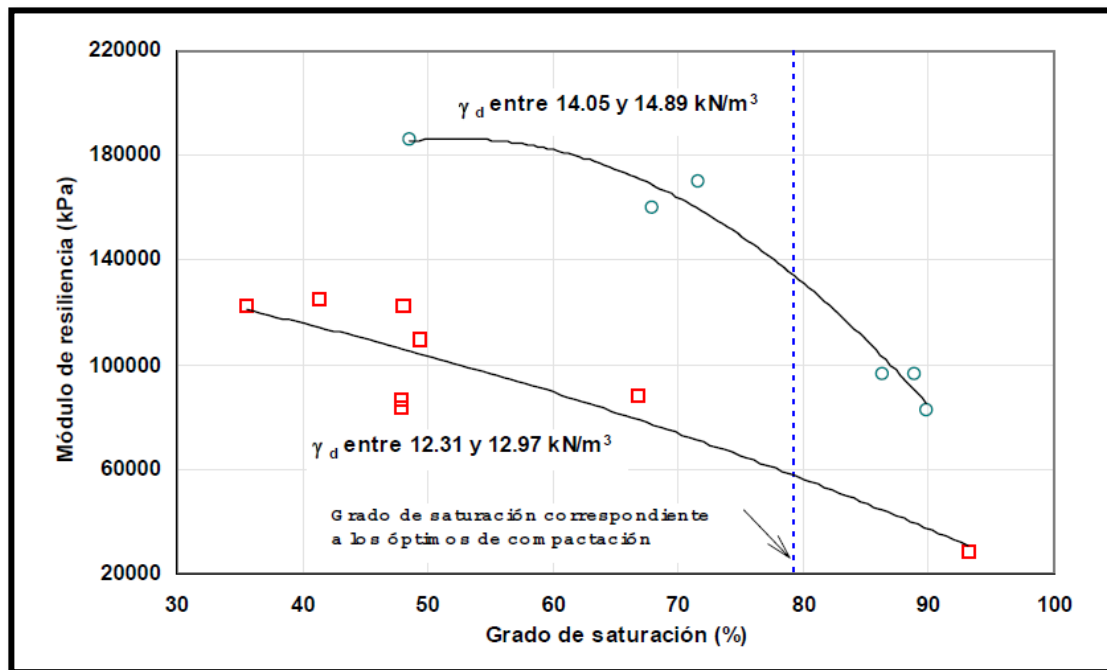


Fuente: Fundamentos Teóricos Y Desarrollo Del Procedimiento De Ensayo De Módulo Resiliente.

La figura anterior muestra claramente la influencia del contenido de agua y de la densidad seca en la magnitud del módulo resiliente.

Es claro que la magnitud del módulo de resiliencia para un valor de contenido de agua dado, aumenta con el peso volumétrico hasta cierto valor y después disminuye para grados de saturación elevados, en especial después del correspondiente a los óptimos de compactación (figura 16).

Figura 16. Comportamiento del módulo resiliente respecto al grado de saturación.



Fuente: Fundamentos Teóricos Y Desarrollo Del Procedimiento De Ensayo De Módulo Resiliente.

Así entonces, la definición del valor para el módulo de resiliencia de un suelo debe de tomar en cuenta los factores mencionados.

Se debe tener en consideración que no se puede asignar un solo valor de módulo de resiliencia a un suelo. Se tendrá que determinar entonces un rango de variación apropiado.

7. Correlación con CBR

Muchos investigadores se han preocupado por establecer correlaciones del módulo resiliente con otros ensayos utilizados normalmente en el diseño de espesores de la estructura de pavimentos. Dentro de estas, la más utilizada ha sido la correlación con el C.B.R.

Los presentes métodos de diseño son empíricos y basados generalmente en el uso de la prueba del Valor Relativo de Soporte (VRS, o C.B.R.) desarrollada por Porter (1938). Esta prueba contiene muchos inconvenientes, entre los principales la poca representatividad de las condiciones de carga a las que se ve sometido un pavimento.

La prueba de CBR es la relación de la fuerza requerida para penetrar un pistón circular de 1935 mm^2 (3 in^2) de sección transversal en un suelo, en un contenedor especial a una tasa de 1 mm/min (0.05 in/min), que se requiere para una penetración similar en una muestra estándar de roca triturada compactada. La tasa se determina con las penetraciones de $2,5$ y 5 mm ($0,1$ y $0,2 \text{ in}$) y se usa el valor más alto.

El valor del CBR puede ser observado como una medida indirecta del esfuerzo cortante del suelo, pero no puede ser relacionado directamente con los parámetros del esfuerzo cortante, la resistencia de los suelos al esfuerzo cortante depende de muchos factores, ninguno de los cuales se controla en una prueba de CBR. En tales condiciones no es posible medir valores de resistencia o variaciones de la misma.

Turnbull (1950) comentó en la prueba del CBR:

“...Es esencialmente una simple prueba de esfuerzos y el C.B.R. es un índice del esfuerzo cortante”.

El noto que las curvas de diseño del C.B.R. daban un espesor total del pavimento para prevenir la deformación por cortante en el suelo.

Más allá de las críticas realizadas, la sencillez del método de diseño y del propio ensayo de C.B.R. favoreció su rápida popularización y extensión en todo el mundo.

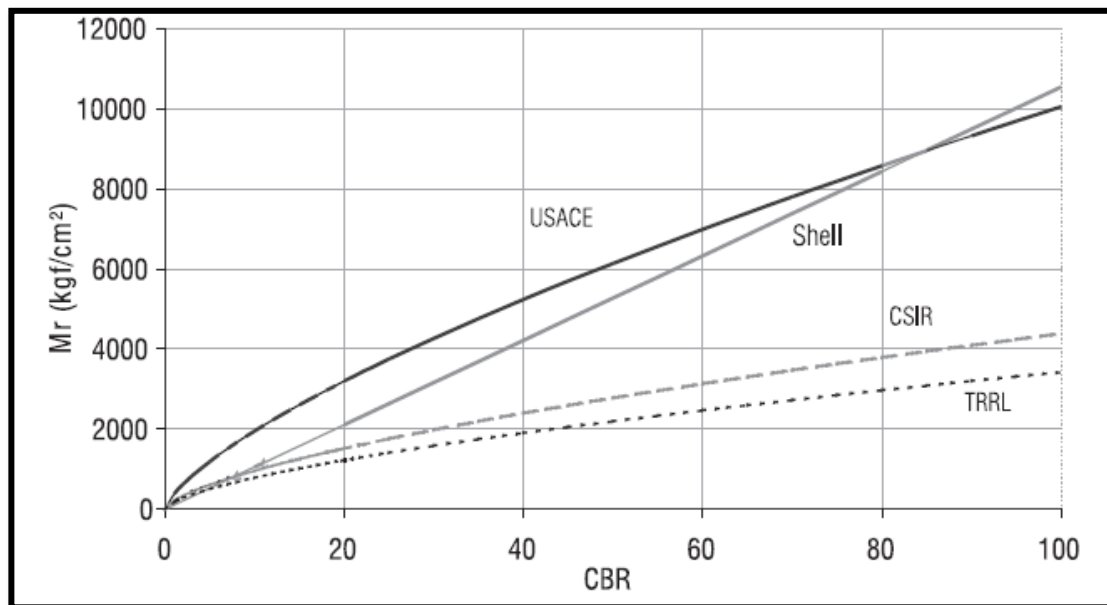
Algunos países adoptaron directamente estos métodos de diseño, y hasta la actualidad persisten.

La práctica actual se basa en métodos básicamente empíricos, en donde el diseño se respalda en propiedades físicas de los materiales, y algún índice de resistencia como lo es el C.B.R... Por supuesto que ya se manejan conceptos mecanicistas como el módulo resiliente, pero solo como parámetro de cálculo que se correlaciona con el C.B.R. y no como una propiedad fundamental del material.

Es importante tener en cuenta que muchas de las correlaciones son más de tipo regional, lo que debe limitar el uso indiferente para cualquier tipo de suelo. Solamente, con una gran experiencia y criterio, el ingeniero podrá elegir la correlación más adecuada para un proyecto específico.

A continuación se presentan algunas correlaciones empíricas entre el C.B.R. y el valor del módulo resiliente. En la figura 17 se esquematizan las mismas.

Figura 17. Correlaciones CBR - Mr.



Fuente: Módulo Resiliente De Suelos Finogranulares

- Shell (Heukelomm y Foster 1960)¹

$$Mr \text{ (psi)} = 1500 * CBR$$

- U.S. Cuerpo de Ingenieros (USACE) (Green y Hall 1975)²

$$Mr \text{ (psi)} = 5409 * CBR^{0,711}$$

- Concilio Sur Africano de Investigaciones Científicas e Industriales (CSIR)³

$$Mr \text{ (psi)} = 3000 * CBR^{0,65}$$

- Laboratorio de Investigación de Transporte y Carreteras (TRRL) (Lister 1987)⁴

$$Mr \text{ (psi)} = 2555 * CBR^{0,64}$$

Shell, CSIR y TRRL presentan una modificación a las anteriores correlaciones, teniendo en cuenta el número de ejes equivalentes (N) de 8,2 toneladas durante el periodo de diseño, tal como se muestra en la tabla 10. Es importante destacar que la representación de las ecuaciones tiene la siguiente forma: $Mr = K * CBR^n$.

Tabla 10. Factores de corrección a las correlaciones CBR – Mr

Proponente	Valor recomendado de K para diferentes N			
	1 x 10 ⁵	1 x 10 ⁶	1 x 10 ⁷	5 x 10 ⁷
Shell Mr = K * CBR	1500	1750	2300	2900
CSIR Mr = K * CBR ^{0,65}	3200	3700	4700	5800
TRRL Mr = K * CBR ^{0,64}	3250	3800	4800	5900

Fuente: Módulo Resiliente De Suelos Finogranulares

¹ Fuente: Módulo Resiliente de Suelos Finogranulares – Julián Vidal

² Fuente: Módulo Resiliente de Suelos Finogranulares – Julián Vidal

³ Fuente: Módulo Resiliente de Suelos Finogranulares – Julián Vidal

⁴ Fuente: Módulo Resiliente de Suelos Finogranulares – Julián Vidal

1. Antecedentes

Dentro del campo de la investigación referente al módulo resiliente, varios investigadores plantearon diversos modelos que representen la variación del módulo resiliente en función a las variables principales que influyan en su obtención en laboratorio.

Al respecto, los resultados del Proyecto 1-28 A, entregan un protocolo armonizado de ensayo para el Mr. Este protocolo asegura el uso de un modelo no – lineal del módulo resiliente, aplicable para todos los tipos de materiales no ligados para pavimentos, desde las arcillas más plásticas hasta las bases más limpias.

La necesidad de mejorar la modelización de los suelos ante las cargas dinámicas determino una evolución en las ecuaciones constitutivas de estos materiales. Hasta arribar a la que actualmente ha adoptado la Guía de Diseño Empírico: Mecánica de Pavimentos (NCHRP Project 1 37) conocida como AASHTO 2002.

$$Mr = k_1 * Pa * \left(\frac{\Theta}{Pa}\right)^{K_2} * \left(\frac{\tau_{oct}}{Pa} + 1\right)^{K_3} \quad (4)$$

Dónde:

Mr: Modulo Resiliente (MPa)

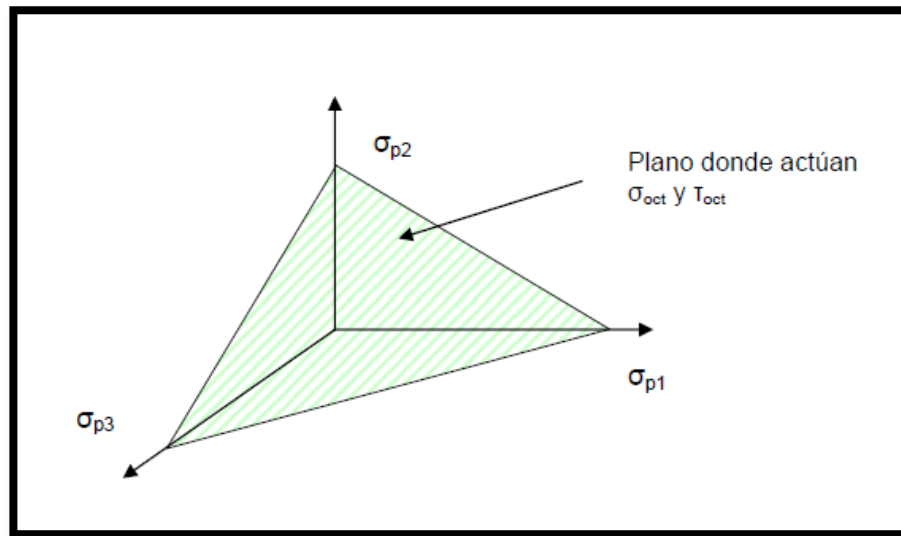
$\Theta = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$: Primer invariante de tensiones (MPa)

$T_{oct} = \frac{\sqrt{2}}{3} \sigma_d$: Tension octaédrica (MPa)

Pa : Presión atmosférica utilizada para normalizar las unidades del Mr (MPa)

K_1, K_2, K_3 : Constantes experimentales de regresión

Figura 18. Concepto de esfuerzo cortante octaédrico



Fuente: Implementación Del Ensayo De Módulo Resiliente En Bases Granulares Para Pavimentos

Los procedimientos de diseño de pavimentos flexibles de base empírico-mecanicista basados en la filosofía de la Guía de Diseño Empírico-Mecanicista de pavimentos (NCHRP Project 1 37) conocida como AASHTO 2002, requieren la adopción de algunas simplificaciones y ajustes para considerar las condiciones locales relacionadas con las características de los materiales, el clima y las técnicas de construcción. Como las ecuaciones constitutivas y las leyes de falla no son de fácil obtención o no se dispone de equipos de ensayos requeridos para determinarlas, la Guía citada, establece para la determinación de las Propiedades de los Materiales, NIVELES JERARQUICOS de acuerdo a la categoría de la ruta, o sea a la importancia, costo y dificultades del proyecto en estudio con el fin de reducir los datos de diseño. Los niveles van del 1 al 3 en orden decreciente a la importancia de la obra como:

NIVEL 1: Se llevan a cabo ensayos de laboratorio o in situ para determinar las ecuaciones constitutivas midiendo el módulo resiliente M_r y estableciendo la ecuación constitutiva.

NIVEL 2: se usan correlaciones con otras propiedades de los materiales determinados en laboratorio o in situ, para determinar las ecuaciones constitutivas (Se estima el M_r).

NIVEL 3: Se adoptan valores apropiados basados en la experiencia con muy pocos ensayos (se adopta un valor del módulo resiliente).

1.1. Modelos de Predicción del Módulo Resiliente

En general, los modelos de predicción del módulo resiliente están basados en correlaciones obtenidas entre resultados obtenidos experimentalmente y ciertas propiedades características de los suelos y los materiales granulares corrientemente determinadas tales como sus límites líquido y plástico, granulometría y condiciones de densidad humedad, u otras propiedades mecánicas como la resistencia a la compresión inconfiada o los parámetros de corte.

Numerosos modelos han sido desarrollados tal como resulta de la bibliografía analizada aunque para este trabajo, se han retenido como más significativos los propuestos por la Federal Highway Administration (FHWA) de los Estados Unidos y la Universidad de Wisconsin del mismo país.

Investigación: FHWA-RD-02-051

Las características físicas de los suelos fueron extraídas de una amplia base de datos, y se realizaron para éstos, los ensayos de resiliencia respectivos.

Los modelos propuestos por la FHWA que se muestran en la tabla 11, resultan de los análisis realizados durante varios años en los tramos de pavimentos para el estudio del desempeño de los mismos a largo plazo LTPP, Long Term Pavement Performance.

La elección de los modelos de este estudio, radica en la facilidad de los ensayos para determinar las propiedades físicas de los suelos, que serán correlacionadas con el valor del módulo resiliente

Las ecuaciones de este modelo pueden ser utilizadas para estimar el módulo resiliente mediante la ecuación universal de Mr sugerida por la AASHTO 2002 (Ec. 4).

$$Mr = k_1 * Pa * \left(\frac{\theta}{Pa}\right)^{K_2} * \left(\frac{\tau_{oct}}{Pa} + 1\right)^{k_3} \quad (4)$$

Tabla 11. Modelos del estudio LTPP

Suelos finos cohesivos	
$K_1 = 1,3577 + 0,0106 * (\%Arcilla) - 0,0437 * w$	(6)
$K_2 = 0,5193 - 0,0073 * P_4 + 0,0095 * P_{40} - 0,0027 * P_{200} - 0,0030 * LL - 0,0049 * W_{opt}$	(7)
$K_3 = 1,4258 - 0,0288 * P_4 + 0,0303 * P_{40} - 0,0521 * P_{200} + 0,0251 * (\%Limo) + 0,0535 * LL - 0,0672 * W_{opt} - 0,0026 * Y_{dmax} + 0,0025 * Y_d - 0,6055 * \left(\frac{W}{W_{opt}}\right)$	(8)
Suelos de granos finos	
$K_1 = -0,8409 + 0,0004 * P_{40} + 0,0161 * IP$	(9)
$K_2 = 0,668 - 0,0007 * P_{40} - 0,0139 * IP$	(10)
$K_3 = -0,1667 - 0,0207 * IP$	(11)

Fuente: Study Of LTPP Laboratory Resilient Modulus Test Data And Response Characteristics

La validez de estas ecuaciones solo es reconocida a los suelos que fueron objeto de estudio, por lo tanto, su aplicación para condiciones y suelos distintos debe estar sujeta a un reajuste, y una justificación.

Investigación: SPR # 0092-08-12

Esta investigación fue realizada por la Universidad de Wisconsin a través de su Department of Civi Engineering and Mechanics y presentada al Departamento de Transporte de la misma ciudad.

Esta investigación ha propuesto los modelos que se muestran en la tabla 12 para el Wisconsin Department Of Transportation, y desarrollados a partir de resultados experimentales obtenidos con suelos de la zona de Wisconsin.

Esta investigación tiene como base las ecuaciones presentadas en el estudio LTTP señalado anteriormente, y de la misma forma adopta ensayos de fácil desarrollo para determinar la correlación entre las propiedades físicas de los suelos, y sus valores de módulo resiliente, por lo que su comprobación se puede realizar con ensayos sencillos.

Las ecuaciones de este modelo pueden ser utilizadas para estimar el módulo resiliente mediante la ecuación universal de Mr sugerida por la AASHTO 2002 (Ec. 4).

$$Mr = k_1 * Pa * \left(\frac{\theta}{Pa}\right)^{K_2} * \left(\frac{\tau_{oct}}{Pa} + 1\right)^{k_3} \quad (4)$$

Tabla 12. Modelos de la Universidad de Wisconsin

Para suelos Finos	
$K_1 = 404,166 + 42,933 * IP + 52,260 * Yd - 987,353 * \left(\frac{W}{W_{opt}}\right)$	(12)
$K_2 = 0,25113 - 0,0292 * IP + 0,5573 * \left(\frac{W}{W_{opt}}\right) * \left(\frac{Yd}{Yd_{max}}\right)$	(13)
$k_3 = -0,20772 + 0,23088 * IP + 0,00367 * Yd - 5,4238 * \left(\frac{W}{W_{opt}}\right)$	(14)

Fuente: Determination Of Typical Resilient Modulus Values For Selected Soils In Wisconsin

2. Muestreo

Esto no es más que el conjunto de procedimientos o técnicas empleados para obtener una o más muestras de una población.

Este se realiza una vez que se ha establecido un marco muestral representativo de la población, se procede a la selección de los elementos de la muestra aunque hay muchos diseños de la muestra. Al tomar varias muestras de una población, las

estadísticas que calculamos para cada muestra no necesariamente serían iguales, y lo más probable es que variarán de una muestra a otra.

2.1. Criterios de Muestreo

- Se llama Muestra a una parte de la población a estudiar que sirve para representarla". Murria R. Spiegel (1991).
- "Una Muestra es una colección de algunos elementos de la población, pero no de todos". Levin & Rubin (1996).
- "Una muestra debe ser definida en base de la población determinada, y las conclusiones que se obtengan de dicha muestra solo podrán referirse a la población en referencia", Cadenas (1974).

El estudio de muestras es más sencillo que el estudio de la población completa; cuesta menos y lleva menos tiempo. Por último, se ha probado que el examen de una población entera todavía permite la aceptación de elementos defectuosos; por tanto, en algunos casos, el muestreo puede elevar el nivel de calidad.

Los expertos en estadística recogen datos de una muestra. Utilizan esta información para hacer referencias sobre la población que está representada por la muestra. En consecuencia muestra y población son conceptos relativos. Una población es un todo y una muestra es una fracción o segmento de ese todo.

2.2. Tipos de Muestreo

Existen dos métodos para seleccionar muestras de poblaciones; el muestreo no aleatorio o de juicio y el muestreo aleatorio o de probabilidad. En este último todos los elementos de la población tienen la oportunidad de ser escogidos en la muestra. Una muestra seleccionada por muestreo de juicio se basa en la experiencia de alguien con la población.

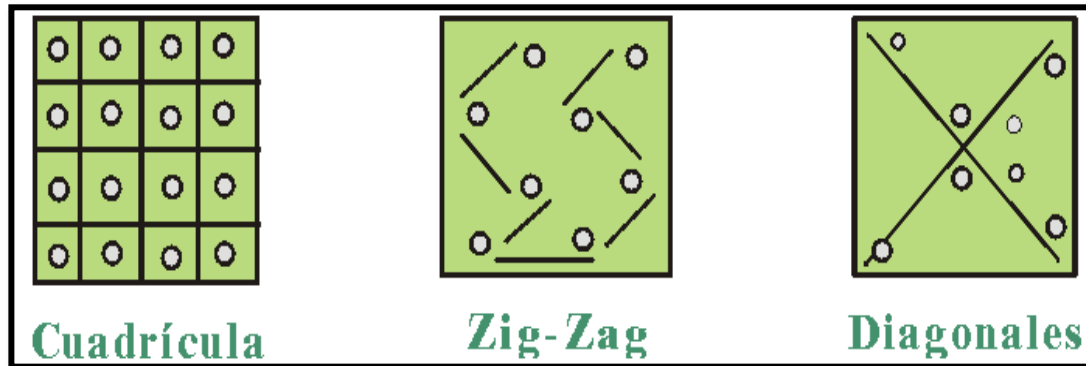
Algunas veces una muestra de juicio se usa como guía o muestra tentativa para decidir cómo tomar una muestra aleatoria más adelante.

Las muestras de juicio evitan el análisis estadístico necesario para hacer muestras de probabilidad.

Son de dos formas:

- Sistemáticos

Figura 19. Forma de muestreo sistemática



Fuente: Muestreo de Suelos – Ing. Alberto D. Sosa

- Asistemáticos

Cuando no se tiene un diseño en especial.

En el siguiente proyecto se utilizó la diferenciación de sitios de muestreo asistemática, porque en estas zonas hubo lugares de difícil acceso para poder utilizar uno de los métodos de forma sistemática.

- Número de muestras.

Para el fin de este proyecto se optó por tomar 8 muestras, para poder realizar el análisis de relación de 24 especímenes, variando el contenido de humedad en un espectro de $\pm 2\%$ a partir del contenido de humedad óptimo, estos resultados se correlacionan con sus propiedades físicas, a través de los modelos estudiados.

2.3. Identificación de las zonas de muestreo

Para realizar el muestreo en una zona se deberán seguir los siguientes pasos:

- Identificación de las zonas de muestreos.
- Inspección visual de la zona.

➤ EL PORTILLO

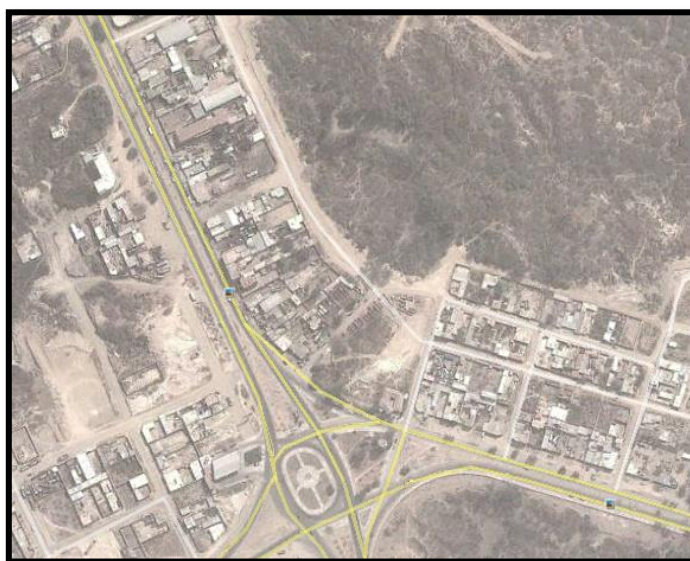
Figura 20. Foto El Portillo



Fuente: Google

➤ LAS BARRANCAS

Figura 21. Foto Las Barrancas



Fuente: Google

2.4. Tipos de Muestra

Lo primero que hay que considerar es que la muestra sea representativa del terreno.

- Para extraer las muestras se utilizó el siguiente equipo:
 - Pala.
 - Picota.
 - Bolsas.
- Las muestras deberán ser etiquetadas identificando el lugar, fecha y número de muestra.
- Las muestras deberán ser guardadas en bolsas preferentemente de nylon.

Se tuvo que visitar los lugares de la zona muestreo con una semana de anticipación, para conocer las condiciones de los materiales en su estado natural.

Hay que tener en cuenta que nunca muestrear luego de una lluvia, debido a que las condiciones del terreno cambiarían debido a su porcentaje de humedad, siempre esperar entre dos y tres días.

En cuanto a la profundidad se deberá considerar lo siguiente:

Tabla 13. Profundidad de los muestreos

TIPO DE ENSAYO	PROFUNDIDAD
Contenido de humedad	10 - 15 (cm)
Limites	30- 50 (cm)
Granulometría	> 30 (cm)

Fuente: Manual de Ensayos de Suelos y Materiales-ABC

3. Materiales a utilizar

En el presente estudio se usaran materiales finos que correspondan a la clasificación AASHTO de A-6 y A-7-6.

4. Ensayos de Caracterización

4.1. Contenido de Humedad

Para obtener el porcentaje de humedad de las muestras se realizó el método del horno.

4.1.1. Resultados

Tabla 14. Contenido de Humedad Natural Muestras

ZONA	Nº POZO	%W
PORTILLO	1	3,48
	2	3,46
	3	3,51
	4	3,50
BARRANCAS	1	3,66
	2	3,87
	3	3,78
	4	3,70

Fuente: Elaboración Propia

4.2. Granulometría

Para suelos finos se realizó el método del lavado.

4.2.1. Resultados

Tabla 15. Granulometría

ZONA	Nº MUESTRA	% QUE PASA			
		Nº 4	Nº 10	Nº 40	Nº 200
PORTILLO	1	100,00	99,90	98,03	84,58
	2	100,00	99,73	97,42	84,99
	3	100,00	100,00	98,09	81,36
	4	100,00	99,88	98,00	81,71
BARRANCAS	1	100,00	99,88	98,41	92,06
	2	100,00	100,00	98,43	91,33
	3	100,00	99,92	98,95	91,46
	4	100,00	99,87	98,72	91,03

Fuente: Elaboración Propia

4.3. Límites de Atterberg

Se realizaron los ensayos de límite líquido y límite plástico para todas las muestras, siguiendo la guía de laboratorio de suelos.

4.3.1. Resultados

Tabla 16. Límites de Atterberg de las muestras

ZONA	MUESTRA Nº	LL	LP	IP
PORTILLO	1	35,45	20,64	14,81
	2	36,78	23,67	13,11
	3	34,44	21,94	12,50
	4	34,70	21,80	12,89
BARRANCAS	1	43,49	22,87	20,62
	2	43,05	23,49	19,56
	3	46,25	26,47	19,79
	4	45,86	26,24	19,62

Fuente: Elaboración Propia

4.4. Clasificación

La clasificación de los suelos se realizó por los métodos AASHTO y SUCS

4.4.1. Resultados

Tabla 17. Clasificación de las muestras

ZONA	Nº POZO	AASHTO	SUCS
PORTILLO	1	A-6 (12)	CL
	2	A-6 (13)	CL
	3	A-6 (10)	CL
	4	A-6 (10)	CL
BARRANCAS	1	A-7-6 (21)	CL
	2	A-7-6 (19)	CL
	3	A-7-6 (21)	CL
	4	A-7-6 (20)	CL

Fuente: Elaboración Propia

4.5. Compactación T-99

Se realizó para todas las muestras, siguiendo la guía de laboratorio de suelos.

4.5.1. Resultados

Tabla 18. Densidad seca máxima y CHO T-99

ZONA	Nº POZO	DENSIDAD SECA MAX		CHO
		gr/cm ³	KN/m ³	%
PORTILLO	1	1,64	16,09	18,71
	2	1,65	16,19	18,34
	3	1,66	16,28	18,80
	4	1,67	16,38	17,21
BARRANCAS	1	1,61	15,79	19,94
	2	1,60	15,70	19,13
	3	1,63	15,99	19,30
	4	1,63	15,99	19,39

Fuente: Elaboración Propia

4.6. Compactación T- 180

Se realizó para todas las muestras, siguiendo la guía de laboratorio de suelos.

4.6.1. Resultados

Tabla 19. Densidad seca máxima y CHO T-180

ZONA	Nº POZO	DENSIDAD SECA MAX		CHO
		gr/cm ³	KN/m ³	%
PORTILLO	1	1,68	16,48	16,43
	2	1,66	16,28	16,23
	3	1,67	16,38	17,45
	4	1,66	16,28	16,46
BARRANCAS	1	1,64	16,09	18,83
	2	1,65	16,19	17,75
	3	1,65	16,19	18,58
	4	1,63	15,99	18,52

Fuente: Elaboración Propia

4.7. Peso Específico

Esta propiedad de los suelos no es tomada en cuenta en los modelos estudiados.

4.7.1. Resultados

Tabla 20. Peso específico de los suelos

ZONA	Clasificación	Peso Específico
PORTILLO	A-6 (12)	2,65
	A-6 (13)	2,65
	A-6 (10)	2,65
	A-6 (10)	2,65
BARRANCAS	A-7-6 (21)	2,68
	A-7-6 (19)	2,68
	A-7-6 (21)	2,68
	A-7-6 (20)	2,68

Fuente: Elaboración Propia

4.8. Análisis Hidrométrico

4.8.1. Resultados

Tabla 21. Análisis Hidrométrico muestras

ZONA	Nº POZO	%de Arcilla	%de Limo
PORTILLO	1	36,33	63,67
	2	31,20	68,80
	3	34,20	65,80
	4	35,34	64,66
BARRANCAS	1	55,18	44,82
	2	50,94	49,06
	3	53,35	46,65
	4	56,42	43,58

Fuente: Elaboración Propia

4.9. Ensayo Triaxial

4.9.1. Procedimiento

Una vez preparado el espécimen a ensayarse, con humedad y peso conocidos, se procede a introducir el espécimen dentro de la membrana, para luego introducirlo entre las piedras porosas de la cámara triaxial.

Con la línea de drenaje del fondo del espécimen cerrada, se conecta la entrada de vacío de la parte superior y se aplica un vacío, para eliminar aire y burbujas entre el espécimen y la membrana.

a) Etapa de pre acondicionamiento

Se aplica una presión de confinamiento de 6 psi dentro de la celda, para aplicar una carga de acondicionamiento de 100 ciclos con un esfuerzo desviador de 4 psi. Luego se mantiene constante la presión de la cámara y se realizan lecturas de deformación para los esfuerzos desviadores de 2, 4, 6, 8 y 10 psi.

Realizadas las lecturas de deformación, para la presión de confinamiento de 6 psi, se procede a bajar la presión de la cámara a 4 psi, y se aplica los mismos esfuerzos desviadores de 2, 4, 6, 8 y 10 psi.

Por último se reduce la presión de la cámara a 2 psi, y se aplica los esfuerzos desviadores de 2, 4, 6, 8 y 10 psi, anotando sus correspondientes deformaciones, y completando así la serie de esfuerzos mencionada en la tabla 7 para muestras finas o material tipo 2.

4.9.2. Resultados

Los resultados se presentan a continuación:

Donde el primer número de la secuencia indica el espécimen ensayado, y el segundo valor, el número del ciclo, ejemplo: Secuencia 1 – 2: espécimen ensayado = 1, ciclo y condición de esfuerzos = 2, de la tabla 8: $\sigma_3 = 20,7$ KPa, $\sigma_d = 41,4$ Kpa.

Tabla 22. Módulo resiliente P1 portillo

PORTILLO					
P - 1					
SECUENCIA	MR(Mpa)	SECUENCIA	MR(Mpa)	SECUENCIA	MR(Mpa)
1-1	88,16	2-1	81,64	3-1	77,89
1-2	65,87	2-2	62,57	3-2	59,69
1-3	55,62	2-3	53,58	3-3	50,05
1-4	49,01	2-4	47,55	3-4	44,11
1-5	45,71	2-5	43,11	3-5	39,49
1-6	72,13	2-6	68,03	3-6	64,91
1-7	56,46	2-7	52,48	3-7	48,50
1-8	47,06	2-8	44,97	3-8	41,42
1-9	40,43	2-9	39,62	3-9	36,93
1-10	36,57	2-10	36,31	3-10	34,64
1-11	56,67	2-11	54,43	3-11	53,35
1-12	46,50	2-12	42,81	3-12	39,80
1-13	38,24	2-13	35,97	3-13	33,37
1-14	33,70	2-14	32,00	3-14	30,53
1-15	30,94	2-15	29,56	3-15	27,42

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 23. Módulo resiliente P2 portillo

PORTILLO					
P - 2					
SECUENCIA	MR(Mpa)	SECUENCIA	MR(Mpa)	SECUENCIA	MR(Mpa)
1-1	80,17	2-1	76,30	3-1	72,40
1-2	63,90	2-2	58,56	3-2	56,67
1-3	53,76	2-3	48,95	3-3	47,24
1-4	48,07	2-4	43,72	3-4	42,72
1-5	44,18	2-5	39,44	3-5	38,82
1-6	66,81	2-6	62,98	3-6	61,26
1-7	55,09	2-7	49,41	3-7	48,08
1-8	44,96	2-8	42,20	3-8	40,94
1-9	38,91	2-9	37,62	3-9	36,89
1-10	34,44	2-10	32,97	3-10	32,56
1-11	55,29	2-11	52,90	3-11	49,77
1-12	43,17	2-12	40,54	3-12	39,67
1-13	36,91	2-13	34,47	3-13	33,19
1-14	32,04	2-14	30,81	3-14	30,63
1-15	29,03	2-15	27,55	3-15	27,28

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 24. Módulo resiliente P3 portillo

PORTILLO					
P - 3					
SECUENCIA	MR(Mpa)	SECUENCIA	MR(Mpa)	SECUENCIA	MR(Mpa)
1-1	78,46	2-1	72,75	3-1	79,31
1-2	60,13	2-2	61,33	3-2	58,53
1-3	50,42	2-3	52,52	3-3	50,97
1-4	44,43	2-4	46,61	3-4	44,91
1-5	40,59	2-5	41,40	3-5	39,42
1-6	65,38	2-6	61,56	3-6	66,09
1-7	52,11	2-7	51,44	3-7	49,39
1-8	42,46	2-8	43,30	3-8	42,18
1-9	37,19	2-9	37,94	3-9	36,75
1-10	33,15	2-10	32,20	3-10	32,43
1-11	56,04	2-11	50,01	3-11	49,57
1-12	41,14	2-12	41,96	3-12	39,51
1-13	35,59	2-13	36,30	3-13	34,95
1-14	30,18	2-14	31,99	3-14	31,09
1-15	27,62	2-15	27,41	3-15	27,17

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 25. Módulo resiliente P4 portillo

PORTILLO					
P - 4					
SECUENCIA	MR(Mpa)	SECUENCIA	MR(Mpa)	SECUENCIA	MR(Mpa)
1-1	79,85	2-1	77,03	3-1	77,39
1-2	61,20	2-2	59,04	3-2	55,08
1-3	52,40	2-3	47,52	3-3	45,91
1-4	47,18	2-4	42,44	3-4	41,52
1-5	43,53	2-5	38,29	3-5	37,73
1-6	66,54	2-6	61,14	3-6	64,49
1-7	53,04	2-7	50,16	3-7	48,19
1-8	43,98	2-8	40,97	3-8	38,50
1-9	38,30	2-9	37,39	3-9	35,86
1-10	34,02	2-10	32,01	3-10	31,64
1-11	57,04	2-11	51,36	3-11	55,28
1-12	44,20	2-12	40,39	3-12	36,72
1-13	37,32	2-13	33,94	3-13	32,26
1-14	32,56	2-14	30,20	3-14	29,77
1-15	28,11	2-15	26,75	3-15	26,51

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 26. Módulo resiliente B1 Barrancas

BARRANCAS					
B - 1					
SECUENCIA	MR(Mpa)	SECUENCIA	MR(Mpa)	SECUENCIA	MR(Mpa)
1-1	65,91	2-1	62,51	3-1	58,35
1-2	43,78	2-2	42,61	3-2	41,99
1-3	36,97	2-3	37,41	3-3	34,41
1-4	32,25	2-4	32,48	3-4	30,93
1-5	28,64	2-5	28,61	3-5	27,47
1-6	56,50	2-6	58,05	3-6	54,18
1-7	39,40	2-7	38,56	3-7	37,79
1-8	32,97	2-8	32,98	3-8	31,62
1-9	29,32	2-9	29,58	3-9	28,12
1-10	26,73	2-10	26,41	3-10	25,64
1-11	49,44	2-11	50,79	3-11	47,41
1-12	34,26	2-12	35,20	3-12	32,86
1-13	29,75	2-13	29,15	3-13	28,53
1-14	26,87	2-14	26,30	3-14	25,77
1-15	23,59	2-15	22,89	3-15	22,62

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 27. Módulo resiliente B2 Barrancas

BARRANCAS					
B - 2					
SECUENCIA	MR(Mpa)	SECUENCIA	MR(Mpa)	SECUENCIA	MR(Mpa)
1-1	70,74	2-1	68,03	3-1	66,19
1-2	45,61	2-2	47,85	3-2	43,97
1-3	36,37	2-3	35,97	3-3	34,03
1-4	30,51	2-4	31,40	3-4	29,44
1-5	26,30	2-5	25,87	3-5	25,17
1-6	59,86	2-6	58,31	3-6	56,74
1-7	40,81	2-7	40,67	3-7	39,57
1-8	32,44	2-8	31,48	3-8	30,63
1-9	27,35	2-9	26,84	3-9	26,12
1-10	21,92	2-10	22,99	3-10	22,37
1-11	51,88	2-11	51,02	3-11	49,64
1-12	35,24	2-12	33,89	3-12	32,97
1-13	27,91	2-13	26,79	3-13	26,06
1-14	22,99	2-14	22,19	3-14	21,59
1-15	19,73	2-15	19,90	3-15	19,36

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 28. Módulo resiliente B3 Barrancas

BARRANCAS					
B - 3					
SECUENCIA	MR(Mpa)	SECUENCIA	MR(Mpa)	SECUENCIA	MR(Mpa)
1-1	67,15	2-1	58,69	3-1	55,46
1-2	44,60	2-2	40,93	3-2	38,68
1-3	36,55	2-3	36,21	3-3	33,26
1-4	31,59	2-4	31,02	3-4	28,78
1-5	27,98	2-5	27,77	3-5	25,23
1-6	57,56	2-6	51,36	3-6	48,53
1-7	38,23	2-7	37,21	3-7	35,16
1-8	31,86	2-8	31,68	3-8	27,85
1-9	27,38	2-9	28,88	3-9	24,35
1-10	24,61	2-10	25,71	3-10	21,87
1-11	50,36	2-11	45,65	3-11	43,14
1-12	32,11	2-12	34,11	3-12	29,75
1-13	28,24	2-13	28,16	3-13	24,95
1-14	24,52	2-14	25,38	3-14	21,10
1-15	20,42	2-15	21,93	3-15	18,74

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 29. Módulo resiliente B4 Barrancas

BARRANCAS					
B - 4					
SECUENCIA	MR(Mpa)	SECUENCIA	MR(Mpa)	SECUENCIA	MR(Mpa)
1-1	66,75	2-1	60,80	3-1	57,94
1-2	46,94	2-2	43,75	3-2	42,53
1-3	38,60	2-3	36,39	3-3	36,79
1-4	33,32	2-4	31,59	3-4	31,80
1-5	29,86	2-5	27,83	3-5	27,41
1-6	57,21	2-6	52,69	3-6	50,69
1-7	38,00	2-7	35,79	3-7	36,73
1-8	31,67	2-8	30,47	3-8	30,51
1-9	27,68	2-9	26,85	3-9	27,56
1-10	23,89	2-10	23,57	3-10	24,19
1-11	47,12	2-11	43,91	3-11	45,06
1-12	33,25	2-12	31,50	3-12	31,08
1-13	27,45	2-13	27,09	3-13	27,19
1-14	23,33	2-14	23,02	3-14	23,62
1-15	20,30	2-15	20,03	3-15	20,56

Fuente: Elaboración Propia

5. Regresión Lineal Múltiple

A partir de la Ecuación (4)

$$Mr = k_1 Pa \left(\frac{\theta}{Pa}\right)^{k_2} \left(\frac{\tau_{oct}}{Pa} + 1\right)^{k_3}$$

Aplicamos logaritmos para volverla lineal:

$$\log\left(\frac{Mr}{Pa}\right) = \log k_1 + k_2 \log\left(\frac{\theta}{Pa}\right) + k_3 \log\left(\frac{\tau_{oct}}{Pa} + 1\right)$$

Aplicamos un cambio de variable para volver la ecuación lineal según la tabla:

Tabla 30. Variables de entrada

Nombre de las variables	Valor de la Variable
Y_1	$\text{LOG}(Mr/Pa)$
X_1	$\text{LOG}(\sigma_3/Pa)$
X_2	$\text{LOG}(\Theta/Pa)$
X_3	$\text{LOG}(\sigma_d/Pa)$
X_4	$\text{LOG}(\tau_{oct}/Pa)$
X_5	$\text{LOG}((\tau_{oct}/Pa)+1)$
X_6	$(\text{LOG}(\tau_{oct}/Pa))^2$ $X_6 = X_4^2$

Fuente: Elaboración Propia

$$Y_1 = b + m_2 * x_2 + m_5 * x_5$$

Dónde:

$$b = \log K_1$$

$$m_2 = K_2$$

$$m_5 = K_5$$

Se realizaron tres especímenes por cada muestra de suelo, considerando la densidad máxima seca y la humedad óptima del ensayo Proctor T-180 para el primer espécimen, y variando es el espectro de $\pm 2\%$ de contenido de humedad a partir del contenido de humedad óptima del primer espécimen, reduciendo el contenido de humedad en 2% para el segundo espécimen, y aumentando un 2% de la humedad óptima para el tercer espécimen.

El modelo de regresión lineal para la muestra identificada como P – 1 con humedad óptima para un $R^2 = 0,97$ queda:

$$Y_1 = 2,96592 + 0,51813 * X_2 - 4,1144 * X_5$$

Finalmente para la muestra de portillo P - 1:

$$Mr = 924,5277 * Pa \left(\frac{\theta}{Pa} \right)^{0,5181} \left(\frac{\tau_{oct}}{Pa} + 1 \right)^{-4,1144}$$

Para el espécimen con una reducción del 2% del contenido de humedad óptima de la muestra identificada como P – 1, con un $R^2 = 0,97$

$$Y_1 = 2,9342 + 0,5229 * X_2 - 4,0069 * X_5$$

Finalmente:

$$Mr = 859,3238 * Pa \left(\frac{\theta}{Pa} \right)^{0,5229} \left(\frac{\tau_{oct}}{Pa} + 1 \right)^{-4,0069}$$

Para el espécimen con un aumento del 2% del contenido de humedad óptima de la muestra identificada como P – 1, con un $R^2 = 0,96$

$$Y_1 = 2,9143 + 0,5082 * X_2 - 4,1657 * X_5$$

Finalmente:

$$Mr = 820,8322 * Pa \left(\frac{\theta}{Pa} \right)^{0,5082} \left(\frac{\tau_{oct}}{Pa} + 1 \right)^{-4,1657}$$

De esta forma se procede a encontrar los coeficientes de regresión para la ecuación constitutiva del módulo resiliente, para cada espécimen.

Para la muestra identificada como P – 2 con el contenido de humedad óptimo y un $R^2 = 0,97$

$$Mr = 872,6125 * Pa \left(\frac{\theta}{Pa} \right)^{0,5205} \left(\frac{\tau_{oct}}{Pa} + 1 \right)^{-4,0654}$$

Para la muestra P – 2 con una reducción del 2% del contenido de humedad óptimo, y un $R^2 = 0,97$:

$$Mr = 809,7318 * Pa \left(\frac{\theta}{Pa} \right)^{0,4786} \left(\frac{\tau_{oct}}{Pa} + 1 \right)^{-3,9908}$$

Para la muestra P – 2 con un aumento del 2% del contenido de humedad óptimo, y con un $R^2 = 0,97$

$$Mr = 767,7127 * Pa \left(\frac{\theta}{Pa} \right)^{0,4764} \left(\frac{\tau_{oct}}{Pa} + 1 \right)^{-3,8182}$$

Para la muestra identificada como P – 3 con el contenido de humedad óptimo y un $R^2=0.96$

$$Mr = 853,0301 * Pa \left(\frac{\theta}{Pa} \right)^{0,4843} \left(\frac{\tau_{oct}}{Pa} + 1 \right)^{-4,1887}$$

Para la muestra P – 3 con una reducción del 2% del contenido de humedad óptimo, y un $R^2=0.98$:

$$Mr = 803,9911 * Pa \left(\frac{\theta}{Pa} \right)^{0,5084} \left(\frac{\tau_{oct}}{Pa} + 1 \right)^{-3,8736}$$

Para la muestra P – 3 con un aumento del 2% del contenido de humedad óptimo, y con un $R^2 = 0,98$:

$$Mr = 828,2361 * Pa \left(\frac{\theta}{Pa} \right)^{0,5388} \left(\frac{\tau_{oct}}{Pa} + 1 \right)^{-4,1389}$$

Para la muestra identificada como P – 4 con el contenido de humedad óptimo y un $R^2=0.96$

$$Mr = 866,1210 * Pa \left(\frac{\theta}{Pa} \right)^{0,4739} \left(\frac{\tau_{oct}}{Pa} + 1 \right)^{-4,0020}$$

Para la muestra P – 4 con una reducción del 2% del contenido de humedad óptimo, y un $R^2=0.98$:

$$Mr = 810,4000 * Pa \left(\frac{\theta}{Pa} \right)^{0,4838} \left(\frac{\tau_{oct}}{Pa} + 1 \right)^{-4,2185}$$

Para la muestra P – 4 con un aumento del 2% del contenido de humedad óptimo, y con un $R^2 = 0,93$:

$$Mr = 808,9805 * Pa \left(\frac{\theta}{Pa} \right)^{0,4690} \left(\frac{\tau_{oct}}{Pa} + 1 \right)^{-4,3014}$$

Para la muestra identificada como B – 1 con el contenido de humedad óptimo y un $R^2=0.94$

$$Mr = 685,7841 * Pa \left(\frac{\theta}{Pa} \right)^{0,3032} \left(\frac{\tau_{oct}}{Pa} + 1 \right)^{-4,0872}$$

Para la muestra B – 1 con una reducción del 2% del contenido de humedad óptimo, y un $R^2=0.94$:

$$Mr = 684,4287 * Pa \left(\frac{\theta}{Pa} \right)^{0,2839} \left(\frac{\tau_{oct}}{Pa} + 1 \right)^{-4,0483}$$

Para la muestra B – 1 con un aumento del 2% del contenido de humedad óptimo, y con un $R^2 = 0,94$:

$$Mr = 636,2973 * Pa \left(\frac{\theta}{Pa} \right)^{0,2691} \left(\frac{\tau_{oct}}{Pa} + 1 \right)^{-3,9959}$$

Para la muestra identificada como B – 2 con el contenido de humedad óptimo y un $R^2=0.97$

$$Mr = 799,7910 * Pa \left(\frac{\theta}{Pa} \right)^{0,3698} \left(\frac{\tau_{oct}}{Pa} + 1 \right)^{-5,2923}$$

Para la muestra B – 2 con una reducción del 2% del contenido de humedad óptimo, y un $R^2=0.97$:

$$Mr = 782,2270 * Pa \left(\frac{\theta}{Pa}\right)^{0,4070} \left(\frac{\tau_{oct}}{Pa} + 1\right)^{-5,1797}$$

Para la muestra B – 2 con un aumento del 2% del contenido de humedad óptimo, y con un $R^2 = 0,96$:

$$Mr = 747,8053 * Pa \left(\frac{\theta}{Pa}\right)^{0,3749} \left(\frac{\tau_{oct}}{Pa} + 1\right)^{-5,1249}$$

Para la muestra identificada como B – 3 con el contenido de humedad óptimo y un $R^2=0.94$

$$Mr = 726,3890 * Pa \left(\frac{\theta}{Pa}\right)^{0,3801} \left(\frac{\tau_{oct}}{Pa} + 1\right)^{-4,6640}$$

Para la muestra B – 3 con una reducción del 2% del contenido de humedad óptimo, y un $R^2=0.95$:

$$Mr = 627,7124 * Pa \left(\frac{\theta}{Pa}\right)^{0,2967} \left(\frac{\tau_{oct}}{Pa} + 1\right)^{-3,8414}$$

Para la muestra B – 3 con un aumento del 2% del contenido de humedad óptimo, y con un $R^2 = 0,95$:

$$Mr = 615,6905 * Pa \left(\frac{\theta}{Pa}\right)^{0,3646} \left(\frac{\tau_{oct}}{Pa} + 1\right)^{-4,4648}$$

Para la muestra identificada como B – 4 con el contenido de humedad óptimo y un $R^2=0.95$

$$Mr = 732,2194 * Pa \left(\frac{\theta}{Pa} \right)^{0,4648} \left(\frac{\tau_{oct}}{Pa} + 1 \right)^{-4,7617}$$

Para la muestra B – 4 con una reducción del 2% del contenido de humedad óptimo, y un $R^2=0.96$:

$$Mr = 661,6366 * Pa \left(\frac{\theta}{Pa} \right)^{0,4195} \left(\frac{\tau_{oct}}{Pa} + 1 \right)^{-4,4434}$$

Para la muestra B – 4 con un aumento del 2% del contenido de humedad óptimo, y con un $R^2 = 0,95$:

$$Mr = 638,8875 * Pa \left(\frac{\theta}{Pa} \right)^{0,3829} \left(\frac{\tau_{oct}}{Pa} + 1 \right)^{-4,1063}$$

Con las propiedades de cada suelo se procede a calcular los valores de regresión K_1 , K_2 y K_3 de la ecuación constitutiva del MR:

Tabla 31. Propiedades Físicas de los suelos estudiados

	Espécimen	P ₄	P ₄₀	P ₂₀₀	LL	IP	W	Wopt	Y	Y _{max}	%arcilla	%limo
P1	1	100	98,03	84,58	35,45	14,81	16,06	16,43	1,68	1,68	36,33	63,67
	2	100	98,03	84,58	35,45	14,81	14,02	16,43	1,67	1,68	36,33	63,67
	3	100	98,03	84,58	35,45	14,81	17,96	16,43	1,67	1,68	36,33	63,67
P2	1	100	97,42	84,99	36,78	13,11	16,15	16,23	1,66	1,66	31,20	68,80
	2	100	97,42	84,99	36,78	13,11	14,04	16,23	1,64	1,66	31,20	68,80
	3	100	97,42	84,99	36,78	13,11	18,13	16,23	1,65	1,66	31,20	68,80
P3	1	100	98,09	81,36	34,44	12,50	17,01	17,45	1,67	1,67	34,20	65,80
	2	100	98,09	81,36	34,44	12,50	14,99	17,45	1,66	1,67	34,20	65,80
	3	100	98,09	81,36	34,44	12,50	19,13	17,45	1,66	1,67	34,20	65,80
P4	1	100	98,00	81,71	34,7	12,89	16,51	16,46	1,66	1,66	35,34	64,66
	2	100	98,00	81,71	34,7	12,89	14,52	16,46	1,65	1,66	35,34	64,66
	3	100	98,00	81,71	34,7	12,89	18,57	16,46	1,64	1,66	35,34	64,66
B1	1	100	98,41	92,06	43,49	20,62	18,96	18,83	1,64	1,64	55,18	44,82
	2	100	98,41	92,06	43,49	20,62	16,98	18,83	1,63	1,64	55,18	44,82
	3	100	98,41	92,06	43,49	20,62	20,91	18,83	1,63	1,64	55,18	44,82
B2	1	100	98,43	91,33	43,05	19,56	17,59	17,75	1,65	1,65	50,94	49,06
	2	100	98,43	91,33	43,05	19,56	15,26	17,75	1,64	1,65	50,94	49,06
	3	100	98,43	91,33	43,05	19,56	19,51	17,75	1,64	1,65	50,94	49,06
B3	1	100	98,95	91,46	46,25	19,79	18,64	18,58	1,65	1,65	53,35	46,65
	2	100	98,95	91,46	46,25	19,79	16,84	18,58	1,63	1,65	53,35	46,65
	3	100	98,95	91,46	46,25	19,79	20,88	18,58	1,63	1,65	53,35	46,65
B4	1	100	98,72	91,03	45,86	19,62	18,47	18,52	1,63	1,63	56,42	43,58
	2	100	98,72	91,03	45,86	19,62	16,43	18,52	1,62	1,63	56,42	43,58
	3	100	98,72	91,03	45,86	19,62	20,41	18,52	1,62	1,63	56,42	43,58

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 32. Coeficientes de Regresión para las ecuaciones (6) a (14)

	Espécimen	K ₁	K ₂	K ₃	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)
					K ₁	K ₂	K ₃	K ₁	K ₂	K ₃	K ₁	K ₂	K ₃
P1	1	924,5277	0,5181	-4,1144	1,0411	0,3053	-1,0940	-0,5633	0,3935	-0,4732	935,8517	0,3629	-2,0281
	2	859,3238	0,5229	-4,0069	1,1299	0,3053	-1,0194	-0,5633	0,3935	-0,4732	1050,8698	0,2901	-1,3578
	3	820,8322	0,5082	-4,1657	0,9579	0,3053	-1,1644	-0,5633	0,3935	-0,4732	816,9170	0,4244	-2,6575
P2	1	872,6125	0,5205	-4,0654	0,9825	0,2954	-0,9309	-0,5909	0,4176	-0,4381	835,5840	0,4238	-2,5206
	2	809,7318	0,4786	-3,9908	1,0748	0,2954	-0,8526	-0,5909	0,4176	-0,4381	953,5576	0,3452	-1,8152
	3	767,7127	0,4764	-3,8182	0,8961	0,2954	-0,5413	-0,5909	0,4176	-0,4381	709,4972	0,4875	-3,1813
P3	1	853,0301	0,4843	-4,1887	0,9770	0,3127	-0,9908	-0,6004	0,4255	-0,4255	835,2226	0,4303	-2,5458
	2	803,9911	0,5084	-3,8736	1,0653	0,3127	-0,9211	-0,6004	0,4255	-0,4255	941,9195	0,3614	-1,9185
	3	828,2361	0,5388	-4,1389	0,8844	0,3127	-1,0645	-0,6004	0,4255	-0,4255	711,6761	0,4956	-3,2049
P4	1	866,1210	0,4739	-4,0020	1,0108	0,3149	-0,9780	-0,5941	0,4202	-0,4336	818,3917	0,4333	-2,6107
	2	810,4000	0,4838	-4,2185	1,0980	0,3149	-0,9048	-0,5941	0,4202	-0,4336	933,0717	0,3629	-1,9536
	3	808,9805	0,4690	-4,3014	0,9207	0,3149	-1,0542	-0,5941	0,4202	-0,4336	686,8388	0,4972	-3,2903
B1	1	685,7841	0,3032	-4,0872	1,1140	0,2528	-1,6937	-0,4695	0,3124	-0,5936	1136,2757	0,2102	-0,8477
	2	684,4287	0,2839	-4,0483	1,2005	0,2528	-1,6303	-0,4695	0,3124	-0,5936	1235,0517	0,2102	-0,8477
	3	636,2973	0,2691	-3,9959	1,0288	0,2528	-1,7566	-0,4695	0,3124	-0,5936	1028,9387	0,2642	-1,4096
B2	1	799,7910	0,3698	-5,2923	1,1290	0,2617	-1,4900	-0,4866	0,3272	-0,5715	1112,4291	0,2342	-1,0076
	2	782,2270	0,4070	-5,1797	1,2309	0,2617	-1,4107	-0,4866	0,3272	-0,5715	1236,5884	0,1576	-0,2953
	3	747,8053	0,3749	-5,1249	1,0450	0,2617	-1,5559	-0,4866	0,3272	-0,5715	999,0203	0,2901	-1,5954
B3	1	726,3890	0,3801	-4,6640	1,1088	0,2525	-1,4331	-0,4827	0,3237	-0,5763	1109,0991	0,2321	-1,0197
	2	627,7124	0,2967	-3,8414	1,1873	0,2525	-1,3750	-0,4827	0,3237	-0,5763	1194,5670	0,1722	-0,4957
	3	615,6905	0,3646	-4,4648	1,0107	0,2525	-1,5067	-0,4827	0,3237	-0,5763	979,7193	0,2919	-1,6753
B4	1	732,2194	0,4648	-4,7617	1,1486	0,2531	-1,5083	-0,4856	0,3262	-0,5728	1097,5097	0,2338	-1,0297
	2	661,6366	0,4195	-4,4434	1,2378	0,2531	-1,4418	-0,4856	0,3262	-0,5728	1201,1076	0,1693	-0,4321
	3	638,8875	0,3829	-4,1063	1,0637	0,2531	-1,5721	-0,4856	0,3262	-0,5728	986,7845	0,2868	-1,5988

Fuente: Elaboración Propia

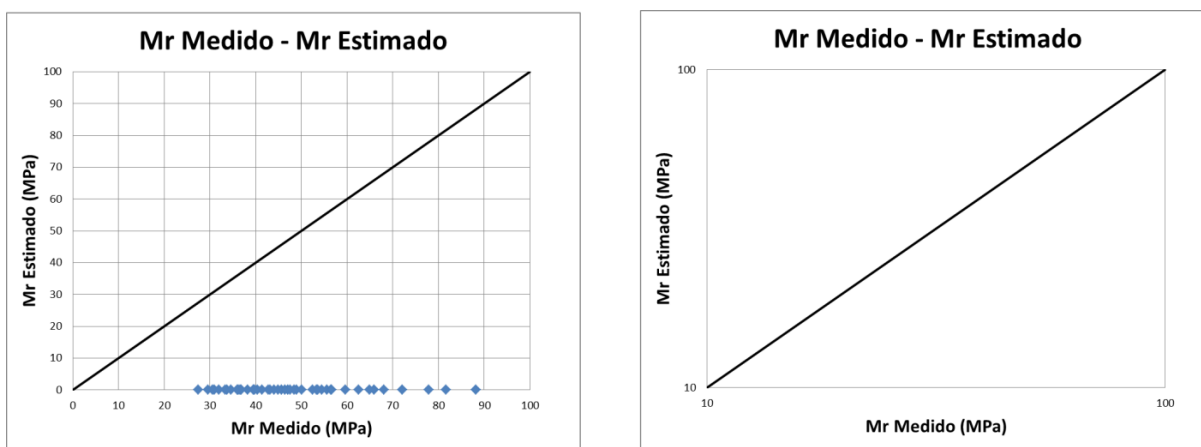
Con estos valores de las constantes K_1 , K_2 y K_3 se procede a estimar el Mr:

Tabla 33. Valores de Modulo Resiliente muestra P – 1 modelo LTTP ecuaciones (6) a (8)

PORTILLO								
P - 1								
$Mr = 1,04 * Pa \left(\frac{\Theta}{Pa}\right)^{0,305} \left(\frac{\tau_{oct}}{Pa} + 1\right)^{-1,094}$			$Mr = 1,13 * Pa \left(\frac{\Theta}{Pa}\right)^{0,305} \left(\frac{\tau_{oct}}{Pa} + 1\right)^{-1,019}$			$Mr = 0,96 * Pa \left(\frac{\Theta}{Pa}\right)^{0,305} \left(\frac{\tau_{oct}}{Pa} + 1\right)^{-1,164}$		
K_1	K_2	K_3	K_1	K_2	K_3	K_1	K_2	K_3
1,041	0,305	-1,094	1,130	0,305	-1,019	0,958	0,305	-1,164
Ciclo	Mr estimado	Mr medido	Ciclo	Mr estimado	Mr medido	Ciclo	Mr estimado	Mr medido
1-1	0,107	88,16	2-1	0,117	81,64	3-1	0,098	77,89
1-2	0,104	65,87	2-2	0,113	62,57	3-2	0,095	59,69
1-3	0,100	55,62	2-3	0,110	53,58	3-3	0,091	50,05
1-4	0,097	49,01	2-4	0,107	47,55	3-4	0,088	44,11
1-5	0,094	45,71	2-5	0,104	43,11	3-5	0,085	39,49
1-6	0,096	72,13	2-6	0,105	68,03	3-6	0,088	64,91
1-7	0,094	56,46	2-7	0,103	52,48	3-7	0,086	48,50
1-8	0,091	47,06	2-8	0,101	44,97	3-8	0,083	41,42
1-9	0,089	40,43	2-9	0,099	39,62	3-9	0,081	36,93
1-10	0,087	36,57	2-10	0,096	36,31	3-10	0,079	34,64
1-11	0,081	56,67	2-11	0,088	54,43	3-11	0,074	53,35
1-12	0,081	46,50	2-12	0,089	42,81	3-12	0,074	39,80
1-13	0,081	38,24	2-13	0,089	35,97	3-13	0,074	33,37
1-14	0,080	33,70	2-14	0,088	32,00	3-14	0,073	30,53
1-15	0,079	30,94	2-15	0,087	29,56	3-15	0,071	27,42

Fuente: Elaboración Propia

Figura 22. Valores medidos y estimados muestra P-1 modelo LTTP ecuaciones (6) a (8)



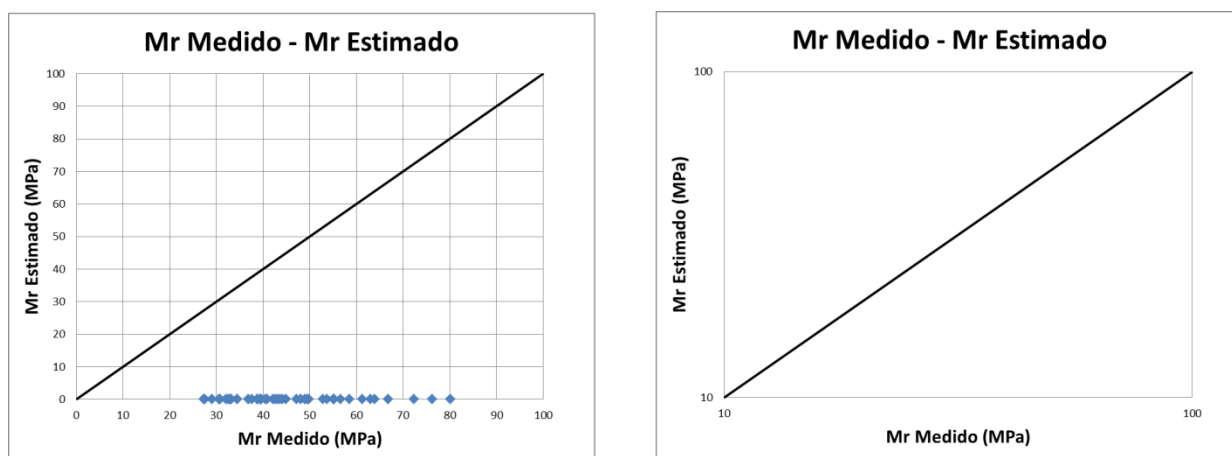
Fuente: Elaboración Propia

Tabla 34. Valores de Modulo Resiliente muestra P – 2 modelo LTTP ecuaciones (6) a (8)

PORTILLO								
P - 2								
$Mr = 0,98 * Pa \left(\frac{\Theta}{Pa}\right)^{0,295} \left(\frac{\tau_{oct}}{Pa} + 1\right)^{-0,931}$			$Mr = 1,07 * Pa \left(\frac{\Theta}{Pa}\right)^{0,295} \left(\frac{\tau_{oct}}{Pa} + 1\right)^{-0,853}$			$Mr = 0,90 * Pa \left(\frac{\Theta}{Pa}\right)^{0,295} \left(\frac{\tau_{oct}}{Pa} + 1\right)^{-1,005}$		
K ₁	K ₂	K ₃	K ₁	K ₂	K ₃	K ₁	K ₂	K ₃
0,982	0,295	-0,931	1,075	0,295	-0,853	0,896	0,295	-1,005
Ciclo	Mr estimado	Mr medido	Ciclo	Mr estimado	Mr medido	Ciclo	Mr estimado	Mr medido
1-1	0,102	80,17	2-1	0,112	76,30	3-1	0,093	72,40
1-2	0,099	63,90	2-2	0,110	58,56	3-2	0,090	56,67
1-3	0,097	53,76	2-3	0,107	48,95	3-3	0,087	47,24
1-4	0,094	48,07	2-4	0,105	43,72	3-4	0,084	42,72
1-5	0,092	44,18	2-5	0,103	39,44	3-5	0,082	38,82
1-6	0,092	66,81	2-6	0,101	62,98	3-6	0,083	61,26
1-7	0,090	55,09	2-7	0,100	49,41	3-7	0,082	48,08
1-8	0,089	44,96	2-8	0,098	42,20	3-8	0,080	40,94
1-9	0,087	38,91	2-9	0,097	37,62	3-9	0,078	36,89
1-10	0,086	34,44	2-10	0,096	32,97	3-10	0,076	32,56
1-11	0,078	55,29	2-11	0,085	52,90	3-11	0,071	49,77
1-12	0,079	43,17	2-12	0,087	40,54	3-12	0,071	39,67
1-13	0,079	36,91	2-13	0,087	34,47	3-13	0,071	33,19
1-14	0,078	32,04	2-14	0,087	30,81	3-14	0,070	30,63
1-15	0,078	29,03	2-15	0,087	27,55	3-15	0,070	27,28

Fuente: Elaboración Propia

Figura 23. Valores medidos y estimados muestra P-2 modelo LTTP ecuaciones (6) a (8)



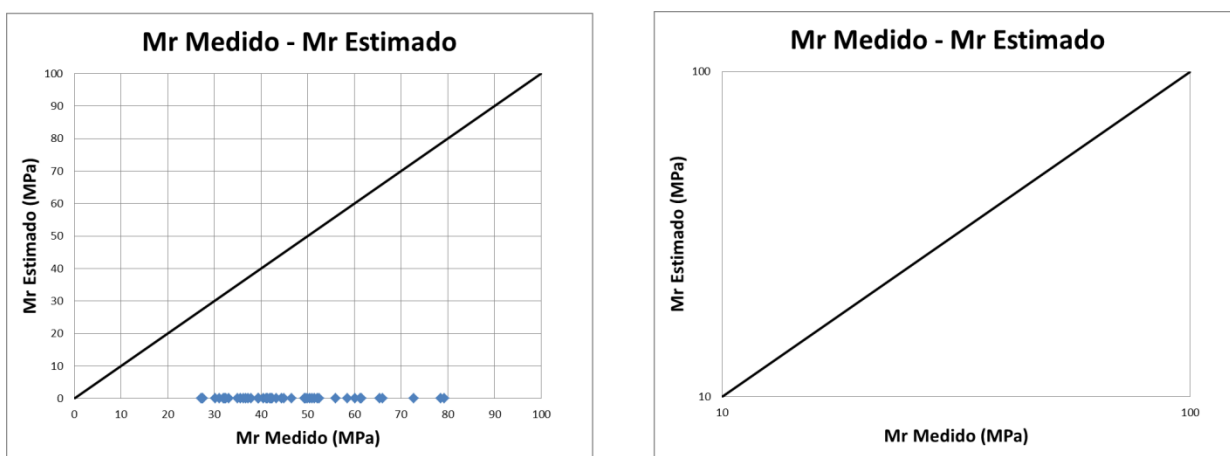
Fuente: Elaboración Propia

Tabla 35. Valores de Modulo Resiliente muestra P – 3 modelo LTTP ecuaciones (6) a (8)

PORTILLO								
P - 3								
$Mr = 0,98 * Pa \left(\frac{\Theta}{Pa}\right)^{0,313} \left(\frac{\tau_{oct}}{Pa} + 1\right)^{-0,991}$			$Mr = 1,06 * Pa \left(\frac{\Theta}{Pa}\right)^{0,313} \left(\frac{\tau_{oct}}{Pa} + 1\right)^{-0,921}$			$Mr = 0,88 * Pa \left(\frac{\Theta}{Pa}\right)^{0,313} \left(\frac{\tau_{oct}}{Pa} + 1\right)^{-1,065}$		
K ₁	K ₂	K ₃	K ₁	K ₂	K ₃	K ₁	K ₂	K ₃
0,977	0,313	-0,991	1,065	0,313	-0,921	0,884	0,313	-1,065
Ciclo	Mr estimado	Mr medido	Ciclo	Mr estimado	Mr medido	Ciclo	Mr estimado	Mr medido
1-1	0,102	78,46	2-1	0,111	72,75	3-1	0,091	79,31
1-2	0,099	60,13	2-2	0,109	61,33	3-2	0,089	58,53
1-3	0,096	50,42	2-3	0,106	52,52	3-3	0,085	50,97
1-4	0,093	44,43	2-4	0,103	46,61	3-4	0,083	44,91
1-5	0,091	40,59	2-5	0,101	41,40	3-5	0,080	39,42
1-6	0,091	65,38	2-6	0,099	61,56	3-6	0,082	66,09
1-7	0,089	52,11	2-7	0,098	51,44	3-7	0,080	49,39
1-8	0,088	42,46	2-8	0,097	43,30	3-8	0,078	42,18
1-9	0,086	37,19	2-9	0,095	37,94	3-9	0,076	36,75
1-10	0,084	33,15	2-10	0,094	32,20	3-10	0,075	32,43
1-11	0,076	56,04	2-11	0,083	50,01	3-11	0,069	49,57
1-12	0,077	41,14	2-12	0,085	41,96	3-12	0,069	39,51
1-13	0,077	35,59	2-13	0,085	36,30	3-13	0,069	34,95
1-14	0,077	30,18	2-14	0,085	31,99	3-14	0,068	31,09
1-15	0,076	27,62	2-15	0,085	27,41	3-15	0,068	27,17

Fuente: Elaboración Propia

Figura 24. Valores medidos y estimados muestra P-3 modelo LTTP ecuaciones (6) a (8)



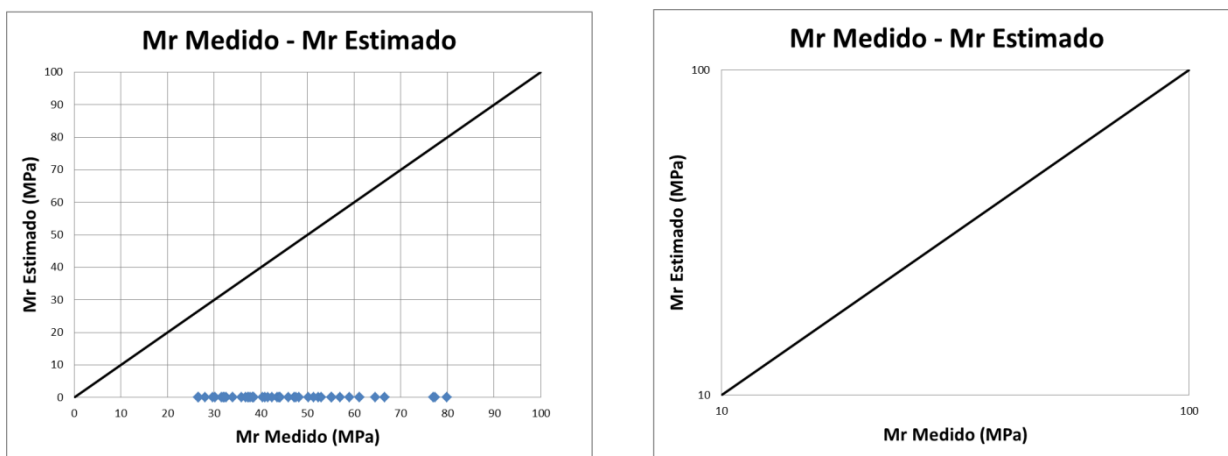
Fuente: Elaboración Propia

Tabla 36. Valores de Modulo Resiliente muestra P – 4 modelo LTTP ecuaciones (6) a (8)

PORTILLO								
P - 4								
$Mr = 1,01 * Pa \left(\frac{\Theta}{Pa}\right)^{0,315} \left(\frac{\tau_{oct}}{Pa} + 1\right)^{-0,978}$			$Mr = 1,10 * Pa \left(\frac{\Theta}{Pa}\right)^{0,315} \left(\frac{\tau_{oct}}{Pa} + 1\right)^{-0,905}$			$Mr = 0,92 * Pa \left(\frac{\Theta}{Pa}\right)^{0,315} \left(\frac{\tau_{oct}}{Pa} + 1\right)^{-1,054}$		
K ₁	K ₂	K ₃	K ₁	K ₂	K ₃	K ₁	K ₂	K ₃
1,011	0,315	-0,978	1,098	0,315	-0,905	0,921	0,315	-1,054
Ciclo	Mr estimado	Mr medido	Ciclo	Mr estimado	Mr medido	Ciclo	Mr estimado	Mr medido
1-1	0,105	79,85	2-1	0,115	77,03	3-1	0,096	77,39
1-2	0,102	61,20	2-2	0,112	59,04	3-2	0,093	55,08
1-3	0,099	52,40	2-3	0,110	47,52	3-3	0,090	45,91
1-4	0,097	47,18	2-4	0,107	42,44	3-4	0,087	41,52
1-5	0,094	43,53	2-5	0,105	38,29	3-5	0,085	37,73
1-6	0,094	66,54	2-6	0,103	61,14	3-6	0,085	64,49
1-7	0,093	53,04	2-7	0,102	50,16	3-7	0,084	48,19
1-8	0,091	43,98	2-8	0,100	40,97	3-8	0,082	38,50
1-9	0,089	38,30	2-9	0,099	37,39	3-9	0,080	35,86
1-10	0,087	34,02	2-10	0,097	32,01	3-10	0,078	31,64
1-11	0,079	57,04	2-11	0,086	51,36	3-11	0,071	55,28
1-12	0,080	44,20	2-12	0,087	40,39	3-12	0,072	36,72
1-13	0,080	37,32	2-13	0,088	33,94	3-13	0,072	32,26
1-14	0,080	32,56	2-14	0,088	30,20	3-14	0,071	29,77
1-15	0,079	28,11	2-15	0,088	26,75	3-15	0,071	26,51

Fuente: Elaboración Propia

Figura 25. Valores medidos y estimados muestra P-4 modelo LTTP ecuaciones (6) a (8)



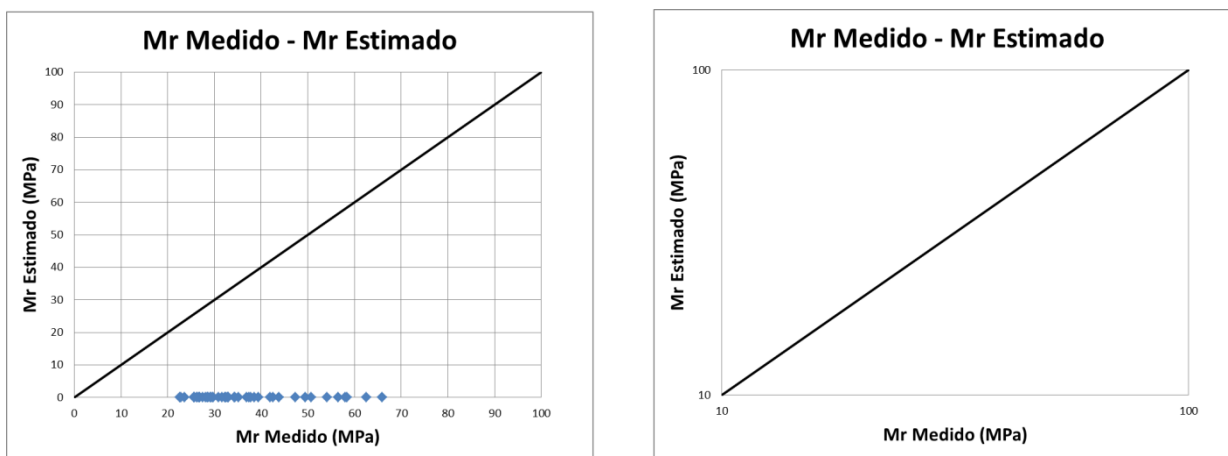
Fuente: Elaboración Propia

Tabla 37. Valores de Modulo Resiliente muestra B – 1 modelo LTTP ecuaciones (6) a (8)

BARRANCAS								
B - 1								
$Mr = 1,11 * Pa \left(\frac{\Theta}{Pa}\right)^{0,253} \left(\frac{\tau_{oct}}{Pa} + 1\right)^{-1,694}$			$Mr = 1,20 * Pa \left(\frac{\Theta}{Pa}\right)^{0,253} \left(\frac{\tau_{oct}}{Pa} + 1\right)^{-1,630}$			$Mr = 1,03 * Pa \left(\frac{\Theta}{Pa}\right)^{0,253} \left(\frac{\tau_{oct}}{Pa} + 1\right)^{-1,757}$		
K ₁	K ₂	K ₃	K ₁	K ₂	K ₃	K ₁	K ₂	K ₃
1,114	0,253	-1,694	1,201	0,253	-1,630	1,029	0,253	-1,757
Ciclo	Mr estimado	Mr medido	Ciclo	Mr estimado	Mr medido	Ciclo	Mr estimado	Mr medido
1-1	0,109	65,91	2-1	0,118	62,51	3-1	0,100	58,35
1-2	0,101	43,78	2-2	0,110	42,61	3-2	0,093	41,99
1-3	0,094	36,97	2-3	0,102	37,41	3-3	0,086	34,41
1-4	0,088	32,25	2-4	0,095	32,48	3-4	0,080	30,93
1-5	0,082	28,64	2-5	0,090	28,61	3-5	0,075	27,47
1-6	0,099	56,50	2-6	0,108	58,05	3-6	0,092	54,18
1-7	0,093	39,40	2-7	0,101	38,56	3-7	0,086	37,79
1-8	0,087	32,97	2-8	0,095	32,98	3-8	0,080	31,62
1-9	0,082	29,32	2-9	0,089	29,58	3-9	0,075	28,12
1-10	0,077	26,73	2-10	0,084	26,41	3-10	0,071	25,64
1-11	0,086	49,44	2-11	0,093	50,79	3-11	0,079	47,41
1-12	0,083	34,26	2-12	0,090	35,20	3-12	0,076	32,86
1-13	0,079	29,75	2-13	0,085	29,15	3-13	0,072	28,53
1-14	0,075	26,87	2-14	0,082	26,30	3-14	0,069	25,77
1-15	0,071	23,59	2-15	0,078	22,89	3-15	0,065	22,62

Fuente: Elaboración Propia

Figura 26. Valores medidos y estimados muestra B-1 modelo LTTP ecuaciones (6) a (8)



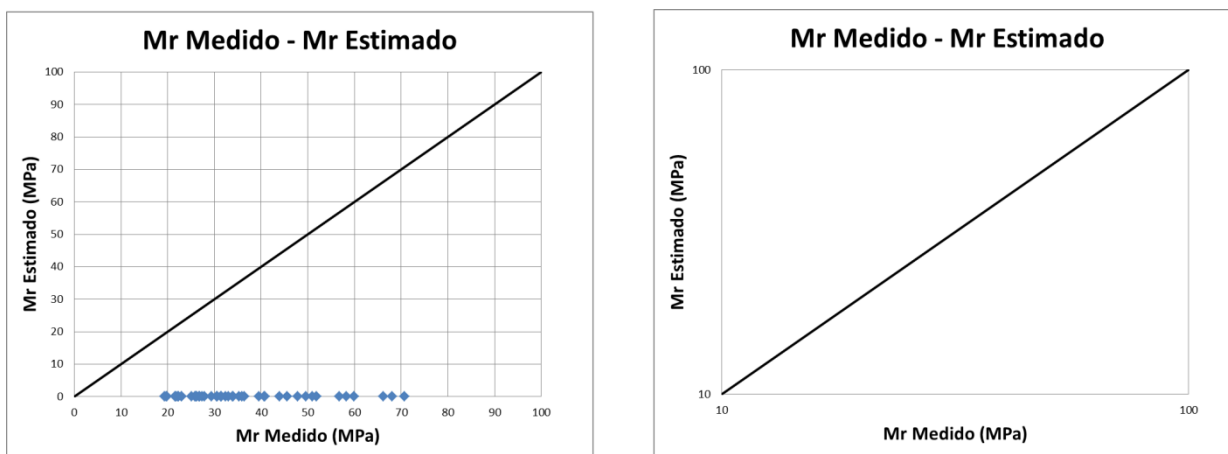
Fuente: Elaboración Propia

Tabla 38. Valores de Modulo Resiliente muestra B – 2 modelo LTTP ecuaciones (6) a (8)

BARRANCAS								
B - 2								
$Mr = 1,13 * Pa \left(\frac{\Theta}{Pa}\right)^{0,262} \left(\frac{\tau_{oct}}{Pa} + 1\right)^{-1,490}$			$Mr = 1,23 * Pa \left(\frac{\Theta}{Pa}\right)^{0,262} \left(\frac{\tau_{oct}}{Pa} + 1\right)^{-1,411}$			$Mr = 1,05 * Pa \left(\frac{\Theta}{Pa}\right)^{0,262} \left(\frac{\tau_{oct}}{Pa} + 1\right)^{-1,556}$		
K ₁	K ₂	K ₃	K ₁	K ₂	K ₃	K ₁	K ₂	K ₃
1,129	0,262	-1,490	1,231	0,262	-1,411	1,045	0,262	-1,556
Ciclo	Mr estimado	Mr medido	Ciclo	Mr estimado	Mr medido	Ciclo	Mr estimado	Mr medido
1-1	0,112	70,74	2-1	0,123	68,03	3-1	0,103	66,19
1-2	0,106	45,61	2-2	0,116	47,85	3-2	0,097	43,97
1-3	0,099	36,37	2-3	0,109	35,97	3-3	0,090	34,03
1-4	0,094	30,51	2-4	0,104	31,40	3-4	0,085	29,44
1-5	0,089	26,30	2-5	0,099	25,87	3-5	0,081	25,17
1-6	0,102	59,86	2-6	0,112	58,31	3-6	0,094	56,74
1-7	0,097	40,81	2-7	0,107	40,67	3-7	0,089	39,57
1-8	0,092	32,44	2-8	0,101	31,48	3-8	0,084	30,63
1-9	0,087	27,35	2-9	0,097	26,84	3-9	0,080	26,12
1-10	0,083	21,92	2-10	0,092	22,99	3-10	0,076	22,37
1-11	0,088	51,88	2-11	0,096	51,02	3-11	0,081	49,64
1-12	0,086	35,24	2-12	0,094	33,89	3-12	0,079	32,97
1-13	0,083	27,91	2-13	0,091	26,79	3-13	0,075	26,06
1-14	0,080	22,99	2-14	0,088	22,19	3-14	0,072	21,59
1-15	0,077	19,73	2-15	0,085	19,90	3-15	0,069	19,36

Fuente: Elaboración Propia

Figura 27. Valores medidos y estimados muestra B-2 modelo LTTP ecuaciones (6) a (8)



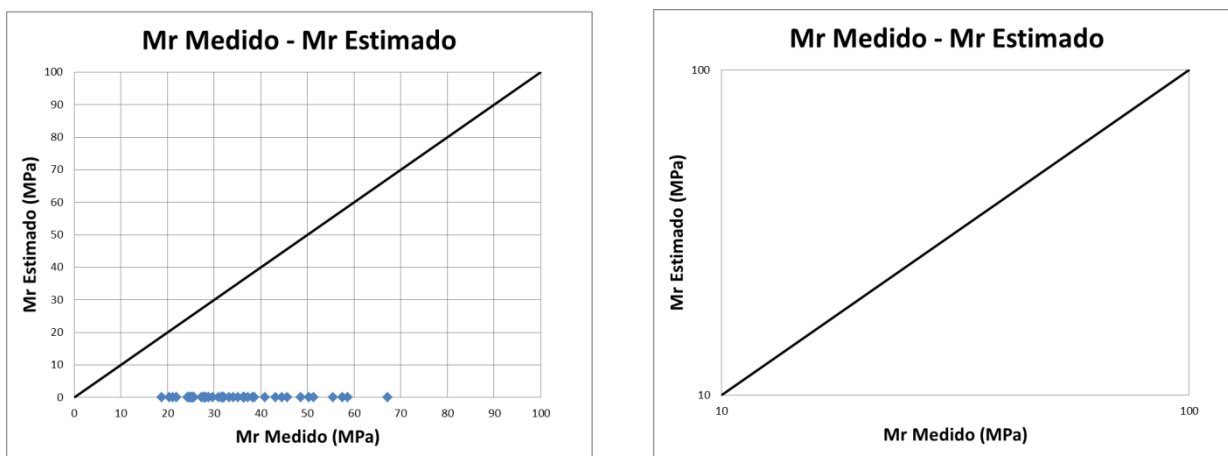
Fuente: Elaboración Propia

Tabla 39. Valores de Modulo Resiliente muestra B - 3 modelo LTTP ecuaciones (6) a (8)

BARRANCAS								
B - 3								
$Mr = 1,11 * Pa \left(\frac{\Theta}{Pa}\right)^{0,253} \left(\frac{\tau_{oct}}{Pa} + 1\right)^{-1,433}$			$Mr = 1,19 * Pa \left(\frac{\Theta}{Pa}\right)^{0,253} \left(\frac{\tau_{oct}}{Pa} + 1\right)^{-1,375}$			$Mr = 1,01 * Pa \left(\frac{\Theta}{Pa}\right)^{0,253} \left(\frac{\tau_{oct}}{Pa} + 1\right)^{-1,507}$		
K ₁	K ₂	K ₃	K ₁	K ₂	K ₃	K ₁	K ₂	K ₃
1,109	0,253	-1,433	1,187	0,253	-1,375	1,011	0,253	-1,507
Ciclo	Mr estimado	Mr medido	Ciclo	Mr estimado	Mr medido	Ciclo	Mr estimado	Mr medido
1-1	0,110	67,15	2-1	0,118	58,69	3-1	0,100	55,46
1-2	0,104	44,60	2-2	0,112	40,93	3-2	0,094	38,68
1-3	0,097	36,55	2-3	0,105	36,21	3-3	0,088	33,26
1-4	0,092	31,59	2-4	0,100	31,02	3-4	0,083	28,78
1-5	0,088	27,98	2-5	0,095	27,77	3-5	0,079	25,23
1-6	0,101	57,56	2-6	0,108	51,36	3-6	0,091	48,53
1-7	0,096	38,23	2-7	0,103	37,21	3-7	0,087	35,16
1-8	0,091	31,86	2-8	0,098	31,68	3-8	0,082	27,85
1-9	0,086	27,38	2-9	0,094	28,88	3-9	0,078	24,35
1-10	0,082	24,61	2-10	0,090	25,71	3-10	0,074	21,87
1-11	0,087	50,36	2-11	0,094	45,65	3-11	0,079	43,14
1-12	0,085	32,11	2-12	0,092	34,11	3-12	0,077	29,75
1-13	0,082	28,24	2-13	0,089	28,16	3-13	0,074	24,95
1-14	0,079	24,52	2-14	0,086	25,38	3-14	0,071	21,10
1-15	0,076	20,42	2-15	0,083	21,93	3-15	0,068	18,74

Fuente: Elaboración Propia

Figura 28. Valores medidos y estimados muestra B-3 modelo LTTP ecuaciones (6) a (8)



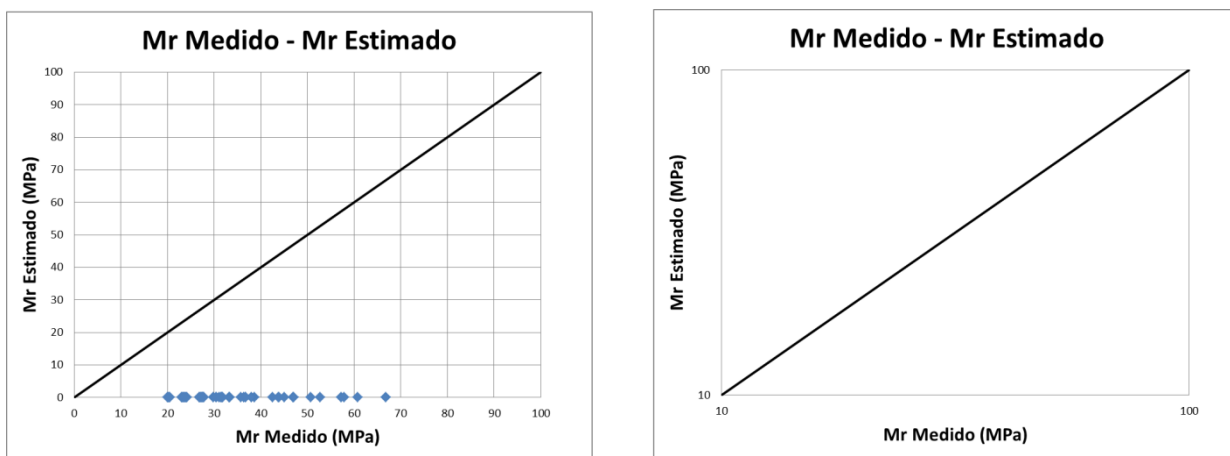
Fuente: Elaboración Propia

Tabla 40. Valores de Modulo Resiliente muestra B - 4 modelo LTTP ecuaciones (6) a (8)

BARRANCAS								
B - 4								
$Mr = 1,15 * Pa \left(\frac{\Theta}{Pa}\right)^{0,253} \left(\frac{\tau_{oct}}{Pa} + 1\right)^{-1,433}$			$Mr = 1,24 * Pa \left(\frac{\Theta}{Pa}\right)^{0,253} \left(\frac{\tau_{oct}}{Pa} + 1\right)^{-1,442}$			$Mr = 1,06 * Pa \left(\frac{\Theta}{Pa}\right)^{0,253} \left(\frac{\tau_{oct}}{Pa} + 1\right)^{-1,572}$		
K ₁	K ₂	K ₃	K ₁	K ₂	K ₃	K ₁	K ₂	K ₃
1,149	0,253	-1,508	1,238	0,253	-1,442	1,064	0,253	-1,572
Ciclo	Mr estimado	Mr medido	Ciclo	Mr estimado	Mr medido	Ciclo	Mr estimado	Mr medido
1-1	0,113	66,75	2-1	0,123	60,80	3-1	0,105	57,94
1-2	0,106	46,94	2-2	0,116	43,75	3-2	0,098	42,53
1-3	0,100	38,60	2-3	0,109	36,39	3-3	0,091	36,79
1-4	0,094	33,32	2-4	0,103	31,59	3-4	0,085	31,80
1-5	0,089	29,86	2-5	0,098	27,83	3-5	0,080	27,41
1-6	0,104	57,21	2-6	0,112	52,69	3-6	0,095	50,69
1-7	0,098	38,00	2-7	0,107	35,79	3-7	0,090	36,73
1-8	0,093	31,67	2-8	0,101	30,47	3-8	0,084	30,51
1-9	0,088	27,68	2-9	0,096	26,85	3-9	0,080	27,56
1-10	0,084	23,89	2-10	0,092	23,57	3-10	0,076	24,19
1-11	0,090	47,12	2-11	0,097	43,91	3-11	0,083	45,06
1-12	0,087	33,25	2-12	0,095	31,50	3-12	0,080	31,08
1-13	0,084	27,45	2-13	0,091	27,09	3-13	0,076	27,19
1-14	0,080	23,33	2-14	0,088	23,02	3-14	0,073	23,62
1-15	0,077	20,30	2-15	0,085	20,03	3-15	0,070	20,56

Fuente: Elaboración Propia

Figura 29. Valores medidos y estimados muestra B-4 modelo LTTP ecuaciones (6) a (8)



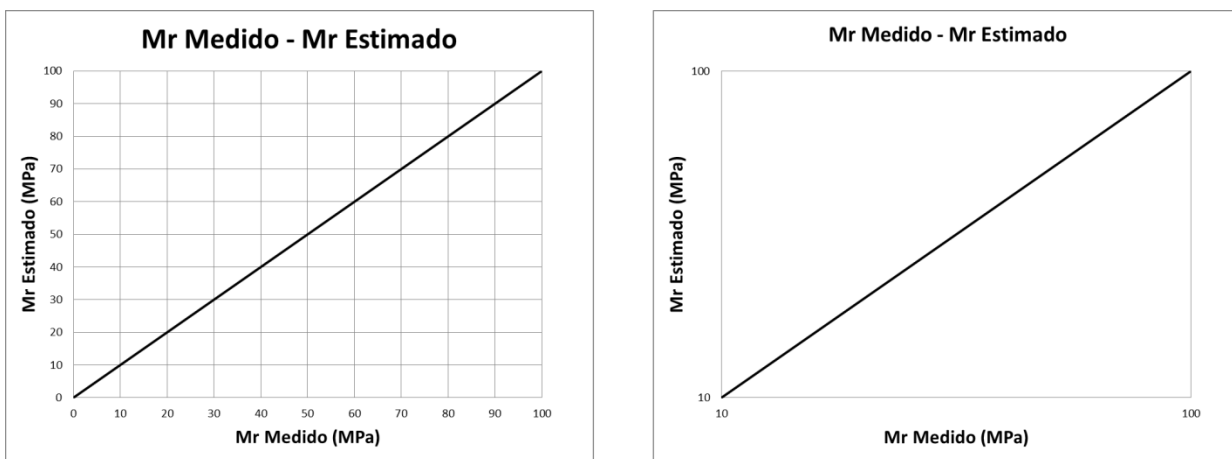
Fuente: Elaboración Propia

Tabla 41. Valores de Modulo Resiliente muestra P – 1 modelo LTTP ecuaciones (9) a (11)

PORTILLO								
P - 1								
$Mr = -0,56 * Pa \left(\frac{\Theta}{Pa}\right)^{0,39} \left(\frac{\tau_{oct}}{Pa} + 1\right)^{-0,47}$			$Mr = -0,56 * Pa \left(\frac{\Theta}{Pa}\right)^{0,39} \left(\frac{\tau_{oct}}{Pa} + 1\right)^{-0,47}$			$Mr = -0,56 * Pa \left(\frac{\Theta}{Pa}\right)^{0,39} \left(\frac{\tau_{oct}}{Pa} + 1\right)^{-0,47}$		
K ₁	K ₂	K ₃	K ₁	K ₂	K ₃	K ₁	K ₂	K ₃
-0,563	0,394	-0,473	-0,563	0,394	-0,473	-0,563	0,394	-0,473
Ciclo	Mr estimado	Mr medido	Ciclo	Mr estimado	Mr medido	Ciclo	Mr estimado	Mr medido
1-1	-0,062	88,16	2-1	-0,062	81,64	3-1	-0,062	77,89
1-2	-0,063	65,87	2-2	-0,063	62,57	3-2	-0,063	59,69
1-3	-0,063	55,62	2-3	-0,063	53,58	3-3	-0,063	50,05
1-4	-0,064	49,01	2-4	-0,064	47,55	3-4	-0,063	44,11
1-5	-0,064	45,71	2-5	-0,064	43,11	3-5	-0,064	39,49
1-6	-0,054	72,13	2-6	-0,054	68,03	3-6	-0,054	64,91
1-7	-0,055	56,46	2-7	-0,055	52,48	3-7	-0,055	48,50
1-8	-0,056	47,06	2-8	-0,056	44,97	3-8	-0,056	41,42
1-9	-0,057	40,43	2-9	-0,057	39,62	3-9	-0,057	36,93
1-10	-0,058	36,57	2-10	-0,058	36,31	3-10	-0,058	34,64
1-11	-0,043	56,67	2-11	-0,043	54,43	3-11	-0,043	53,35
1-12	-0,046	46,50	2-12	-0,046	42,81	3-12	-0,046	39,80
1-13	-0,048	38,24	2-13	-0,048	35,97	3-13	-0,048	33,37
1-14	-0,050	33,70	2-14	-0,050	32,00	3-14	-0,050	30,53
1-15	-0,051	30,94	2-15	-0,051	29,56	3-15	-0,051	27,42

Fuente: Elaboración Propia

Figura 30. Valores medidos y estimados muestra P-1 modelo LTTP ecuaciones (9) a (11)



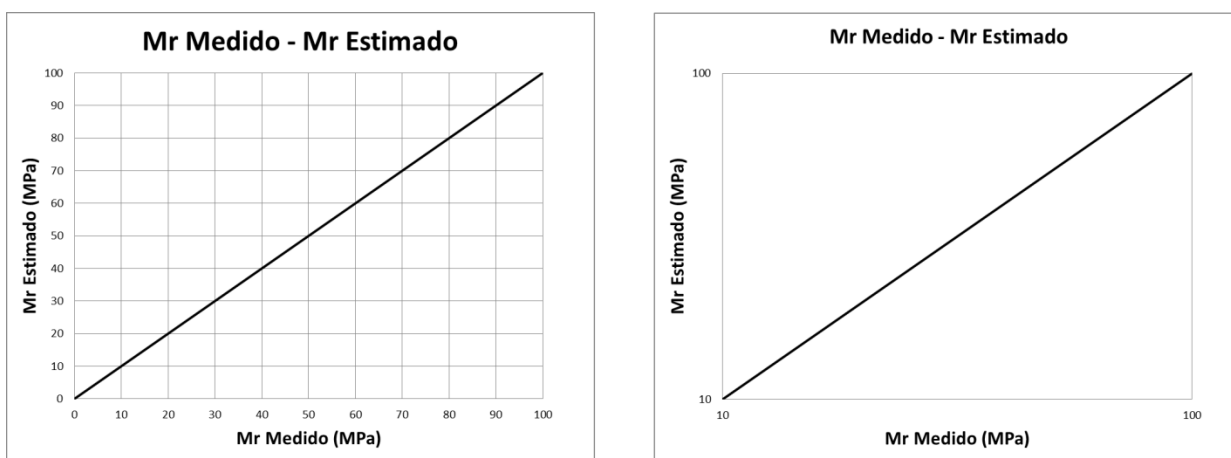
Fuente: Elaboración Propia

Tabla 42. Valores de Modulo Resiliente muestra P – 2 modelo LTTP ecuaciones (9) a (11)

PORTILLO								
P - 2								
$Mr = -0,591 * Pa \left(\frac{\Theta}{Pa}\right)^{0,418} \left(\frac{\tau_{oct}}{Pa} + 1\right)^{-0,438}$			$Mr = -0,591 * Pa \left(\frac{\Theta}{Pa}\right)^{0,418} \left(\frac{\tau_{oct}}{Pa} + 1\right)^{-0,438}$			$Mr = -0,591 * Pa \left(\frac{\Theta}{Pa}\right)^{0,418} \left(\frac{\tau_{oct}}{Pa} + 1\right)^{-0,438}$		
K ₁	K ₂	K ₃	K ₁	K ₂	K ₃	K ₁	K ₂	K ₃
-0,591	0,418	-0,438	-0,591	0,418	-0,438	-0,591	0,418	-0,438
Ciclo	Mr estimado	Mr medido	Ciclo	Mr estimado	Mr medido	Ciclo	Mr estimado	Mr medido
1-1	-0,066	80,17	2-1	-0,066	76,30	3-1	-0,066	72,40
1-2	-0,067	63,90	2-2	-0,067	58,56	3-2	-0,067	56,67
1-3	-0,067	53,76	2-3	-0,067	48,95	3-3	-0,067	47,24
1-4	-0,068	48,07	2-4	-0,068	43,72	3-4	-0,068	42,72
1-5	-0,069	44,18	2-5	-0,069	39,44	3-5	-0,069	38,82
1-6	-0,057	66,81	2-6	-0,057	62,98	3-6	-0,057	61,26
1-7	-0,058	55,09	2-7	-0,058	49,41	3-7	-0,058	48,08
1-8	-0,060	44,96	2-8	-0,060	42,20	3-8	-0,060	40,94
1-9	-0,061	38,91	2-9	-0,061	37,62	3-9	-0,061	36,89
1-10	-0,062	34,44	2-10	-0,062	32,97	3-10	-0,062	32,56
1-11	-0,045	55,29	2-11	-0,045	52,90	3-11	-0,045	49,77
1-12	-0,048	43,17	2-12	-0,048	40,54	3-12	-0,048	39,67
1-13	-0,051	36,91	2-13	-0,051	34,47	3-13	-0,051	33,19
1-14	-0,053	32,04	2-14	-0,053	30,81	3-14	-0,053	30,63
1-15	-0,054	29,03	2-15	-0,054	27,55	3-15	-0,054	27,28

Fuente: Elaboración Propia

Figura 31. Valores medidos y estimados muestra P-2 modelo LTTP ecuaciones (9) a (11)



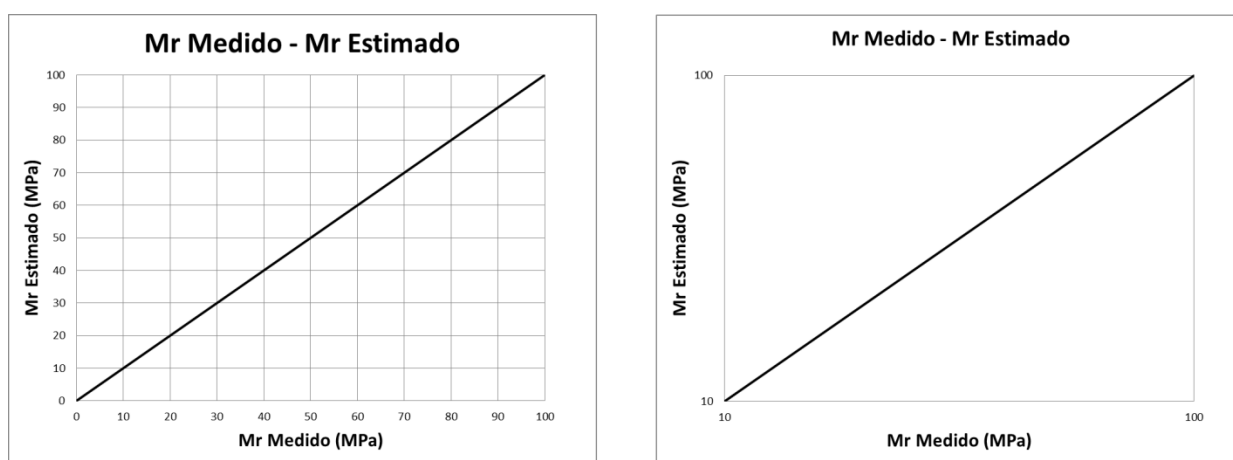
Fuente: Elaboración Propia

Tabla 43. Valores de Modulo Resiliente muestra P – 3 modelo LTTP ecuaciones (9) a (11)

PORTILLO								
P - 3								
$Mr = -0,600 * Pa \left(\frac{\Theta}{Pa}\right)^{0,426} \left(\frac{\tau_{oct}}{Pa} + 1\right)^{-0,426}$			$Mr = -0,600 * Pa \left(\frac{\Theta}{Pa}\right)^{0,426} \left(\frac{\tau_{oct}}{Pa} + 1\right)^{-0,426}$			$Mr = -0,600 * Pa \left(\frac{\Theta}{Pa}\right)^{0,426} \left(\frac{\tau_{oct}}{Pa} + 1\right)^{-0,426}$		
K_1	K_2	K_3	K_1	K_2	K_3	K_1	K_2	K_3
-0,600	0,426	-0,426	-0,600	0,426	-0,426	-0,600	0,426	-0,426
Ciclo	Mr estimado	Mr medido	Ciclo	Mr estimado	Mr medido	Ciclo	Mr estimado	Mr medido
1-1	-0,067	78,46	2-1	-0,067	72,75	3-1	-0,067	79,31
1-2	-0,068	60,13	2-2	-0,068	61,33	3-2	-0,068	58,53
1-3	-0,069	50,42	2-3	-0,069	52,52	3-3	-0,069	50,97
1-4	-0,070	44,43	2-4	-0,070	46,61	3-4	-0,070	44,91
1-5	-0,070	40,59	2-5	-0,070	41,40	3-5	-0,070	39,42
1-6	-0,058	65,38	2-6	-0,058	61,56	3-6	-0,058	66,09
1-7	-0,059	52,11	2-7	-0,059	51,44	3-7	-0,059	49,39
1-8	-0,061	42,46	2-8	-0,061	43,30	3-8	-0,061	42,18
1-9	-0,062	37,19	2-9	-0,062	37,94	3-9	-0,062	36,75
1-10	-0,064	33,15	2-10	-0,064	32,20	3-10	-0,064	32,43
1-11	-0,045	56,04	2-11	-0,045	50,01	3-11	-0,045	49,57
1-12	-0,048	41,14	2-12	-0,049	41,96	3-12	-0,049	39,51
1-13	-0,051	35,59	2-13	-0,051	36,30	3-13	-0,051	34,95
1-14	-0,054	30,18	2-14	-0,054	31,99	3-14	-0,054	31,09
1-15	-0,055	27,62	2-15	-0,055	27,41	3-15	-0,056	27,17

Fuente: Elaboración Propia

Figura 32. Valores medidos y estimados muestra P-3 modelo LTTP ecuaciones (9) a (11)



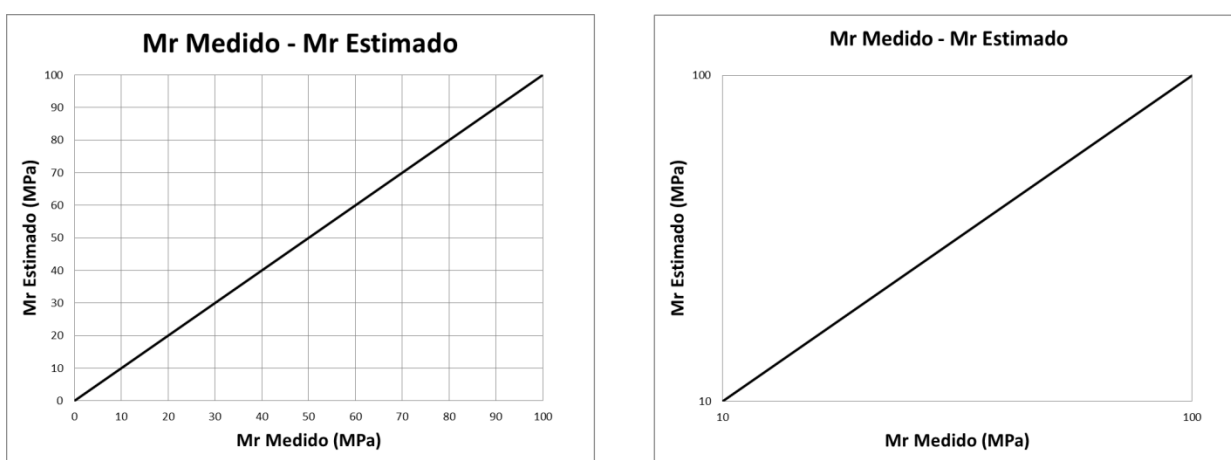
Fuente: Elaboración Propia

Tabla 44. Valores de Modulo Resiliente muestra P – 4 modelo LTTP ecuaciones (9) a (11)

PORTILLO								
P - 4								
$Mr = -0,594 * Pa \left(\frac{\Theta}{Pa}\right)^{0,420} \left(\frac{\tau_{oct}}{Pa} + 1\right)^{-0,434}$			$Mr = -0,594 * Pa \left(\frac{\Theta}{Pa}\right)^{0,420} \left(\frac{\tau_{oct}}{Pa} + 1\right)^{-0,434}$			$Mr = -0,594 * Pa \left(\frac{\Theta}{Pa}\right)^{0,420} \left(\frac{\tau_{oct}}{Pa} + 1\right)^{-0,434}$		
K_1	K_2	K_3	K_1	K_2	K_3	K_1	K_2	K_3
-0,594	0,420	-0,434	-0,594	0,420	-0,434	-0,594	0,420	-0,434
Ciclo	Mr estimado	Mr medido	Ciclo	Mr estimado	Mr medido	Ciclo	Mr estimado	Mr medido
1-1	-0,066	79,85	2-1	-0,066	77,03	3-1	-0,066	77,39
1-2	-0,067	61,20	2-2	-0,067	59,04	3-2	-0,067	55,08
1-3	-0,068	52,40	2-3	-0,068	47,52	3-3	-0,068	45,91
1-4	-0,069	47,18	2-4	-0,069	42,44	3-4	-0,069	41,52
1-5	-0,069	43,53	2-5	-0,069	38,29	3-5	-0,069	37,73
1-6	-0,057	66,54	2-6	-0,057	61,14	3-6	-0,057	64,49
1-7	-0,059	53,04	2-7	-0,059	50,16	3-7	-0,059	48,19
1-8	-0,060	43,98	2-8	-0,060	40,97	3-8	-0,060	38,50
1-9	-0,062	38,30	2-9	-0,061	37,39	3-9	-0,061	35,86
1-10	-0,063	34,02	2-10	-0,062	32,01	3-10	-0,062	31,64
1-11	-0,045	57,04	2-11	-0,045	51,36	3-11	-0,045	55,28
1-12	-0,048	44,20	2-12	-0,048	40,39	3-12	-0,048	36,72
1-13	-0,051	37,32	2-13	-0,051	33,94	3-13	-0,051	32,26
1-14	-0,053	32,56	2-14	-0,053	30,20	3-14	-0,053	29,77
1-15	-0,055	28,11	2-15	-0,054	26,75	3-15	-0,054	26,51

Fuente: Elaboración Propia

Figura 33. Valores medidos y estimados muestra P-4 modelo LTTP ecuaciones (9) a (11)



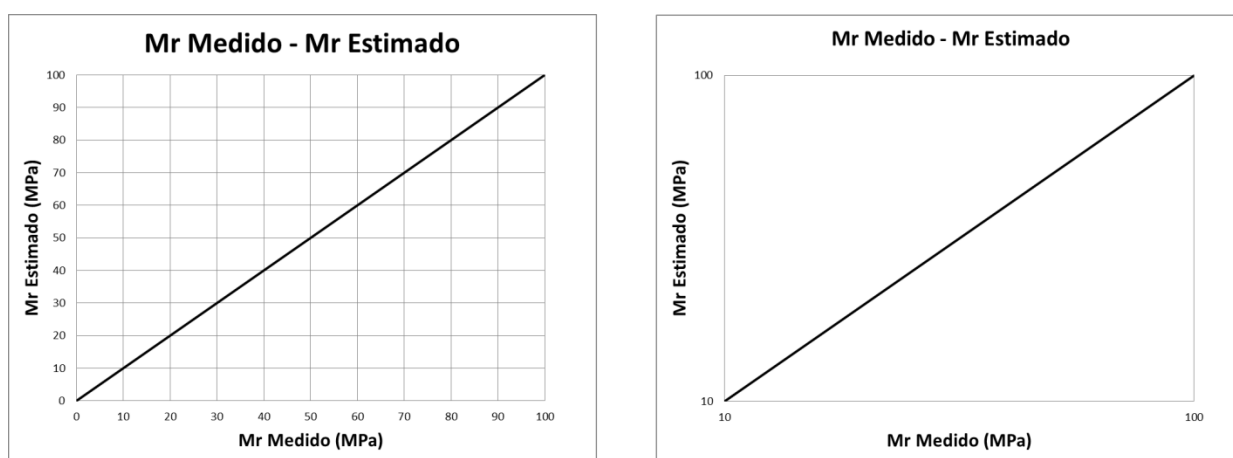
Fuente: Elaboración Propia

Tabla 45. Valores de Modulo Resiliente muestra B- 1 modelo LTTP ecuaciones (9) a (11)

BARRANCAS								
B - 1								
$Mr = -0,469 * Pa \left(\frac{\Theta}{Pa}\right)^{0,312} \left(\frac{\tau_{oct}}{Pa} + 1\right)^{-0,594}$			$Mr = -0,469 * Pa \left(\frac{\Theta}{Pa}\right)^{0,312} \left(\frac{\tau_{oct}}{Pa} + 1\right)^{-0,594}$			$Mr = -0,469 * Pa \left(\frac{\Theta}{Pa}\right)^{0,312} \left(\frac{\tau_{oct}}{Pa} + 1\right)^{-0,594}$		
K ₁	K ₂	K ₃	K ₁	K ₂	K ₃	K ₁	K ₂	K ₃
-0,469	0,312	-0,594	-0,469	0,312	-0,594	-0,469	0,312	-0,594
Ciclo	Mr estimado	Mr medido	Ciclo	Mr estimado	Mr medido	Ciclo	Mr estimado	Mr medido
1-1	-0,050	65,91	2-1	-0,050	62,51	3-1	-0,050	58,35
1-2	-0,050	43,78	2-2	-0,050	42,61	3-2	-0,050	41,99
1-3	-0,049	36,97	2-3	-0,049	37,41	3-3	-0,049	34,41
1-4	-0,049	32,25	2-4	-0,049	32,48	3-4	-0,049	30,93
1-5	-0,049	28,64	2-5	-0,049	28,61	3-5	-0,049	27,47
1-6	-0,045	56,50	2-6	-0,045	58,05	3-6	-0,045	54,18
1-7	-0,045	39,40	2-7	-0,045	38,56	3-7	-0,045	37,79
1-8	-0,045	32,97	2-8	-0,045	32,98	3-8	-0,045	31,62
1-9	-0,045	29,32	2-9	-0,045	29,58	3-9	-0,045	28,12
1-10	-0,045	26,73	2-10	-0,045	26,41	3-10	-0,045	25,64
1-11	-0,038	49,44	2-11	-0,038	50,79	3-11	-0,037	47,41
1-12	-0,039	34,26	2-12	-0,039	35,20	3-12	-0,039	32,86
1-13	-0,040	29,75	2-13	-0,040	29,15	3-13	-0,040	28,53
1-14	-0,040	26,87	2-14	-0,040	26,30	3-14	-0,040	25,77
1-15	-0,041	23,59	2-15	-0,041	22,89	3-15	-0,041	22,62

Fuente: Elaboración Propia

Figura 34. Valores medidos y estimados muestra B-1 modelo LTTP ecuaciones (9) a (11)



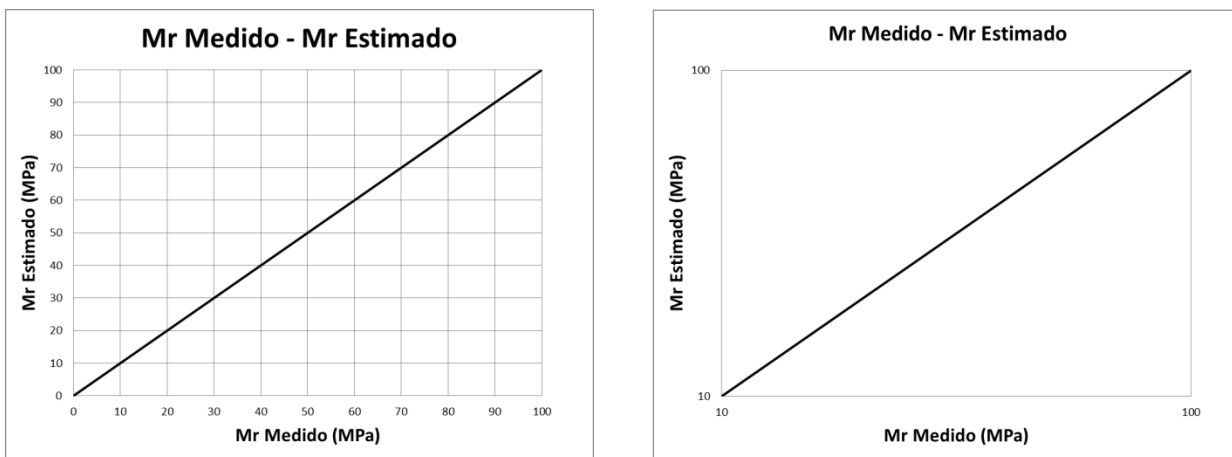
Fuente: Elaboración Propia

Tabla 46. Valores de Modulo Resiliente muestra B- 2 modelo LTTP ecuaciones (9) a (11)

BARRANCAS								
B - 2								
$Mr = -0,487 * Pa \left(\frac{\Theta}{Pa}\right)^{0,327} \left(\frac{\tau_{oct}}{Pa} + 1\right)^{-0,572}$			$Mr = -0,487 * Pa \left(\frac{\Theta}{Pa}\right)^{0,327} \left(\frac{\tau_{oct}}{Pa} + 1\right)^{-0,572}$			$Mr = -0,487 * Pa \left(\frac{\Theta}{Pa}\right)^{0,327} \left(\frac{\tau_{oct}}{Pa} + 1\right)^{-0,572}$		
K ₁	K ₂	K ₃	K ₁	K ₂	K ₃	K ₁	K ₂	K ₃
-0,487	0,327	-0,572	-0,487	0,327	-0,572	-0,487	0,327	-0,572
Ciclo	Mr estimado	Mr medido	Ciclo	Mr estimado	Mr medido	Ciclo	Mr estimado	Mr medido
1-1	-0,052	70,74	2-1	-0,052	68,03	3-1	-0,052	66,19
1-2	-0,052	45,61	2-2	-0,052	47,85	3-2	-0,052	43,97
1-3	-0,052	36,37	2-3	-0,052	35,97	3-3	-0,052	34,03
1-4	-0,052	30,51	2-4	-0,052	31,40	3-4	-0,052	29,44
1-5	-0,051	26,30	2-5	-0,051	25,87	3-5	-0,051	25,17
1-6	-0,046	59,86	2-6	-0,046	58,31	3-6	-0,046	56,74
1-7	-0,047	40,81	2-7	-0,047	40,67	3-7	-0,047	39,57
1-8	-0,047	32,44	2-8	-0,047	31,48	3-8	-0,047	30,63
1-9	-0,047	27,35	2-9	-0,047	26,84	3-9	-0,047	26,12
1-10	-0,047	21,92	2-10	-0,047	22,99	3-10	-0,047	22,37
1-11	-0,039	51,88	2-11	-0,039	51,02	3-11	-0,039	49,64
1-12	-0,040	35,24	2-12	-0,040	33,89	3-12	-0,040	32,97
1-13	-0,041	27,91	2-13	-0,041	26,79	3-13	-0,041	26,06
1-14	-0,042	22,99	2-14	-0,042	22,19	3-14	-0,042	21,59
1-15	-0,043	19,73	2-15	-0,043	19,90	3-15	-0,043	19,36

Fuente: Elaboración Propia

Figura 35. Valores medidos y estimados muestra B-2 modelo LTTP ecuaciones (9) a (11)



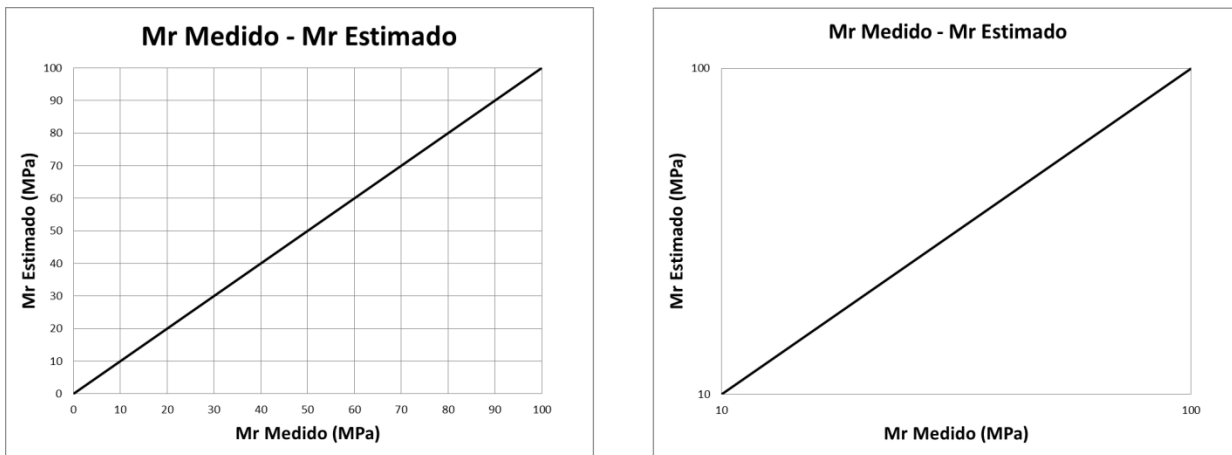
Fuente: Elaboración Propia

Tabla 47. Valores de Modulo Resiliente muestra B- 3 modelo LTTP ecuaciones (9) a (11)

BARRANCAS								
B - 3								
$Mr = -0,483 * Pa \left(\frac{\Theta}{Pa}\right)^{0,324} \left(\frac{\tau_{oct}}{Pa} + 1\right)^{-0,576}$			$Mr = -0,483 * Pa \left(\frac{\Theta}{Pa}\right)^{0,324} \left(\frac{\tau_{oct}}{Pa} + 1\right)^{-0,576}$			$Mr = -0,483 * Pa \left(\frac{\Theta}{Pa}\right)^{0,324} \left(\frac{\tau_{oct}}{Pa} + 1\right)^{-0,576}$		
K ₁	K ₂	K ₃	K ₁	K ₂	K ₃	K ₁	K ₂	K ₃
-0,483	0,324	-0,576	-0,483	0,324	-0,576	-0,483	0,324	-0,576
Ciclo	Mr estimado	Mr medido	Ciclo	Mr estimado	Mr medido	Ciclo	Mr estimado	Mr medido
1-1	-0,052	67,15	2-1	-0,052	58,69	3-1	-0,052	55,46
1-2	-0,051	44,60	2-2	-0,051	40,93	3-2	-0,052	38,68
1-3	-0,051	36,55	2-3	-0,051	36,21	3-3	-0,051	33,26
1-4	-0,051	31,59	2-4	-0,051	31,02	3-4	-0,051	28,78
1-5	-0,051	27,98	2-5	-0,051	27,77	3-5	-0,051	25,23
1-6	-0,046	57,56	2-6	-0,046	51,36	3-6	-0,046	48,53
1-7	-0,046	38,23	2-7	-0,046	37,21	3-7	-0,046	35,16
1-8	-0,047	31,86	2-8	-0,047	31,68	3-8	-0,047	27,85
1-9	-0,047	27,38	2-9	-0,047	28,88	3-9	-0,047	24,35
1-10	-0,047	24,61	2-10	-0,047	25,71	3-10	-0,047	21,87
1-11	-0,038	50,36	2-11	-0,038	45,65	3-11	-0,038	43,14
1-12	-0,040	32,11	2-12	-0,040	34,11	3-12	-0,040	29,75
1-13	-0,041	28,24	2-13	-0,041	28,16	3-13	-0,041	24,95
1-14	-0,042	24,52	2-14	-0,042	25,38	3-14	-0,042	21,10
1-15	-0,042	20,42	2-15	-0,042	21,93	3-15	-0,042	18,74

Fuente: Elaboración Propia

Figura 36. Valores medidos y estimados muestra B-3 modelo LTTP ecuaciones (9) a (11)



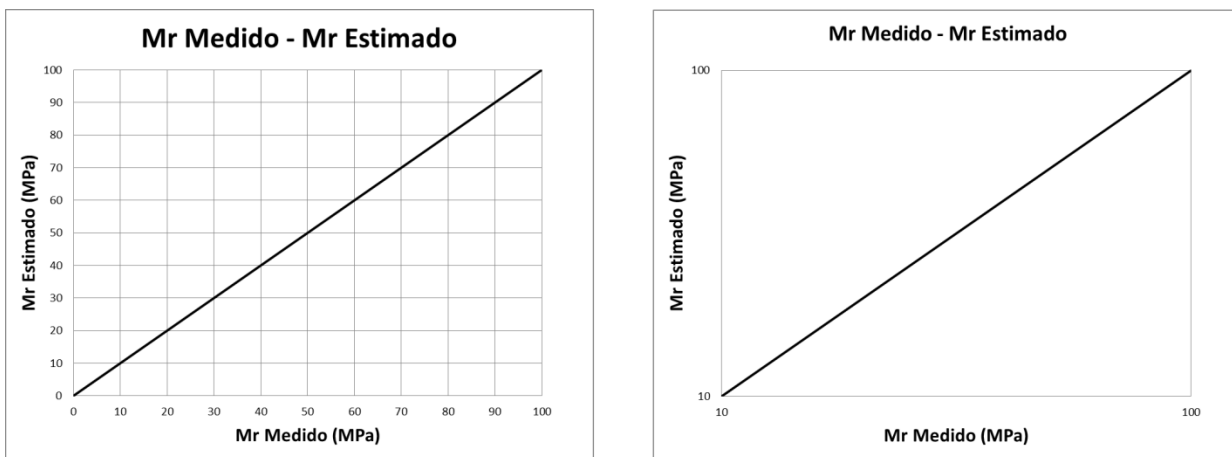
Fuente: Elaboración Propia

Tabla 48. Valores de Modulo Resiliente muestra B- 4 modelo LTTP ecuaciones (9) a (11)

BARRANCAS								
B - 4								
$Mr = -0,486 * Pa \left(\frac{\Theta}{Pa}\right)^{0,326} \left(\frac{\tau_{oct}}{Pa} + 1\right)^{-0,573}$			$Mr = -0,486 * Pa \left(\frac{\Theta}{Pa}\right)^{0,326} \left(\frac{\tau_{oct}}{Pa} + 1\right)^{-0,573}$			$Mr = -0,486 * Pa \left(\frac{\Theta}{Pa}\right)^{0,326} \left(\frac{\tau_{oct}}{Pa} + 1\right)^{-0,573}$		
K ₁	K ₂	K ₃	K ₁	K ₂	K ₃	K ₁	K ₂	K ₃
-0,486	0,326	-0,573	-0,486	0,326	-0,573	-0,486	0,326	-0,573
Ciclo	Mr estimado	Mr medido	Ciclo	Mr estimado	Mr medido	Ciclo	Mr estimado	Mr medido
1-1	-0,052	66,75	2-1	-0,052	60,80	3-1	-0,052	57,94
1-2	-0,052	46,94	2-2	-0,052	43,75	3-2	-0,052	42,53
1-3	-0,052	38,60	2-3	-0,052	36,39	3-3	-0,052	36,79
1-4	-0,051	33,32	2-4	-0,051	31,59	3-4	-0,051	31,80
1-5	-0,051	29,86	2-5	-0,051	27,83	3-5	-0,051	27,41
1-6	-0,046	57,21	2-6	-0,046	52,69	3-6	-0,046	50,69
1-7	-0,047	38,00	2-7	-0,047	35,79	3-7	-0,047	36,73
1-8	-0,047	31,67	2-8	-0,047	30,47	3-8	-0,047	30,51
1-9	-0,047	27,68	2-9	-0,047	26,85	3-9	-0,047	27,56
1-10	-0,047	23,89	2-10	-0,047	23,57	3-10	-0,047	24,19
1-11	-0,039	47,12	2-11	-0,039	43,91	3-11	-0,039	45,06
1-12	-0,040	33,25	2-12	-0,040	31,50	3-12	-0,040	31,08
1-13	-0,041	27,45	2-13	-0,041	27,09	3-13	-0,041	27,19
1-14	-0,042	23,33	2-14	-0,042	23,02	3-14	-0,042	23,62
1-15	-0,043	20,30	2-15	-0,043	20,03	3-15	-0,043	20,56

Fuente: Elaboración Propia

Figura 37. Valores medidos y estimados muestra B-4 modelo LTTP ecuaciones (9) a (11)



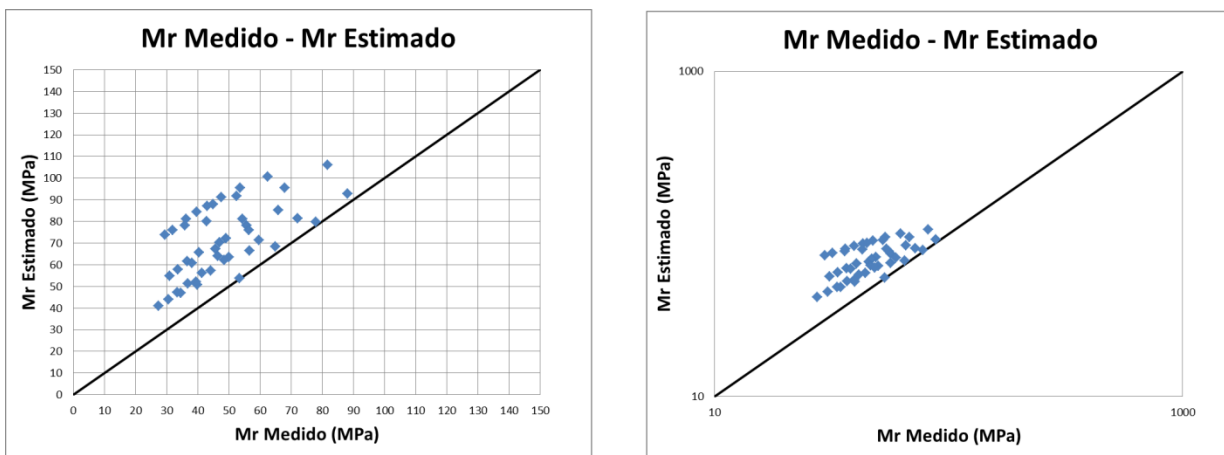
Fuente: Elaboración Propia

Tabla 49. Valores de Modulo Resiliente muestra P- 1 modelo Universidad de Wisconsin ecuaciones (12) a (14)

PORTILLO								
P - 1								
$Mr = 935,85 \text{ Pa} \left(\frac{\Theta}{Pa}\right)^{0,363} \left(\frac{\tau_{oct}}{Pa} + 1\right)^{-2,028}$			$Mr = 1050,87 \text{ Pa} \left(\frac{\Theta}{Pa}\right)^{0,29} \left(\frac{\tau_{oct}}{Pa} + 1\right)^{-1,538}$			$Mr = 816,92 \text{ Pa} \left(\frac{\Theta}{Pa}\right)^{0,424} \left(\frac{\tau_{oct}}{Pa} + 1\right)^{-2,658}$		
K ₁	K ₂	K ₃	K ₁	K ₂	K ₃	K ₁	K ₂	K ₃
935,85	0,363	-2,028	1050,870	0,290	-1,358	816,917	0,424	-2,658
Ciclo	Mr estimado	Mr medido	Ciclo	Mr estimado	Mr medido	Ciclo	Mr estimado	Mr medido
1-1	92,674	88,16	2-1	106,040	81,64	3-1	79,678	77,89
1-2	85,219	65,87	2-2	100,738	62,57	3-2	71,319	59,69
1-3	78,030	55,62	2-3	95,429	53,58	3-3	63,480	50,05
1-4	72,274	49,01	2-4	91,026	47,55	3-4	57,369	44,11
1-5	67,152	45,71	2-5	86,981	43,11	3-5	52,059	39,49
1-6	81,404	72,13	2-6	95,589	68,03	3-6	68,423	64,91
1-7	75,885	56,46	2-7	91,799	52,48	3-7	62,207	48,50
1-8	70,323	47,06	2-8	87,797	44,97	3-8	56,138	41,42
1-9	65,721	40,43	2-9	84,344	39,62	3-9	51,260	36,93
1-10	61,524	36,57	2-10	81,081	36,31	3-10	46,923	34,64
1-11	66,406	56,67	2-11	81,205	54,43	3-11	53,836	53,35
1-12	63,923	46,50	2-12	80,004	42,81	3-12	50,783	39,80
1-13	60,750	38,24	2-13	78,069	35,97	3-13	47,187	33,37
1-14	57,759	33,70	2-14	76,036	32,00	3-14	43,958	30,53
1-15	54,808	30,94	2-15	73,890	29,56	3-15	40,882	27,42

Fuente: Elaboración Propia

Figura 38. Valores medidos y estimados muestra P-1 modelo Universidad de Wisconsin ecuaciones (12) a (14)



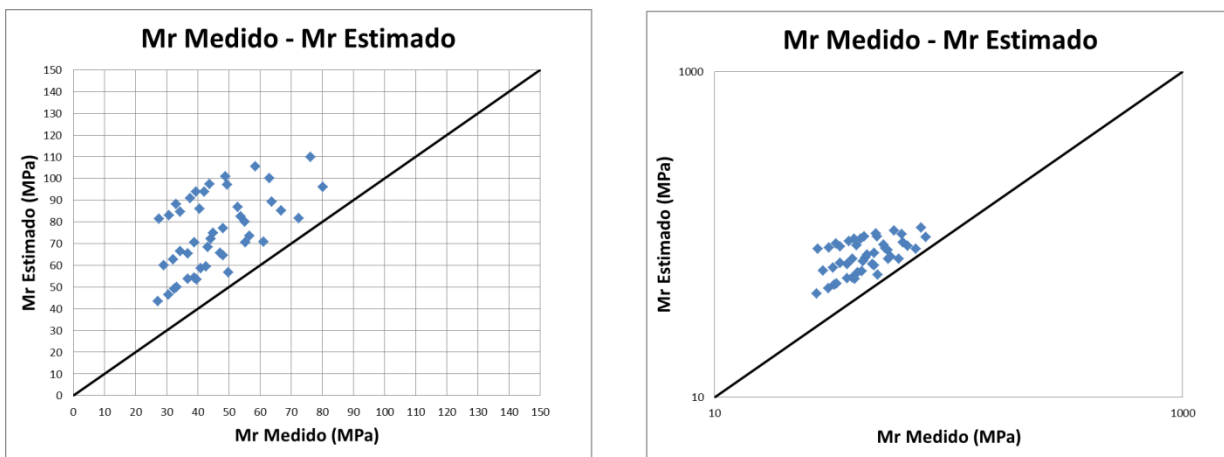
Fuente: Elaboración Propia

Tabla 50. Valores de Modulo Resiliente muestra P- 2 modelo Universidad de Wisconsin ecuaciones (12) a (14)

PORTILLO								
P - 2								
$Mr = 835,58 \text{ Pa} \left(\frac{\Theta}{Pa}\right)^{0,424} \left(\frac{\tau_{oct}}{Pa} + 1\right)^{-2,521}$			$Mr = 953,56 \text{ Pa} \left(\frac{\Theta}{Pa}\right)^{0,345} \left(\frac{\tau_{oct}}{Pa} + 1\right)^{-1,815}$			$Mr = 709,49 \text{ Pa} \left(\frac{\Theta}{Pa}\right)^{0,487} \left(\frac{\tau_{oct}}{Pa} + 1\right)^{-3,181}$		
K ₁	K ₂	K ₃	K ₁	K ₂	K ₃	K ₁	K ₂	K ₃
835,584	0,424	-2,521	953,558	0,345	-1,815	709,497	0,487	-3,181
Ciclo	Mr estimado	Mr medido	Ciclo	Mr estimado	Mr medido	Ciclo	Mr estimado	Mr medido
1-1	81,866	80,17	2-1	95,183	76,30	3-1	68,026	72,40
1-2	73,603	63,90	2-2	88,502	58,56	3-2	59,159	56,67
1-3	65,822	53,76	2-3	81,976	48,95	3-3	51,103	47,24
1-4	59,735	48,07	2-4	76,689	43,72	3-4	45,009	42,72
1-5	54,427	44,18	2-5	71,932	39,44	3-5	39,855	38,82
1-6	70,357	66,81	2-6	84,132	62,98	3-6	57,157	61,26
1-7	64,269	55,09	2-7	79,245	49,41	3-7	50,628	48,08
1-8	58,287	44,96	2-8	74,243	42,20	3-8	44,447	40,94
1-9	53,450	38,91	2-9	70,047	37,62	3-9	39,620	36,89
1-10	49,130	34,44	2-10	66,173	32,97	3-10	35,440	32,56
1-11	55,456	55,29	2-11	69,302	52,90	3-11	43,487	49,77
1-12	52,589	43,17	2-12	67,295	40,54	3-12	40,220	39,67
1-13	49,117	36,91	2-13	64,575	34,47	3-13	36,527	33,19
1-14	45,955	32,04	2-14	61,929	30,81	3-14	33,321	30,63
1-15	42,914	29,03	2-15	59,263	27,55	3-15	30,353	27,28

Fuente: Elaboración Propia

Figura 39. Valores medidos y estimados muestra P-2 modelo Universidad de Wisconsin ecuaciones (12) a (14)



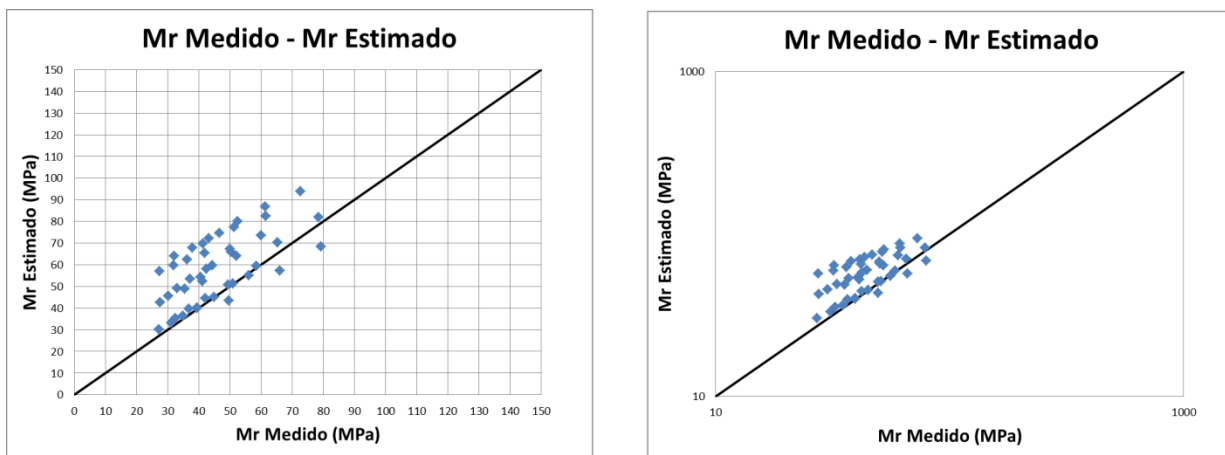
Fuente: Elaboración Propia

Tabla 51. Valores de Modulo Resiliente muestra P- 3 modelo Universidad de Wisconsin ecuaciones (12) a (14)

PORTILLO								
P - 3								
$Mr = 835,223 \text{ Pa} \left(\frac{\Theta}{\text{Pa}}\right)^{0,430} \left(\frac{\tau_{\text{oct}}}{\text{Pa}} + 1\right)^{-2,546}$			$Mr = 941,92 \text{ Pa} \left(\frac{\Theta}{\text{Pa}}\right)^{0,361} \left(\frac{\tau_{\text{oct}}}{\text{Pa}} + 1\right)^{-1,919}$			$Mr = 711,676 \text{ Pa} \left(\frac{\Theta}{\text{Pa}}\right)^{0,496} \left(\frac{\tau_{\text{oct}}}{\text{Pa}} + 1\right)^{-3,205}$		
K ₁	K ₂	K ₃	K ₁	K ₂	K ₃	K ₁	K ₂	K ₃
835,223	0,430	-2,546	941,920	0,361	-1,919	711,676	0,496	-3,205
Ciclo	Mr estimado	Mr medido	Ciclo	Mr estimado	Mr medido	Ciclo	Mr estimado	Mr medido
1-1	81,922	78,46	2-1	93,908	72,75	3-1	68,312	79,31
1-2	73,630	60,13	2-2	86,928	61,33	3-2	59,371	58,53
1-3	65,823	50,42	2-3	80,142	52,52	3-3	51,252	50,97
1-4	59,715	44,43	2-4	74,669	46,61	3-4	45,114	44,91
1-5	54,390	40,59	2-5	69,766	41,40	3-5	39,926	39,42
1-6	70,235	65,38	2-6	82,526	61,56	3-6	57,232	66,09
1-7	64,150	52,11	2-7	77,433	51,44	3-7	50,679	49,39
1-8	58,168	42,46	2-8	72,246	43,30	3-8	44,474	42,18
1-9	53,330	37,19	2-9	67,913	37,94	3-9	39,629	36,75
1-10	49,008	33,15	2-10	63,929	32,20	3-10	35,434	32,43
1-11	55,145	56,04	2-11	67,363	50,01	3-11	43,346	49,57
1-12	52,312	41,14	2-12	65,254	41,96	3-12	40,106	39,51
1-13	48,870	35,59	2-13	62,428	36,30	3-13	36,430	34,95
1-14	45,727	30,18	2-14	59,697	31,99	3-14	33,232	31,09
1-15	42,702	27,62	2-15	56,958	27,41	3-15	30,269	27,17

Fuente: Elaboración Propia

Figura 40. Valores medidos y estimados muestra P-3 modelo Universidad de Wisconsin ecuaciones (12) a (14)



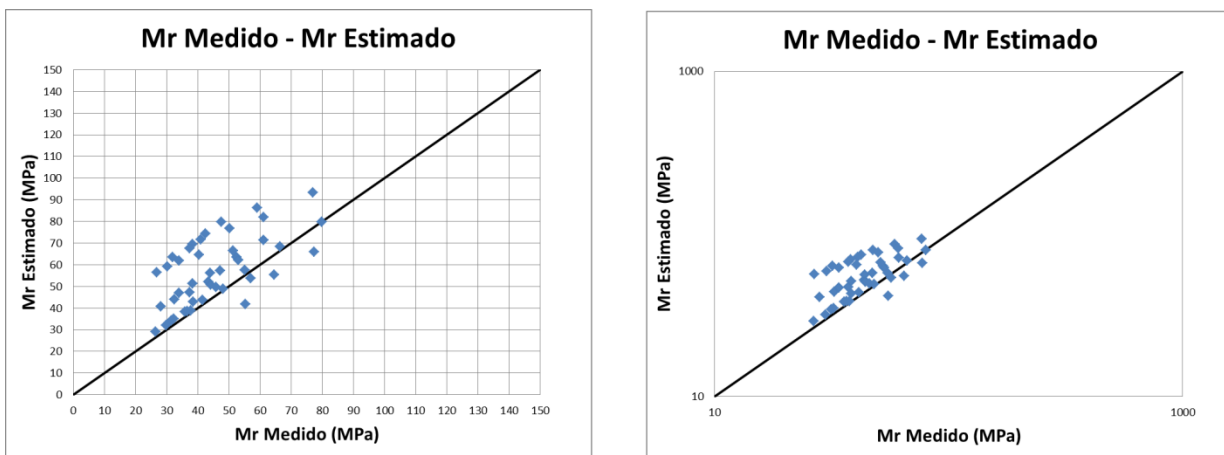
Fuente: Elaboración Propia

Tabla 52. Valores de Modulo Resiliente muestra P- 4 modelo Universidad de Wisconsin ecuaciones (12) a (14)

PORTILLO								
P - 4								
$Mr = 818,392 \text{ Pa} \left(\frac{\Theta}{\text{Pa}}\right)^{0,433} \left(\frac{\tau_{\text{oct}}}{\text{Pa}} + 1\right)^{-2,611}$			$Mr = 933,072 \text{ Pa} \left(\frac{\Theta}{\text{Pa}}\right)^{0,363} \left(\frac{\tau_{\text{oct}}}{\text{Pa}} + 1\right)^{-1,954}$			$Mr = 686,839 \text{ Pa} \left(\frac{\Theta}{\text{Pa}}\right)^{0,497} \left(\frac{\tau_{\text{oct}}}{\text{Pa}} + 1\right)^{3,290}$		
K_1	K_2	K_3	K_1	K_2	K_3	K_1	K_2	K_3
818,392	0,433	-2,611	933,072	0,363	-1,954	686,839	0,497	-3,290
Ciclo	Mr estimado	Mr medido	Ciclo	Mr estimado	Mr medido	Ciclo	Mr estimado	Mr medido
1-1	79,858	79,85	2-1	93,193	77,03	3-1	66,035	77,39
1-2	71,392	61,20	2-2	86,376	59,04	3-2	57,448	55,08
1-3	63,472	52,40	2-3	79,731	47,52	3-3	49,631	45,91
1-4	57,313	47,18	2-4	74,357	42,44	3-4	43,708	41,52
1-5	51,973	43,53	2-5	69,532	38,29	3-5	38,692	37,73
1-6	68,416	66,54	2-6	81,799	61,14	3-6	55,241	64,49
1-7	62,174	53,04	2-7	76,824	50,16	3-7	48,941	48,19
1-8	56,079	43,98	2-8	71,750	40,97	3-8	42,969	38,50
1-9	51,183	38,30	2-9	67,504	37,39	3-9	38,301	35,86
1-10	46,833	34,02	2-10	63,594	32,01	3-10	34,253	31,64
1-11	53,672	57,04	2-11	66,604	51,36	3-11	41,705	55,28
1-12	50,689	44,20	2-12	64,543	40,39	3-12	38,576	36,72
1-13	47,121	37,32	2-13	61,799	33,94	3-13	35,046	32,26
1-14	43,899	32,56	2-14	59,145	30,20	3-14	31,980	29,77
1-15	40,823	28,11	2-15	56,480	26,75	3-15	29,137	26,51

Fuente: Elaboración Propia

Figura 41. Valores medidos y estimados muestra P-4 modelo Universidad de Wisconsin ecuaciones (12) a (14)



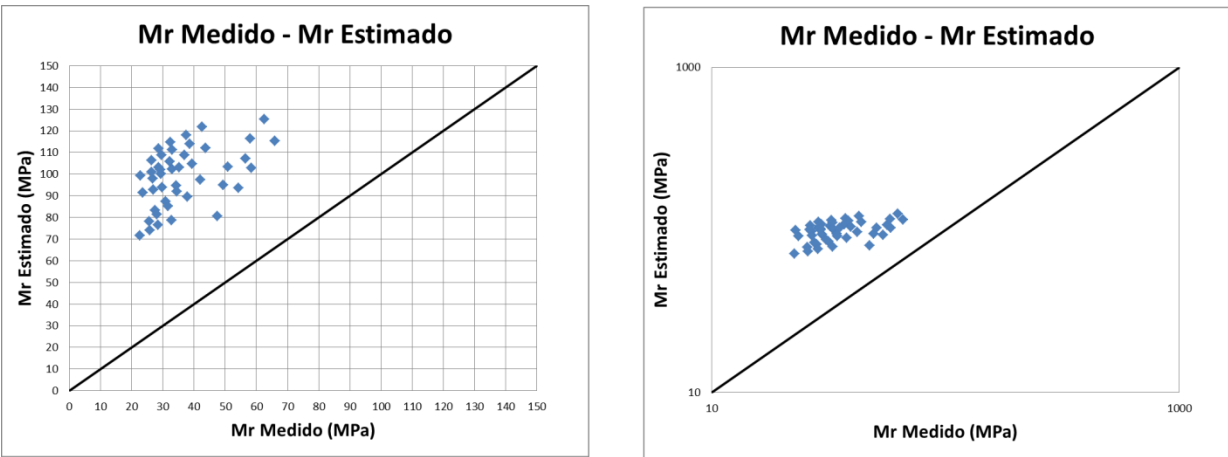
Fuente: Elaboración Propia

Tabla 53. Valores de Modulo Resiliente muestra B – 1 modelo Universidad de Wisconsin ecuaciones (12) a (14)

BARRANCAS								
B - 1								
$Mr = 1136,27 \text{ Pa} \left(\frac{\Theta}{\text{Pa}}\right)^{0,210} \left(\frac{\tau_{\text{oct}}}{\text{Pa}} + 1\right)^{-0,848}$			$Mr = 1235,05 \text{ Pa} \left(\frac{\Theta}{\text{Pa}}\right)^{0,210} \left(\frac{\tau_{\text{oct}}}{\text{Pa}} + 1\right)^{-0,848}$			$Mr = 1028,94 \text{ Pa} \left(\frac{\Theta}{\text{Pa}}\right)^{0,264} \left(\frac{\tau_{\text{oct}}}{\text{Pa}} + 1\right)^{-1,41}$		
K ₁	K ₂	K ₃	K ₁	K ₂	K ₃	K ₁	K ₂	K ₃
1136,276	0,210	-0,848	1235,052	0,210	-0,848	1028,939	0,264	-1,410
Ciclo	Mr estimado	Mr medido	Ciclo	Mr estimado	Mr medido	Ciclo	Mr estimado	Mr medido
1-1	115,370	65,91	2-1	125,350	62,51	3-1	102,869	58,35
1-2	112,064	43,78	2-2	121,716	42,61	3-2	97,394	41,99
1-3	108,661	36,97	2-3	117,977	37,41	3-3	91,939	34,41
1-4	105,765	32,25	2-4	114,797	32,48	3-4	87,434	30,93
1-5	103,042	28,64	2-5	111,811	28,61	3-5	83,310	27,47
1-6	107,003	56,50	2-6	116,274	58,05	3-6	93,554	54,18
1-7	104,753	39,40	2-7	113,795	38,56	3-7	89,432	37,79
1-8	102,275	32,97	2-8	111,068	32,98	3-8	85,147	31,62
1-9	100,062	29,32	2-9	108,635	29,58	3-9	81,495	28,12
1-10	97,910	26,73	2-10	106,270	26,41	3-10	78,072	25,64
1-11	95,057	49,44	2-11	103,321	50,79	3-11	80,558	47,41
1-12	94,788	34,26	2-12	103,012	35,20	3-12	78,787	32,86
1-13	93,901	29,75	2-13	102,021	29,15	3-13	76,384	28,53
1-14	92,788	26,87	2-14	100,784	26,30	3-14	74,023	25,77
1-15	91,507	23,59	2-15	99,366	22,89	3-15	71,617	22,62

Fuente: Elaboración Propia

Figura 42. Valores medidos y estimados muestra B-1 modelo Universidad de Wisconsin ecuaciones (12) a (14)



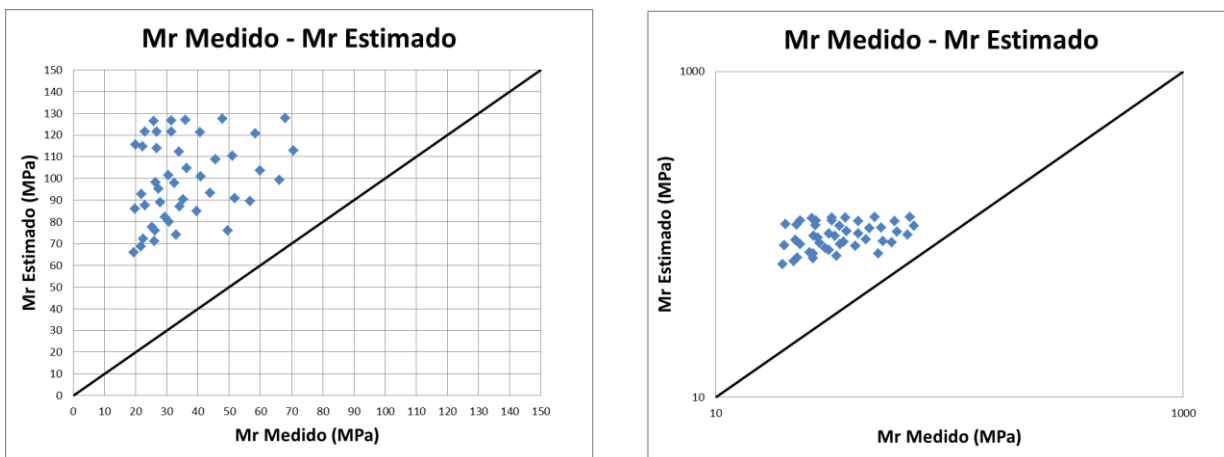
Fuente: Elaboración Propia

Tabla 54. Valores de Modulo Resiliente muestra B – 2 modelo Universidad de Wisconsin ecuaciones (12) a (14)

BARRANCAS								
B - 2								
$Mr = 1112,43 Pa \left(\frac{\Theta}{Pa}\right)^{0,234} \left(\frac{\tau_{oct}}{Pa} + 1\right)^{-1,008}$			$Mr = 1236,59 Pa \left(\frac{\Theta}{Pa}\right)^{0,158} \left(\frac{\tau_{oct}}{Pa} + 1\right)^{-0,295}$			$Mr = 999,02 Pa \left(\frac{\Theta}{Pa}\right)^{0,290} \left(\frac{\tau_{oct}}{Pa} + 1\right)^{-1,595}$		
K ₁	K ₂	K ₃	K ₁	K ₂	K ₃	K ₁	K ₂	K ₃
1112,429	0,234	-1,008	1236,588	0,158	-0,295	999,020	0,290	-1,595
Ciclo	Mr estimado	Mr medido	Ciclo	Mr estimado	Mr medido	Ciclo	Mr estimado	Mr medido
1-1	112,747	70,74	2-1	127,698	68,03	3-1	99,392	66,19
1-2	108,795	45,61	2-2	127,393	47,85	3-2	93,181	43,97
1-3	104,761	36,37	2-3	127,012	35,97	3-3	87,064	34,03
1-4	101,355	30,51	2-4	126,639	31,40	3-4	82,069	29,44
1-5	98,175	26,30	2-5	126,249	25,87	3-5	77,544	25,17
1-6	103,668	59,86	2-6	120,699	58,31	3-6	89,588	56,74
1-7	100,903	40,81	2-7	121,122	40,67	3-7	84,901	39,57
1-8	97,908	32,44	2-8	121,389	31,48	3-8	80,087	30,63
1-9	95,267	27,35	2-9	121,502	26,84	3-9	76,031	26,12
1-10	92,724	21,92	2-10	121,523	22,99	3-10	72,269	22,37
1-11	90,838	51,88	2-11	110,466	51,02	3-11	76,091	49,64
1-12	90,241	35,24	2-12	112,402	33,89	3-12	73,969	32,97
1-13	88,989	27,91	2-13	113,888	26,79	3-13	71,189	26,06
1-14	87,552	22,99	2-14	114,847	22,19	3-14	68,517	21,59
1-15	85,963	19,73	2-15	115,545	19,90	3-15	65,837	19,36

Fuente: Elaboración Propia

Figura 43. Valores medidos y estimados muestra B-2 modelo Universidad de Wisconsin ecuaciones (12) a (14)



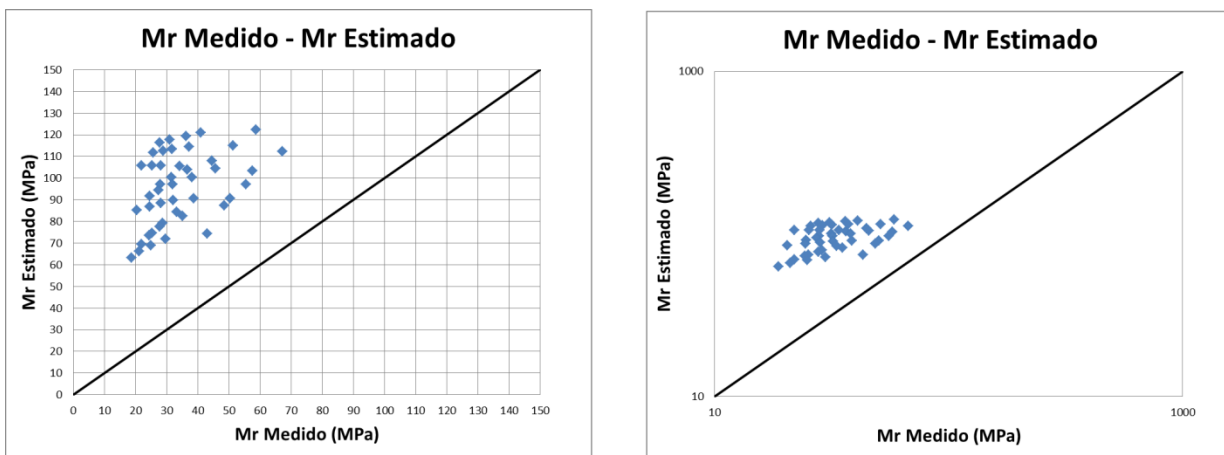
Fuente: Elaboración Propia

Tabla 55. Valores de Modulo Resiliente muestra B – 3 modelo Universidad de Wisconsin ecuaciones (12) a (14)

BARRANCAS								
B - 3								
$Mr = 1109,10 \text{ Pa} \left(\frac{\Theta}{Pa}\right)^{0,232} \left(\frac{\tau_{oct}}{Pa} + 1\right)^{-1,020}$			$Mr = 1194,57 \text{ Pa} \left(\frac{\Theta}{Pa}\right)^{0,172} \left(\frac{\tau_{oct}}{Pa} + 1\right)^{-0,496}$			$Mr = 979,72 \text{ Pa} \left(\frac{\Theta}{Pa}\right)^{0,292} \left(\frac{\tau_{oct}}{Pa} + 1\right)^{-1,675}$		
K ₁	K ₂	K ₃	K ₁	K ₂	K ₃	K ₁	K ₂	K ₃
1109,099	0,232	-1,020	1194,567	0,172	-0,496	979,719	0,292	-1,675
Ciclo	Mr estimado	Mr medido	Ciclo	Mr estimado	Mr medido	Ciclo	Mr estimado	Mr medido
1-1	112,166	67,15	2-1	122,413	58,69	3-1	97,114	55,46
1-2	108,063	44,60	2-2	120,881	40,93	3-2	90,698	38,68
1-3	103,888	36,55	2-3	119,245	36,21	3-3	84,407	33,26
1-4	100,373	31,59	2-4	117,809	31,02	3-4	79,290	28,78
1-5	97,099	27,98	2-5	116,423	27,77	3-5	74,670	25,23
1-6	103,232	57,56	2-6	115,102	51,36	3-6	87,470	48,53
1-7	100,323	38,23	2-7	114,396	37,21	3-7	82,577	35,16
1-8	97,189	31,86	2-8	113,492	31,68	3-8	77,586	27,85
1-9	94,437	27,38	2-9	112,600	28,88	3-9	73,404	24,35
1-10	91,796	24,61	2-10	111,672	25,71	3-10	69,544	21,87
1-11	90,607	50,36	2-11	104,486	45,65	3-11	74,198	43,14
1-12	89,875	32,11	2-12	105,433	34,11	3-12	71,856	29,75
1-13	88,479	28,24	2-13	105,856	28,16	3-13	68,886	24,95
1-14	86,924	24,52	2-14	105,884	25,38	3-14	66,078	21,10
1-15	85,229	20,42	2-15	105,688	21,93	3-15	63,289	18,74

Fuente: Elaboración Propia

Figura 44. Valores medidos y estimados muestra B-3 modelo Universidad de Wisconsin ecuaciones (12) a (14)



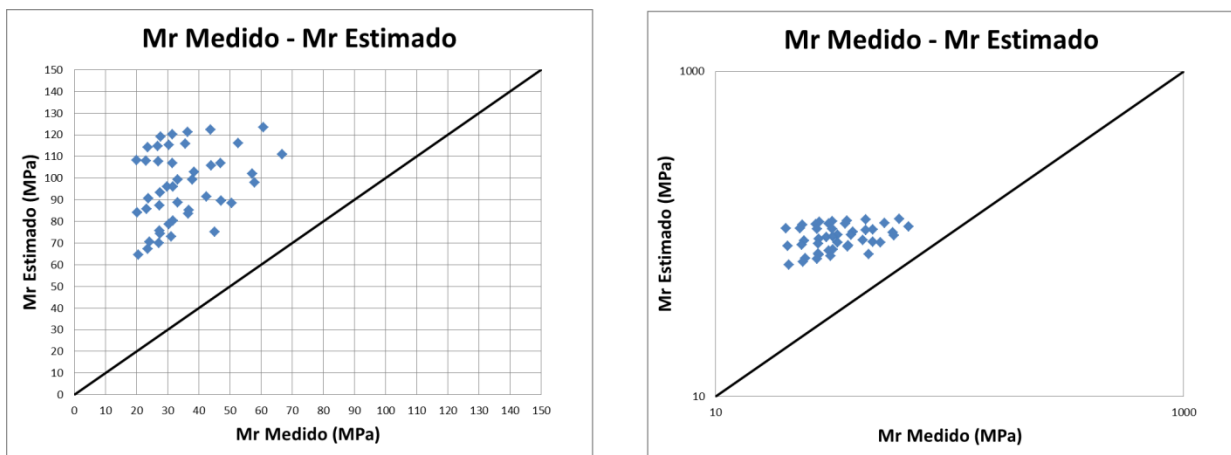
Fuente: Elaboración Propia

Tabla 56. Valores de Modulo Resiliente muestra B – 4 modelo Universidad de Wisconsin ecuaciones (12) a (14)

BARRANCAS								
B - 4								
$Mr = 1097,51 \text{ Pa} \left(\frac{\Theta}{Pa}\right)^{0,234} \left(\frac{\Gamma_{oct}}{Pa} + 1\right)^{-1,030}$			$Mr = 1201,11 \text{ Pa} \left(\frac{\Theta}{Pa}\right)^{0,169} \left(\frac{\Gamma_{oct}}{Pa} + 1\right)^{-0,432}$			$Mr = 986,79 \text{ Pa} \left(\frac{\Theta}{Pa}\right)^{0,287} \left(\frac{\Gamma_{oct}}{Pa} + 1\right)^{-1,599}$		
K ₁	K ₂	K ₃	K ₁	K ₂	K ₃	K ₁	K ₂	K ₃
1097,510	0,234	-1,030	1201,108	0,169	-0,432	986,785	0,287	-1,599
Ciclo	Mr estimado	Mr medido	Ciclo	Mr estimado	Mr medido	Ciclo	Mr estimado	Mr medido
1-1	110,984	66,75	2-1	123,459	60,80	3-1	97,844	57,94
1-2	106,879	46,94	2-2	122,336	43,75	3-2	91,508	42,53
1-3	102,704	38,60	2-3	121,116	36,39	3-3	85,293	36,79
1-4	99,190	33,32	2-4	120,029	31,59	3-4	80,237	31,80
1-5	95,919	29,86	2-5	118,968	27,83	3-5	75,671	27,41
1-6	102,084	57,21	2-6	116,202	52,69	3-6	88,330	50,69
1-7	99,172	38,00	2-7	115,873	35,79	3-7	83,514	36,73
1-8	96,036	31,67	2-8	115,358	30,47	3-8	78,591	30,51
1-9	93,284	27,68	2-9	114,797	26,85	3-9	74,459	27,56
1-10	90,645	23,89	2-10	114,181	23,57	3-10	70,641	24,19
1-11	89,517	47,12	2-11	105,645	43,91	3-11	75,231	45,06
1-12	88,774	33,25	2-12	106,924	31,50	3-12	72,971	31,08
1-13	87,372	27,45	2-13	107,702	27,09	3-13	70,056	27,19
1-14	85,813	23,33	2-14	108,041	23,02	3-14	67,282	23,62
1-15	84,116	20,30	2-15	108,142	20,03	3-15	64,520	20,56

Fuente: Elaboración Propia

Figura 45. Valores medidos y estimados muestra B-4 modelo Universidad de Wisconsin ecuaciones (12) a (14)



Fuente: Elaboración Propia

A partir de los valores de las constantes de regresión K_1 , K_2 y K_3 obtenidas a partir de las mediciones, procedemos al ajuste de las constantes de los modelos según la ecuación (6):

$$K_1 = 1196,652 - 6,140 * \%Arcilla - 9.221 * w \quad (15)$$

$$R^2 = 0,71$$

Tabla 57. Ajuste a la ecuación (6) para estimar K_1 según propiedades físicas

	K_1	%Arcilla	W	K_1 Ajustado
P1	924,5277	36,33	16,06	825,5333
	859,3238	36,33	14,02	844,2689
	820,8322	36,33	17,96	807,9578
P2	872,6125	31,20	16,15	856,1627
	809,7318	31,20	14,04	875,6411
	767,7127	31,20	18,13	837,9461
P3	853,0301	34,20	17,01	829,8890
	803,9911	34,20	14,99	848,5176
	828,2361	34,20	19,13	810,3438
P4	866,1210	35,34	16,51	827,4415
	810,4000	35,34	14,52	845,8402
	808,9805	35,34	18,57	808,4382
B1	685,7841	55,18	18,96	682,9908
	684,4287	55,18	16,98	701,2430
	636,2973	55,18	20,91	665,0138
B2	799,7910	50,94	17,59	721,6878
	782,2270	50,94	15,26	743,1906
	747,8053	50,94	19,51	703,9621
B3	726,3890	53,35	18,64	697,2485
	627,7124	53,35	16,84	713,8251
	615,6905	53,35	20,88	676,5642
B4	732,2194	56,42	18,47	679,9122
	661,6366	56,42	16,43	698,7382
	638,8875	56,42	20,41	662,0120

Fuente: Elaboración Propia

A partir de los valores de las constantes de regresión K_1 , K_2 y K_3 obtenidas a partir de las mediciones, procedemos al ajuste de las constantes de los modelos según la ecuación (7):

$$K_2 = 0,9046 + 0,0167 * P_{40} - 0,0188 * P_{200} + 0,0105 * LL - 0,0510 * W_{opt} \quad (16)$$

$$R^2 = 0,78$$

Tabla 58. Ajuste a la ecuación (7) para estimar K_2 según propiedades físicas

	K_2	P_4	P_{40}	P_{200}	LL	W_{opt}	K_2 ajustado
P1	0,5181	100	98,03	84,58	35,45	16,43	0,4849
	0,5229	100	98,03	84,58	35,45	16,43	0,4849
	0,5082	100	98,03	84,58	35,45	16,43	0,4849
P2	0,5205	100	97,42	84,99	36,78	16,23	0,4914
	0,4786	100	97,42	84,99	36,78	16,23	0,4914
	0,4764	100	97,42	84,99	36,78	16,23	0,4914
P3	0,4843	100	98,09	81,36	34,44	17,45	0,4841
	0,5084	100	98,09	81,36	34,44	17,45	0,4841
	0,5388	100	98,09	81,36	34,44	17,45	0,4841
P4	0,4739	100	98,00	81,71	34,70	16,46	0,5291
	0,4838	100	98,00	81,71	34,70	16,46	0,5291
	0,4690	100	98,00	81,71	34,70	16,46	0,5291
B1	0,3032	100	98,41	92,06	43,49	18,83	0,3128
	0,2839	100	98,41	92,06	43,49	18,83	0,3128
	0,2691	100	98,41	92,06	43,49	18,83	0,3128
B2	0,3698	100	98,43	91,33	43,05	17,75	0,3774
	0,4070	100	98,43	91,33	43,05	17,75	0,3774
	0,3749	100	98,43	91,33	43,05	17,75	0,3774
B3	0,3801	100	98,95	91,46	46,25	18,58	0,3751
	0,2967	100	98,95	91,46	46,25	18,58	0,3751
	0,3646	100	98,95	91,46	46,25	18,58	0,3751
B4	0,4648	100	98,72	91,03	45,86	18,52	0,3784
	0,4195	100	98,72	91,03	45,86	18,52	0,3784
	0,3829	100	98,72	91,03	45,86	18,52	0,3784

Fuente: Elaboración Propia

A partir de los valores de las constantes de regresión K_1 , K_2 y K_3 obtenidas a partir de las mediciones, procedemos al ajuste de las constantes de los modelos según la ecuación (8):

$$K_3 = 323,5490 - 4,3012 * P_{40} - 0,5409 * P_{200} - 0,2179 * \%limo + 0,4531 * LL + 0,5608 * W_{opt} + 9,9052 * Y_{m\acute{a}x} - 1,8038 * Y - 0,2529 * \left(\frac{W}{W_{opt}}\right) \quad (17)$$

$$R^2 = 0,82$$

Tabla 59. Ajuste a la ecuación (8) para estimar K_3 según propiedades físicas

	K_3	P_4	P_{40}	P_{200}	$\%Limo$	LL	W_{opt}	Y	Y_{max}	$\frac{W}{W_{opt}}$	K_3 ajustado
P1	-4,1144	100	98,03	84,58	63,67	35,45	16,43	16,48	16,47	1,0068	-4,1807
	-4,0069	100	98,03	84,58	63,67	35,45	16,43	16,48	16,33	0,9017	-3,9099
	-4,1657	100	98,03	84,58	63,67	35,45	16,43	16,48	16,39	1,1103	-4,0551
P2	-4,0654	100	97,42	84,99	68,80	36,78	16,23	16,27	16,29	0,9910	-4,1561
	-3,9908	100	97,42	84,99	68,80	36,78	16,23	16,27	16,09	0,8596	-3,7583
	-3,8182	100	97,42	84,99	68,80	36,78	16,23	16,27	16,18	1,0993	-3,9806
P3	-4,1887	100	98,09	81,36	65,80	34,44	17,45	16,35	16,39	1,0030	-4,0749
	-3,8736	100	98,09	81,36	65,80	34,44	17,45	16,35	16,24	0,9063	-3,7881
	-4,1389	100	98,09	81,36	65,80	34,44	17,45	16,35	16,32	1,1238	-3,9804
P4	-4,0020	100	98,00	81,71	64,66	34,70	16,46	16,29	16,28	0,9974	-4,4908
	-4,2185	100	98,00	81,71	64,66	34,70	16,46	16,29	16,19	0,8872	-4,2902
	-4,3014	100	98,00	81,71	64,66	34,70	16,46	16,29	16,13	1,1022	-4,2434
B1	-4,0872	100	98,41	92,06	44,82	43,49	18,83	16,08	16,09	0,9771	-4,2845
	-4,0483	100	98,41	92,06	44,82	43,49	18,83	16,08	15,99	0,8535	-4,0806
	-3,9959	100	98,41	92,06	44,82	43,49	18,83	16,08	15,99	1,0932	-4,1370
B2	-5,2923	100	98,43	91,33	49,06	43,05	17,75	16,15	16,21	0,9955	-5,2231
	-5,1797	100	98,43	91,33	49,06	43,05	17,75	16,15	16,10	0,8653	-4,9982
	-5,1249	100	98,43	91,33	49,06	43,05	17,75	16,15	16,08	1,1172	-5,0305
B3	-4,6640	100	98,95	91,46	46,65	46,25	18,58	16,19	16,18	0,9744	-4,6766
	-3,8414	100	98,95	91,46	46,65	46,25	18,58	16,19	15,99	0,8587	-4,3000
	-4,4648	100	98,95	91,46	46,65	46,25	18,58	16,19	15,99	1,0959	-4,3562
B4	-4,7617	100	98,72	91,03	43,58	45,86	18,52	16,01	16,00	1,0030	-4,4432
	-4,4434	100	98,72	91,03	43,58	45,86	18,52	16,01	15,90	0,8818	-4,2310
	-4,1063	100	98,72	91,03	43,58	45,86	18,52	16,01	15,86	1,1282	-4,2255

Fuente: Elaboración Propia

A partir de los valores de las constantes de regresión K_1 , K_2 y K_3 obtenidas a partir de las mediciones, procedemos al ajuste de las constantes de los modelos según la ecuación (9):

$$K_1 = 5612,3081 - 46,7626 * P_{40} - 15,1964 * IP \quad (18)$$

$$R^2 = 0,63$$

Tabla 60. Ajuste a la ecuación (9) para estimar K_1 según propiedades físicas

	K_1	P_{40}	IP	K_1 ajustado
P1	924,5277	98,03	14,81	803,3172
	859,3238	98,03	14,81	803,3172
	820,8322	98,03	14,81	803,3172
P2	872,6125	97,42	13,11	857,5813
	809,7318	97,42	13,11	857,5813
	767,7127	97,42	13,11	857,5813
P3	853,0301	98,09	12,50	835,3516
	803,9911	98,09	12,50	835,3516
	828,2361	98,09	12,50	835,3516
P4	866,1210	98,00	12,89	833,5261
	810,4000	98,00	12,89	833,5261
	808,9805	98,00	12,89	833,5261
B1	685,7841	98,41	20,62	697,1828
	684,4287	98,41	20,62	697,1828
	636,2973	98,41	20,62	697,1828
B2	799,7910	98,43	19,56	712,2582
	782,2270	98,43	19,56	712,2582
	747,8053	98,43	19,56	712,2582
B3	726,3890	98,95	19,79	684,6198
	627,7124	98,95	19,79	684,6198
	615,6905	98,95	19,79	684,6198
B4	732,2194	98,72	19,62	697,6192
	661,6366	98,72	19,62	697,6192
	638,8875	98,72	19,62	697,6192

Fuente: Elaboración Propia

A partir de los valores de las constantes de regresión K_1 , K_2 y K_3 obtenidas a partir de las mediciones, procedemos al ajuste de las constantes de los modelos según la ecuación (10):

$$K_2 = -1.7496 - 0,0262 * P_{40} - 0,0236 * IP \quad (19)$$

$$R^2 = 0,73$$

Tabla 61. Ajuste a la ecuación (10) para estimar K_2 según propiedades físicas

	K_2	P_{40}	IP	K_2 ajustado
P1	0,5181	98,03	14,81	0,4658
	0,5229	98,03	14,81	0,4658
	0,5082	98,03	14,81	0,4658
P2	0,5205	97,42	13,11	0,4900
	0,4786	97,42	13,11	0,4900
	0,4764	97,42	13,11	0,4900
P3	0,4843	98,09	12,50	0,5219
	0,5084	98,09	12,50	0,5219
	0,5388	98,09	12,50	0,5219
P4	0,4739	98,00	12,89	0,5103
	0,4838	98,00	12,89	0,5103
	0,4690	98,00	12,89	0,5103
B1	0,3032	98,41	20,62	0,3384
	0,2839	98,41	20,62	0,3384
	0,2691	98,41	20,62	0,3384
B2	0,3698	98,43	19,56	0,3642
	0,4070	98,43	19,56	0,3642
	0,3749	98,43	19,56	0,3642
B3	0,3801	98,95	19,79	0,3722
	0,2967	98,95	19,79	0,3722
	0,3646	98,95	19,79	0,3722
B4	0,4648	98,72	19,62	0,3705
	0,4195	98,72	19,62	0,3705
	0,3829	98,72	19,62	0,3705

Fuente: Elaboración Propia

A partir de los valores de las constantes de regresión K_1 , K_2 y K_3 obtenidas a partir de las mediciones, procedemos al ajuste de las constantes de los modelos según la ecuación (11):

$$K_3 = -3,3473 - 0,0566 * IP \quad (20)$$

$$R^2 = 0,21$$

Tabla 62. Ajuste a la ecuación (11) para estimar K_3 según propiedades físicas

	K_3	IP	K_3 ajustado
P1	-4,1144	14,81	-4,1852
	-4,0069	14,81	-4,1852
	-4,1657	14,81	-4,1852
P2	-4,0654	13,11	-4,0890
	-3,9908	13,11	-4,0890
	-3,8182	13,11	-4,0890
P3	-4,1887	12,50	-4,0548
	-3,8736	12,50	-4,0548
	-4,1389	12,50	-4,0548
P4	-4,0020	12,89	-4,0769
	-4,2185	12,89	-4,0769
	-4,3014	12,89	-4,0769
B1	-4,0872	20,62	-4,5142
	-4,0483	20,62	-4,5142
	-3,9959	20,62	-4,5142
B2	-5,2923	19,56	-4,4539
	-5,1797	19,56	-4,4539
	-5,1249	19,56	-4,4539
B3	-4,6640	19,79	-4,4670
	-3,8414	19,79	-4,4670
	-4,4648	19,79	-4,4670
B4	-4,7617	19,62	-4,4572
	-4,4434	19,62	-4,4572
	-4,1063	19,62	-4,4572

Fuente: Elaboración Propia

A partir de los valores de las constantes de regresión K_1 , K_2 y K_3 obtenidas a partir de las mediciones, procedemos al ajuste de las constantes de los modelos según la ecuación (12):

$$K_1 = -4924,5713 - 8,1425 * IP + 366,9419 * Y - 102,8576 * \left(\frac{W}{W_{opt}} \right) \quad (21)$$

$$R^2 = 0,86$$

Tabla 63. Ajuste a la ecuación (12) para estimar K_1 según propiedades físicas

	K_1	IP	Y	$\left(\frac{W}{W_{opt}} \right)$	K_1 ajustado
P1	924,5277	14,81	16,47	1,0068	894,5934
	859,3238	14,81	16,33	0,9017	855,7081
	820,8322	14,81	16,39	1,1103	853,0576
P2	872,6125	13,11	16,29	0,9910	845,5268
	809,7318	13,11	16,09	0,8596	784,8729
	767,7127	13,11	16,18	1,0993	793,1194
P3	853,0301	12,50	16,39	1,0030	883,2550
	803,9911	12,50	16,24	0,9063	839,8309
	828,2361	12,50	16,32	1,1238	845,3978
P4	866,1210	12,89	16,28	0,9974	842,4152
	810,4000	12,89	16,19	0,8872	818,6230
	808,9805	12,89	16,13	1,1022	775,9073
B1	685,7841	20,62	16,09	0,9771	710,1887
	684,4287	20,62	15,99	0,8535	687,7844
	636,2973	20,62	15,99	1,0932	662,2802
B2	799,7910	19,56	16,21	0,9955	761,1750
	782,2270	19,56	16,10	0,8653	735,5077
	747,8053	19,56	16,08	1,1172	703,2029
B3	726,3890	19,79	16,18	0,9744	752,0713
	627,7124	19,79	15,99	0,8587	693,3052
	615,6905	19,79	15,99	1,0959	668,1433
B4	732,2194	19,62	16,00	1,0030	682,1485
	661,6366	19,62	15,90	0,8818	657,6936
	638,8875	19,62	15,86	1,1282	618,5601

Fuente: Elaboración Propia

A partir de los valores de las constantes de regresión K_1 , K_2 y K_3 obtenidas a partir de las mediciones, procedemos al ajuste de las constantes de los modelos según la ecuación (13):

$$K_2 = 0,8117 - 0,0207 * IP - 0,0384 * \left(\frac{W}{W_{opt}}\right) * \left(\frac{Y}{Y_{m\acute{a}x}}\right) \quad (22)$$

$$R^2 = 0.73$$

Tabla 64. Ajuste a la ecuación (13) para estimar K_2 según propiedades físicas

	K_2	IP	$\left(\frac{W}{W_{opt}}\right) * \left(\frac{Y}{Y_{m\acute{a}x}}\right)$	K_2 ajustado
P1	0,5181	14,81	0,9765	0,4670
	0,5229	14,81	0,8459	0,4720
	0,5082	14,81	1,0868	0,4628
P2	0,5205	13,11	0,9968	0,5015
	0,4786	13,11	0,8557	0,5069
	0,4764	13,11	1,1109	0,4971
P3	0,4843	12,50	0,9767	0,5148
	0,5084	12,50	0,8530	0,5196
	0,5388	12,50	1,0938	0,5103
P4	0,4739	12,89	1,0025	0,5057
	0,4838	12,89	0,8762	0,5106
	0,4690	12,89	1,1172	0,5013
B1	0,3032	20,62	1,0072	0,3452
	0,2839	20,62	0,8967	0,3495
	0,2691	20,62	1,1040	0,3415
B2	0,3698	19,56	0,9944	0,3678
	0,4070	19,56	0,8569	0,3731
	0,3749	19,56	1,0947	0,3640
B3	0,3801	19,79	1,0027	0,3627
	0,2967	19,79	0,8952	0,3669
	0,3646	19,79	1,1099	0,3586
B4	0,4648	19,62	0,9967	0,3665
	0,4195	19,62	0,8809	0,3710
	0,3829	19,62	1,0919	0,3629

Fuente: Elaboración Propia

A partir de los valores de las constantes de regresión K_1 , K_2 y K_3 obtenidas a partir de las mediciones, procedemos al ajuste de las constantes de los modelos según la ecuación (14):

$$K_3 = 10,5086 + 0,0879 * IP - 0,9911 * Y - 0,2823 * \left(\frac{W}{W_{opt}} \right) \quad (23)$$

$$R^2 = 0,169$$

Tabla 65. Ajuste a la ecuación (14) para estimar K_3 según propiedades fisca

	K_3	IP	Y	$\left(\frac{W}{W_{opt}} \right)$	K_3 ajustado
P1	-4,1144	14,81	16,47	1,0068	-4,4052
	-4,0069	14,81	16,33	0,9017	-4,2570
	-4,1657	14,81	16,39	1,1103	-4,3672
P2	-4,0654	13,11	16,29	0,9910	-4,1061
	-3,9908	13,11	16,09	0,8596	-3,8930
	-3,8182	13,11	16,18	1,0993	-4,0457
P3	-4,1887	12,50	16,39	1,0030	-4,1367
	-3,8736	12,50	16,24	0,9063	-3,9827
	-4,1389	12,50	16,32	1,1238	-4,1168
P4	-4,0020	12,89	16,28	0,9974	-4,0802
	-4,2185	12,89	16,19	0,8872	-3,9639
	-4,3014	12,89	16,13	1,1022	-3,9853
B1	-4,0872	20,62	16,09	0,9771	-4,5698
	-4,0483	20,62	15,99	0,8535	-4,4492
	-3,9959	20,62	15,99	1,0932	-4,5240
B2	-5,2923	19,56	16,21	0,9955	-4,5864
	-5,1797	19,56	16,10	0,8653	-4,4547
	-5,1249	19,56	16,08	1,1172	-4,5206
B3	-4,6640	19,79	16,18	0,9744	-4,5778
	-3,8414	19,79	15,99	0,8587	-4,3778
	-4,4648	19,79	15,99	1,0959	-4,4520
B4	-4,7617	19,62	16,00	1,0030	-4,4145
	-4,4434	19,62	15,90	0,8818	-4,2906
	-4,1063	19,62	15,86	1,1282	-4,3377

Fuente: Elaboración Propia

Después de realizar el ajuste a los coeficientes de las ecuaciones (6) a (14) se obtienen las ecuaciones (15) a (23):

Tabla 66. Modelos Reajustados del Estudio LTTP

Suelos finos cohesivos	
$K_1 = 1196,652 - 6,140 * \%Arcilla - 9,221 * w$	(15)
$K_2 = 0,9046 + 0,0167 * P_{40} - 0,0188 * P_{200} + 0,0105 * LL - 0,0510 * W_{opt}$	(16)
$K_3 = 323,5490 - 4,3012 * P_{40} - 0,5409 * P_{200} - 0,2179 * \%limo + 0,4531 * LL + 0,5608 * W_{opt} + 9,9052 * D_{m\acute{a}x} - 1,8038 * \Upsilon - 0,2529 * \left(\frac{W}{W_{opt}}\right)$	(17)
Suelos de granos finos	
$K_1 = 5612,3081 - 46,7626 * P_{40} - 15,1964 * IP$	(18)
$K_2 = -1,7496 + 0,0262 * P_{40} - 0,0236 * IP$	(19)
$K_3 = -3,3473 - 0,0566 * IP$	(20)

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 67. Modelos Reajustados de la Universidad de Wisconsin

Para suelos Finos	
$K_1 = -4924,5713 - 8,1425 * IP + 366,9420 * \Upsilon - 102,8576 * \left(\frac{W}{W_{opt}}\right)$	(21)
$K_2 = 0,8117 - 0,0207 * IP - 0,0384 * \left(\frac{W}{W_{opt}}\right) * \left(\frac{\Upsilon}{\Upsilon_{max}}\right)$	(22)
$K_3 = 11,113 - 0,0855 * IP - 0,8458 * \Upsilon - 0,3205 * \left(\frac{W}{W_{opt}}\right)$	(23)

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 68. Coeficientes de Regresión para las ecuaciones (15) a (23)

	Espécimen	K ₁	K ₂	K ₃	(15)	(16)	(17)	(18)	(19)	(20)	(21)	(22)	(23)
					K ₁	K ₂	K ₃	K ₁	K ₂	K ₃	K ₁	K ₂	K ₃
P1	1	924,5277	0,5181	-4,1144	825,5333	0,4849	-4,1807	803,3172	0,4658	-4,1852	894,5934	0,4670	-4,4052
	2	859,3238	0,5229	-4,0069	844,2689	0,4849	-3,9099	803,3172	0,4658	-4,1852	855,7081	0,4720	-4,2570
	3	820,8322	0,5082	-4,1657	807,9578	0,4849	-4,0551	803,3172	0,4658	-4,1852	853,0576	0,4628	-4,3672
P2	1	872,6125	0,5205	-4,0654	856,1627	0,4914	-4,1561	857,5813	0,4900	-4,0890	845,5268	0,5015	-4,1061
	2	809,7318	0,4786	-3,9908	875,6411	0,4914	-3,7583	857,5813	0,4900	-4,0890	784,8729	0,5069	-3,8930
	3	767,7127	0,4764	-3,8182	837,9461	0,4914	-3,9806	857,5813	0,4900	-4,0890	793,1194	0,4971	-4,0457
P3	1	853,0301	0,4843	-4,1887	829,8890	0,4841	-4,0749	835,3516	0,5219	-4,0548	883,2550	0,5148	-4,1367
	2	803,9911	0,5084	-3,8736	848,5176	0,4841	-3,7881	835,3516	0,5219	-4,0548	839,8309	0,5196	-3,9827
	3	828,2361	0,5388	-4,1389	810,3438	0,4841	-3,9804	835,3516	0,5219	-4,0548	845,3978	0,5103	-4,1168
P4	1	866,1210	0,4739	-4,0020	827,4415	0,5291	-4,4908	833,5261	0,5103	-4,0769	842,4152	0,5057	-4,0802
	2	810,4000	0,4838	-4,2185	845,8402	0,5291	-4,2902	833,5261	0,5103	-4,0769	818,6230	0,5106	-3,9639
	3	808,9805	0,4690	-4,3014	808,4382	0,5291	-4,2434	833,5261	0,5103	-4,0769	775,9073	0,5013	-3,9853
B1	1	685,7841	0,3032	-4,0872	682,9908	0,3128	-4,2845	697,1828	0,3384	-4,5142	710,1887	0,3452	-4,5698
	2	684,4287	0,2839	-4,0483	701,2430	0,3128	-4,0806	697,1828	0,3384	-4,5142	687,7844	0,3495	-4,4492
	3	636,2973	0,2691	-3,9959	665,0138	0,3128	-4,1370	697,1828	0,3384	-4,5142	662,2802	0,3415	-4,5240
B2	1	799,7910	0,3698	-5,2923	721,6878	0,3774	-5,2231	712,2582	0,3642	-4,4539	761,1750	0,3678	-4,5864
	2	782,2270	0,4070	-5,1797	743,1906	0,3774	-4,9982	712,2582	0,3642	-4,4539	735,5077	0,3731	-4,4547
	3	747,8053	0,3749	-5,1249	703,9621	0,3774	-5,0305	712,2582	0,3642	-4,4539	703,2029	0,3640	-4,5206
B3	1	726,3890	0,3801	-4,6640	697,2485	0,3751	-4,6766	684,6198	0,3722	-4,4670	752,0713	0,3627	-4,5778
	2	627,7124	0,2967	-3,8414	713,8251	0,3751	-4,3000	684,6198	0,3722	-4,4670	693,3052	0,3669	-4,3778
	3	615,6905	0,3646	-4,4648	676,5642	0,3751	-4,3562	684,6198	0,3722	-4,4670	668,1433	0,3586	-4,4520
B4	1	732,2194	0,4648	-4,7617	679,9122	0,3784	-4,4432	697,6192	0,3705	-4,4572	682,1485	0,3665	-4,4145
	2	661,6366	0,4195	-4,4434	698,7382	0,3784	-4,2310	697,6192	0,3705	-4,4572	657,6936	0,3710	-4,2906
	3	638,8875	0,3829	-4,1063	662,0120	0,3784	-4,2255	697,6192	0,3705	-4,4572	618,5601	0,3629	-4,3377

Fuente: Elaboración Propia

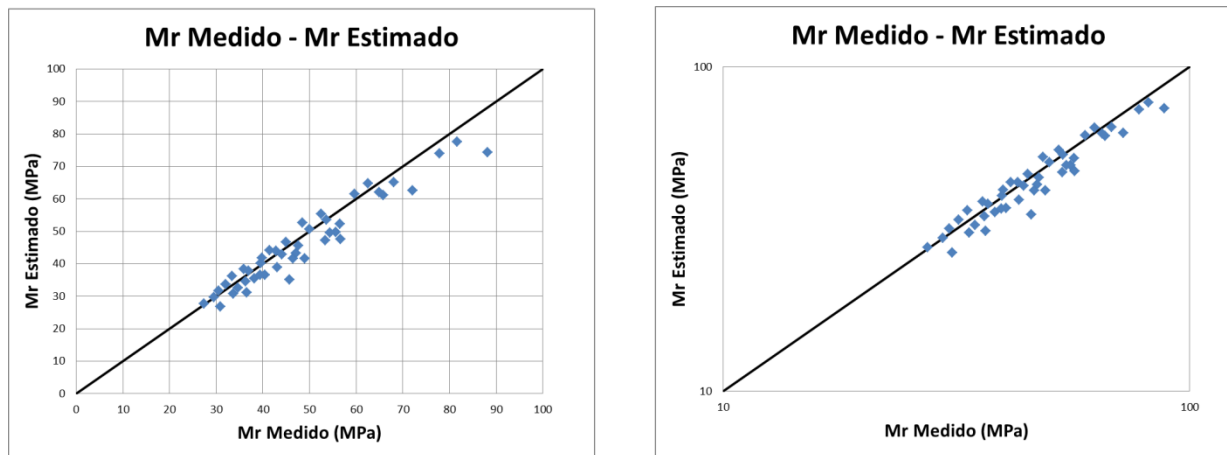
Con los coeficientes K_1 , K_2 y K_3 ajustados se procede a estimar el valor del módulo resiliente:

Tabla 69. Valores de Modulo Resiliente muestra P – 1 modelo LTTP ecuaciones (15) a (17)

PORTILLO								
P - 1								
$Mr = 825,53 \text{ Pa} \left(\frac{\Theta}{\text{Pa}}\right)^{0,485} \left(\frac{\tau_{\text{oct}}}{\text{Pa}} + 1\right)^{-4,181}$			$Mr = 844,27 \text{ Pa} \left(\frac{\Theta}{\text{Pa}}\right)^{0,485} \left(\frac{\tau_{\text{oct}}}{\text{Pa}} + 1\right)^{-3,910}$			$Mr = 807,96 \text{ Pa} \left(\frac{\Theta}{\text{Pa}}\right)^{0,485} \left(\frac{\tau_{\text{oct}}}{\text{Pa}} + 1\right)^{-4,055}$		
K_1	K_2	K_3	K_1	K_2	K_3	K_1	K_2	K_3
825,533	0,485	-4,181	844,269	0,485	-3,910	807,958	0,485	-4,055
Ciclo	Mr estimado	Mr medido	Ciclo	Mr estimado	Mr medido	Ciclo	Mr estimado	Mr medido
1-1	74,36	88,16	2-1	77,48	81,64	3-1	73,87	77,89
1-2	61,04	65,87	2-2	64,70	62,57	3-2	61,46	59,69
1-3	49,66	55,62	2-3	53,58	53,58	3-3	50,70	50,05
1-4	41,54	49,01	2-4	45,51	47,55	3-4	42,91	44,11
1-5	35,02	45,71	2-5	38,93	43,11	3-5	36,58	39,49
1-6	62,54	72,13	2-6	65,14	68,03	3-6	62,07	64,91
1-7	52,27	56,46	2-7	55,39	52,48	3-7	52,58	48,50
1-8	43,22	47,06	2-8	46,62	44,97	3-8	44,06	41,42
1-9	36,59	40,43	2-9	40,07	39,62	3-9	37,73	36,93
1-10	31,16	36,57	2-10	34,62	36,31	3-10	32,49	34,64
1-11	47,64	56,67	2-11	49,60	54,43	3-11	47,20	53,35
1-12	41,57	46,50	2-12	44,02	42,81	3-12	41,70	39,80
1-13	35,54	38,24	2-13	38,31	35,97	3-13	36,13	33,37
1-14	30,79	33,70	2-14	33,69	32,00	3-14	31,66	30,53
1-15	26,70	30,94	2-15	29,65	29,56	3-15	27,75	27,42

Fuente: Elaboración Propia

Figura 46. Valores medidos y estimados muestra P-1 modelo LTTP ecuaciones (15) a (17)



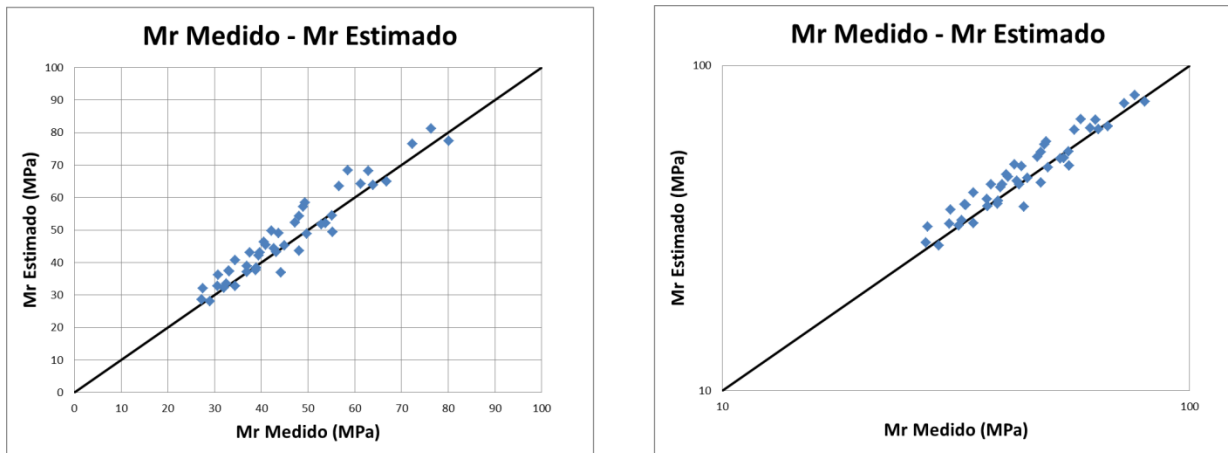
Fuente: Elaboración Propia

Tabla 70. Valores de Modulo Resiliente muestra P – 2 modelo LTTP ecuaciones (15) a (17)

PORTILLO								
P - 2								
$Mr = 856,16 Pa \left(\frac{\Theta}{Pa}\right)^{0,491} \left(\frac{\tau_{oct}}{Pa} + 1\right)^{-4,156}$			$Mr = 857,64 Pa \left(\frac{\Theta}{Pa}\right)^{0,491} \left(\frac{\tau_{oct}}{Pa} + 1\right)^{-3,758}$			$Mr = 837,95 Pa \left(\frac{\Theta}{Pa}\right)^{0,491} \left(\frac{\tau_{oct}}{Pa} + 1\right)^{-3,981}$		
K ₁	K ₂	K ₃	K ₁	K ₂	K ₃	K ₁	K ₂	K ₃
856,163	0,491	-4,156	875,641	0,491	-3,758	837,946	0,491	-3,981
Ciclo	Mr estimado	Mr medido	Ciclo	Mr estimado	Mr medido	Ciclo	Mr estimado	Mr medido
1-1	77,46	80,17	2-1	81,23	76,30	3-1	76,53	72,40
1-2	63,75	63,90	2-2	68,43	58,56	3-2	63,55	56,67
1-3	52,01	53,76	2-3	57,19	48,95	3-3	52,33	47,24
1-4	43,61	48,07	2-4	48,96	43,72	3-4	44,23	42,72
1-5	36,85	44,18	2-5	42,19	39,44	3-5	37,66	38,82
1-6	64,98	66,81	2-6	68,14	62,98	3-6	64,21	61,26
1-7	54,48	55,09	2-7	58,47	49,41	3-7	54,32	48,08
1-8	45,17	44,96	2-8	49,67	42,20	3-8	45,46	40,94
1-9	38,33	38,91	2-9	43,03	37,62	3-9	38,89	36,89
1-10	32,72	34,44	2-10	37,47	32,97	3-10	33,46	32,56
1-11	49,31	55,29	2-11	51,70	52,90	3-11	48,75	49,77
1-12	43,17	43,17	2-12	46,33	40,54	3-12	43,07	39,67
1-13	37,04	36,91	2-13	40,72	34,47	3-13	37,30	33,19
1-14	32,17	32,04	2-14	36,11	30,81	3-14	32,66	30,63
1-15	27,97	29,03	2-15	32,02	27,55	3-15	28,62	27,28

Fuente: Elaboración Propia

Figura 47. Valores medidos y estimados muestra P-2 modelo LTTP ecuaciones (15) a (17)



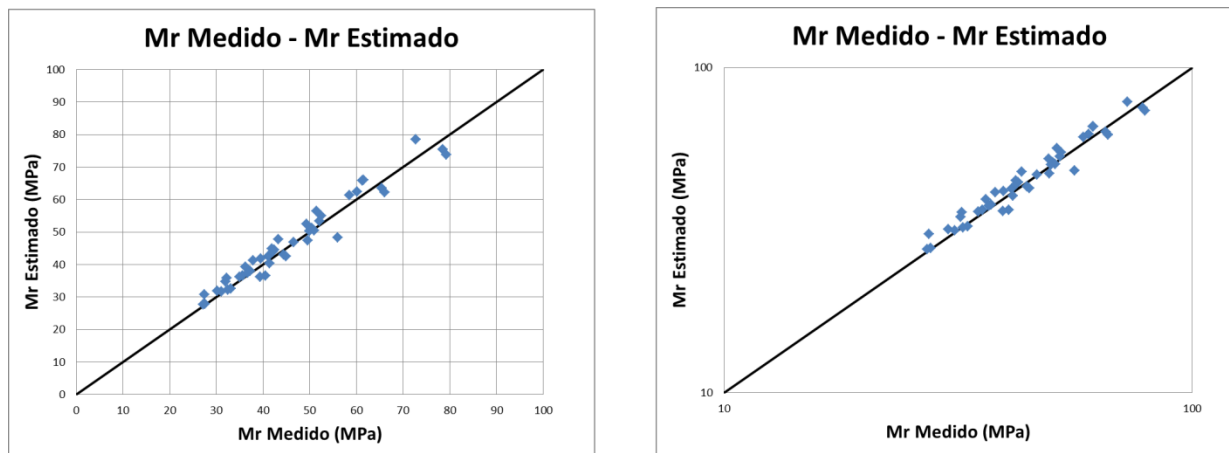
Fuente: Elaboración Propia

Tabla 71. Valores de Modulo Resiliente muestra P – 3 modelo LTTP ecuaciones (15) a (17)

PORTILLO								
P - 3								
$Mr = 829,89 \text{ Pa} \left(\frac{\Theta}{Pa}\right)^{0,484} \left(\frac{\tau_{oct}}{Pa} + 1\right)^{-4,075}$			$Mr = 848,52 \text{ Pa} \left(\frac{\Theta}{Pa}\right)^{0,484} \left(\frac{\tau_{oct}}{Pa} + 1\right)^{-3,788}$			$Mr = 810,34 \text{ Pa} \left(\frac{\Theta}{Pa}\right)^{0,484} \left(\frac{\tau_{oct}}{Pa} + 1\right)^{-3,980}$		
K_1	K_2	K_3	K_1	K_2	K_3	K_1	K_2	K_3
829,889	0,484	-4,075	848,518	0,484	-3,788	810,344	0,484	-3,980
Ciclo	Mr estimado	Mr medido	Ciclo	Mr estimado	Mr medido	Ciclo	Mr estimado	Mr medido
1-1	75,4	78,5	2-1	78,4	72,7	3-1	73,8	79,3
1-2	62,3	60,1	2-2	65,9	61,3	3-2	61,3	58,5
1-3	51,1	50,4	2-3	54,9	52,5	3-3	50,4	51,0
1-4	43,1	44,4	2-4	46,9	46,6	3-4	42,6	44,9
1-5	36,5	40,6	2-5	40,4	41,4	3-5	36,2	39,4
1-6	63,4	65,4	2-6	65,9	61,6	3-6	62,1	66,1
1-7	53,4	52,1	2-7	56,4	51,4	3-7	52,5	49,4
1-8	44,5	42,5	2-8	47,8	43,3	3-8	43,9	42,2
1-9	37,9	37,2	2-9	41,3	37,9	3-9	37,5	36,7
1-10	32,5	33,1	2-10	35,9	32,2	3-10	32,3	32,4
1-11	48,3	56,0	2-11	50,2	50,0	3-11	47,3	49,6
1-12	42,4	41,1	2-12	44,9	42,0	3-12	41,8	39,5
1-13	36,6	35,6	2-13	39,3	36,3	3-13	36,1	34,9
1-14	31,9	30,2	2-14	34,8	32,0	3-14	31,6	31,1
1-15	27,8	27,6	2-15	30,8	27,4	3-15	27,7	27,2

Fuente: Elaboración Propia

Figura 48. Valores medidos y estimados muestra P-3 modelo LTTP ecuaciones (15) a (17)



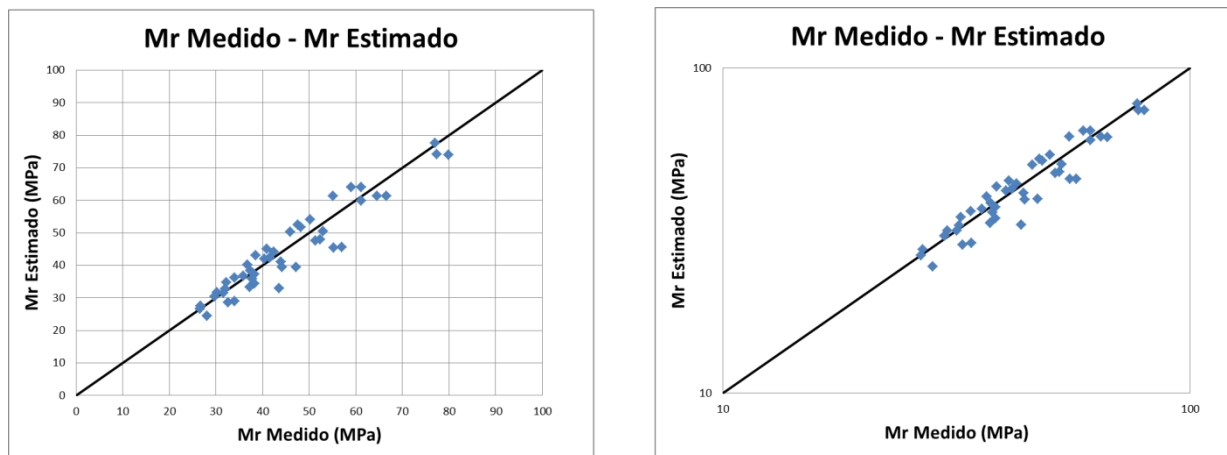
Fuente: Elaboración Propia

Tabla 72. Valores de Modulo Resiliente muestra P – 4 modelo LTTP ecuaciones (15) a (17)

PORTILLO								
P - 4								
$Mr = 827,44 Pa \left(\frac{\Theta}{Pa}\right)^{0,529} \left(\frac{\tau_{oct}}{Pa} + 1\right)^{-4,491}$			$Mr = 845,84 Pa \left(\frac{\Theta}{Pa}\right)^{0,529} \left(\frac{\tau_{oct}}{Pa} + 1\right)^{-4,290}$			$Mr = 808,44 Pa \left(\frac{\Theta}{Pa}\right)^{0,529} \left(\frac{\tau_{oct}}{Pa} + 1\right)^{-4,243}$		
K ₁	K ₂	K ₃	K ₁	K ₂	K ₃	K ₁	K ₂	K ₃
827,441	0,529	-4,491	845,840	0,529	-4,290	808,438	0,529	-4,243
Ciclo	Mr estimado	Mr medido	Ciclo	Mr estimado	Mr medido	Ciclo	Mr estimado	Mr medido
1-1	74,01	79,85	2-1	77,52	77,03	3-1	74,17	77,39
1-2	59,80	61,20	2-2	64,06	59,04	3-2	61,35	55,08
1-3	47,86	52,40	2-3	52,45	47,52	3-3	50,29	45,91
1-4	39,48	47,18	2-4	44,10	42,44	3-4	42,32	41,52
1-5	32,84	43,53	2-5	37,35	38,29	3-5	35,88	37,73
1-6	61,27	66,54	2-6	64,10	61,14	3-6	61,34	64,49
1-7	50,51	53,04	2-7	53,99	50,16	3-7	51,73	48,19
1-8	41,15	43,98	2-8	44,97	40,97	3-8	43,14	38,50
1-9	34,39	38,30	2-9	38,30	37,39	3-9	36,78	35,86
1-10	28,92	34,02	2-10	32,79	32,01	3-10	31,52	31,64
1-11	45,56	57,04	2-11	47,50	51,36	3-11	45,48	55,28
1-12	39,36	44,20	2-12	41,88	40,39	3-12	40,15	36,72
1-13	33,27	37,32	2-13	36,17	33,94	3-13	34,73	32,26
1-14	28,51	32,56	2-14	31,58	30,20	3-14	30,35	29,77
1-15	24,46	28,11	2-15	27,58	26,75	3-15	26,53	26,51

Fuente: Elaboración Propia

Figura 49. Valores medidos y estimados muestra P-4 modelo LTTP ecuaciones (15) a (17)



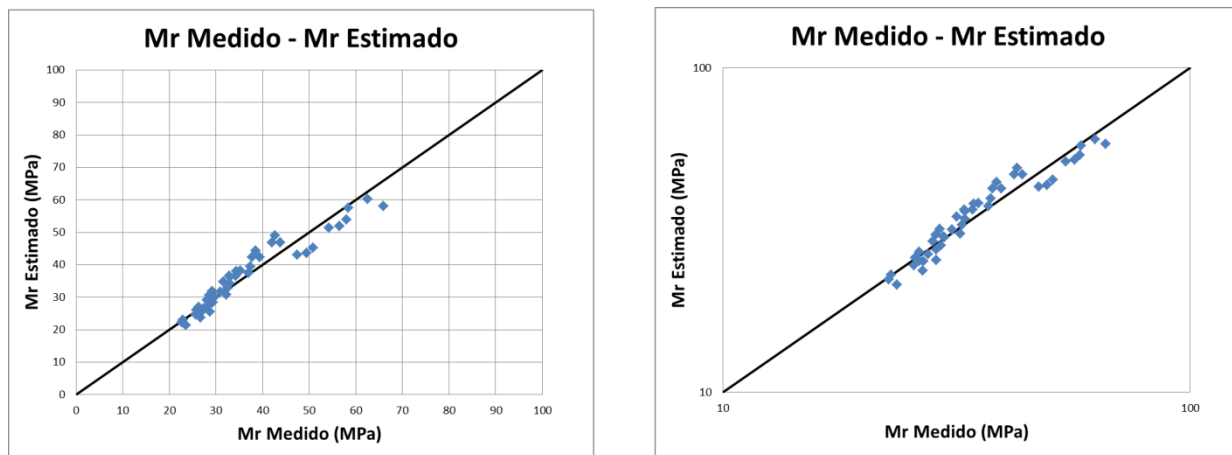
Fuente: Elaboración Propia

Tabla 73. Valores de Modulo Resiliente muestra B – 1 modelo LTTP ecuaciones (15) a (17)

BARRANCAS								
B - 1								
$Mr = 682,99 \text{ Pa} \left(\frac{\Theta}{\text{Pa}}\right)^{0,313} \left(\frac{\tau_{\text{oct}}}{\text{Pa}} + 1\right)^{-4,285}$			$Mr = 701,24 \text{ Pa} \left(\frac{\Theta}{\text{Pa}}\right)^{0,313} \left(\frac{\tau_{\text{oct}}}{\text{Pa}} + 1\right)^{-4,081}$			$Mr = 665,01 \text{ Pa} \left(\frac{\Theta}{\text{Pa}}\right)^{0,313} \left(\frac{\tau_{\text{oct}}}{\text{Pa}} + 1\right)^{-4,137}$		
K ₁	K ₂	K ₃	K ₁	K ₂	K ₃	K ₁	K ₂	K ₃
682,991	0,313	-4,285	701,243	0,313	-4,081	665,014	0,313	-4,137
Ciclo	Mr estimado	Mr medido	Ciclo	Mr estimado	Mr medido	Ciclo	Mr estimado	Mr medido
1-1	58,09	65,91	2-1	60,22	62,51	3-1	57,42	58,35
1-2	46,81	43,78	2-2	48,98	42,61	3-2	46,92	41,99
1-3	37,37	36,97	2-3	39,49	37,41	3-3	38,00	34,41
1-4	30,77	32,25	2-4	32,79	32,48	3-4	31,66	30,93
1-5	25,56	28,64	2-5	27,46	28,61	3-5	26,60	27,47
1-6	51,94	56,50	2-6	53,85	58,05	3-6	51,32	54,18
1-7	42,34	39,40	2-7	44,31	38,56	3-7	42,41	37,79
1-8	34,15	32,97	2-8	36,10	32,98	3-8	34,70	31,62
1-9	28,34	29,32	2-9	30,20	29,58	3-9	29,13	28,12
1-10	23,69	26,73	2-10	25,46	26,41	3-10	24,63	25,64
1-11	43,55	49,44	2-11	45,18	50,79	3-11	42,99	47,41
1-12	36,49	34,26	2-12	38,21	35,20	3-12	36,51	32,86
1-13	30,08	29,75	2-13	31,81	29,15	3-13	30,51	28,53
1-14	25,33	26,87	2-14	27,02	26,30	3-14	26,00	25,77
1-15	21,42	23,59	2-15	23,04	22,89	3-15	22,24	22,62

Fuente: Elaboración Propia

Figura 50. Valores medidos y estimados muestra B-1 modelo LTTP ecuaciones (15) a (17)



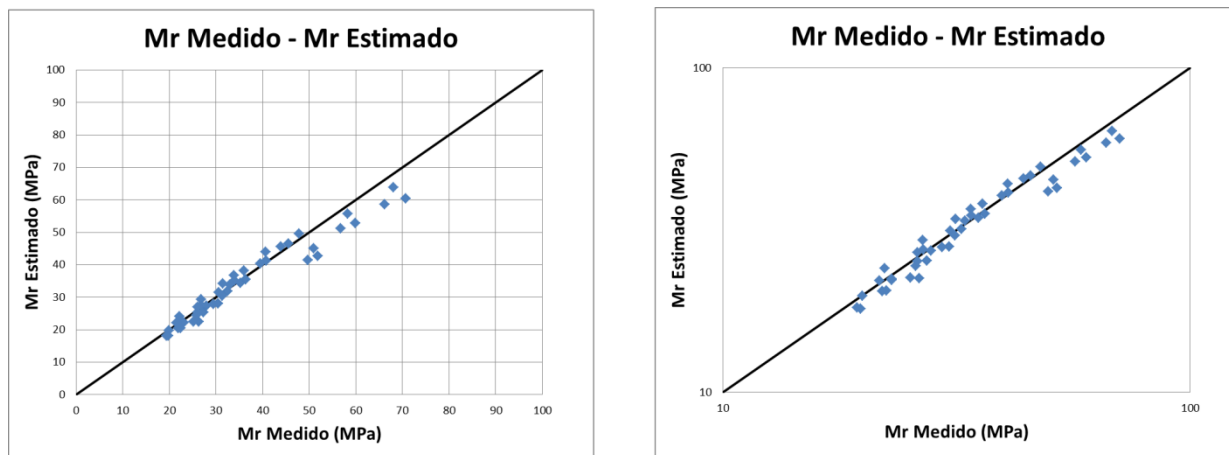
Fuente: Elaboración Propia

Tabla 74. Valores de Modulo Resiliente muestra B – 2 modelo LTTP ecuaciones (15) a (17)

BARRANCAS								
B - 2								
$Mr = 721,69 \text{ Pa} \left(\frac{\Theta}{\text{Pa}}\right)^{0,377} \left(\frac{\tau_{\text{oct}}}{\text{Pa}} + 1\right)^{-5,223}$			$Mr = 743,19 \text{ Pa} \left(\frac{\Theta}{\text{Pa}}\right)^{0,377} \left(\frac{\tau_{\text{oct}}}{\text{Pa}} + 1\right)^{-4,998}$			$Mr = 703,96 \text{ Pa} \left(\frac{\Theta}{\text{Pa}}\right)^{0,377} \left(\frac{\tau_{\text{oct}}}{\text{Pa}} + 1\right)^{-5,030}$		
K ₁	K ₂	K ₃	K ₁	K ₂	K ₃	K ₁	K ₂	K ₃
721,688	0,377	-5,223	743,191	0,377	-4,998	703,962	0,377	-5,030
Ciclo	Mr estimado	Mr medido	Ciclo	Mr estimado	Mr medido	Ciclo	Mr estimado	Mr medido
1-1	59,31	70,74	2-1	61,63	68,03	3-1	58,37	66,19
1-2	45,67	45,61	2-2	47,86	47,85	3-2	45,32	43,97
1-3	34,78	36,37	2-3	36,77	35,97	3-3	34,82	34,03
1-4	27,48	30,51	2-4	29,29	31,40	3-4	27,72	29,44
1-5	21,95	26,30	2-5	23,58	25,87	3-5	22,31	25,17
1-6	51,81	59,86	2-6	53,85	58,31	3-6	50,99	56,74
1-7	40,45	40,81	2-7	42,41	40,67	3-7	40,16	39,57
1-8	31,18	32,44	2-8	32,99	31,48	3-8	31,23	30,63
1-9	24,87	27,35	2-9	26,52	26,84	3-9	25,10	26,12
1-10	20,02	21,92	2-10	21,52	22,99	3-10	20,35	22,37
1-11	41,88	51,88	2-11	43,55	51,02	3-11	41,23	49,64
1-12	33,79	35,24	2-12	35,46	33,89	3-12	33,56	32,97
1-13	26,74	27,91	2-13	28,32	26,79	3-13	26,79	26,06
1-14	21,71	22,99	2-14	23,18	22,19	3-14	21,92	21,59
1-15	17,72	19,73	2-15	19,07	19,90	3-15	18,03	19,36

Fuente: Elaboración Propia

Figura 51. Valores medidos y estimados muestra B-2 modelo LTTP ecuaciones (15) a (17)



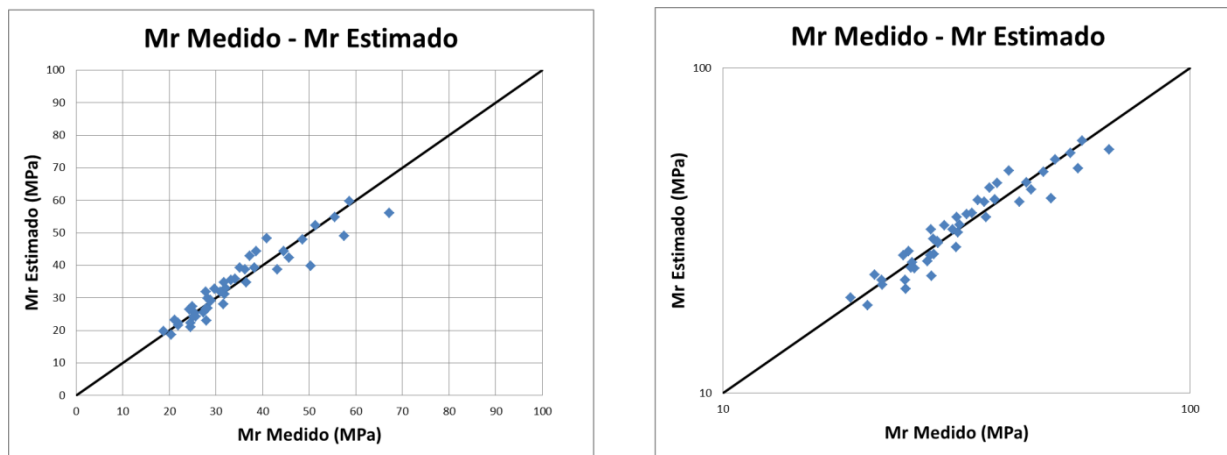
Fuente: Elaboración Propia

Tabla 75. Valores de Modulo Resiliente muestra B – 3 modelo LTTP ecuaciones (15) a (17)

BARRANCAS								
B - 3								
$Mr = 697,25 Pa \left(\frac{\Theta}{Pa}\right)^{0,375} \left(\frac{\tau_{oct}}{Pa} + 1\right)^{-4,677}$			$Mr = 713,83 Pa \left(\frac{\Theta}{Pa}\right)^{0,375} \left(\frac{\tau_{oct}}{Pa} + 1\right)^{-4300}$			$Mr = 676,56 Pa \left(\frac{\Theta}{Pa}\right)^{0,375} \left(\frac{\tau_{oct}}{Pa} + 1\right)^{-4,356}$		
K ₁	K ₂	K ₃	K ₁	K ₂	K ₃	K ₁	K ₂	K ₃
697,248	0,375	-4,677	713,825	0,375	-4,300	676,564	0,375	-4,356
Ciclo	Mr estimado	Mr medido	Ciclo	Mr estimado	Mr medido	Ciclo	Mr estimado	Mr medido
1-1	58,90	67,15	2-1	61,72	58,69	3-1	58,53	55,46
1-2	46,57	44,60	2-2	49,87	40,93	3-2	47,31	38,68
1-3	36,45	36,55	2-3	39,93	36,21	3-3	37,89	33,26
1-4	29,51	31,59	2-4	32,95	31,02	3-4	31,27	28,78
1-5	24,11	27,98	2-5	27,43	27,77	3-5	26,03	25,23
1-6	51,51	57,56	2-6	53,97	51,36	3-6	51,17	48,53
1-7	41,30	38,23	2-7	44,23	37,21	3-7	41,94	35,16
1-8	32,73	31,86	2-8	35,85	31,68	3-8	34,00	27,85
1-9	26,74	27,38	2-9	29,86	28,88	3-9	28,32	24,35
1-10	22,02	24,61	2-10	25,05	25,71	3-10	23,75	21,87
1-11	41,72	50,36	2-11	43,72	45,65	3-11	41,42	43,14
1-12	34,58	32,11	2-12	37,03	34,11	3-12	35,08	29,75
1-13	28,12	28,24	2-13	30,80	28,16	3-13	29,18	24,95
1-14	23,39	24,52	2-14	26,12	25,38	3-14	24,74	21,10
1-15	19,53	20,42	2-15	22,22	21,93	3-15	21,04	18,74

Fuente: Elaboración Propia

Figura 52. Valores medidos y estimados muestra B-3 modelo LTTP ecuaciones (15) a (17)



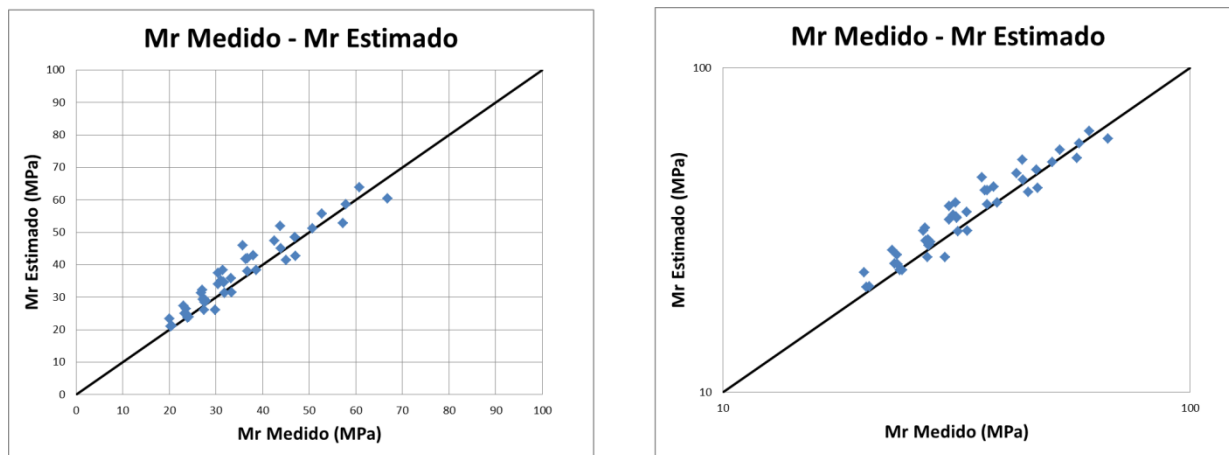
Fuente: Elaboración Propia

Tabla 76. Valores de Modulo Resiliente muestra B - 4 modelo LTTP ecuaciones (15) a (17)

BARRANCAS								
B - 4								
$Mr = 679,91 \text{ Pa} \left(\frac{\Theta}{\text{Pa}}\right)^{0,378} \left(\frac{\tau_{\text{oct}}}{\text{Pa}} + 1\right)^{-4,443}$			$Mr = 698,74 \text{ Pa} \left(\frac{\Theta}{\text{Pa}}\right)^{0,378} \left(\frac{\tau_{\text{oct}}}{\text{Pa}} + 1\right)^{-4,231}$			$Mr = 662,01 \text{ Pa} \left(\frac{\Theta}{\text{Pa}}\right)^{0,378} \left(\frac{\tau_{\text{oct}}}{\text{Pa}} + 1\right)^{-4,226}$		
K ₁	K ₂	K ₃	K ₁	K ₂	K ₃	K ₁	K ₂	K ₃
679,912	0,378	-4,443	698,738	0,378	-4,231	662,012	0,378	-4,226
Ciclo	Mr estimado	Mr medido	Ciclo	Mr estimado	Mr medido	Ciclo	Mr estimado	Mr medido
1-1	58,33	66,75	2-1	60,83	60,80	3-1	57,29	57,94
1-2	46,76	46,94	2-2	49,43	43,75	3-2	46,30	42,53
1-3	37,13	38,60	2-3	39,81	36,39	3-3	37,09	36,79
1-4	30,42	33,32	2-4	33,02	31,59	3-4	30,63	31,80
1-5	25,16	29,86	2-5	27,61	27,83	3-5	25,51	27,41
1-6	50,95	57,21	2-6	53,13	52,69	3-6	50,06	50,69
1-7	41,42	38,00	2-7	43,79	35,79	3-7	41,04	36,73
1-8	33,31	31,67	2-8	35,70	30,47	3-8	33,29	30,51
1-9	27,55	27,68	2-9	29,88	26,85	3-9	27,75	27,56
1-10	22,95	23,89	2-10	25,19	23,57	3-10	23,30	24,19
1-11	41,19	47,12	2-11	42,94	43,91	3-11	40,50	45,06
1-12	34,63	33,25	2-12	36,58	31,50	3-12	34,35	31,08
1-13	28,58	27,45	2-13	30,62	27,09	3-13	28,61	27,19
1-14	24,06	23,33	2-14	26,09	23,02	3-14	24,28	23,62
1-15	20,34	20,30	2-15	22,31	20,03	3-15	20,67	20,56

Fuente: Elaboración Propia

Figura 53. Valores medidos y estimados muestra B-4 modelo LTTP ecuaciones (15) a (17)



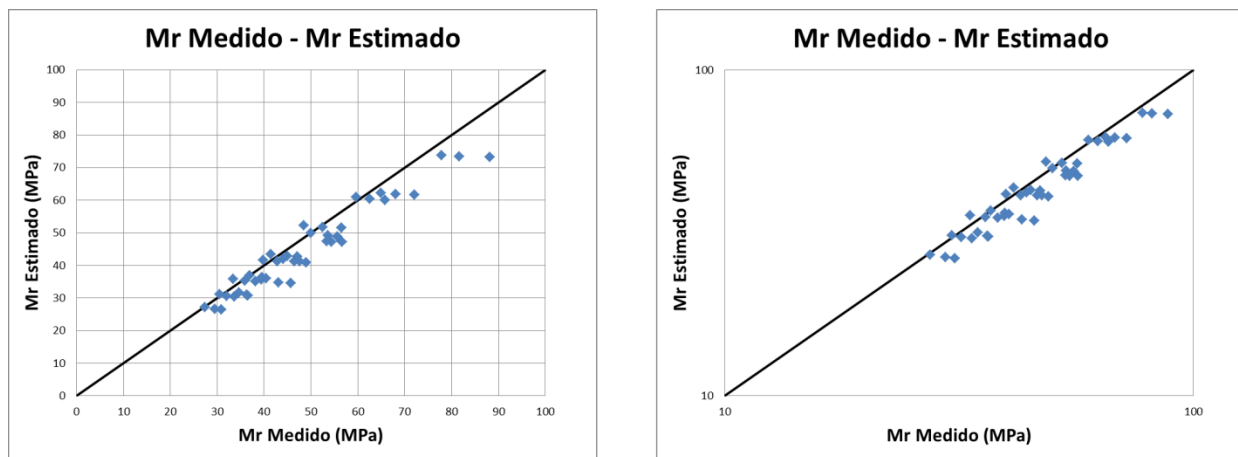
Fuente: Elaboración Propia

Tabla 77. Valores de Modulo Resiliente muestra P – 1 modelo LTTP ecuaciones (18) a (20)

PORTILLO								
P - 1								
$Mr = 803,32 Pa \left(\frac{\Theta}{Pa}\right)^{0,466} \left(\frac{\tau_{oct}}{Pa} + 1\right)^{-4,185}$			$Mr = 803,32 Pa \left(\frac{\Theta}{Pa}\right)^{0,466} \left(\frac{\tau_{oct}}{Pa} + 1\right)^{-4,185}$			$Mr = 803,32 Pa \left(\frac{\Theta}{Pa}\right)^{0,466} \left(\frac{\tau_{oct}}{Pa} + 1\right)^{-4,185}$		
K ₁	K ₂	K ₃	K ₁	K ₂	K ₃	K ₁	K ₂	K ₃
803,317	0,466	-4,185	803,317	0,466	-4,185	803,317	0,466	-4,185
Ciclo	Mr estimado	Mr medido	Ciclo	Mr estimado	Mr medido	Ciclo	Mr estimado	Mr medido
1-1	71,90	88,16	2-1	72,04	81,64	3-1	72,44	77,89
1-2	58,90	65,87	2-2	59,11	62,57	3-2	59,73	59,69
1-3	47,82	55,62	2-3	48,07	53,58	3-3	48,81	50,05
1-4	39,93	49,01	2-4	40,20	47,55	3-4	40,98	44,11
1-5	33,61	45,71	2-5	33,88	43,11	3-5	34,67	39,49
1-6	60,88	72,13	2-6	60,98	68,03	3-6	61,29	64,91
1-7	50,75	56,46	2-7	50,92	52,48	3-7	51,41	48,50
1-8	41,84	47,06	2-8	42,05	44,97	3-8	42,65	41,42
1-9	35,34	40,43	2-9	35,57	39,62	3-9	36,22	36,93
1-10	30,04	36,57	2-10	30,27	36,31	3-10	30,94	34,64
1-11	46,88	56,67	2-11	46,94	54,43	3-11	47,11	53,35
1-12	40,72	46,50	2-12	40,83	42,81	3-12	41,14	39,80
1-13	34,68	38,24	2-13	34,82	35,97	3-13	35,25	33,37
1-14	29,95	33,70	2-14	30,11	32,00	3-14	30,60	30,53
1-15	25,90	30,94	2-15	26,07	29,56	3-15	26,59	27,42

Fuente: Elaboración Propia

Figura 54. Valores medidos y estimados muestra P-1 modelo LTTP ecuaciones (18) a (20)



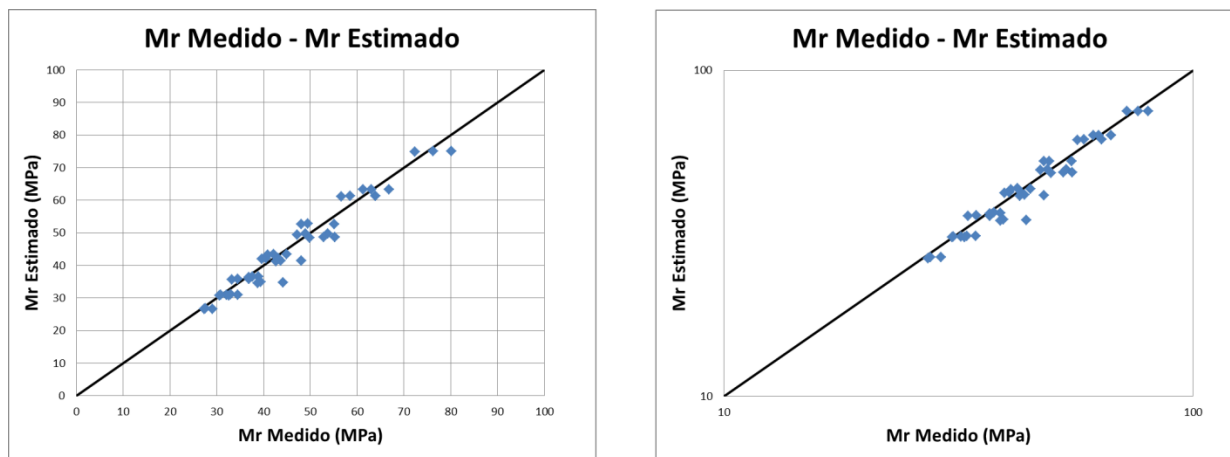
Fuente: Elaboración Propia

Tabla 78. Valores de Modulo Resiliente muestra P – 2 modelo LTTP ecuaciones (18) a (20)

PORTILLO								
P - 2								
$Mr = 857,58 \text{ Pa} \left(\frac{\Theta}{Pa}\right)^{0,490} \left(\frac{\tau_{oct}}{Pa} + 1\right)^{-4,089}$			$Mr = 857,58 \text{ Pa} \left(\frac{\Theta}{Pa}\right)^{0,490} \left(\frac{\tau_{oct}}{Pa} + 1\right)^{-4,089}$			$Mr = 857,58 \text{ Pa} \left(\frac{\Theta}{Pa}\right)^{0,490} \left(\frac{\tau_{oct}}{Pa} + 1\right)^{-4,089}$		
K ₁	K ₂	K ₃	K ₁	K ₂	K ₃	K ₁	K ₂	K ₃
857,581	0,490	-4,089	857,581	0,490	-4,089	857,581	0,490	-4,089
Ciclo	Mr estimado	Mr medido	Ciclo	Mr estimado	Mr medido	Ciclo	Mr estimado	Mr medido
1-1	77,88	80,17	2-1	77,90	76,30	3-1	77,76	72,40
1-2	64,33	63,90	2-2	64,38	58,56	3-2	64,16	56,67
1-3	52,69	53,76	2-3	52,74	48,95	3-3	52,48	47,24
1-4	44,33	48,07	2-4	44,38	43,72	3-4	44,10	42,72
1-5	37,57	44,18	2-5	37,63	39,44	3-5	37,35	38,82
1-6	65,36	66,81	2-6	65,39	62,98	3-6	65,28	61,26
1-7	55,00	55,09	2-7	55,04	49,41	3-7	54,86	48,08
1-8	45,78	44,96	2-8	45,82	42,20	3-8	45,61	40,94
1-9	38,98	38,91	2-9	39,03	37,62	3-9	38,79	36,89
1-10	33,38	34,44	2-10	33,43	32,97	3-10	33,19	32,56
1-11	49,64	55,29	2-11	49,65	52,90	3-11	49,60	49,77
1-12	43,62	43,17	2-12	43,64	40,54	3-12	43,53	39,67
1-13	37,56	36,91	2-13	37,59	34,47	3-13	37,44	33,19
1-14	32,73	32,04	2-14	32,77	30,81	3-14	32,60	30,63
1-15	28,55	29,03	2-15	28,58	27,55	3-15	28,40	27,28

Fuente: Elaboración Propia

Figura 55. Valores medidos y estimados muestra P-2 modelo LTTP ecuaciones (18) a (20)



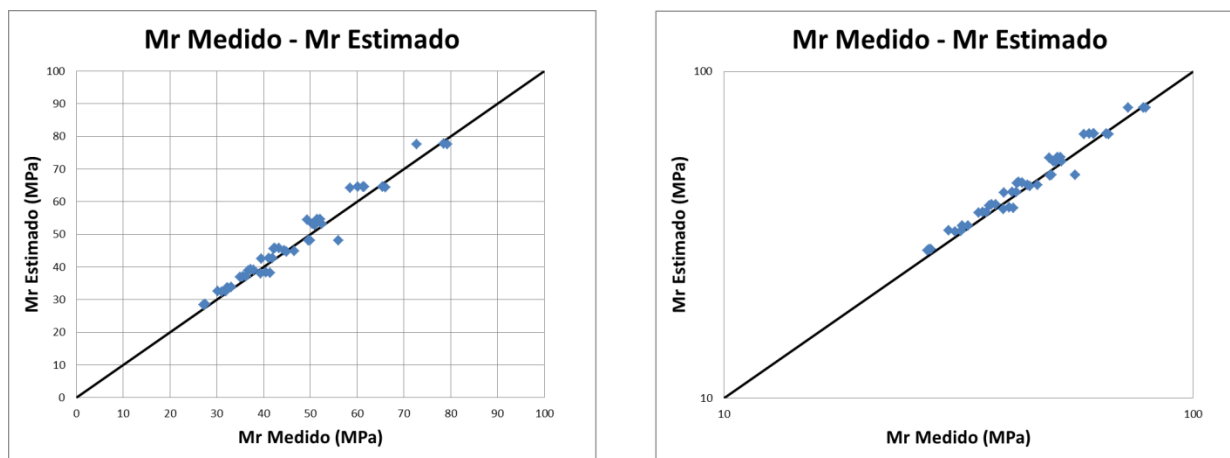
Fuente: Elaboración Propia

Tabla 79. Valores de Modulo Resiliente muestra P – 3 modelo LTTP ecuaciones (18) a (20)

PORTILLO								
P - 3								
$Mr = 835,352 Pa \left(\frac{\Theta}{Pa}\right)^{0,522} \left(\frac{\tau_{oct}}{Pa} + 1\right)^{-4,055}$			$Mr = 835,352 Pa \left(\frac{\Theta}{Pa}\right)^{0,522} \left(\frac{\tau_{oct}}{Pa} + 1\right)^{-4,055}$			$Mr = 835,352 Pa \left(\frac{\Theta}{Pa}\right)^{0,522} \left(\frac{\tau_{oct}}{Pa} + 1\right)^{-4,055}$		
K ₁	K ₂	K ₃	K ₁	K ₂	K ₃	K ₁	K ₂	K ₃
835,352	0,522	-4,055	835,352	0,522	-4,055	835,352	0,522	-4,055
Ciclo	Mr estimado	Mr medido	Ciclo	Mr estimado	Mr medido	Ciclo	Mr estimado	Mr medido
1-1	76,88	78,46	2-1	76,82	72,75	3-1	76,69	79,31
1-2	63,89	60,13	2-2	63,80	61,33	3-2	63,59	58,53
1-3	52,64	50,42	2-3	52,53	52,52	3-3	52,27	50,97
1-4	44,50	44,43	2-4	44,39	46,61	3-4	44,12	44,91
1-5	37,90	40,59	2-5	37,79	41,40	3-5	37,51	39,42
1-6	63,79	65,38	2-6	63,75	61,56	3-6	63,65	66,09
1-7	54,05	52,11	2-7	53,99	51,44	3-7	53,82	49,39
1-8	45,31	42,46	2-8	45,23	43,30	3-8	45,02	42,18
1-9	38,80	37,19	2-9	38,71	37,94	3-9	38,49	36,75
1-10	33,40	33,15	2-10	33,31	32,20	3-10	33,08	32,43
1-11	47,57	56,04	2-11	47,55	50,01	3-11	47,50	49,57
1-12	42,21	41,14	2-12	42,17	41,96	3-12	42,07	39,51
1-13	36,68	35,59	2-13	36,63	36,30	3-13	36,49	34,95
1-14	32,20	30,18	2-14	32,14	31,99	3-14	31,98	31,09
1-15	28,27	27,62	2-15	28,20	27,41	3-15	28,02	27,17

Fuente: Elaboración Propia

Figura 56. Valores medidos y estimados muestra P-3 modelo LTTP ecuaciones (18) a (20)



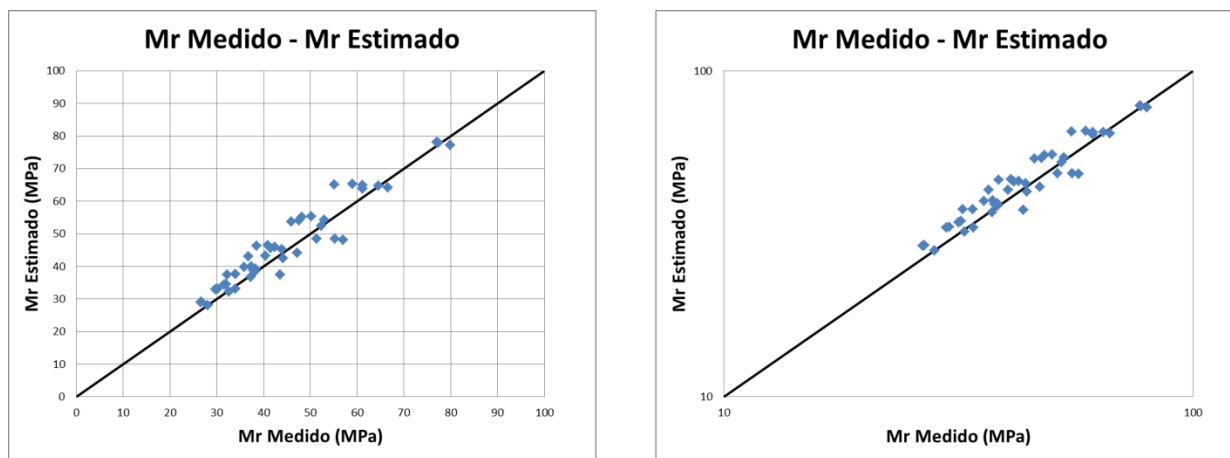
Fuente: Elaboración Propia

Tabla 80. Valores de Modulo Resiliente muestra P – 4 modelo LTTP ecuaciones (18) a (20)

PORTILLO								
P - 4								
$Mr = 833,53 Pa \left(\frac{\Theta}{Pa}\right)^{0,510} \left(\frac{\tau_{oct}}{Pa} + 1\right)^{-4,077}$			$Mr = 833,53 Pa \left(\frac{\Theta}{Pa}\right)^{0,510} \left(\frac{\tau_{oct}}{Pa} + 1\right)^{-4,077}$			$Mr = 833,53 Pa \left(\frac{\Theta}{Pa}\right)^{0,510} \left(\frac{\tau_{oct}}{Pa} + 1\right)^{-4,077}$		
K ₁	K ₂	K ₃	K ₁	K ₂	K ₃	K ₁	K ₂	K ₃
833,526	0,510	-4,077	833,526	0,510	-4,077	833,526	0,510	-4,077
Ciclo	Mr estimado	Mr medido	Ciclo	Mr estimado	Mr medido	Ciclo	Mr estimado	Mr medido
1-1	76,05	79,85	2-1	76,91	77,03	3-1	76,78	77,39
1-2	62,85	61,20	2-2	64,20	59,04	3-2	63,99	55,08
1-3	51,49	52,40	2-3	53,12	47,52	3-3	52,87	45,91
1-4	43,33	47,18	2-4	45,08	42,44	3-4	44,81	41,52
1-5	36,75	43,53	2-5	38,52	38,29	3-5	38,24	37,73
1-6	63,39	66,54	2-6	64,02	61,14	3-6	63,93	64,49
1-7	53,40	53,04	2-7	54,44	50,16	3-7	54,28	48,19
1-8	44,50	43,98	2-8	45,80	40,97	3-8	45,60	38,50
1-9	37,93	38,30	2-9	39,35	37,39	3-9	39,13	35,86
1-10	32,51	34,02	2-10	33,97	32,01	3-10	33,75	31,64
1-11	47,63	57,04	2-11	47,95	51,36	3-11	47,90	55,28
1-12	41,99	44,20	2-12	42,61	40,39	3-12	42,52	36,72
1-13	36,25	37,32	2-13	37,13	33,94	3-13	37,00	32,26
1-14	31,65	32,56	2-14	32,67	30,20	3-14	32,52	29,77
1-15	27,65	28,11	2-15	28,75	26,75	3-15	28,58	26,51

Fuente: Elaboración Propia

Figura 57. Valores medidos y estimados muestra P-4 modelo LTTP ecuaciones (18) a (20)



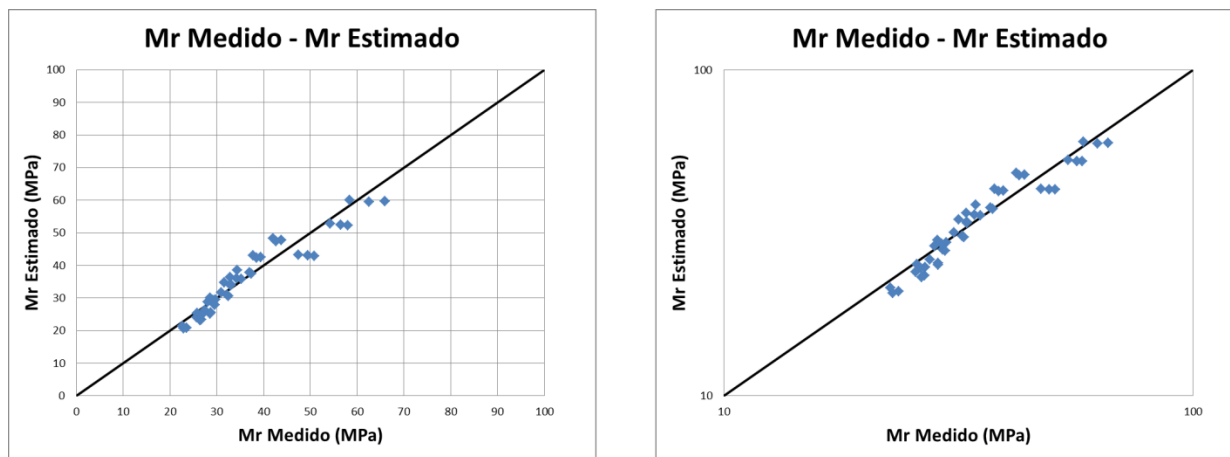
Fuente: Elaboración Propia

Tabla 81. Valores de Modulo Resiliente muestra B – 1 modelo LTTP ecuaciones (18) a (20)

BARRANCAS								
B - 1								
$Mr = 697,183 \text{ Pa} \left(\frac{\Theta}{\text{Pa}}\right)^{0,338} \left(\frac{\tau_{\text{Oct}}}{\text{Pa}} + 1\right)^{-4,514}$			$Mr = 697,183 \text{ Pa} \left(\frac{\Theta}{\text{Pa}}\right)^{0,338} \left(\frac{\tau_{\text{Oct}}}{\text{Pa}} + 1\right)^{-4,514}$			$Mr = 697,183 \text{ Pa} \left(\frac{\Theta}{\text{Pa}}\right)^{0,338} \left(\frac{\tau_{\text{Oct}}}{\text{Pa}} + 1\right)^{-4,514}$		
K ₁	K ₂	K ₃	K ₁	K ₂	K ₃	K ₁	K ₂	K ₃
697,183	0,338	-4,514	697,183	0,338	-4,514	697,183	0,338	-4,514
Ciclo	Mr estimado	Mr medido	Ciclo	Mr estimado	Mr medido	Ciclo	Mr estimado	Mr medido
1-1	58,95	65,91	2-1	58,77	62,51	3-1	59,35	58,35
1-2	46,99	43,78	2-2	46,73	42,61	3-2	47,59	41,99
1-3	37,10	36,97	2-3	36,79	37,41	3-3	37,80	34,41
1-4	30,25	32,25	2-4	29,93	32,48	3-4	30,97	30,93
1-5	24,90	28,64	2-5	24,59	28,61	3-5	25,60	27,47
1-6	52,22	56,50	2-6	52,08	58,05	3-6	52,55	54,18
1-7	42,16	39,40	2-7	41,93	38,56	3-7	42,67	37,79
1-8	33,66	32,97	2-8	33,39	32,98	3-8	34,26	31,62
1-9	27,67	29,32	2-9	27,39	29,58	3-9	28,30	28,12
1-10	22,93	26,73	2-10	22,66	26,41	3-10	23,56	25,64
1-11	43,16	49,44	2-11	43,06	50,79	3-11	43,39	47,41
1-12	35,89	34,26	2-12	35,72	35,20	3-12	36,28	32,86
1-13	29,33	29,75	2-13	29,12	29,15	3-13	29,81	28,53
1-14	24,51	26,87	2-14	24,28	26,30	3-14	25,02	25,77
1-15	20,57	23,59	2-15	20,33	22,89	3-15	21,09	22,62

Fuente: Elaboración Propia

Figura 58. Valores medidos y estimados muestra B-1 modelo LTTP ecuaciones (18) a (20)



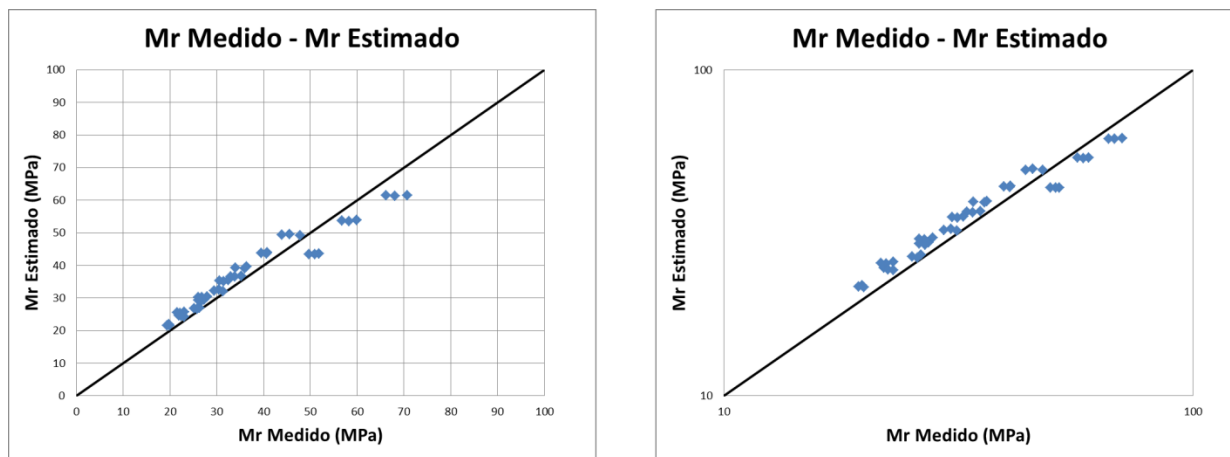
Fuente: Elaboración Propia

Tabla 82. Valores de Modulo Resiliente muestra B – 2 modelo LTTP ecuaciones (18) a (20)

BARRANCAS								
B - 2								
$Mr = 712,258 Pa \left(\frac{\Theta}{Pa}\right)^{0,364} \left(\frac{\tau_{oct}}{Pa} + 1\right)^{-4,454}$			$Mr = 712,258 Pa \left(\frac{\Theta}{Pa}\right)^{0,364} \left(\frac{\tau_{oct}}{Pa} + 1\right)^{-4,454}$			$Mr = 712,258 Pa \left(\frac{\Theta}{Pa}\right)^{0,364} \left(\frac{\tau_{oct}}{Pa} + 1\right)^{-4,454}$		
K ₁	K ₂	K ₃	K ₁	K ₂	K ₃	K ₁	K ₂	K ₃
712,258	0,364	-4,454	712,258	0,364	-4,454	712,258	0,364	-4,454
Ciclo	Mr estimado	Mr medido	Ciclo	Mr estimado	Mr medido	Ciclo	Mr estimado	Mr medido
1-1	61,07	70,74	2-1	60,82	68,03	3-1	60,92	66,19
1-2	49,06	45,61	2-2	48,67	47,85	3-2	48,83	43,97
1-3	39,04	36,37	2-3	38,59	35,97	3-3	38,77	34,03
1-4	32,04	30,51	2-4	31,58	31,40	3-4	31,76	29,44
1-5	26,53	26,30	2-5	26,07	25,87	3-5	26,26	25,17
1-6	53,60	59,86	2-6	53,39	58,31	3-6	53,47	56,74
1-7	43,64	40,81	2-7	43,32	40,67	3-7	43,45	39,57
1-8	35,14	32,44	2-8	34,75	31,48	3-8	34,91	30,63
1-9	29,10	27,35	2-9	28,69	26,84	3-9	28,86	26,12
1-10	24,28	21,92	2-10	23,87	22,99	3-10	24,04	22,37
1-11	43,65	51,88	2-11	43,51	51,02	3-11	43,56	49,64
1-12	36,68	35,24	2-12	36,45	33,89	3-12	36,54	32,97
1-13	30,29	27,91	2-13	29,99	26,79	3-13	30,11	26,06
1-14	25,52	22,99	2-14	25,19	22,19	3-14	25,32	21,59
1-15	21,58	19,73	2-15	21,25	19,90	3-15	21,38	19,36

Fuente: Elaboración Propia

Figura 59. Valores medidos y estimados muestra B-2 modelo LTTP ecuaciones (18) a (20)



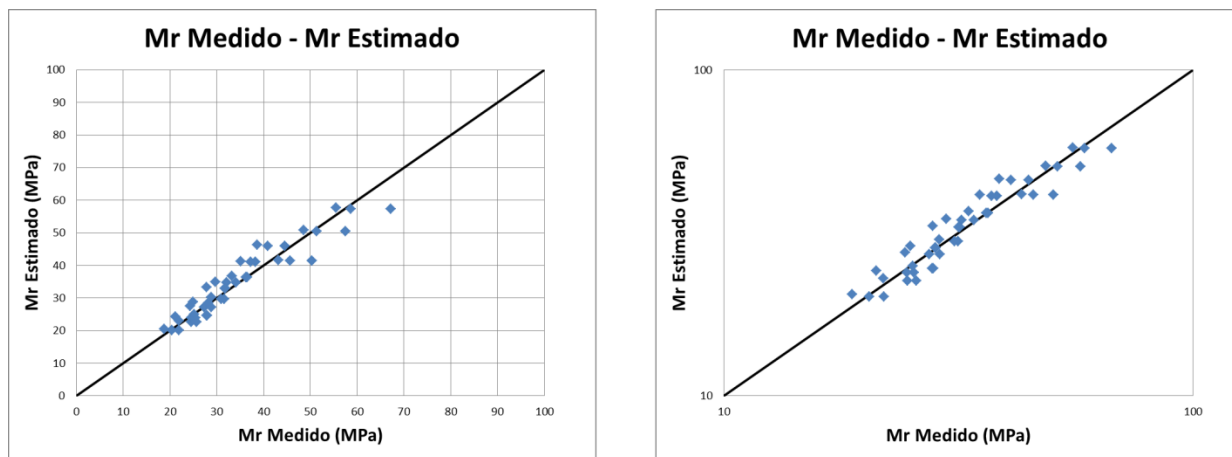
Fuente: Elaboración Propia

Tabla 83. Valores de Modulo Resiliente muestra B – 3 modelo LTTP ecuaciones (18) a (20)

BARRANCAS								
B - 3								
$Mr = 684,620 \text{ Pa} \left(\frac{\Theta}{\text{Pa}}\right)^{0,372} \left(\frac{\tau_{\text{Oct}}}{\text{Pa}} + 1\right)^{-4,467}$			$Mr = 684,620 \text{ Pa} \left(\frac{\Theta}{\text{Pa}}\right)^{0,372} \left(\frac{\tau_{\text{Oct}}}{\text{Pa}} + 1\right)^{-4,467}$			$Mr = 684,620 \text{ Pa} \left(\frac{\Theta}{\text{Pa}}\right)^{0,372} \left(\frac{\tau_{\text{Oct}}}{\text{Pa}} + 1\right)^{-4,467}$		
K ₁	K ₂	K ₃	K ₁	K ₂	K ₃	K ₁	K ₂	K ₃
684,620	0,372	-4,467	684,620	0,372	-4,467	684,620	0,372	-4,467
Ciclo	Mr estimado	Mr medido	Ciclo	Mr estimado	Mr medido	Ciclo	Mr estimado	Mr medido
1-1	58,54	67,15	2-1	58,54	58,69	3-1	58,78	55,46
1-2	46,83	44,60	2-2	46,83	40,93	3-2	47,20	38,68
1-3	37,11	36,55	2-3	37,11	36,21	3-3	37,54	33,26
1-4	30,36	31,59	2-4	30,36	31,02	3-4	30,80	28,78
1-5	25,06	27,98	2-5	25,06	27,77	3-5	25,50	25,23
1-6	51,24	57,56	2-6	51,24	51,36	3-6	51,44	48,53
1-7	41,57	38,23	2-7	41,57	37,21	3-7	41,88	35,16
1-8	33,35	31,86	2-8	33,35	31,68	3-8	33,72	27,85
1-9	27,53	27,38	2-9	27,53	28,88	3-9	27,92	24,35
1-10	22,90	24,61	2-10	22,90	25,71	3-10	23,29	21,87
1-11	41,57	50,36	2-11	41,57	45,65	3-11	41,70	43,14
1-12	34,85	32,11	2-12	34,85	34,11	3-12	35,07	29,75
1-13	28,69	28,24	2-13	28,69	28,16	3-13	28,97	24,95
1-14	24,10	24,52	2-14	24,10	25,38	3-14	24,41	21,10
1-15	20,33	20,42	2-15	20,33	21,93	3-15	20,65	18,74

Fuente: Elaboración Propia

Figura 60. Valores medidos y estimados muestra B-3 modelo LTTP ecuaciones (18) a (20)



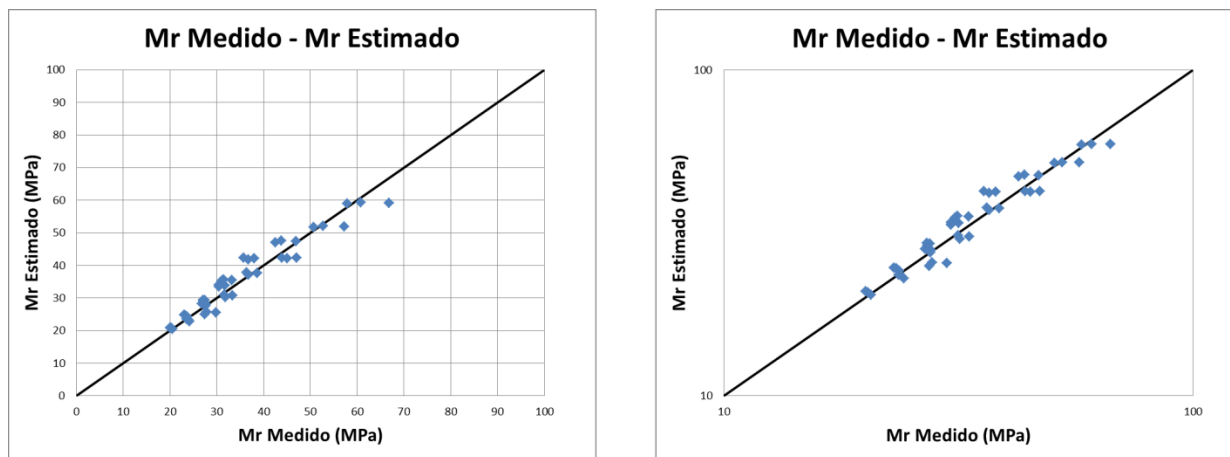
Fuente: Elaboración Propia

Tabla 84. Valores de Modulo Resiliente muestra B – 4 modelo LTTP ecuaciones (18) a (20)

BARRANCAS								
B - 4								
$Mr = 697,619 Pa \left(\frac{\Theta}{Pa}\right)^{0,370} \left(\frac{\tau_{oct}}{Pa} + 1\right)^{-4,457}$			$Mr = 697,619 Pa \left(\frac{\Theta}{Pa}\right)^{0,370} \left(\frac{\tau_{oct}}{Pa} + 1\right)^{-4,457}$			$Mr = 697,619 Pa \left(\frac{\Theta}{Pa}\right)^{0,370} \left(\frac{\tau_{oct}}{Pa} + 1\right)^{-4,457}$		
K ₁	K ₂	K ₃	K ₁	K ₂	K ₃	K ₁	K ₂	K ₃
697,619	0,370	-4,457	697,619	0,370	-4,457	697,619	0,370	-4,457
Ciclo	Mr estimado	Mr medido	Ciclo	Mr estimado	Mr medido	Ciclo	Mr estimado	Mr medido
1-1	59,65	66,75	2-1	59,75	60,80	3-1	59,34	57,94
1-2	47,74	46,94	2-2	47,89	43,75	3-2	47,28	42,53
1-3	37,85	38,60	2-3	38,03	36,39	3-3	37,31	36,79
1-4	30,97	33,32	2-4	31,15	31,59	3-4	30,42	31,80
1-5	25,58	29,86	2-5	25,76	27,83	3-5	25,04	27,41
1-6	52,25	57,21	2-6	52,33	52,69	3-6	52,00	50,69
1-7	42,40	38,00	2-7	42,53	35,79	3-7	42,01	36,73
1-8	34,03	31,67	2-8	34,18	30,47	3-8	33,57	30,51
1-9	28,10	27,68	2-9	28,26	26,85	3-9	27,62	27,56
1-10	23,38	23,89	2-10	23,54	23,57	3-10	22,91	24,19
1-11	42,43	47,12	2-11	42,48	43,91	3-11	42,26	45,06
1-12	35,57	33,25	2-12	35,67	31,50	3-12	35,29	31,08
1-13	29,29	27,45	2-13	29,41	27,09	3-13	28,94	27,19
1-14	24,62	23,33	2-14	24,74	23,02	3-14	24,23	23,62
1-15	20,77	20,30	2-15	20,90	20,03	3-15	20,38	20,56

Fuente: Elaboración Propia

Figura 61. Valores medidos y estimados muestra B-4 modelo LTTP ecuaciones (18) a (20)



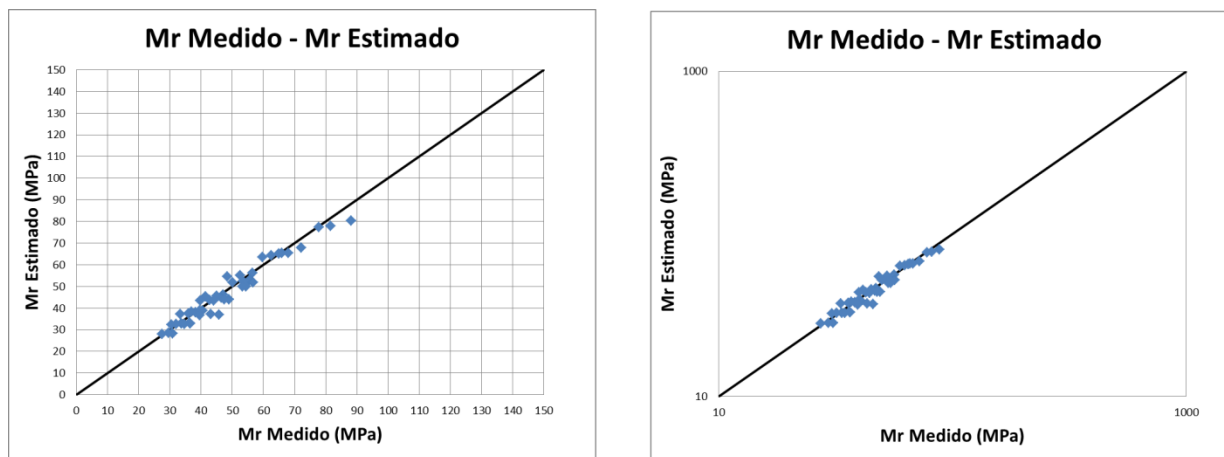
Fuente: Elaboración Propia

Tabla 85. Valores de Modulo Resiliente muestra P - 1 modelo Universidad de Wisconsin ecuaciones (21) a (23)

PORTILLO								
P - 1								
$Mr = 894,593 \text{ Pa} \left(\frac{\Theta}{Pa}\right)^{0,467} \left(\frac{\tau_{oct}}{Pa} + 1\right)^{-4,405}$			$Mr = 855,708 \text{ Pa} \left(\frac{\Theta}{Pa}\right)^{0,472} \left(\frac{\tau_{oct}}{Pa} + 1\right)^{-4,4257}$			$Mr = 853,058 \text{ Pa} \left(\frac{\Theta}{Pa}\right)^{0,463} \left(\frac{\tau_{oct}}{Pa} + 1\right)^{-4,367}$		
K ₁	K ₂	K ₃	K ₁	K ₂	K ₃	K ₁	K ₂	K ₃
894,593	0,467	-4,405	855,708	0,472	-4,257	853,058	0,463	-4,367
Ciclo	Mr estimado	Mr medido	Ciclo	Mr estimado	Mr medido	Ciclo	Mr estimado	Mr medido
1-1	79,02	88,16	2-1	76,55	81,64	3-1	76,01	77,89
1-2	63,91	65,87	2-2	62,59	62,57	3-2	62,03	59,69
1-3	51,21	55,62	2-3	50,71	53,58	3-3	50,14	50,05
1-4	42,28	49,01	2-4	42,27	47,55	3-4	41,71	44,11
1-5	35,21	45,71	2-5	35,52	43,11	3-5	34,97	39,49
1-6	66,87	72,13	2-6	64,66	68,03	3-6	64,38	64,91
1-7	55,05	56,46	2-7	53,81	52,48	3-7	53,43	48,50
1-8	44,80	47,06	2-8	44,28	44,97	3-8	43,85	41,42
1-9	37,42	40,43	2-9	37,34	39,62	3-9	36,89	36,93
1-10	31,46	36,57	2-10	31,68	36,31	3-10	31,22	34,64
1-11	51,46	56,67	2-11	49,59	54,43	3-11	49,57	53,35
1-12	44,14	46,50	2-12	43,02	42,81	3-12	42,83	39,80
1-13	37,11	38,24	2-13	36,58	35,97	3-13	36,28	33,37
1-14	31,69	33,70	2-14	31,54	32,00	3-14	31,20	30,53
1-15	27,11	30,94	2-15	27,24	29,56	3-15	26,87	27,42

Fuente: Elaboración Propia

Figura 62. Valores medidos y estimados muestra P-1 modelo Universidad de Wisconsin ecuaciones (21) a (23)



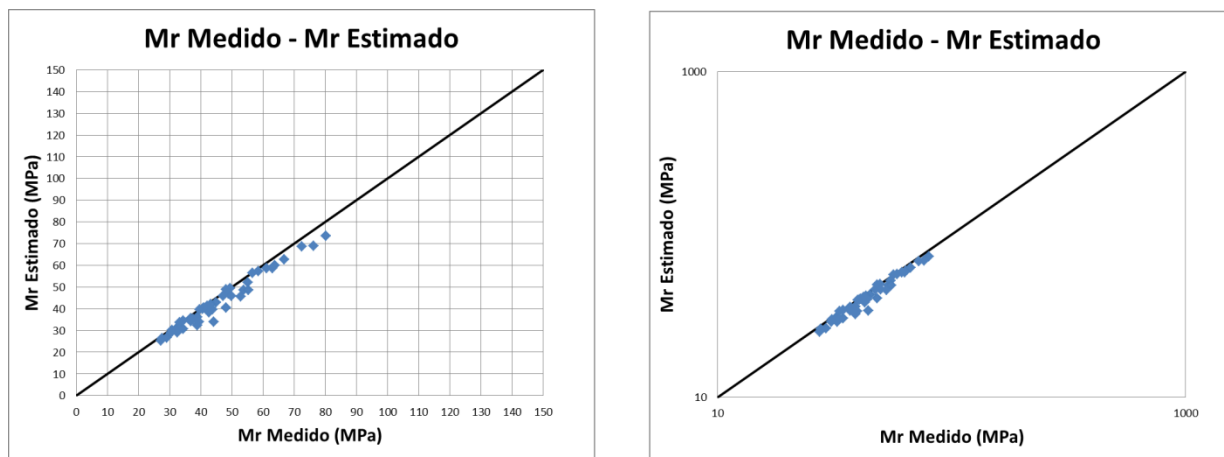
Fuente: Elaboración Propia

Tabla 86. Valores de Modulo Resiliente muestra P - 2 modelo Universidad de Wisconsin ecuaciones (21) a (23)

PORTILLO								
P - 2								
$Mr = 845,527 \text{ Pa} \left(\frac{\Theta}{Pa}\right)^{0,502} \left(\frac{\tau_{oct}}{Pa} + 1\right)^{-4,106}$			$Mr = 784,873 \text{ Pa} \left(\frac{\Theta}{Pa}\right)^{0,507} \left(\frac{\tau_{oct}}{Pa} + 1\right)^{-3,893}$			$Mr = 793,119 \text{ Pa} \left(\frac{\Theta}{Pa}\right)^{0,497} \left(\frac{\tau_{oct}}{Pa} + 1\right)^{-4,046}$		
K ₁	K ₂	K ₃	K ₁	K ₂	K ₃	K ₁	K ₂	K ₃
845,527	0,502	-4,106	784,873	0,507	-3,893	793,119	0,497	-4,046
Ciclo	Mr estimado	Mr medido	Ciclo	Mr estimado	Mr medido	Ciclo	Mr estimado	Mr medido
1-1	76,98	80,17	2-1	72,56	76,30	3-1	72,28	72,40
1-2	63,60	63,90	2-2	60,74	58,56	3-2	59,82	56,67
1-3	52,09	53,76	2-3	50,43	48,95	3-3	49,09	47,24
1-4	43,82	48,07	2-4	42,92	43,72	3-4	41,37	42,72
1-5	37,15	44,18	2-5	36,79	39,44	3-5	35,13	38,82
1-6	64,35	66,81	2-6	60,53	62,98	3-6	60,52	61,26
1-7	54,17	55,09	2-7	51,64	49,41	3-7	51,04	48,08
1-8	45,11	44,96	2-8	43,60	42,20	3-8	42,58	40,94
1-9	38,42	38,91	2-9	37,58	37,62	3-9	36,33	36,89
1-10	32,91	34,44	2-10	32,55	32,97	3-10	31,17	32,56
1-11	48,56	55,29	2-11	45,53	52,90	3-11	45,80	49,77
1-12	42,73	43,17	2-12	40,62	40,54	3-12	40,36	39,67
1-13	36,84	36,91	2-13	35,52	34,47	3-13	34,86	33,19
1-14	32,13	32,04	2-14	31,36	30,81	3-14	30,45	30,63
1-15	28,04	29,03	2-15	27,68	27,55	3-15	26,61	27,28

Fuente: Elaboración Propia

Figura 63. Valores medidos y estimados muestra P-2 modelo Universidad de Wisconsin ecuaciones (21) a (23)



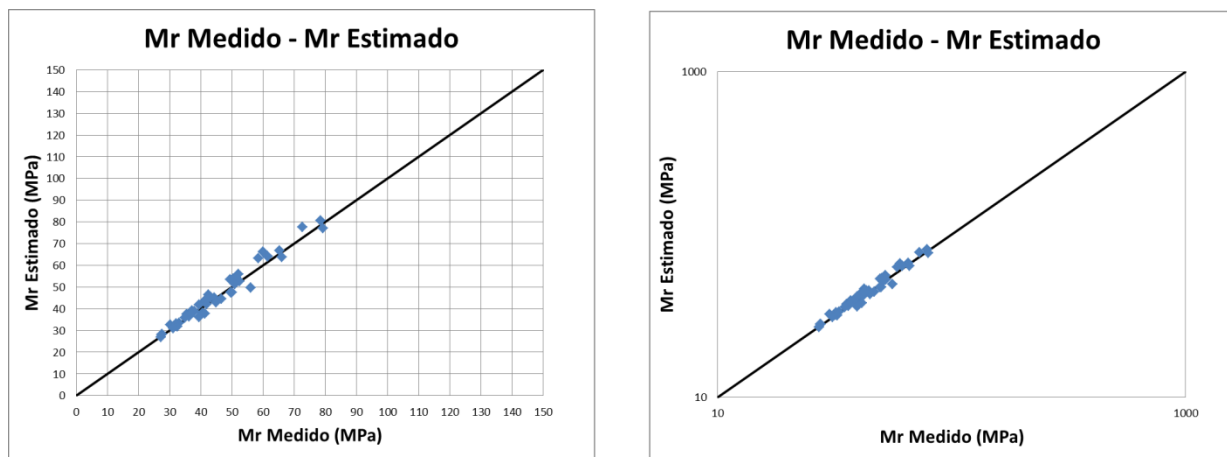
Fuente: Elaboración Propia

Tabla 87. Valores de Modulo Resiliente muestra P – 3 modelo Universidad de Wisconsin ecuaciones (21) a (23)

PORTILLO								
P - 3								
$Mr = 883,255 \text{ Pa} \left(\frac{\sigma}{Pa}\right)^{0,515} \left(\frac{\tau_{oct}}{Pa} + 1\right)^{-4,137}$			$Mr = 839,831 \text{ Pa} \left(\frac{\sigma}{Pa}\right)^{0,520} \left(\frac{\tau_{oct}}{Pa} + 1\right)^{-4,137}$			$Mr = 845,398 \text{ Pa} \left(\frac{\sigma}{Pa}\right)^{0,510} \left(\frac{\tau_{oct}}{Pa} + 1\right)^{-4,117}$		
K ₁	K ₂	K ₃	K ₁	K ₂	K ₃	K ₁	K ₂	K ₃
883,255	0,515	-4,137	839,831	0,520	-3,983	845,398	0,510	-4,117
Ciclo	Mr estimado	Mr medido	Ciclo	Mr estimado	Mr medido	Ciclo	Mr estimado	Mr medido
1-1	80,70	78,46	2-1	77,52	72,75	3-1	77,03	79,31
1-2	66,70	60,13	2-2	64,64	61,33	3-2	63,57	58,53
1-3	54,65	50,42	2-3	53,44	52,52	3-3	52,01	50,97
1-4	45,99	44,43	2-4	45,32	46,61	3-4	43,71	44,91
1-5	38,99	40,59	2-5	38,71	41,40	3-5	37,02	39,42
1-6	67,13	65,38	2-6	64,38	61,56	3-6	64,19	66,09
1-7	56,56	52,11	2-7	54,74	51,44	3-7	54,01	49,39
1-8	47,14	42,46	2-8	46,04	43,30	3-8	44,94	42,18
1-9	40,17	37,19	2-9	39,54	37,94	3-9	38,25	36,75
1-10	34,42	33,15	2-10	34,14	32,20	3-10	32,74	32,43
1-11	50,26	56,04	2-11	48,09	50,01	3-11	48,22	49,57
1-12	44,31	41,14	2-12	42,80	41,96	3-12	42,44	39,51
1-13	38,27	35,59	2-13	37,32	36,30	3-13	36,59	34,95
1-14	33,42	30,18	2-14	32,85	31,99	3-14	31,91	31,09
1-15	29,19	27,62	2-15	28,92	27,41	3-15	27,84	27,17

Fuente: Elaboración Propia

Figura 64. Valores medidos y estimados muestra P-3 modelo Universidad de Wisconsin ecuaciones (21) a (23)



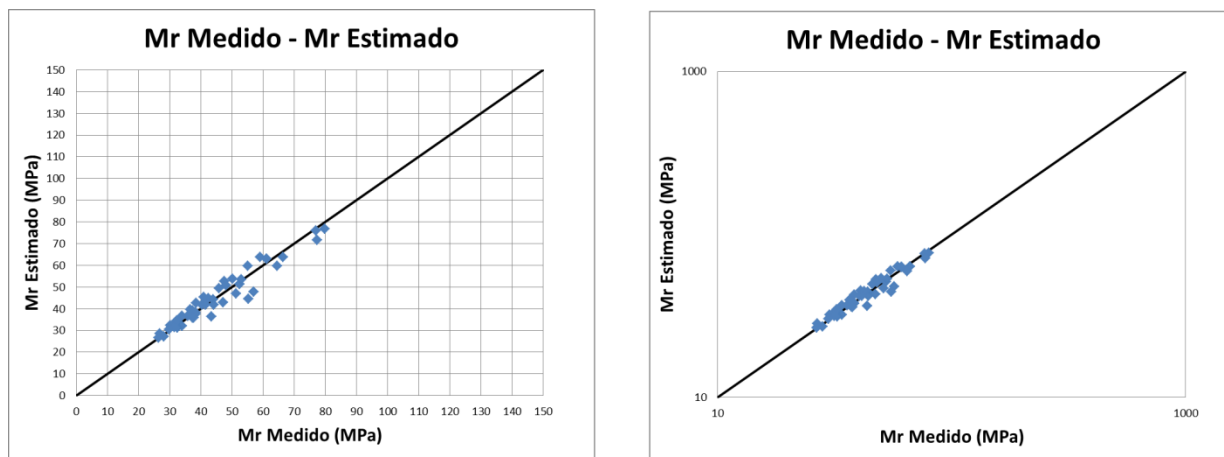
Fuente: Elaboración Propia

Tabla 88. Valores de Modulo Resiliente muestra P - 4 modelo Universidad de Wisconsin ecuaciones (21) a (23)

PORTILLO								
P - 4								
$Mr = 842,415 Pa \left(\frac{\sigma}{Pa}\right)^{0,506} \left(\frac{\tau_{oct}}{Pa} + 1\right)^{-4,080}$			$Mr = 818,623 Pa \left(\frac{\sigma}{Pa}\right)^{0,511} \left(\frac{\tau_{oct}}{Pa} + 1\right)^{-3,964}$			$Mr = 775,907 Pa \left(\frac{\sigma}{Pa}\right)^{0,501} \left(\frac{\tau_{oct}}{Pa} + 1\right)^{-3,985}$		
K ₁	K ₂	K ₃	K ₁	K ₂	K ₃	K ₁	K ₂	K ₃
842,415	0,506	-4,080	818,623	0,511	-3,964	775,907	0,501	-3,985
Ciclo	Mr estimado	Mr medido	Ciclo	Mr estimado	Mr medido	Ciclo	Mr estimado	Mr medido
1-1	76,73	79,85	2-1	76,04	77,03	3-1	71,66	77,39
1-2	63,37	61,20	2-2	63,88	59,04	3-2	59,98	55,08
1-3	51,89	52,40	2-3	53,21	47,52	3-3	49,79	45,91
1-4	43,64	47,18	2-4	45,40	42,44	3-4	42,36	41,52
1-5	36,99	43,53	2-5	39,00	38,29	3-5	36,29	37,73
1-6	64,06	66,54	2-6	63,30	61,14	3-6	59,86	64,49
1-7	53,93	53,04	2-7	54,17	50,16	3-7	51,03	48,19
1-8	44,90	43,98	2-8	45,87	40,97	3-8	43,05	38,50
1-9	38,25	38,30	2-9	39,63	37,39	3-9	37,08	35,86
1-10	32,76	34,02	2-10	34,40	32,01	3-10	32,09	31,64
1-11	48,26	57,04	2-11	47,40	51,36	3-11	45,08	55,28
1-12	42,49	44,20	2-12	42,40	40,39	3-12	40,14	36,72
1-13	36,65	37,32	2-13	37,18	33,94	3-13	35,05	32,26
1-14	31,97	32,56	2-14	32,90	30,20	3-14	30,91	29,77
1-15	27,91	28,11	2-15	29,11	26,75	3-15	27,26	26,51

Fuente: Elaboración Propia

Figura 65. Valores medidos y estimados muestra P-4 modelo Universidad de Wisconsin ecuaciones (21) a (23)



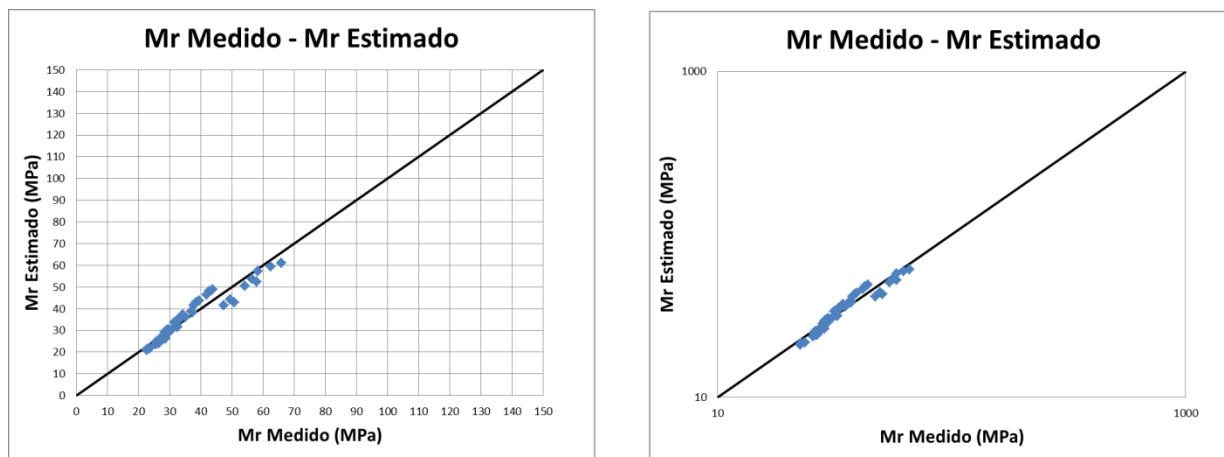
Fuente: Elaboración Propia

Tabla 89. Valores de Modulo Resiliente muestra B - 1 modelo Universidad de Wisconsin ecuaciones (21) a (23)

BARRANCAS								
B - 1								
$Mr = 710,189 \text{ Pa} \left(\frac{\Theta}{Pa}\right)^{0,345} \left(\frac{\tau_{oct}}{Pa} + 1\right)^{-4,570}$			$Mr = 687,784 \text{ Pa} \left(\frac{\Theta}{Pa}\right)^{0,349} \left(\frac{\tau_{oct}}{Pa} + 1\right)^{-4,449}$			$Mr = 662,280 \text{ Pa} \left(\frac{\Theta}{Pa}\right)^{0,342} \left(\frac{\tau_{oct}}{Pa} + 1\right)^{-4,524}$		
K ₁	K ₂	K ₃	K ₁	K ₂	K ₃	K ₁	K ₂	K ₃
710,189	0,345	-4,570	687,784	0,349	-4,449	662,280	0,342	-4,524
Ciclo	Mr estimado	Mr medido	Ciclo	Mr estimado	Mr medido	Ciclo	Mr estimado	Mr medido
1-1	59,98	65,91	2-1	58,42	62,51	3-1	56,40	58,35
1-2	47,69	43,78	2-2	46,67	42,61	3-2	45,22	41,99
1-3	37,55	36,97	2-3	36,93	37,41	3-3	35,90	34,41
1-4	30,55	32,25	2-4	30,17	32,48	3-4	29,41	30,93
1-5	25,09	28,64	2-5	24,88	28,61	3-5	24,31	27,47
1-6	53,00	56,50	2-6	51,56	58,05	3-6	49,89	54,18
1-7	42,69	39,40	2-7	41,73	38,56	3-7	40,50	37,79
1-8	34,00	32,97	2-8	33,41	32,98	3-8	32,51	31,62
1-9	27,89	29,32	2-9	27,53	29,58	3-9	26,85	28,12
1-10	23,07	26,73	2-10	22,87	26,41	3-10	22,35	25,64
1-11	43,64	49,44	2-11	42,37	50,79	3-11	41,12	47,41
1-12	36,23	34,26	2-12	35,37	35,20	3-12	34,38	32,86
1-13	29,55	29,75	2-13	29,01	29,15	3-13	28,25	28,53
1-14	24,64	26,87	2-14	24,30	26,30	3-14	23,71	25,77
1-15	20,64	23,59	2-15	20,45	22,89	3-15	19,99	22,62

Fuente: Elaboración Propia

Figura 66. Valores medidos y estimados muestra B-1 modelo Universidad de Wisconsin ecuaciones (21) a (23)



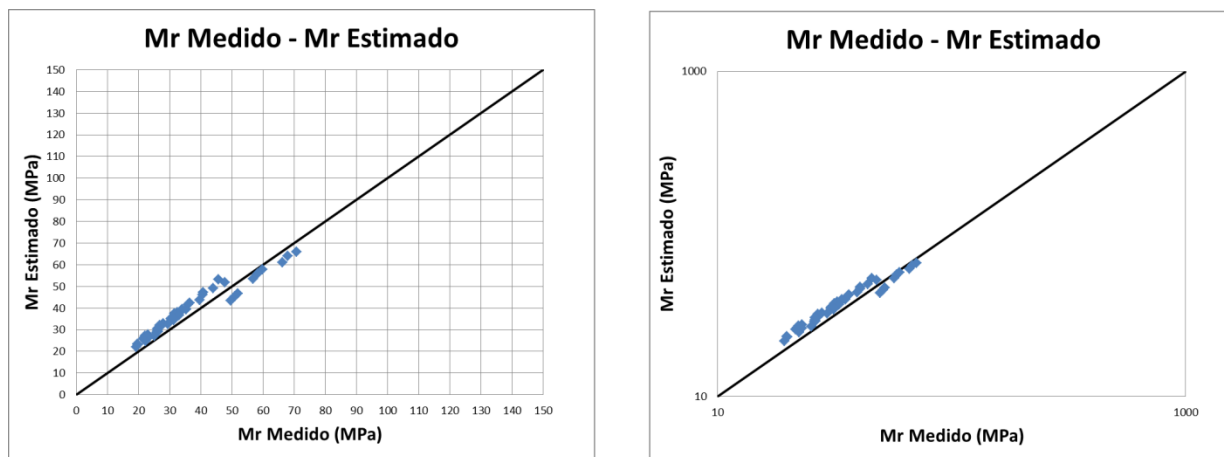
Fuente: Elaboración Propia

Tabla 90. Valores de Modulo Resiliente muestra B - 2 modelo Universidad de Wisconsin ecuaciones (21) a (23)

BARRANCAS								
B - 2								
$Mr = 761,175 \text{ Pa} \left(\frac{\Theta}{Pa}\right)^{0,368} \left(\frac{\tau_{oct}}{Pa} + 1\right)^{-4,586}$			$Mr = 735,508 \text{ Pa} \left(\frac{\Theta}{Pa}\right)^{0,373} \left(\frac{\tau_{oct}}{Pa} + 1\right)^{-4,455}$			$Mr = 703,203 \text{ Pa} \left(\frac{\Theta}{Pa}\right)^{0,364} \left(\frac{\tau_{oct}}{Pa} + 1\right)^{-4,521}$		
K ₁	K ₂	K ₃	K ₁	K ₂	K ₃	K ₁	K ₂	K ₃
761,175	0,368	-4,586	735,508	0,373	-4,455	703,203	0,364	-4,521
Ciclo	Mr estimado	Mr medido	Ciclo	Mr estimado	Mr medido	Ciclo	Mr estimado	Mr medido
1-1	64,82	70,74	2-1	62,98	68,03	3-1	59,90	66,19
1-2	51,70	45,61	2-2	50,44	47,85	3-2	47,83	43,97
1-3	40,83	36,37	2-3	40,02	35,97	3-3	37,82	34,03
1-4	33,30	30,51	2-4	32,77	31,40	3-4	30,88	29,44
1-5	27,40	26,30	2-5	27,08	25,87	3-5	25,45	25,17
1-6	56,81	59,86	2-6	55,11	58,31	3-6	52,58	56,74
1-7	45,93	40,81	2-7	44,76	40,67	3-7	42,56	39,57
1-8	36,72	32,44	2-8	35,95	31,48	3-8	34,06	30,63
1-9	30,21	27,35	2-9	29,71	26,84	3-9	28,06	26,12
1-10	25,05	21,92	2-10	24,74	22,99	3-10	23,29	22,37
1-11	46,17	51,88	2-11	44,68	51,02	3-11	42,84	49,64
1-12	38,54	35,24	2-12	37,51	33,89	3-12	35,80	32,97
1-13	31,60	27,91	2-13	30,91	26,79	3-13	29,38	26,06
1-14	26,46	22,99	2-14	26,00	22,19	3-14	24,62	21,59
1-15	22,24	19,73	2-15	21,95	19,90	3-15	20,72	19,36

Fuente: Elaboración Propia

Figura 67. Valores medidos y estimados muestra B-2 modelo Universidad de Wisconsin ecuaciones (21) a (23)



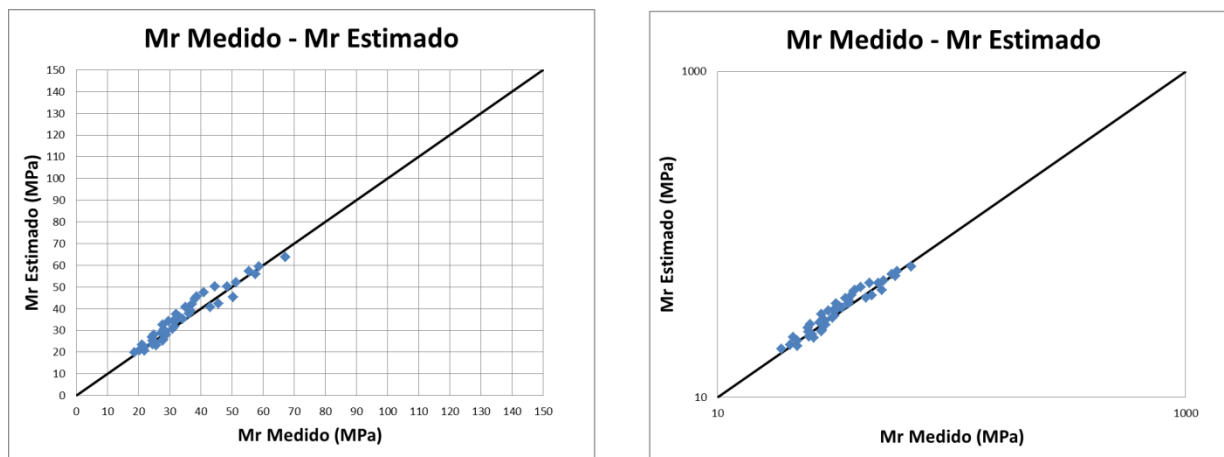
Fuente: Elaboración Propia

Tabla 91. Valores de Modulo Resiliente muestra B – 3 modelo Universidad de Wisconsin ecuaciones (21) a (23)

BARRANCAS								
B - 3								
$Mr = 752,071 \text{ Pa} \left(\frac{\Theta}{Pa}\right)^{0,363} \left(\frac{\tau_{oct}}{Pa} + 1\right)^{-4,578}$			$Mr = 693,305 \text{ Pa} \left(\frac{\Theta}{Pa}\right)^{0,367} \left(\frac{\tau_{oct}}{Pa} + 1\right)^{-4,378}$			$Mr = 668,143 \text{ Pa} \left(\frac{\Theta}{Pa}\right)^{0,359} \left(\frac{\tau_{oct}}{Pa} + 1\right)^{-4,452}$		
K ₁	K ₂	K ₃	K ₁	K ₂	K ₃	K ₁	K ₂	K ₃
752,071	0,363	-4,578	693,305	0,367	-4,378	668,143	0,359	-4,452
Ciclo	Mr estimado	Mr medido	Ciclo	Mr estimado	Mr medido	Ciclo	Mr estimado	Mr medido
1-1	63,67	67,15	2-1	59,50	58,69	3-1	57,17	55,46
1-2	50,57	44,60	2-2	47,83	40,93	3-2	45,89	38,68
1-3	39,77	36,55	2-3	38,08	36,21	3-3	36,49	33,26
1-4	32,33	31,59	2-4	31,28	31,02	3-4	29,93	28,78
1-5	26,52	27,98	2-5	25,93	27,77	3-5	24,77	25,23
1-6	55,93	57,56	2-6	52,19	51,36	3-6	50,28	48,53
1-7	45,03	38,23	2-7	42,53	37,21	3-7	40,90	35,16
1-8	35,84	31,86	2-8	34,28	31,68	3-8	32,90	27,85
1-9	29,39	27,38	2-9	28,41	28,88	3-9	27,22	24,35
1-10	24,30	24,61	2-10	23,73	25,71	3-10	22,70	21,87
1-11	45,61	50,36	2-11	42,47	45,65	3-11	41,07	43,14
1-12	37,92	32,11	2-12	35,74	34,11	3-12	34,47	29,75
1-13	30,95	28,24	2-13	29,55	28,16	3-13	28,43	24,95
1-14	25,82	24,52	2-14	24,92	25,38	3-14	23,92	21,10
1-15	21,63	20,42	2-15	21,10	21,93	3-15	20,21	18,74

Fuente: Elaboración Propia

Figura 68. Valores medidos y estimados muestra B-3 modelo Universidad de Wisconsin ecuaciones (21) a (23)



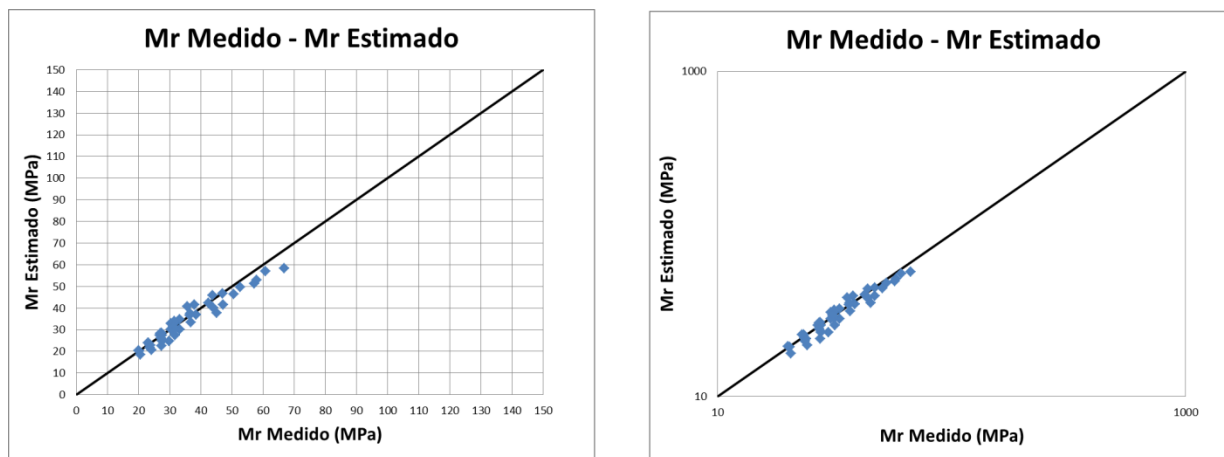
Fuente: Elaboración Propia

Tabla 92. Valores de Modulo Resiliente muestra B - 4 modelo Universidad de Wisconsin ecuaciones (21) a (23)

BARRANCAS								
B - 4								
$Mr = 682,149 \text{ Pa} \left(\frac{\Theta}{Pa}\right)^{0,367} \left(\frac{\tau_{oct}}{Pa} + 1\right)^{-4,415}$			$Mr = 657,694 \text{ Pa} \left(\frac{\Theta}{Pa}\right)^{0,371} \left(\frac{\tau_{oct}}{Pa} + 1\right)^{-4,291}$			$Mr = 618,560 \text{ Pa} \left(\frac{\Theta}{Pa}\right)^{0,363} \left(\frac{\tau_{oct}}{Pa} + 1\right)^{-4,338}$		
K ₁	K ₂	K ₃	K ₁	K ₂	K ₃	K ₁	K ₂	K ₃
682,149	0,367	-4,415	657,694	0,371	-4,291	618,560	0,363	-4,338
Ciclo	Mr estimado	Mr medido	Ciclo	Mr estimado	Mr medido	Ciclo	Mr estimado	Mr medido
1-1	58,41	66,75	2-1	56,92	60,80	3-1	52,89	57,94
1-2	46,84	46,94	2-2	46,06	43,75	3-2	42,40	42,53
1-3	37,22	38,60	2-3	36,94	36,39	3-3	33,68	36,79
1-4	30,51	33,32	2-4	30,52	31,59	3-4	27,62	31,80
1-5	25,24	29,86	2-5	25,44	27,83	3-5	22,85	27,41
1-6	51,23	57,21	2-6	49,84	52,69	3-6	46,47	50,69
1-7	41,66	38,00	2-7	40,90	35,79	3-7	37,77	36,73
1-8	33,50	31,67	2-8	33,20	30,47	3-8	30,37	30,51
1-9	27,71	27,68	2-9	27,68	26,85	3-9	25,12	27,56
1-10	23,10	23,89	2-10	23,25	23,57	3-10	20,95	24,19
1-11	41,70	47,12	2-11	40,45	43,91	3-11	37,93	45,06
1-12	35,02	33,25	2-12	34,29	31,50	3-12	31,84	31,08
1-13	28,88	27,45	2-13	28,56	27,09	3-13	26,26	27,19
1-14	24,31	23,33	2-14	24,24	23,02	3-14	22,10	23,62
1-15	20,55	20,30	2-15	20,64	20,03	3-15	18,68	20,56

Fuente: Elaboración Propia

Figura 69. Valores medidos y estimados muestra B-4 modelo Universidad de Wisconsin ecuaciones (21) a (23)



Fuente: Elaboración Propia

La calidad de estos procedimientos de predicción recalibrados ha sido evaluada utilizando el criterio estadístico de “buen ajuste” propuesto por witzack y otros, considerando la relación entre el error típico de la estimación de los valores y la desviación estándar de valores medidos (Se/Sy) y el coeficiente de correlación, R^2 . Este criterio subjetivo se muestra en la tabla 93.

Tabla 93. Criterio Estadístico de buen ajuste

Criterio	R^2	Se/Sy
Excelente	$\geq 0,90$	$\leq 0,35$
Bueno	0,70 - 0,89	0,36 - 0,55
Adecuado	0,40 - 0,69	0,56 - 0,75
Pobre	0,20 - 0,39	0,76 - 0,89
Muy Pobre	$\leq 0,19$	$\geq 0,90$

Fuente: Elaboración Propia

La tabla 94 presenta la evaluación de los distintos procedimientos de estimación recalibrados de acuerdo con el criterio subjetivo propuesto y para los resultados determinados.

Tabla 94. Evaluación de los modelos de estimación del módulo resiliente

Modelo	R^2	Se/Sy	Evaluación
LTTP suelos finos ec (6)-(8)	0,20	0,36	Pobre/Bueno
LTTP Suelos finos ec (9)-(11)	0,35	0,55	Pobre/Bueno
Univ. de Wisconsin ec (12)-(14)	0,89	0,45	Bueno/Bueno

Fuente: Elaboración Propia

La aplicación de modelos recalibrados a los valores propios aseguran un mejoramiento en las estimaciones. Los modelos del estudio LTTP para suelos finos son los que tienen más baja predicción. Esto es debido a que en su formulación solo tienen en cuenta las propiedades del suelo y las condiciones óptimas, y no consideran las condiciones de servicio como la densidad seca y el contenido de humedad. Se aprecia que los modelos que consideran las condiciones de densidad seca y humedad de cada espécimen tienen una mejor correlación.

6. Análisis de Resultados

Después de realizar los ensayos en las muestras de suelos seleccionados, se puede observar un gran coeficiente de determinación R^2 , superior al 0,90 lo que indica que se realizó bien los ensayos.

Se observa que para cada espécimen ensayado corresponde un solo conjunto de valores K_1 , K_2 , y K_3 hallados mediante regresión lineal múltiple.

Se puede observar que el coeficiente hallado por medio de una regresión lineal múltiple K_1 , siempre sale positivo para los ensayos triaxiales, tanto para el suelo A – 6 y para el suelo A – 7 – 6, siempre es positivo, y se observa que a un mayor módulo resiliente, el valor de K_1 es mayor, debido a que el coeficiente K_1 es directamente proporcional al Módulo de Young.

Se puede observar que el coeficiente hallado por medio de una regresión lineal múltiple K_2 , siempre sale positivo para los ensayos triaxiales, tanto para el suelo A–6 y para el suelo A–7– 6, siempre es positivo y menor a uno, por lo que se deduce que: el aumento del invariante de tensiones Θ producirá un aumento de la rigidez del material, lo cual resulta en un mayor módulo resiliente, por lo que el coeficiente K_2 deberá ser positivo.

Realizados los ensayos triaxiales y obtenidos los coeficientes de regresión K_3 , para cada espécimen, se pudo concluir que el coeficiente K_3 involucra al esfuerzo cortante octaédrico, el cual es directamente proporcional al tensor desviador, por lo que según la teoría estudiada deberá ser negativo, dado que al aumentar la tensión de corte se producirá un “ablandamiento” del material y por lo tanto una disminución del módulo resiliente.

Según los ensayos triaxiales realizados se observa que aumentos de la presión de confinamiento σ_3 inducen aumentos en la magnitud del módulo resiliente.

En suelos finos donde el confinamiento es mucho menos significativo que el esfuerzo desviador, el módulo resiliente presenta una disminución en su magnitud cuando se aplica un incremento en el esfuerzo desviador, principalmente para materiales finos.

Los valores estimados para los coeficientes K_1 , K_2 , y K_3 , para el modelo 1 cumplen con las condiciones de ser positivos K_1 y K_3 , y negativo el coeficiente K_2 . Pero los valores de módulo resiliente estimados con este modelo son muy distantes de los medidos, considerando así, que tiene un nivel pobre de predicción.

Los valores estimados para los coeficientes K_1 , K_2 , y K_3 , para el modelo 2 no cumplen con las condiciones de ser positivos K_1 y K_3 , y negativo el coeficiente K_2 , ya que el coeficiente K_1 es negativo para todos los especímenes ensayados, y además los coeficientes K_1 , K_2 , y K_3 son constantes para los tres especímenes de cada muestra de suelo, y los valores de módulo resiliente estimados con este modelo son prácticamente descartados, ya que todos son negativos, esto debido al valor negativo del coeficiente K_1 . Finalmente observamos que tiene un bajísimo nivel de predicción.

Finalmente se observa que los coeficientes estimados K_1 , K_2 , y K_3 para el modelo 3 cumplen con las condiciones de ser positivos K_1 y K_3 , y negativo el coeficiente K_2 , y además son más cercanos a los encontrados experimentalmente a través del ensayo triaxial.

El nivel de predicción del modelo 3 es más alto que el de los otros dos modelos.

Finalmente se pudo observar que en la mayoría de los ensayos realizados, se encontraba un mayor módulo resiliente para muestras compactadas con el contenido de humedad óptima, por lo que se reconoce su importancia.

Para muestras compactadas del lado seco de la humedad óptima, las magnitudes del módulo resiliente fueron superiores, comparadas con las muestras compactadas del lado húmedo, conservando la tendencia de menores valores a medida que se incrementa el esfuerzo desviador.

1. CONCLUSIONES

Las conclusiones generales presentadas a continuación fueron realizadas tras haber finalizado satisfactoriamente este trabajo, el cual está basado en la evaluación de modelos para la predicción del módulo resiliente.

- Se concluye que la práctica triaxial es muy precisa, y brinda de manera muy acertada las relaciones entre esfuerzo deformación, y esfuerzos de confinamiento. Para la realización de la práctica se deben considerar algunos factores como ser la humedad y la hermeticidad de la cámara, el resultado final de la obtención de los módulos resilientes será la consecuencia de una buena medición y la adecuada calibración del equipo.
- Con factores de correlación R^2 superiores a 0,90 podemos decir que se hizo un buen trabajo de escritorio y también buenas prácticas, fruto de ellas se obtuvo buenos resultados.
- Los factores K_1 , K_2 y K_3 dependen de la regresión múltiple lineal, K_1 en todos los ensayos dio positivo, lo cual indica que es directamente proporcional al módulo de Young.
- El aumento del invariante de tensiones Θ produjo un aumento de la rigidez del material, lo cual resulta en un mayor M_r , por lo que K_2 ha de ser positivo siempre como lo reflejan los resultados.
- K_3 involucra al tensor desviador por lo que deberá ser negativo, dado que al aumentar la tensión de corte se producirá un “ablandamiento” del material y una disminución del M_r , en todos los resultados K_3 es negativo, lo cual ratifica la teoría.
- Los coeficientes K_1 , K_2 y K_3 , son muy sensibles al contenido de humedad y densidad seca que contiene cada espécimen en el momento de ensayo, como lo demuestra la baja correlación que se obtiene en los modelos que no la consideran.

- Se realizaron los cálculos y mediciones de todos los ensayos de caracterización física de los suelos involucrados en el estudio, para ver su dependencia lineal con el módulo resiliente.
- Se ha presentado el estudio de diferentes modelos que estiman el comportamiento no lineal del Módulo Resiliente para su uso en los métodos de diseño de base empírico-mecanicistas de pavimentos flexibles.
- Los modelos propuestos en el estudio LTTP presentan un número de variables muy grande, con ensayos que no son de rutina, como lo son el contenido de arcillas y de limos, lo que dificulta realizar una estimación del módulo resiliente de forma simple y sin ensayos extra que los convencionales.
- Los módulos predichos por los modelos analizados podrían ser considerados como valores orientativos para ser introducidos en la nueva guía AASHTO de diseño de pavimentos para los niveles 2 y 3.
- Se ha establecido que no es posible adoptar un modelo directamente sin realizar su correspondiente calibración a condiciones locales.

2. RECOMENDACIONES

- En cuanto a las recomendaciones sobre el presente proyecto, cabe señalar que la cámara triaxial es un poco pequeña, lo cual obliga a reducir las dimensiones de los especímenes a ser ensayados.
- Los instrumentos de medición de alta precisión como los deformímetros tienen que estar funcionando en óptimas condiciones, ya que ante un mínimo cambio o descalibración, puede alterar todas las mediciones, ocasionando lecturas erróneas, y provocando así que el ensayo sea descartado.
- Es necesario realizar una correcta caracterización del suelo que será usado como subrasante, ya que el módulo resiliente será directamente proporcional a dichas propiedades físicas.

- Se deberá repetir el ensayo triaxial para el espectro de humedades y densidades que se esperan ocurran en la puesta en servicio del paquete estructural.
- Se debe tomar en cuenta que para obtener resultados más exactos y coherentes, el ensayo triaxial debe realizarse con varios especímenes, disminuyendo así la dispersión de datos y resultados, para luego hacer una comparación y obtener resultados más precisos y satisfactorios.