

RELACIÓN ENTRE MÓDULO RESILIENTE DETERMINADO MEDIANTE DEFLECTÓMETRO DE IMPACTO Y EL DE LABORATORIO.

MIGUEL PETERSEN ACEVEDO, Ingeniero Civil, Profesor Depto. Obras Civiles
Universidad Técnica Federico Santa María, miguel.petersen@ociv.utfsm.cl

CARLOS WAHR DANIEL, Ingeniero Civil, Profesor Depto. Obras Civiles
Universidad Técnica Federico Santa María, carlos.wahr@ociv.utfsm.cl

GABRIEL PALMA PAPIC, Ingeniero Civil
Laboratorio Nacional de Vialidad

LEONARDO CASTRO ORÓSTICA, Ingeniero Civil
Universidad Técnica Federico Santa María

JORGE ALBORNOZ DÍAZ, Ingeniero Civil
Empresa Consultora JADIC Ingeniería

RESUMEN

Se investigó la relación entre el módulo resiliente (M_R) obtenido en ensayos de laboratorio (ensaye AASHTO T294-92I), y el obtenido mediante retrocálculo de deflexiones medidas con Deflectómetro de Impacto (FWD). Se realizaron numerosos ensayos en laboratorio y terreno, siguiendo todos los procedimientos definidos en la guía AASHTO 1993 y en el documento “Design Pamphlet for the Determination of Design Subgrade in Support of the 1993 AASHTO Guide for the Design of Pavemente Structures”, publicado por Federal Highway Administration, en 1997. Se logró determinar un factor de ajuste que permite estimar el M_R de laboratorio, considerado como patrón, a partir del valor retrocalculado, para ser utilizado en el diseño y evaluación de pavimentos en el marco del método de diseño propuesto por AASHTO.

1. INTRODUCCIÓN

El método de diseño de estructuras de pavimentos propuesto por AASHTO, incorpora al módulo resiliente como parámetro representativo de la capacidad de soporte del suelo de fundación del camino. Para el desarrollo del modelo de comportamiento de los pavimentos flexibles, el módulo resiliente (M_R), se determinó mediante la ejecución de ensayos triaxiales dinámicos con cargas repetidas, por lo cual la guía de diseño recomienda este método para determinar esta propiedad. No obstante y considerando que el equipo requerido para este ensaye es de un costo bastante alto y de operación compleja, la misma guía ofrece alternativas para determinar este parámetro de diseño. Entre las alternativas, la guía recomienda el uso del Deflectómetro de Impacto.

De acuerdo a los antecedentes contenidos en la Guía AASHTO 1993 y el documento complementario “Design Pamphelt for the Determination of Design Subgrade in Support of the 1993 AASHTO Guide for the Design of Pavemente Structures”[3], publicado en 1997, los valores obtenidos mediante el uso del Deflectómetro de Impacto, resultan en general más altos que los obtenidos en laboratorio, por lo que se recomienda el uso de un factor de ajuste, con el fin de hacer consistente estos valores con el valor de laboratorio. El factor de ajuste recomendado, en este último documento, depende la superficie sobre la que se realicen los ensayos, tal como se indica en la Tabla 1-1.

Tabla 1-1. Factores de ajuste a aplicar al módulo resiliente retrocalculado (FWD).

Tipo de pavimento	Factor de ajuste “C” Promedio	Coefficiente de variación (%)
Suelos de subrasante bajo una subrasante estabilizada.	0.75	13
Suelos de subrasante bajo un pavimento sin una capa de base y/o subbase granular no ligada, y sin subrasante estabilizada.	0.52	37
Suelo de subrasante bajo un pavimento con una capa de base y/o subbase granular no ligada, pero sin subrasante estabilizada.	0.35	49

La escasa investigación realizada hasta ahora en nuestro país, presenta resultados que difieren bastante de los reportados por AASHTO. Sin embargo, los trabajos realizados no han considerado los procedimientos recomendados por AASHTO en el documento “Design Pamphelt for the Determination of Design Subgrade in Support of the 1993 AASHTO Guide for the Design of Pavemente Structures”, lo que da lugar al cuestionamiento de dichos resultados.

El principal objetivo de este trabajo se ha centrado en comparar el módulo resiliente que se obtiene en laboratorio y el que se determina a partir de ensayos no destructivos realizados con Deflectómetro de Impactos, siguiendo lo más rigurosamente posible los procedimientos recomendados por AASHTO, esto con el objetivo de definir la necesidad o no de aplicar un factor de ajuste y determinar su magnitud.

2. MÓDULO RESILIENTE

Cuando un vehículo circula sobre un pavimento sus ruedas transmiten cargas que generan, al interior de la estructura de ese pavimento y el suelo de fundación, un estado de esfuerzos que a su vez induce un estado de deformaciones. Si el material de la capa se supone linealmente elástico, isotrópico y homogéneo, ambos estados se consideran relacionados entre sí a través del Módulo de Elasticidad y la Razón de Poisson propios del material. Sin embargo la respuesta real de los materiales utilizados en la construcción de pavimentos y suelo de fundación, muestra que bajo pulsos de carga dinámicos como los inducidos por las ruedas de los vehículos, solo parte de la deformación total generada se recupera al cesar la sollicitación aplicada. Esto implica que en estricto rigor este tipo de materiales no presenta un comportamiento elástico. En consideración a este hecho se introduce el concepto de Módulo Resiliente, que se define como aquel que relaciona las tensiones aplicadas y las deformaciones recuperables [AASHTO, 1993].

El estudio del módulo resiliente se ha desarrollado a partir de ensayos triaxiales dinámicos con carga repetida. Este ensaye consiste básicamente en someter a una probeta de material a un estado de esfuerzos compuesto por una presión de confinamiento y un esfuerzo desviador dinámico, estado de esfuerzos que pretende reproducir el estado a que se encuentra sometido el suelo de fundación del camino cuando éste es solicitado por los vehículos. Una respuesta típica al ensaye se muestra en la Figura 2-1. A partir de esta respuesta y sus componentes se puede definir matemáticamente el módulo resiliente del material según la expresión indicada en la Ecuación (2-1).

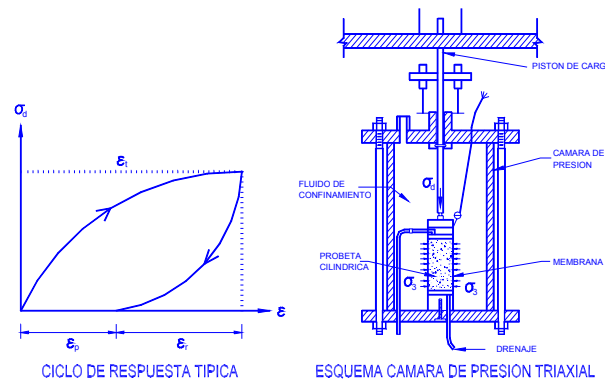


Figura 2-1. Ciclo de carga y descarga típico en un ensaye triaxial con carga repetida.

$$M_R = \frac{\sigma_d}{\varepsilon_r} \quad Ec.(2-1)$$

Donde:

M_R = Módulo Resiliente.

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

ε_r = Deformación unitaria recuperada.

σ_1 = Esfuerzo axial. Esfuerzo principal mayor.

σ_3 = Presión de confinamiento. Esfuerzo Principal menor.

2.1 Factores que afectan la magnitud del módulo resiliente

El módulo resiliente del suelo no es una magnitud constante, y de acuerdo a los antecedentes recopilados, depende principalmente del estado de esfuerzos solicitante y de las condiciones físicas en que se encuentre el suelo al momento del ensaye.

a) Estado de esfuerzos solicitante.

El estado de esfuerzos se encuentra compuesto por una presión de confinamiento (σ_3) y un esfuerzo desviador dinámico (σ_d). De acuerdo a los antecedentes recopilados, ambos componentes influyen sobre la magnitud del módulo resiliente. En el caso de la presión de confinamiento

existe una relación directa entre la magnitud del módulo resiliente y la intensidad de la presión de confinamiento, es decir, aumentos de la presión de confinamiento inducen aumentos en la magnitud del módulo resiliente y una disminución de la presión de confinamiento induce una disminución en la magnitud del módulo resiliente. Esta tendencia es independiente del tipo de suelo de que se trate. A diferencia de lo anterior en el caso del esfuerzo desviador la tendencia depende del tipo de suelo. Para suelos gruesos la relación es directa, en cambio para suelos finos cohesivos esta relación es inversa. El número de veces que el esfuerzo desviador dinámico es aplicado sobre la muestra también influye en el valor del módulo resiliente. La información recopilada indica que la magnitud del módulo se incrementa a medida que el número de aplicaciones aumenta, tendiendo a permanecer constante a partir de las 1000 repeticiones. Este fenómeno fue considerado en el diseño del procedimiento de ensaye, el cual considera un ciclo de acondicionamiento de la muestra que comprende la aplicación de 1000 repeticiones, de un estado de esfuerzos determinado.

b) Condiciones físicas del suelo.

De acuerdo a los antecedentes recopilados la magnitud del módulo resiliente depende en forma significativa de las condiciones físicas en que se encuentre el suelo al momento del ensaye. Las condiciones físicas se encuentran representadas por la densidad seca y el contenido de humedad del suelo. La magnitud del módulo resiliente se relaciona en forma directa con la densidad seca y en forma inversa con el contenido de humedad.

3. DETERMINACIÓN DEL MÓDULO RESILIENTE EN LABORATORIO

El módulo resiliente en laboratorio se determina mediante el ensaye AASHTO T294-92I. Este ensaye consiste básicamente en aplicar un número determinado de repeticiones de un esfuerzo desviador dinámico (σ_d), sobre una probeta sometida previamente a una presión de confinamiento estática (σ_3), en una cámara de presión triaxial. Las secuencias de carga aplicar dependen del tipo de material a ensayar, y corresponden a las indicadas en la Tabla 3-1. El esfuerzo desviador corresponde a un pulso dinámico con las características indicadas en la Figura 3-1.

Tabla 3-1. Secuencias de ensaye.

Secuencia N°	Materiales Tipo 1		Materiales Tipo 2		N° de Aplicaciones
	(σ_3) (psi)	(σ_d) (psi)	(σ_3) (psi)	(σ_d) (psi)	
0	15	15	6	4	1000
1	3	3	6	2	100
2	3	6	6	4	100
3	3	9	6	6	100
4	5	5	6	8	100
5	5	10	6	10	100
6	5	15	3	2	100
7	10	10	3	4	100
8	10	20	3	6	100
9	10	30	3	8	100
10	15	10	3	10	100
11	15	15	0	2	100
12	15	30	0	4	100
13	20	15	0	6	100
14	20	20	0	8	100
15	20	40	0	10	100

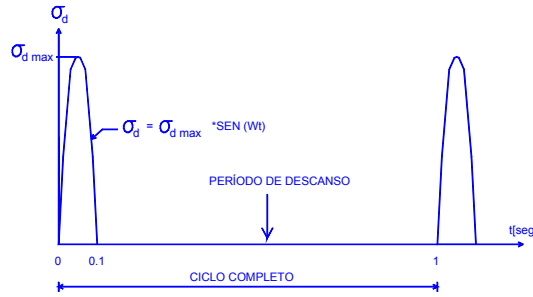


Figura 3-1. Esfuerzo desviador (AASHTO T294-92I).

Los materiales se clasifican en Tipo 1 y Tipo 2 de acuerdo a un criterio definido en la misma norma AASHTO T294-92I.

Durante el ensaye se miden y registran el esfuerzo desviador aplicado (σ_d) y la deformación recuperable de los últimos 5 ciclos de cada secuencia. Con estos datos se calcula el valor del módulo resiliente promedio de la secuencia, mediante la Ecuación (2-1). Como resultado de lo anterior se obtiene para cada secuencia de ensaye un conjunto de valores promedio de M_R , σ_d y σ_3 , que permiten determinar el comportamiento resiliente del material ensayado, a partir del ajuste de regresiones sobre los resultados obtenidos. El documento complementario de la guía AASHTO 1993 “Design Pamphelt for the Determination of Design Subgrade in Suport of the 1993 AASHTO Guide for the Design of Pavement Structures” [3], recomienda las siguientes 4 regresiones:

$$M_R = k_1 * (\sigma_b)^{k_2} \quad Ec.(3-1)$$

$$M_R = k_1 * (\sigma_d)^{k_2} \quad Ec.(3-2)$$

$$M_R = k_1 * (\sigma_d)^{k_2} * (1 + \sigma_3)^{k_3} \quad Ec(3-3)$$

$$M_R = k_1 * P_a * \left(\frac{\sigma_b}{P_a}\right)^{k_2} * \left(\frac{\sigma_d}{P_a}\right)^{k_3} \quad Ec(3-4)$$

El ajuste consiste en determinar los parámetros k_1 , k_2 y k_3 según corresponda, y el coeficiente de determinación R^2 , el cual debe ser igual o superior a 0.9, según el mismo documento anterior.

Es importante destacar que el resultado del ensaye de laboratorio se traduce en una función que describe el comportamiento del módulo resiliente del material ensayado en función del estado de esfuerzo aplicado, y por lo tanto no es valor particular.

4. DETERMINACIÓN DEL MÓDULO RESILIENTE MEDIANTE DEFLECTÓMETRO DE IMPACTO

4.1 Deflectómetro de Impacto.

En términos generales el Deflectómetro de Impacto es un equipo que mide las deformaciones verticales (cuenco de deflexiones) generadas por una carga de impacto aplicada sobre la superficie de un pavimento. Este equipo es capaz de aplicar una carga que modela, en forma adecuada, la magnitud y características dinámicas de las cargas que imponen los vehículos sobre los pavimentos y mide la respuesta de éstos en forma bastante precisa.

El equipo se encuentra constituido por cuatro sistemas principales; sistema de control, sistema de procesamiento, sistema de aplicación de cargas, y sistema de medición de cargas y deflexiones. Físicamente los dos primeros sistemas se encuentran instalados en un vehículo de arrastre y los otros dos en un remolque. La característica principal del Deflectómetro de Impacto radica en el sistema de aplicación de carga, ya que permite generar impulsos de carga que modelan en forma bastante aproximada tanto la magnitud como la duración de las cargas que imponen los vehículos al pavimento. En general, existen dos tipos de Deflectómetro de Impacto, que se distinguen principalmente por el rango de carga que son capaces de modelar, según los valores indicados en la siguiente tabla.

Tabla 4-1. Rango de cargas que aplica el Deflectómetro de Impacto.

Tipo de Equipo	Rango de Carga (kN)	Rango de Carga (Lbf)
Falling Weight Deflectometer (FWD)	7 - 120	1500 – 27000
Heavy Weight Deflectometer (HWD)	30 - 240	6000 – 54000

El sistema de medición de carga consiste en una celda de carga, de precisión, la cual registra la fuerza máxima aplicada sobre el plato de carga producto del impulso de carga aplicado. El sistema de medición de las deflexiones se compone de un conjunto de sensores, los cuales se colocan en la superficie del pavimento a fin de determinar el cuenco de deflexiones máximas provocado por el impulso de carga aplicado. La distribución y número de los sensores depende del estudio a realizar.

4.2 Retroanálisis de deflexiones

En términos generales el retroanálisis de deflexiones, consiste en determinar los valores de los módulos de las capas de un pavimento, que mejor modelan la forma y magnitud del cuenco de deflexiones medidas. Los módulos determinados de esta manera se consideran representativos de la respuesta estructural del pavimento.

Método de retroanálisis propuesto por AASHTO

Este método, permite determinar el módulo resiliente de la subrasante (M_r) y el módulo efectivo del pavimento (E_p), datos que pueden ser luego utilizados en la evaluación de la capacidad estructural del pavimento. En este método el pavimento se modela como un conjunto de dos

capas, una correspondiente a todas las capas sobre la subrasante y otra correspondiente a la subrasante. Para explicar el procedimiento de retroajuste modular propuesto por AASHTO nos apoyaremos en la siguiente figura:

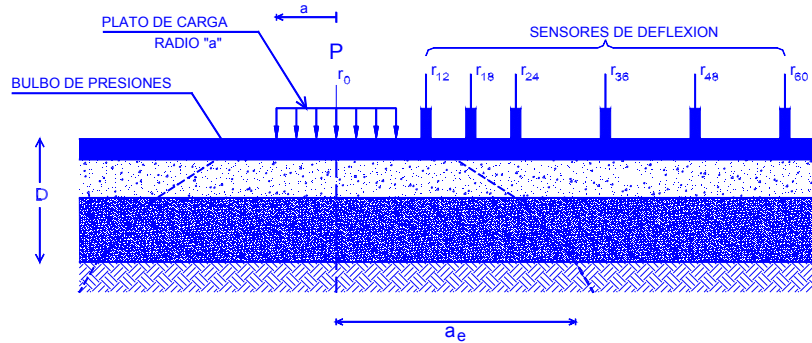


Figura 4-1. Esquema de medición de deflexiones con Deflectómetro de Impactos.

El Módulo Resiliente de la subrasante, se calcula usando la siguiente ecuación:

$$Mr = \frac{0.24P}{dr \cdot r} \quad Ec.(4-3)$$

Mr = Módulo resiliente de la subrasante, retrocalculado.

P = Carga aplicada.

dr = Deflexión a una distancia "r" desde el centro de carga.

r = Distancia desde el centro de carga.

El uso de la ecuación anterior su uso debe considerar las siguientes dos condiciones:

- En primer lugar, la deflexión debe ser medida a una distancia suficientemente alejada del plato de carga como para que esta deflexión se deba sólo a la deformación en la subrasante y sea independiente del efecto de las capas superiores, y además se pueda considerar la carga aplicada sobre el plato como una carga puntual que valide el uso de la ecuación anterior.
- Por otro lado, y en sentido contrario, la distancia no debe ser muy grande ya que las deflexiones podrían ser muy pequeñas y por lo tanto muy difíciles de medir con la exactitud necesaria.

La distancia mínima a utilizar en la ecuación (4-3), debe cumplir con la siguiente condición:

$$r \geq 0.7 \cdot ae \quad Inecuación(4-6)$$

donde

$$ae = \sqrt{a^2 + \left(D \sqrt{\frac{Ep}{Mr}} \right)^2} \quad Ec(4-7)$$

a_e = Radio del bulbo de presiones a nivel de subrasante.
 a = Radio del plato de carga.
 D = Espesor total del pavimento sobre la subrasante.
 E_p = Módulo efectivo del pavimento.

Como se puede apreciar, para verificar si la deflexión utilizada cumple con la distancia mínima se debe primero conocer el módulo efectivo del pavimento (E_p), el cual se debe determinar mediante la siguiente ecuación:

$$d_0 = 1.5 pa \left[\frac{1}{Mr \sqrt{1 + \left(\frac{D}{a} \sqrt{\frac{E_p}{Mr}} \right)^2}} + \frac{\left(1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{D}{a} \right)^2}} \right)}{E_p} \right] \quad \text{Ec. (4-4)}$$

donde:

d_0 = Deflexión máxima en el centro del plato de carga, ajustada a la temperatura normalizada de 20° C (60°F).
 p = Presión del plato de carga.
 a = Radio del plato de carga.
 D = Espesor total del pavimento sobre la subrasante.
 E_p = Módulo efectivo del pavimento.
 M_r = Módulo Resiliente de la subrasante.

El proceso antes descrito se puede automatizar mediante programas computacionales que siguen el proceso iterativo ilustrado en el diagrama de flujo contenido en la Figura 4-2.

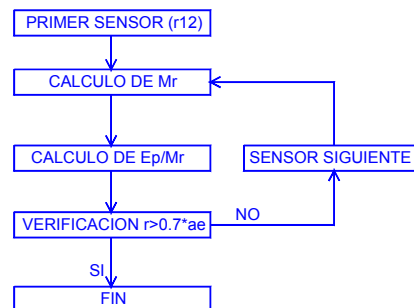


Figura 4-2. Algoritmo del método de retroanálisis propuesto AASHTO.

5. ESTUDIO EXPERIMENTAL

El estudio experimental consistió en comparar el módulo resiliente de subrasante obtenido mediante el Deflectómetro de Impacto y el obtenido en laboratorio. Para que los resultados fueran comparables los ensayos se realizaron sobre el suelo en condiciones físicas similares y bajo estados de esfuerzos equivalentes.

El estudio se realizó en el Camino Lo Orozco, Ruta F-50, V Región, camino que posee una estructura de pavimento asfáltica. Este estudio considero el siguiente trabajo en terreno y laboratorio:

- Medición de deflexiones en 12 puntos del camino, con Deflectómetro de Impacto tipo HWD modelo 8081 de Dynatest. En cada punto se aplicaron dos secuencias de carga, con niveles de carga de 6000, 9000, 12000 y 15000 Lbf. La disposición de los sensores utilizada para la medición del cuenco de deflexiones, fue de 0, 12, 18, 24, 36, 48 y 60 pulgadas, respecto del centro del plato de carga. Cabe destacar, que esta es la distribución que AASHTO recomienda para este tipo de ensayos. Una vez realizadas las mediciones de deflexión, se procedió al retroanálisis de éstas mediante el método propuesto por AASHTO, obteniendo de esta forma el módulo resiliente retrocalculado.
- Ejecución de 24 ensayos de módulo resiliente en laboratorio, dos por cada punto donde se midió deflexiones. Los ensayos se realizaron sobre muestras inalteradas, en condiciones representativas a las existentes en terreno, al momento de realizar las mediciones de deflexión, con el objetivo de que los resultados obtenidos, mediante ambos métodos, fueran comparables. La norma utilizada para la realización de los ensayos de módulo resiliente es la AASHTO T294-92I. Los ensayos fueron realizados en el Laboratorio Nacional de la Dirección de Vialidad del M.O.P.
- Ensayes para la caracterización de los suelos encontrados. Estos ensayos se realizaron en el Laboratorio Regional, V Región, de la Dirección de Vialidad del M.O.P.

5.1 Presentación de resultados

a) Caracterización de suelos

Tabla 5-1. Granulometría de suelos.

Tamiz		% que pasa											
NCh (mm)	ASTM (inch)	Pozo 1	Pozo 2	Pozo 3	Pozo 4	Pozo 5	Pozo 6	Pozo 7	Pozo 8	Pozo 9	Pozo 10	Pozo 11	Pozo 12
63	2 ½"	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
50	2"	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
40	1 ½"	-	100.0	-	-	-	-	100.0	-	-	-	-	-
25	1"	-	99.1	100.0	100.0	-	-	99.4	-	-	-	-	-
20	¾"	100.0	98.7	99.2	99.7	100.0	-	-	-	100.0	100.0	100.0	100.0
12.5	½"	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10	3/8"	99.8	98.0	97.2	98.8	99.9	100.0	98.5	100.0	99.7	99.9	99.9	99.7
5	Nº4	93.6	90.8	87.1	89.4	97.9	99.3	97.2	98.7	99.3	99.8	99.6	97.5
2.5	Nº8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	Nº10	77.4	65.5	67.2	66.2	80.7	79.0	80.6	77.4	87.3	92.2	92.4	75.6
1.25	Nº16	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0.63	Nº30	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0.5	Nº40	50.2	36.5	39.2	35.9	43.8	36.0	43.1	31.5	50.0	56.2	57.2	35.6
0.315	Nº50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0.16	Nº100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0.08	Nº200	23.8	16.4	16.2	13.6	18.7	13.5	19.6	10.1	32.1	24.3	25.1	15.7

Tabla 5-2. Ensayes para la caracterización de suelos y condiciones de terreno.

Pozo	Límite Líquido (%)	Límite Plástico (%)	Índice de Plasticidad (%)	Densidad en sitio (kg/m³)	Humedad natural (%)	DMCS (kg/m³)	Humedad óptima (%)	CBR (%)
------	--------------------	---------------------	---------------------------	---------------------------	---------------------	--------------	--------------------	---------

1	29	19	10	1880	9.0	2025	8.2	23
2	27	20	7	1962	5.7	2106	8.1	59
3	25	19	6	1931	5.7	2106	8.1	59
4	26	20	6	1774	5.6	2106	8.1	59
5	33	20	13	1850	8.1	2046	9.5	34
6	32	19	13	1903	9.6	2065	9.3	44
7	31	19	12	1929	7.3	2046	9.5	34
8	32	20	12	1919	9.5	2065	9.3	44
9	34	17	17	1904	10.2	2024	8.8	7
10	32	18	14	1822	7.4	2022	8.3	22
11	35	21	14	1833	5.9	2022	8.3	22
12	32	20	12	1818	7.4	2065	9.3	44

De acuerdo a los resultados de los ensayos anteriores los suelos se pueden clasificar como A-2-4 (pozos 1, 2, 3 y 4) y A-2-6 (pozos 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11 y 12).

b) Módulo resiliente retrocalculado de deflexiones medidas con HWD

Tabla 5-3. Módulo resiliente retrocalculado para una carga nominal de 9000 Lbf.

Punto	Carga Nominal (Lbf)	Carga medida (Lbf)	Módulo resiliente (Kgf/cm ²)
1	9000	9357	1520
2	9000	9706	2652
3	9000	9502	2479
4	9000	9364	673
5	9000	9253	1979
6	9000	10151	1469
7	9000	9364	1550
8	9000	9324	2080
9	9000	9200	2295
10	9000	9844	1214
11	9000	9483	1275
12	9000	9224	1173

La carga medida difiere de la carga nominal ya que depende de la rigidez del pavimento ensayado. En general los suelos clasificados como A-2-4 presenta módulos mayores que aquellos clasificados como A-2-6, excepto el suelo del pozo 4, que presentó una densidad en sitio bastante más baja que el resto. Ambos suelos corresponden a maicillos de V Región.

c) Módulo resiliente determinado en laboratorio

A los resultados obtenidos en laboratorio se ajustaron las cuatro regresiones indicadas en el Capítulo 3, resultando con un mejor ajuste la regresión (3-3). Los parámetros de ajuste y coeficientes de determinación son los siguientes.

Tabla 5-4. Parámetros de la regresión (3-3).

Pozo	Probeta	K ₁	K ₂	K ₃	R ²
1	1-A	2280.87	-0.27593	0.24821	0.81
	1-B	1968.79	-0.23511	0.27858	0.73
2	2-A	2134.52	-0.21094	0.30041	0.76
	2-B	1752.27	-0.18663	0.30225	0.78
3	3-A	1990.22	-0.21705	0.24629	0.87
	3-B	2138.95	-0.21256	0.28483	0.73
4	4-A	910.96	-0.19428	0.42883	0.83
	5-A	2604.95	-0.29363	0.25837	0.48

	5-B	2341.53	-0.24658	0.23887	0.54
6	6-A	1637.19	-0.16240	0.30382	0.58
	6-B	1615.10	-0.26524	0.35042	0.67
7	7-A	2339.91	-0.22063	0.23239	0.62
	7-B	1777.46	-0.19160	0.27647	0.31
8	8-A	2119.34	-0.33494	0.34589	0.75
	8-B	1676.87	-0.21929	0.30287	0.51
9	9-A	4161.98	-0.35921	0.12760	0.89
	9-B	3610.77	-0.26304	0.17295	0.64
10	10-A	976.11	-0.25417	0.40945	0.75
	10-B	1041.84	-0.19923	0.38739	0.77
11	11-A	1001.61	-0.21218	0.45890	0.73
	11-B	1395.40	-0.25118	0.38325	0.65
12	12-A	1992.51	-0.33257	0.31715	0.67
	12-B	749.20	-0.23312	0.50923	0.79

A modo ilustrativo, se presenta el comportamiento resiliente del material de la probeta 1-A. En rigor la regresión representa una superficie, por lo tanto, en el Gráfico 5-1, cada curva representa la intersección de un determinado plano σ_3 (esfuerzo de confinamiento) con dicha superficie.

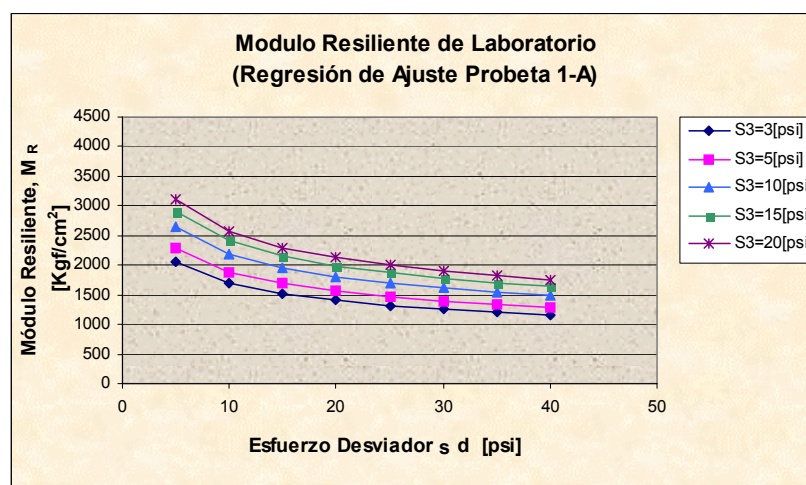


Figura 5-1. Comportamiento resiliente probeta 1-A.

Este comportamiento es similar al comportamiento de los suelos finos cohesivos, según la información contenida en el Capítulo 2 de este trabajo, es decir la magnitud del módulo resiliente depende en forma directa de la presión de confinamiento y en forma inversa del esfuerzo desviador. El comportamiento del resto de las probetas es similar, lo que se refleja en los signos de los parámetros de ajuste, que acompañan a las variables σ_3 y σ_d .

Condiciones de ensaye

En la Tabla 5-5, se muestran las condiciones de contenido de humedad y densidad seca, de cada una de las probetas al momento del ensaye. Además, se indica el nivel de compactación referido al 95% de la DMCS del material del pozo, desde donde se extrajeron las probetas respectivas.

Tabla 5-5. Condiciones de ensaye de probetas

Pozo	Probeta	Humedad (%)	Densidad Seca (Kg/m3)	Nivel de Compactación (%)
1	1-A	9.3	1845	91
	1-B	9.2	1878	93
2	2-A	5.9	1903	90
	2-B	5.8	1931	92
3	3-A	5.6	1902	90
	3-B	5.7	1959	93
4	4-A	5.2	1913	91
	4-B	5.7	1959	93
5	5-A	8.6	1976	97
	5-B	8.0	2029	99
6	6-A	7.8	1972	95
	6-B	9.0	1900	92
7	7-A	7.3	2052	100
	7-B	7.5	1967	96
8	8-A	9.4	1993	97
	8-B	9.3	2002	97
9	9-A	10.8	1983	98
	9-B	10.9	1959	97
10	10-A	7.5	1898	94
	10-B	7.4	1908	94
11	11-A	6.5	1943	96
	11-B	7.7	1945	96
12	12-A	7.6	1856	90
	12-B	7.4	1852	90

Según se aprecia en la tabla anterior las probetas de un mismo pozo presentan diferencias mínimas de contenidos de humedad y densidad seca, y además diferencias mínimas con las condiciones de terreno, reportadas en la Tabla 5-2.

5.2 Relación entre M_{RR} y M_{RL}

Debido a que el ensaye de laboratorio se traduce en una relación funcional y no en un valor único del módulo resiliente, el valor a utilizar en la comparación, corresponde a aquel asociado al estado de esfuerzos que la carga aplicada, en el ensaye con el HWD, genera en la subrasante. Este valor corresponde al denominado módulo resiliente en condiciones de servicio. El módulo retrocalculado a utilizar, corresponde al reportado en la Tabla 5-3.

La estructura de pavimento del camino se compone de 5 cm de concreto asfáltico, 15 cm de base CBR 100% y 15 cm de subbase CBR 40%. Para efectos de este estudio se ha considerado como capa de subrasante a aquellos 30 cm, compactados a un 95% de la DMCS.

La evaluación del módulo resiliente de servicio, se ha realizado para tres profundidades, 35, 65 y 85 cm, desde la cota de subrasante. Estas profundidades corresponden a la parte superior e inferior de la capa de subrasante antes definida y 50 cm bajo el nivel de subrasante.

Los estados de esfuerzos se han calculado mediante el programa EVERSTRS 4.0 y confirmados con ELSYM5M.

En las Tablas 5-6, 5-7 y 5-8 se reportan los módulo de servicio, para las profundidades consideradas.

Tabla 5-6. Módulo resiliente de laboratorio -H=35 cm

Pozo	Estado de Esfuerzos		Módulo resiliente(Kgf/cm ²)		M _R Promedio (kgf/cm ²)
	σ_3 (psi)	σ_d (psi)	Probeta A	Probeta B	
1	0.00	15.88	1063	1027	1045
2	0.00	17.17	1172	1031	1102
3	0.00	16.81	1079	1174	1126
8	0.00	16.32	832	D	832
9	0.00	14.42	1596	D	1596
10	0.00	16.63	478	595	536
11	0.00	16.04	556	D	556
12	0.00	16.16	D	392	392

D: Probeta descartada debido a que el coeficiente R2 es menor a 0.7.

Nota: Para H=35 cm, la resultante del esfuerzo de confinamiento resulta negativa, es decir, la subrasante resultaría traccionada, sin embargo se asume como nula, debido a que después de algunas repeticiones de carga, el suelo de subrasante de fisura y pierde la cohesión y por lo tanto no soporta tracción.

Tabla 5-7. Módulo resiliente de laboratorio -H=65 cm

Pozo	Estado de Esfuerzos		Módulo resiliente(Kgf/cm ²)		M _R Promedio (kgf/cm ²)
	σ_3 (psi)	σ_d (psi)	Probeta A	Probeta B	
1	0.32	6.74	1444	1358	1401
2	0.33	7.09	1537	1324	1430
3	0.33	6.96	1402	1537	1470
8	0.33	6.82	1231	D	1231
9	0.32	6.42	2211	D	2211
10	0.30	7.02	663	783	723
11	0.32	6.80	757	D	757
12	0.34	6.76	D	556	556

D: Probeta descartada debido a que el coeficiente R2 es menor a 0.7.

Tabla 5-8. Módulo resiliente de laboratorio - H=85 cm

Pozo	Estado de Esfuerzos		Módulo resiliente(Kgf/cm ²)		M _R Promedio (kgf/cm ²)
	σ_3 (psi)	σ_d (psi)	Probeta A	Probeta B	
1	0.64	4.94	1660	1552	1606
2	0.65	5.14	1756	1501	1628
3	0.65	5.07	1584	1748	1666
8	0.65	4.98	1472	D	1472
9	0.64	4.78	2527	D	2527
10	0.63	5.11	788	910	849
11	0.64	4.98	894	D	894
12	0.65	4.94	D	667	667

D: Probeta descartada debido a que el coeficiente R2 es menor a 0.7.

Según se pudo constatar, para H=85 cm, el bulbo de presiones generado por la carga aplicada en la superficie del pavimento, prácticamente ha perdido su efecto, alcanzando un esfuerzo vertical a dicha profundidad menor a un 4% de la presión de contacto en la superficie. En la Tabla 5-9, se presenta la razón $C=M_{RL}/M_{RR}$, para cada una de las profundidades analizadas.

Tabla 5-9. Valores de módulo resiliente retrocalculado y de laboratorio

Pozo	M_{RR} (Kgf/cm ²)	M_{RL} (Kgf/cm ²)			Razón $C=M_{RL}/M_{RR}$		
		H=35 cm	H=65 cm	H=85 cm	H=35 cm	H=65 cm	H=85 cm
1	1520	1045	1401	1606	0.69	0.92	1.06
2	2652	1102	1430	1628	0.42	0.54	0.61
3	2479	1126	1470	1666	0.45	0.59	0.67
8	2080	832	1231	1472	0.40	0.59	0.71
9	2295	1596	2211	2527	0.70	0.96	1.10
10	1214	536	723	849	0.44	0.60	0.70
11	1275	556	757	894	0.44	0.59	0.70
12	1173	392	556	667	0.33	0.47	0.57

Tabla 5-10. Factores de ajuste C, resultantes en el presente estudio

Modelo 1 Powell y Otros	Factor $C= M_{RL}/M_{RR}$		
	H=35 cm	H=65 cm	H=85 cm
Promedio	0.48	0.66	0.77
Desviación Estándar	0.13	0.18	0.20
Coefficiente de Variación	28%	27%	26%

Como se aprecia en las tablas anteriores, el factor de ajuste varía de manera significativa con la profundidad a la que se realice la evaluación de este. Esto debido a la que el módulo resiliente de servicio varía en función del estado de esfuerzo solicitante.

5.3 Análisis de resultados

- Los ensayos fueron realizados para condiciones físicas del suelo bastante similares y además para estados de esfuerzos equivalentes, por lo cual los valores de módulo resiliente determinados en laboratorio y mediante Deflectómetro de Impacto resultan comparables.
- Los factores de ajuste $C=M_{RL}/M_{RR}$, resultantes, dependen de manera significativa de la profundidad de evaluación del módulo resiliente de servicio. Es así como el factor C alcanza un valor promedio de 0.48 si el módulo de servicio se evalúa justo a nivel de subrasante, y alcanza un valor 0.66 si se evalúa 30 cm más abajo, lo que representa un aumento de alrededor de un 40%. Esto se debe a que el módulo resiliente de servicio depende del estado de esfuerzos generado por la carga aplicada en la superficie, el que a su vez varía con la profundidad. En este sentido la profundidad de evaluación adquiere una importancia determinante sobre el factor de ajuste.
- La evaluación a 50 cm bajo el nivel de subrasante como sugiere AASHTO [2], arroja un factor de ajuste igual a 0.77 que representa un aumento de 60% respecto del valor obtenido a 30 cm bajo la rasante del camino.

5.4 Factor de ajuste propuesto

Para efectos de proponer un factor de ajuste se hace necesario adoptar un criterio sobre la profundidad a la cual se evalúe el módulo resiliente de servicio y consecuentemente el factor de ajuste. Esto implica decidir sobre cual es el módulo resiliente representativo de la capa de subrasante o aquel que influye de manera más significativa sobre el comportamiento del pavimento. En este sentido se ha optado por un criterio similar al incluido en el método de diseño de pavimentos flexibles propuesto por SHELL. Este método considera como sección crítica de la capa de subrasante la parte superior de ésta, que es la sección en que se generan los esfuerzos mayores, y por lo tanto las mayores deformaciones. Incluso este método considera limitar los esfuerzos generados a nivel de subrasante con el fin de acotar a su vez la deformación permanente acumulada al final de la vida útil del pavimento.

En la Tabla 5-11 se incluye el factor de ajuste resultante del presente estudio para una profundidad de evaluación de 35 cm bajo el nivel de rasante, con los índices estadísticos asociados.

Tabla 5-11. Factores de ajuste resultantes en este estudio.

Modelo	Factor C Promedio	Desviación Estándar	Coefficiente de Variación (%)
Powell y Otros	0.48	0.13	28%

En base a los resultados obtenidos se propone un factor de ajuste $C=0.45$ para los suelos y estructura de pavimento asfáltico, considerados en este estudio. En este sentido, para estimar el módulo resiliente de laboratorio a partir del módulo retrocalculado de deflexiones medidas con el HWD, se propone la siguiente relación:

$$M_{RL} = 0.45 * M_{RR}$$

Este factor de ajuste incorpora el concepto de seguridad en el diseño al elegir la sección crítica de la capa de subrasante, para su evaluación.

Es importante mencionar que el criterio adoptado difiere del procedimiento definido en el documento “Design Pamphelt for the Determination of Design Subgrade in Support of the 1993 AASHTO Guide for the Design of Pavemente Structures”[3], que indica como habitual evaluar el módulo resiliente de servicio a una profundidad de 50 cm bajo el nivel de subrasante. Sin embargo como se ha indicado anteriormente evaluar a esta profundidad significaría sobre estimar la capacidad de soporte de la subrasante. Además cabe consignar que no se argumenta la decisión de elegir la profundidad de evaluación antes indicada. De haber evaluado según este criterio el factor obtenido hubiera alcanzado un valor $C=0.77$.

6. CONCLUSIONES

6.1 Conclusiones generales

- El módulo resiliente depende del estado de esfuerzos a que es sometido el suelo en condiciones de servicio o durante el ensaye en laboratorio, y de las condiciones físicas en que este se encuentre, principalmente del contenido de humedad y de la densidad seca.
- Para el ensaye de módulo resiliente en laboratorio AASHTO recomienda el procedimiento descrito en la norma AASHTO T294-92I. El resultado final de este ensaye corresponde al ajuste de una regresión que relaciona la magnitud del módulo resiliente con el estado de esfuerzos solicitante. En este sentido el módulo resiliente determinado en laboratorio no es un valor único sino una relación funcional como la antes descrita.
- El módulo resiliente determinado a partir de la medición de deflexiones se denomina módulo resiliente retrocalculado y el proceso mediante el cual se determina se denomina retroanálisis de deflexiones.

6.2 Conclusiones del estudio experimental

- El comportamiento de los suelos ensayados en laboratorio es similar al de los suelos finos cohesivos, es decir la magnitud del módulo resiliente aumenta en la medida que el esfuerzo de confinamiento aumenta y la magnitud disminuye en la medida que aumenta el esfuerzo desviador.
- El factor de ajuste depende de manera significativa de la profundidad a la que se realice la evaluación del módulo resiliente de laboratorio en condiciones de servicio. En este sentido la elección de la profundidad de evaluación se torna determinante. En este estudio se ha optado por evaluar el factor de ajuste a nivel de subrasante, debido a que a este nivel se producen los mayores esfuerzos, generados por la carga aplicada en la superficie, y en consecuencia las mayores deformaciones, que condicionan el comportamiento del pavimento y su serviciabilidad. Además, considerar como profundidad de evaluación del factor de ajuste, el nivel de subrasante, se traduce en agregar un margen de seguridad en la verificación del diseño a través del criterio de falla por fatiga
- El factor de ajuste propuesto corresponde a $C=0.45$, cercano al recomendado por AASHTO $C=0.35$. Cabe mencionar que se ha seguido en forma rigurosa el procedimiento recomendado por AASHTO para obtener el factor de ajuste, no obstante en lo que se refiere a la profundidad de evaluación se ha optado por un criterio propio.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- [1] AASHTO, “Guide for Design of Pavement Structures 1993”, 1993.
- [2] Dynatest Consulting, Inc. “The Dynatest Model 8081, Heavy Weigh Deflectometer Test Sistem, Especifications”, 1994.
- [3] FHWA, “Design Pamphelt for the Determination of Design Subgrade in Support of the 1993 AASHTO Guide for the Design of Pavemente Structures”, 1997.
- [4] Gazitúa F., “Módulos Resilientes, comparación de determinaciones en laboratorio y terreno”. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil Universidad de Chile, 1999.
- [5] Grez P., “Comparación Módulo Resiliente, determinaciones en terreno y laboratorio”. Memoria para optar al título de Constructor Civil Universidad Técnica Federico Santa María, 2000.
- [6] Strategic Highway Research Program (SHRP), “Resiliente Modulus of Unbound Granular Base/Subbase Materials and Subgrade Soils”- Protocol P46 – AASHTO Designation T294-92I, 1992.