

IAG311-03-2013
ENSAYES DE MÓDULO RESILIENTE EN MATERIALES NO LIGADOS
EN EL CONTEXTO DE LA GUÍA DE DISEÑO INTERINA AASHTO 2008
ENSAIOS DE MÓDULO RESILIENTE EM MATERIAIS NÃO LIGADO NO
CONTEXTO DA GUIA DO DESIGN AASHTO 2008

Rodrigo Yáñez
Universidad Técnica Federico Santa María
Valparaíso, Chile
rodrigo.yanez@postgrado.usm.cl

Jenaro Llanos
Universidad Técnica Federico Santa María
Valparaíso, Chile
jenaro.llanos@alumnos.usm.cl

Gabriel Palma
Laboratorio Nacional de Vialidad - Ministerio de Obras Públicas
Santiago, Chile
gabriel.palma@mop.gov.cl

Rodrigo Delgadillo
Universidad Técnica Federico Santa María
Valparaíso, Chile
rodrigo.delgadillo@usm.cl

Carlos Wahr
Universidad Técnica Federico Santa María
Valparaíso, Chile
carlos.wahr@usm.cl

Ricardo Salsilli
Universidad Técnica Federico Santa María
Valparaíso, Chile

Gabriel García
Universidad Técnica Federico Santa María
Valparaíso, Chile
gabriel.garcia@usm.cl

Resumen

En Chile, el diseño de pavimentos flexibles y rígidos en la vialidad interurbana se hace con los procedimientos descritos en el Manual de Carreteras de Chile. En el marco del Proyecto INNOVA CORFO 11BPC-10220, que se encuentra en desarrollo por la Universidad Técnica

Federico Santa María, conducente a la adaptación de la Guía Interina Empírico Mecanicista AASHTO 2008, se caracteriza un total de 13 tipos de suelos típicos de subrasantes chilenas, un material de subbase y en uno de base. Estos últimos corresponden a materiales granulares que cumplen las disposiciones de la normativa chilena respectiva. El método diseño de AASHTO introdujo el parámetro del módulo resiliente en el año 1986. Los ensayos fueron realizados según norma AASHTO T307-99(2007) en el Laboratorio LEMCO de la Universidad Técnica Federico Santa María y en el Laboratorio Nacional de Vialidad. Los resultados de los módulos resilientes de laboratorio se comparan con las correlaciones de módulo resiliente con CBR de Heukelom y Klomp de 1962 (AASHTO 1993), Powell et al. de 1984 (Guía Interina AASHTO 2008) y Manual de Carreteras de Chile. Además, los resultados son contrastados con los valores por defecto propuestos en nivel 3 por AASHTO 2008. Los resultados de los ajustes realizados evidencian las grandes discrepancias entre los valores medidos y los predichos.

Resumo

No Chile, o projeto de pavimentos flexíveis e rígidos na portagem é feito com os procedimentos descritos no Manual de Carreteras de Chile. No âmbito da INNOVA CORFO 11BPC-10220, que está em desenvolvimento na Universidade Universidad Técnica Federico Santa María, levando a adaptação empírica mecanicista AASHTO Guia Provisória de 2008, apresenta um total de 13 tipos de solos do subleito típico chileno um material de sub-base e de uma base. Este último corresponde a materiais granulares que atendam as disposições dos respectivos regulamentos chilenos. O método de projeto AASHTO introduziu parâmetro módulo de resiliência no ano de 1986. Os ensaios foram realizados de acordo com a AASHTO T307-99 (2007) no Laboratório LEMCO Universidade Universidad Técnica Federico Santa María e Laboratorio Nacional de Vialidad. Os resultados de laboratório, em relação ao módulo de resiliência correlações com módulo de CBR Heukelom resiliente e Klomp 1962 (AASHTO 1993), Powell et al. 1984 (AASHTO Guia Provisória 2008) e Manual de Carreteras de Chile. Além disso, os resultados são contrastados com os padrões de nível 3 dadas por AASHTO 2008. Os resultados dos ajustes feitos evidentes as grandes discrepâncias entre os valores medidos e os previstos.

INTRODUCCION

El módulo resiliente se define como la razón entre el esfuerzo cíclico aplicado y la deformación axial recuperable y es el parámetro utilizado para caracterizar la rigidez de las capas no ligadas en el diseño de pavimento. El ensaye de laboratorio de módulo resiliente es el que mejor representa el paso de los vehículos sobre la estructura de pavimento y en él se considera la dependencia al estado de esfuerzo a que está sometido el material.

Es común la utilización de otras formas de estimar el módulo resiliente. El ensaye de CBR es normalmente usado en la práctica para estimarlo debido a su bajo costo y rápida confección de las probetas de ensaye. Por otra parte la Guía Interina AASHTO 2008 proporciona valores por defecto de módulo resiliente provenientes de deflectometría de impacto.

En el marco del Proyecto INNOVA CORFO 11BPC-10220, que se encuentra en desarrollo por la Universidad Técnica Federico Santa María, conducente a la adaptación de la Guía Interina Empírico Mecanicista AASHTO 2008, se caracteriza un total de 13 tipos de suelos típicos de subrasantes chilenas, un material de subbase y uno de base.

Tomando estos resultados se realiza una comparación entre los valores obtenidos en laboratorio y los valores predichos mediante correlaciones con el CBR y los valores por defecto provistos en AASHTO 2008.

EL MÓDULO RESILIENTE EN LA GUÍA INTERINA AASHTO 2008

Como todo dato de entrada de la AASHTO 2008, el módulo resiliente puede ser ingresado bajo tres posibles niveles jerárquicos que dependen del grado de conocimiento del parámetro en cuestión. En términos generales estos niveles se definen de la siguiente manera: Nivel 1, corresponde a parámetros medidos directamente; Nivel 2, corresponde a parámetros obtenidos a partir de correlaciones o ecuaciones de regresión y Nivel 3, corresponde a valores estimados o por defecto en base a clasificación AASHTO de suelos.

Para el caso particular del módulo resiliente en el diseño de pavimentos nuevos: Nivel 1, corresponde a la medición en laboratorio mediante ensaye triaxial de carga repetida (según AASHTO T307-99(2007)); Nivel 2, corresponde a la determinación del módulo a partir de otros parámetros tales como el CBR y Nivel 3, corresponde a la utilización de valores por defecto propuestos en la AASHTO 2008.

MEDICIÓN DEL MÓDULO RESILIENTE EN LABORATORIO

Actualmente la medición de módulo resiliente se realiza en laboratorio siguiendo la norma de ensaye AASHTO T307-99(2007)). El ensaye consiste en una prueba de naturaleza triaxial en que al espécimen se le es aplicado un esfuerzo desviador axial y una presión de confinamiento mediante aire.

Las deformaciones axiales son medidas a través de transductores lineales variables diferenciales (LVDT) y la carga axial aplicada mediante un pistón a la probeta es medida a través de una celda de carga dispuesta al interior de la cámara triaxial.

El pulso de onda aplicado es de naturaleza repetida, es decir, con períodos de descanso entre aplicación de pulso. Generalmente la duración del pulso es de 0,1 [s] y el período de descanso es de 0,9 [s]. El pulso tiene la forma de una función haversine debido a que esta forma representa de mejor manera el paso de los vehículos sobre la estructura de pavimento.

Al espécimen se le aplican un total de 15 secuencias de ensaye más una secuencia de acondicionamiento al comienzo del ensaye. Cada secuencia es un estado de esfuerzo dado por una combinación de presión de confinamiento y esfuerzo desviador dinámico. La primera secuencia es la llamada etapa de acondicionamiento que consiste en la aplicación de 500 ó 1000 ciclos con un esfuerzo desviador y presión de confinamiento determinados. El propósito es estabilizar las deformaciones permanentes y establecer una homogeneidad entre el sistema de carga y la probeta para lograr una plena aplicación de la carga. El resto de las secuencias consiste en la aplicación de 100 ciclos cada una, siendo contabilizados los últimos 5 ciclos. Estos últimos 5 valores de cada secuencia se promedian dando un módulo resiliente correspondiente a la secuencia. En consecuencia, para cada ensaye se obtiene un total de 15 valores de módulo resiliente para cada combinación de esfuerzos aplicados a la probeta.

CORRELACIONES MÓDULO RESILIENTE – CBR

Si bien en la literatura se reportan diversas correlaciones, en este estudio se presentan y analizan las correlaciones de Heukelom y Klomp de 1962 y la de Powell et al. de 1984.

Correlación de Heukelom y Klomp (1962)

La correlación de Heukelom y Klomp de 1962 viene dada por

$$M_R(MPa) = 10,3 \cdot CBR \quad \text{Para } CBR < 10\% \quad (1)$$

Está basada en mediciones de módulo dinámico y ensayos de CBR, ambos en terreno. Por lo tanto, las mediciones de módulo elástico no vienen de mediciones de módulo resiliente de laboratorio. Heukelom y Klomp usaron tres sets de datos para calcular módulos dinámicos a partir de mediciones de velocidad de onda. Aunque los autores no hablan directamente de módulo resiliente la correlación es ampliamente citada (Mokwa y Akin, 2009).

La correlación de Heukelom y Klomp es indicada para el diseño por AASHTO 93. Se considera razonable para suelos finos con CBR medido en saturación de 10% o menos (AASHTO, 1993).

Correlación de Powell et al. (1984)

La correlación de Powell et al. de 1984 mostrada en la Ecuación (2) es la empleada por AASHTO 2008.

$$M_R(MPa) = 17,6 \cdot CBR^{0,64} \quad (2)$$

Esta correlación desarrollada para la caracterización de la subrasante se basó en ensayos de CBR en terreno y las técnicas de propagación de onda. No se usaron ensayos de laboratorio para la generación de la correlación. Los autores indicaron que la correlación es solo aplicable para suelos con CBR entre 2% y 12% (Mokwa y Akin, 2009).

Por otro lado, el Manual de Carreteras de Chile agrega la Ecuación (3) para ampliar el rango de valores de CBR en subrasante.

$$M_R(MPa) = 22,1 \cdot CBR^{0,55} \quad \text{Para } 12\% \leq CBR < 80\% \quad (3)$$

VALORES POR DEFECTO EN AASHTO 2008

La versión definitiva de AASHTO 2008 en su Tabla 11-10 recomienda valores por defecto basados en el valor medio de la deflectometría de impacto dada para las secciones de la base de datos LTPP. Estos valores vienen dados tanto para pavimentos flexibles como para pavimentos rígidos. La diferencia proviene de la naturaleza de la estructura de pavimento que en efecto provoca distintos estados de esfuerzo para un mismo material y por tanto un módulo resiliente distinto (AASHTO, 2008).

Los valores por defecto pueden ser usados suponiendo que se encuentran en condiciones óptimas, esto es, densidad máxima compactada seca y humedad óptima, ambos parámetros determinados según AASHTO T180 correspondiente al ensaye de Proctor modificado (AASHTO, 2008).

Para el caso de los pavimentos flexibles los valores por defecto propuestos en AASHTO 2008, Tabla 11-10, vienen de retrocálculo de las deflexiones hechas por deflectómetro de impacto en las secciones LTPP. Los módulos elásticos retrocalculados con contenidos de humedad de terreno generalmente mayores que los óptimos fueron ajustados para llevarlos a esta última condición. Además los módulos elásticos se ajustaron para llevarlos a condiciones de laboratorio mediante un factor de 0,55 en el caso de los suelos finos y 0,67 para el caso de los suelos gruesos (Darter et al., 2009).

ENSAYES DE LABORATORIO PARA SUELOS CHILENOS

En el marco del Proyecto INNOVA CORFO 11BPC-10220, que se encuentra en desarrollo por la Universidad Técnica Federico Santa María, conducente a la adaptación de la Guía Interina Empírico Mecanicista AASHTO 2008, se caracterizaron un total de 13 tipos de suelos típicos de subrasantes chilenas, un material de subbase y uno de base.

El listado de suelos, junto con su caracterización principal, es mostrado en la Tabla 1. También en esta tabla se incluye en algunos casos el nombre local dado a determinados suelos en Chile.

Tabla 1: Principales características de suelos y materiales granulares analizados en el Proyecto INNOVA CORFO 11BPC-10220

Rótulo	Nombre Local	Clasificación AASHTO	Clasificación USCS	Índice de Plasticidad %	Pasando #200 %
1	Arena de Viña del Mar	A-1b(0)	SW-SM	0	5
2	Arena de Duna	A-3(0)	SP	0	2
3	"Maicillo"	A-2-4(0)	SM	0	25
4	Arcilla Arenosa "Greda"	A-6(10)	CL	23	59
5	Arcilla	A-7-6(15)	CL	22	74
6	"Tosca"	A-6(6)	CL	15	58
7	Grava Arenosa	A-1a(0)	GW	0	1
8a*	Arena Arcillosa	A-6(2)	SC	15	40
8b*	Arena Arcillosa	A-6(1)	SC	12	36
9	"Sebo de Burro"	A-7-6(23)	CL	21	95
10	"Pumacita"	A-2-4(0)	SM	0	25
11	"Trumao"	A-4(0)	ML	0	60
12	"Chusca"	A-4(0)	SM	0	43
13	"Mazacote"	A-6(11)	CL	15	81
Base	NA	A-1a(0)	GP	0	3
Subbase	NA	A-1a(0)	GP	0	3

*Para el suelo Arena Arcillosa fueron analizadas dos muestras de características similares provenientes de distintas zonas geográficas. Las muestras se identificaron como 8a y 8b.

Los materiales se caracterizaron a través de ensaye granulométrico, determinación de los índices de consistencia, características de curva densidad seca-humedad (Proctor modificado), densidades máximas y mínimas en caso de suelos granulares limpios, densidad de partículas sólidas y CBR. Las probetas del ensaye de CBR, sumergidas en agua por 96 horas, fueron ensayadas en condición de saturación (excepto probetas de Suelo 12).

A su vez, a todos los materiales se les practicó ensayos de módulo resiliente en laboratorio, confeccionando para cada uno al menos dos probetas para comprobar repetibilidad. Los especímenes de suelos cohesivos fueron compactados y ensayados en condiciones óptimas es decir a humedad óptima y densidad máxima compactada seca (excepto especímenes de Suelo 3 y Suelo 4 que fueron compactados y ensayados a humedad óptima y al 95% de la DMCS), obtenidas mediante ensaye de Proctor modificado. Para el caso de los suelos granulares limpios la condición de compactación y ensaye de las probetas se fijó en un valor mínimo del 80% de la densidad relativa.

Las probetas fueron ensayadas según norma AASHTO T307-99(2007) en las dependencias del laboratorio LEMCO del Departamento de Obras Civiles de la Universidad Técnica Federico Santa María y en el Laboratorio Nacional de Vialidad. Para cada una se obtuvo un total de 15 valores de módulo resiliente correspondientes a cada una de las secuencias de ensaye o, en otras palabras, a cada una de las combinaciones de estados de esfuerzo aplicados a la probeta.

COMPARACIÓN DE MÓDULO RESILIENTE DE LABORATORIO CON MÓDULO RESILIENTE OBTENIDO A TRAVÉS DE CORRELACIONES CON CBR

Se hizo una comparación de los módulos resilientes en estado óptimo con los obtenidos mediante correlación con CBR saturado y módulos resilientes llevados a condición de saturación con los obtenidos mediante correlación con CBR saturado.

Para llevar los módulos medidos en condiciones óptimas a valores en condición de saturación se utilizó el modelo de humedad incorporado en el programa climático EICM de la Guía Interina AASHTO 2008. El modelo viene dado por

$$\log \frac{M_R}{M_{Ropt}} = a + \frac{b-a}{1+EXP\left(\ln \frac{-b}{a} + k_m \cdot (S-S_{opt})\right)} \quad (4)$$

Donde:

M_R = Módulo Resiliente.

M_{Ropt} = Módulo Resiliente en las condiciones de referencia.

a = Valor máximo de $\log \frac{M_R}{M_{Ropt}}$ (suelos gruesos=-0,3123 y suelos finos=-0,5934)

b = Valor mínimo de $\log \frac{M_R}{M_{Ropt}}$ (suelos gruesos=0,3 y suelos finos=0,4)

k_m = Parámetro de regresión (suelos gruesos=6,8157 y suelos finos=6,1324)

$S-S_{opt}$ = Variación en el grado de saturación (decimal).

Importante es hacer notar que el M_{Ropt} en condiciones de referencia se refiere a un módulo resiliente en condiciones óptimas, es decir, densidad máxima compactada seca y humedad óptima determinado por ensaye de Proctor. Por lo tanto, para ser consistentes, no se llevarán a condición de saturación las probetas confeccionadas en función de densidad relativa y las probetas compactadas al 95% de la densidad máxima compactada seca. Los valores de laboratorio llevados a condición de saturación para cada probeta son los mínimos, máximos y promedios de los módulos resilientes para las 15 secuencias de ensaye.

La Tabla 2, muestra los resultados de los módulos resilientes medidos en laboratorio (en estado óptimo y en estado saturado) y los módulos resilientes obtenidos a partir de las correlaciones de Heukelom y Klomp, Powell et al. y Manual de Carreteras de Chile. La Tabla 2 excluye del análisis las probetas de módulo resiliente ensayadas en el estudio con un CBR fuera del rango aceptable para las tres correlaciones simultáneamente (Específicamente, probetas de grava arenosa, subbase y base). La Figura 1 muestra gráficamente estos resultados.

Para comprobar el grado de correlación entre valores de módulo resiliente medidos y predichos se ajustaron funciones de forma logarítmica y lineal (con intercepto igual a cero). Se consideró los valores promedio de laboratorio en condición óptima y condición saturada. Los ajustes hechos y sus respectivos coeficientes de determinación R^2 se visualizan en la Figura 1.

De la Figura 1 es posible notar que para todos los casos planteados y considerando el ajuste lineal, los coeficientes de determinación R^2 no superan el 0,44, por lo que la precisión es baja. Por otro lado, para todos los ajustes de función lineal con intercepto cero se obtienen pendientes mucho menores a 1 (a lo más 0,6134) que implica un gran sesgo. Todo lo anterior indica que en este estudio las correlaciones no predicen de buena forma los módulos resilientes de laboratorio. No se obtienen mejores resultados con los ajustes logarítmicos.

Tabla 2: Resultados de módulos resilientes obtenidos en laboratorio y predichos mediante correlaciones con el CBR

Probeta	Clasificación		CBR Probeta Saturado %	M _R Medido Mínimo [MPa]	M _R Medido Máximo [MPa]	M _R Medido Promedio [MPa]	M _R Medido Mínimo Saturado [MPa]	M _R Medido Máximo Saturado [MPa]	M _R Medido Promedio Saturado [MPa]	M _R Predicho Correlación Heukelom y Klomp [MPa]	M _R Predicho Correlación Powell et al. [MPa]	M _R Predicho Correlación Manual de Carreteras de Chile [MPa]
	AASHTO	USCS										
01.01 LNV	A-1b(0)	SW-SM	53	91	126	108	-	-	-	-	-	196
02.01 LNV	A-1b(0)	SW-SM	53	81	128	105	-	-	-	-	-	196
01.02 USM	A-3(0)	SP	41	58	103	81	-	-	-	-	-	170
02.02 USM	A-3(0)	SP	41	53	100	79	-	-	-	-	-	170
01.03 USM	A-2-4(0)	SM	7	56	98	73	-	-	-	72	61	61
02.03 USM	A-2-4(0)	SM	9	57	106	75	-	-	-	93	72	72
01.03 LNV	A-2-4(0)	SM	10	63	92	74	-	-	-	103	77	77
02.03 LNV	A-2-4(0)	SM	9	70	118	87	-	-	-	93	72	72
01.04 USM	A-6(10)	CL	11	62	141	84	-	-	-	-	82	82
02.04 USM	A-6(10)	CL	9	63	144	88	-	-	-	93	72	72
01.05 USM	A-7-6(15)	CL	4	231	265	247	144	166	154	41	43	43
02.05 USM	A-7-6(15)	CL	4	248	279	265	167	187	178	41	43	43
01.06 USM	A-6(6)	CL	15	86	184	122	49	105	70	-	-	98
02.06 USM	A-6(6)	CL	15	88	166	122	55	103	76	-	-	98
01.08a USM	A-6(2)	SC	7	388	453	431	179	209	199	72	61	61
02.08a USM	A-6(2)	SC	7	311	418	381	141	189	172	72	61	61
01.08b LNV	A-6(1)	SC	12	249	339	292	102	139	120	-	86	87
02.08b LNV	A-6(1)	SC	12	223	315	263	91	129	108	-	86	87
03.08b LNV	A-6(1)	SC	12	263	303	282	108	125	116	-	86	87
01.09 LNV	A-7-6(23)	CL	8	80	116	94	62	90	73	83	67	67
02.09 LNV	A-7-6(23)	CL	8	81	120	96	60	88	71	83	67	67
01.10 USM	A-2-4(0)	SM	51	45	90	69	28	57	43	-	-	192
02.10 USM	A-2-4(0)	SM	51	43	87	66	28	57	43	-	-	192
01.11 USM	A-4(0)	ML	11	68	81	74	33	39	36	-	82	82
02.11 USM	A-4(0)	ML	11	63	77	70	30	37	34	-	82	82
01.12 LNV	A-4(0)	SM	50*	78	173	130	30	66	50	-	-	190
02.12 LNV	A-4(0)	SM	49*	87	170	133	32	63	49	-	-	188
01.13 USM	A-6(11)	CL	4	228	295	255	128	165	143	41	43	43
02.13 USM	A-6(11)	CL	4	206	255	227	118	147	130	41	43	43

*Para el caso del Suelo 12 las probetas de CBR fueron compactadas y ensayadas a densidad máxima compactada seca y humedad óptima debido a que es un suelo característico de la zona norte de Chile (en general, con pocas precipitaciones) donde, según la norma chilena, el ensaye puede realizarse no saturado.

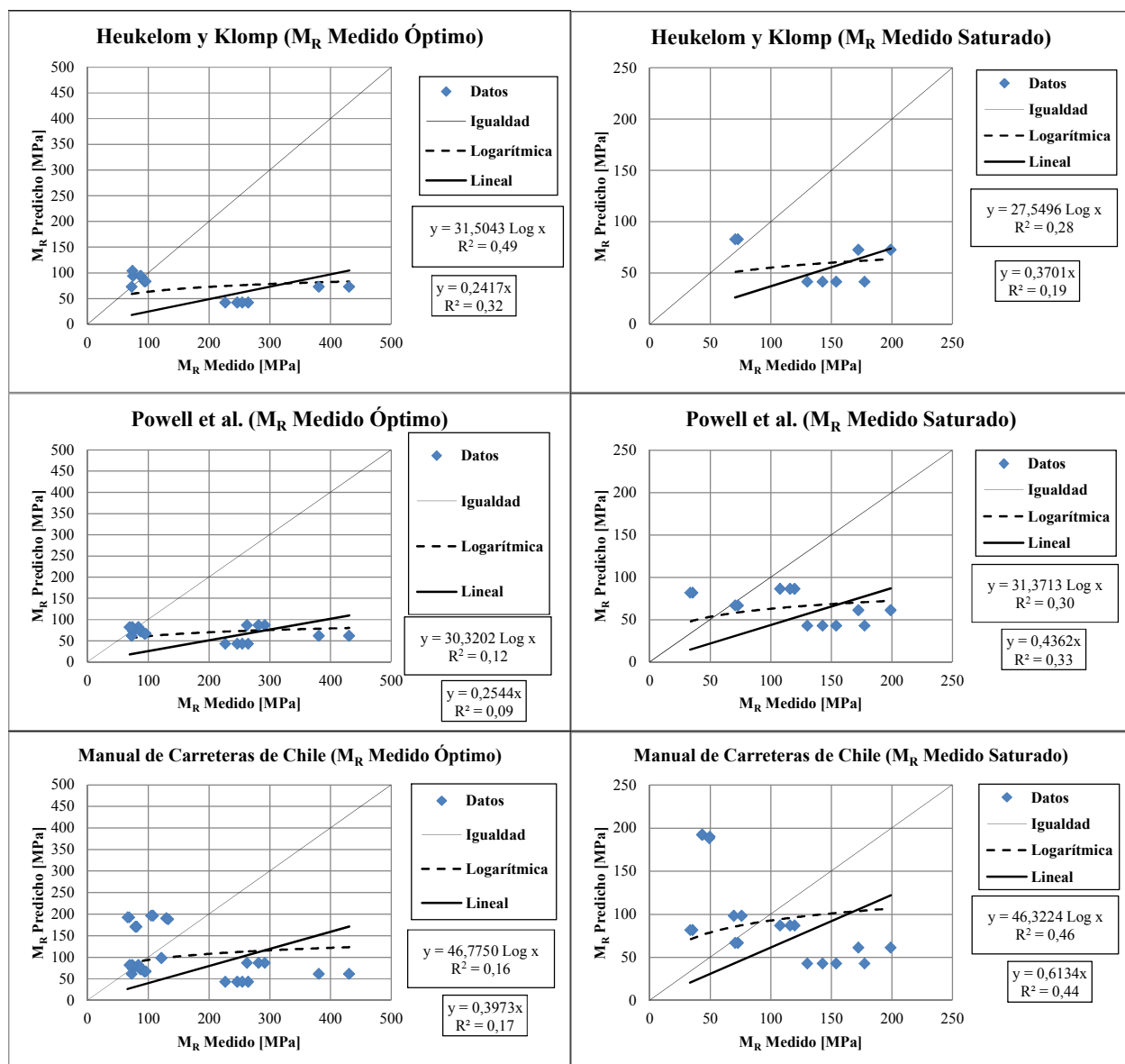


Figura 1: M_R Predicho vs. M_R Medido y los R^2 de ajuste lineal y logarítmico para los distintos casos

COMPARACIÓN DE MÓDULO RESILIENTE DE LABORATORIO CON VALORES POR DEFECTO DE AASHTO 2008

En este caso los valores por defecto se pueden suponer a densidad máxima compactada seca y humedad óptima determinadas según ensaye de Proctor modificado por lo que se excluirán del análisis las probetas confeccionadas en función de densidad relativa y las probetas compactadas al 95% de la densidad máxima compactada seca.

La Tabla 3 y Figura 2 muestran los resultados de la comparación de los módulos resilientes medidos en laboratorio (promedio) y los valores de módulos resilientes por defecto de AASHTO 2008 para pavimentos flexibles y pavimentos rígidos. Los resultados para el ajuste lineal, al igual que para el caso de las correlaciones, evidencian baja precisión (R^2 de a lo más 0,18) y alto sesgo (pendiente de a lo más 0,3962). No se logra tampoco buenos resultados con el ajuste logarítmico.

Tabla 3: Resultados de módulos resilientes obtenidos en laboratorio y los valores por defecto de AASHTO 2008

Probeta	Clasificación		M_R Medido Mínimo [MPa]	M_R Medido Máximo [MPa]	M_R Medido Promedio [MPa]	M_R Por Defecto AASHTO 2008 Pavimentos Flexibles [MPa]	M_R Por Defecto AASHTO 2008 Pavimentos Rígidos [MPa]
	AASHTO	USCS					
01.05 USM	A-7-6(15)	CL	231	265	247	79	90
02.05 USM	A-7-6(15)	CL	248	279	265	79	90
01.06 USM	A-6(6)	CL	86	184	122	100	97
02.06 USM	A-6(6)	CL	88	166	122	100	97
01.08a USM	A-6(2)	SC	388	453	431	100	97
02.08a USM	A-6(2)	SC	311	418	381	100	97
01.08b LNV	A-6(1)	SC	249	339	292	100	97
02.08b LNV	A-6(1)	SC	223	315	263	100	97
03.08b LNV	A-6(1)	SC	263	303	282	100	97
01.09 LNV	A-7-6(23)	CL	80	116	94	79	90
02.09 LNV	A-7-6(23)	CL	81	120	96	79	90
01.10 USM	A-2-4(0)	SM	45	90	69	169	114
02.10 USM	A-2-4(0)	SM	43	87	66	169	114
01.11 USM	A-4(0)	ML	68	81	74	114	103
02.11 USM	A-4(0)	ML	63	77	70	114	103
01.12 LNV	A-4(0)	SM	78	173	130	114	103
02.12 LNV	A-4(0)	SM	87	170	133	114	103
01.13 USM	A-6(11)	CL	228	295	255	100	97
02.13 USM	A-6(11)	CL	206	255	227	100	97

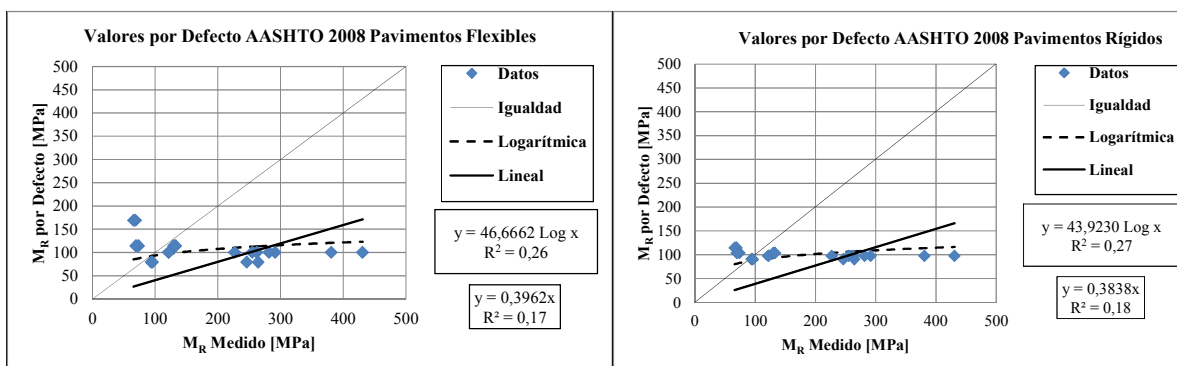


Figura 2: M_R por Defecto vs. M_R Medido y los R^2 de ajuste lineal y logarítmico para los distintos casos

CONCLUSIONES

La práctica común en ingeniería es obtener un valor de módulo resiliente a partir de correlaciones con el CBR debido a que éste resulta ser un ensaye que optimiza factores de costo y tiempo, aun cuando es sabido que el CBR no emula las condiciones encontradas en los pavimentos. A diferencia del módulo resiliente, no simula el paso de los vehículos a través de cargas cíclicas y no considera la dependencia de los suelos y materiales granulares al estado de esfuerzo al que se encuentre en la estructura de pavimento. El ensaye de CBR aplica carga monotónica (grandes deformaciones) a diferencia del ensaye del módulo resiliente que representa de mejor manera el paso de los vehículos por la superficie del pavimento a través de cargas cíclicas repetidas (pequeñas deformaciones). Los resultados de las comparaciones hechas de los ensayos de

laboratorio de módulo resiliente con las correlaciones con el CBR y los valores por defecto en AASHTO 2008 evidencian las discrepancias existentes. En cuanto a las correlaciones, para el caso del ajuste lineal se tienen coeficientes de determinación R^2 muy bajos (baja precisión), que en el mejor de los casos alcanza el 0,44, mientras que los sesgos son muy altos con valores lejanos a 1 de a lo más 0,6134. En consecuencia, para este estudio las correlaciones empíricas muestran que éstas no predicen de buena manera el módulo resiliente. Importante es destacar que el origen de estas correlaciones no viene de ensayos de laboratorio por lo que esto puede ser un factor a considerar en el análisis. Por otro lado, los valores por defecto de AASHTO 2008 provienen de valores promedio provenientes de deflectometría con altas desviaciones estándar en su determinación lo que pudiera explicar las diferencias con los valores de laboratorio. Analizando valores por defecto de AASHTO 2008 versus valores medidos se encuentran resultados similares al análisis de las correlaciones, con, en general, baja precisión (R^2 de a lo más 0,18) y grandes sesgos (pendiente de a lo más 0,3962). Es imprescindible seguir aumentando las mediciones de laboratorio de módulo resiliente de manera de avanzar en el estudio de los suelos y materiales granulares locales, entendiendo que éstos poseen características especiales dependientes de su origen.

REFERENCIAS

- American Association of State Highway and Transportation Officials, *“Guide for Design of Pavement Structures”*, Washington, D.C., 1993
- American Association of State Highway and Transportation Officials, *“Determining the Resilient Modulus of Soils and Aggregate Materials – AASHTO T307-99(2007)”*, 2007
- American Association of State Highway and Transportation Officials, *“Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide, Interim Edition: A Manual of Practice”*, Washington, D.C., 2008
- ARA, *“Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures (NCHRP Project 1-37A)”*, Julio 2004.
- Darter et al., *“Implementation of the Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide in Utah: Validation, Calibration, And Development of the Udot MEPDG User’s Guide”*, 2009
- Darter et al., *“NCHRP Research Results Digest 308: Changes to the Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide Software Through Version 0.900”*, Julio 2006
- Ministerio de Obras Públicas de Chile - Dirección de Vialidad, *“Manual de Carreteras”*, 2012
- Mokwa, R. L. y Akin, M., *“Measurement and Evaluation of Subgrade Soil Parameters: Phase I – Synthesis of Literature”*, Research Report FHWA/MT-09-006/8199 for the Montana Department of Transportation and the U.S. Department of Transportation. Helena, MT, Septiembre 2009