



UNIVERSIDAD DE CUENCA
Fundada en 1867

Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Civil
Av. 12 de Abril s/n, Cuenca

Título

Análisis de sensibilidad de parámetros en el diseño de pavimentos rígidos por los métodos de la AASHTO y PCA.

Director:
Ing. Jaime Asdrúbal Bojorque
Iñiguez., PhD
C.I:0102857885

Tesis previa a la
obtención del título
de Ingeniero Civil

Autores:
CABRERA ILLESCAS ABEL BERNARDO
C.I: 0104089164
URGILES PARRA DIANA DEL ROCIO
C.I: 0105759450

Cuenca - Ecuador
28 de Marzo de 2017

© Universidad de Cuenca – Facultad de Ingeniería
Av. 12 de Abril s/n, Cuenca (Ecuador)

Todos los Derechos Reservados.

RESUMEN

ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE PARÁMETROS EN EL DISEÑO DE PAVIMENTOS RÍGIDOS POR LOS MÉTODOS DE LA AASHTO Y PCA

En el presente trabajo de investigación se ha programado los métodos de PCA (Portland Cement Association) y AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials) para el diseño de pavimentos rígidos en el programa Matlab, con el fin de analizar los parámetros de influencia en cada método, encontrando el espesor que optimice el diseño y entender los parámetros más relevantes en cada método. Se presenta una introducción a los conceptos básicos del diseño de los pavimentos rígidos, así como el análisis estadístico de los resultados obtenidos a partir de la variación de los parámetros.

Una herramienta computacional permite realizar análisis comparativo frente a los diferentes parámetros, como: materiales, tráfico, periodo de diseño, factores de seguridad, entre otros, para que de esta manera, se elija la solución más adecuada con un grado de confiabilidad determinado.

Del análisis estadístico, se implementó el método experimental no lineal, este método identifica las relaciones entre las variables a partir del grupo de datos experimentales, y proporcionó modelos de ecuaciones cuadráticas con coeficientes de correlación mayores a 0.98 para los dos métodos, indicando, adicionalmente los parámetros significativos. Se determinó que el módulo de reacción de la subrasante es el parámetro con mayor influencia y el de menor influencia es la tasa de crecimiento vehicular para el método de la PCA. En el caso del método de la AASHTO, el parámetro más influyente es el coeficiente de transferencia de carga, mientras el espesor de la subbase es el menos influyente.

Palabras clave: pavimento rígido, herramienta computacional, análisis estadístico, Matlab, PCA, AASHTO.

ABSTRACT

SENSITIVITY ANALYSIS OF PARAMETERS IN THE DESIGN OF RIGID PAVEMENTS BY THE METHODS OF AASHTO AND PCA

In the present work of investigation, it has been programmed the methods of PCA (Portland Cement Association) and AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials) for the design of rigid pavements in the Matlab Software, in order to analyze the parameters of influence in each method, finding the thickness that optimizes the design and to understand the most relevant parameters in each method. It's presented an introduction to the basic concepts of rigid pavement design, as well as the statistical analysis of the results obtained from the variation of the parameters.

A computational tool permit to perform comparative analysis against the different parameters, such as: materials, traffic, design period, safety factors, and others. In this way, the most appropriate solution is chosen with a certain degree of reliability.

From the statistical analysis, the nonlinear experimental method was implemented, this method identifies the relationships between the variables from the experimental data group, and provided models of quadratic equations with correlation coefficients greater than 0.98 for the two methods, indicating the significant parameters. It was determined that the subgrade reaction modulus is the parameter with the greatest influence and the least influence is the rate of vehicle growth for the PCA method. In the case of the AASHTO method the most influential parameter is the load transfer coefficient, while the thickness of the subbase is the least influential.

Keywords: rigid pavement, computational tool, statistical analysis, Matlab, PCA, AASHTO.

CONTENIDO

Resumen	I
Abstract	III
Contenido	V
Índice de figuras	IX
Índice de tablas	XIII
Declaración	XVI
Agradecimiento	XXIII
Lista de Símbolos	XXV
1 Introducción	1
1.1 Antecedentes	2
1.2 Alcance	2
1.3 Justificación	2
1.4 Objetivos	3
1.4.1 General	3
1.4.2 Específicos	3
1.5 Metodología	3
1.6 Sumario	4



2	Marco Teórico	5
2.1	Método de PCA	5
2.1.1	Criterios de diseño	6
2.1.2	Factores de diseño	7
2.1.3	Procedimiento de diseño	12
2.2	Método AASHTO-93	19
2.2.1	VARIABLES de diseño	19
2.2.2	Propiedades de los materiales	24
2.2.3	Características estructurales	25
2.2.4	Metodología	28
2.3	Desarrollo del método de PCA y AASHTO en Matlab.	29
2.3.1	Desarrollo del método de la PCA	30
2.3.2	Desarrollo del método de la AASHTO.	38
3	Análisis Estadístico	57
3.1	Análisis del método de la PCA	57
3.1.1	Selección de los parámetros de entrada más influyentes para la estructura del pavimento y determinación de sus rangos.	58
3.1.2	Realización de la codificación de las matrices de análisis	59
3.1.3	Aplicación del método experimental no lineal en la matriz codificada	59
3.1.4	Selección del modelo matemático apropiado para la predicción del espesor (h)	60
3.1.5	Identificación de los factores más importantes a partir del gráfico de Pareto	69
3.1.6	Análisis del comportamiento del espesor del pavimento	78
3.1.7	Verificación de los modelos propuestos	86
3.1.8	Análisis complementario	88
3.2	Análisis del método de la AASHTO	89
3.2.1	Selección de los parámetros de entrada más influyentes para la estructura del pavimento	89
3.2.2	Determinación de los intervalos de los parámetros de entrada	89
3.2.3	Codificación de las matrices de análisis	89
3.2.4	Aplicación del método experimental no lineal en la matriz codificada	89
3.2.5	Selección del modelo matemático apropiado para la predicción del espesor	91
3.2.6	Identificación de los factores más importantes a partir del gráfico de Pareto	92



3.2.7	Análisis del comportamiento del espesor del pavimento	96
3.2.8	Verificación de los modelos propuestos	100
3.2.9	Análisis complementario	101
4	Conclusiones, recomendaciones y futuras líneas de investigación	105
4.1	Conclusiones	105
4.1.1	Conclusiones para el método de la PCA	106
4.1.2	Conclusiones para el método de la AASHTO	109
4.2	Recomendaciones	111
4.3	Futuras líneas de investigación	112
	Referencias	115
	Anexos	I
I	Análisis de sensibilidad de parámetros en el diseño de pavimentos rígidos por los métodos de la AASHTO y PCA.	I
I.1	Análisis del método de la PCA	I
I.2	Líneas de código de Matlab para el método de la PCA	XI
I.3	Líneas de código de Matlab para el método de la AASHTO	XXVII
I.4	Líneas de código de Matlab del análisis estadístico del método de la PCA	XXXIX
I.5	Líneas de código de Matlab del análisis estadístico del método de la AASHTO	LIII
I.6	Resultado de la función RESULT_PCA en formato texto	LIX
I.7	Resultado de la función RESULT_AASHTO en formato texto	LXV

ÍNDICE DE FIGURAS

2.1	Tipos de pavimento rígido [12].	6
2.2	Factor carril (FL) [13].	10
2.3	Nomograma para determinar el módulo de reacción de la subrasante [16].	29
2.4	División de funciones del programa PCA.	30
2.5	Gráfico de resultados de la función FIG_PCA.	35
2.6	Resultados generados por la función FIG_PCA del ejemplo de aplicación.	38
2.7	Funciones del programa AASHTO en Matlab.	39
2.8	Obtención del “Y” equivalente de la Figura 2.10 para el cálculo del Kcomp.	42
2.9	Obtención del “X” equivalente de la Figura 2.10 para el cálculo del Kcomp.	43
2.10	Módulos de reacción compuestos de la subrasante Kcomp (pci)(Asumiendo una profundidad al estrato firme semi infinita).	44
2.11	Curva para profundidad al estrato firme de 2 pies.	45
2.12	Curva para profundidad al estrato firme de 5 pies.	45
2.13	Curva para profundidad al estrato firme de 10 pies.	46
2.14	Modificación del módulo de reacción de la subrasante considerando efectos por proximidad al estrato firme (dentro de los 10 pies).	47
2.15	Obtención del daño relativo para una aproximación inicial del espesor de la losa del pavimento de 6 pulgadas.	48
2.16	Obtención del daño relativo para una aproximación inicial del espesor de la losa del pavimento de 7 pulgadas.	48
2.17	Obtención del daño relativo para una aproximación inicial del espesor de la losa del pavimento de 8 pulgadas.	49
2.18	Obtención del daño relativo para una aproximación inicial del espesor de la losa del pavimento de 9 pulgadas.	49



2.19	Obtención del daño relativo para una aproximación inicial del espesor de la losa del pavimento de 10 pulgadas.	50
2.20	Obtención del daño relativo para una aproximación inicial del espesor de la losa del pavimento de 12 pulgadas.	50
2.21	Obtención del daño relativo para una aproximación inicial del espesor de la losa del pavimento de 14 pulgadas.	51
2.22	Corrección del módulo de reacción efectivo de la subrasante para una pérdida de soporte igual a 1.	52
2.23	Corrección del módulo de reacción efectivo de la subrasante para una pérdida de soporte igual a 3.	52
2.24	Corrección del módulo de reacción efectivo de la subrasante para una pérdida de soporte igual a 2.	53
3.1	Pavimento rígido con berma [17].	62
3.2	Pavimento rígido sin berma [17].	63
3.3	Pavimento rígido con pasador [2].	64
3.4	Pavimento rígido sin pasador [3].	65
3.5	Gráfico de Pareto para pavimento rígido con subbase granular, con bermas y con pasadores.	69
3.6	Gráfico de Pareto para pavimento rígido con subbase granular, con bermas y sin pasadores.	70
3.7	Gráfico de Pareto para pavimento rígido con subbase granular, sin bermas y con pasadores.	71
3.8	Gráfico de Pareto para pavimento rígido con subbase granular, sin bermas y sin pasadores.	72
3.9	3 Gráfico de Pareto para pavimento rígido con subbase cementada, con bermas y con pasadores.	73
3.10	Gráfico de Pareto para pavimento rígido con subbase cementada, con bermas y sin pasadores.	74
3.11	Gráfico de Pareto para pavimento rígido con subbase cementada, sin bermas y con pasadores.	75
3.12	Gráfico de Pareto para pavimento rígido con subbase cementada, sin bermas y sin pasadores.	76
3.13	Efecto del periodo de diseño (n) sobre el espesor (h) para subbase granular, $h=f(n)$, donde $r=3.5\%$, $MR=555$ psi, $Mr=55$ MPa/m, $D_s=203$ mm.	78
3.14	Efecto del periodo de diseño (n) sobre el espesor (h) para subbase cementada, $h=f(n)$, donde $r=3.5\%$, $MR=555$ psi, $Mr=55$ MPa/m, $D_s=203$ mm.	79



3.15 Efecto de la tasa de crecimiento vehicular (r) sobre el espesor (h) para subbase granular, $h=f(r)$, donde $n=20$ años, $MR=555$ psi, $Mr=55$ MPa/m, $Ds=203$ mm.	80
3.16 Efecto de la tasa de crecimiento vehicular (r) sobre el espesor (h) para subbase cementada, $h=f(r)$, donde $n=20$ años, $MR=555$ psi, $Mr=55$ MPa/m, $Ds=203$ mm.	80
3.17 Efecto del módulo de rotura (MR) sobre el espesor (h) para subbase granular, $h=f(MR)$, donde $n=20$ años, $r=3.5\%$, $Mr=55$ MPa/m, $Ds=203$ mm.	82
3.18 Efecto del módulo de rotura (MR) sobre el espesor (h) para subbase cementada, $h=f(MR)$, donde $n=20$ años, $r=3.5\%$, $Mr=55$ MPa/m, $Ds=203$ mm.	82
3.19 Efecto del módulo de reacción de la subrasante (Mr) sobre el espesor (h) para subbase granular, $h=f(Mr)$, donde $n=20$ años, $r=3.5\%$, $MR=555$ psi, $Ds=203$ mm.	83
3.20 Efecto del módulo de reacción de la subrasante (Mr) sobre el espesor (h) para subbase cementada, $h=f(Mr)$ donde $n=20$ años, $r=3.5\%$, $MR=555$ psi, $Ds=203$ mm.	84
3.21 Efecto del espesor de la subbase (Ds) sobre el espesor (h) para subbase granular, $h=f(Ds)$, donde $n=20$ años, $r=3.5\%$, $MR=555$ psi, $Mr=55$ MPa/m.	85
3.22 Efecto del espesor de la subbase (Ds) sobre el espesor (h) para subbase cementada, $h=f(Ds)$, donde $n=20$ años, $r=3.5\%$, $MR=555$ psi, $Mr=55$ MPa/m.	85
3.23 Comparación de los valores del espesor (h) determinado por el método de la PCA y los valores calculados por el modelo matemático para un pavimento rígido con subbase granular con berma y con pasador.	87
3.24 Gráfico de Pareto para el método de la AASHTO.	93
3.25 Efecto de la confiabilidad sobre el espesor D , $D=f(\text{confiabilidad})$, donde $H1=7$ pulg, $H2=3$ pulg, $n=26$ años, $Cd=1.2$, $J=2.5$, $Ls=0$ y $So=0.34$	96
3.26 Efecto del espesor de la subbase sobre el espesor D , $D=f(H1)$, donde confiabilidad= 63% , $H2=3$ pies, $n=26$ años, $Cd=1.2$, $J=2.5$, $Ls=0$ y $So=0.34$	97
3.27 Efecto de la profundidad al estrato firme sobre el espesor D , $D=f(H2)$, donde confiabilidad= 63% , $H1=7$ pulg, $n=26$ años, $Cd=1.2$, $J=2.5$, $Ls=0$ y $So=0.34$	97
3.28 Efecto del coeficiente de drenaje sobre el espesor D , $D=f(Cd)$, donde confiabilidad= 63% , $H1=7$ pulg, $H2=3$ pulg, $n=26$ años, $J=2.5$, $Ls=0$ y $So=0.34$	98
3.29 Efecto del coeficiente de transferencia de carga sobre el espesor D , $D=f(J)$, donde confiabilidad= 63% , $H1=7$ pulg, $H2=3$ pulg, $n=26$ años, $Cd=1.2$, $Ls=0$ y $So=0.34$	98



3.30 Efecto de La pérdida de soporte sobre el espesor D , $D=f(Ls)$, donde confiabilidad=63 % , $H1=7$ pulg, $H2=3$ pulg, $n=26$ años, $Cd=1.2$, $J=2.5$ y $So=0.34$ 99

3.31 Efecto del periodo de diseño estructural sobre el espesor D , $D=f(n)$, donde confiabilidad=63 %, $H1=7$ pulg, $H2=3$ pulg, $Cd=1.2$, $J=2.5$, $Ls=0$, $So=0.34$. 99

3.32 Efecto individual de la desviación estándar sobre el espesor D , $D=f(So)$, donde confiabilidad=63 %, $H1=7$ pulg, $H2=3$ pulg, $n=26$ años, $Cd=1.2$, $J=2.5$ y $Ls=0$ 100

3.33 Comprobación de los valores del espesor (D) determinamos por el método de la AASHTO y los valores calculados por el modelo matemático con un coeficiente de ajuste de $R^2=0.997$ 101

I.1 Comparación de los valores del espesor (h) determinado por el método de la PCA y los valores calculados por el modelo matemático para un pavimento rígido con subbase granular con berma y sin pasador V

I.2 Comparación de los valores del espesor (h) determinado por el método de la PCA y los valores calculados por el modelo matemático para un pavimento rígido con subbase granular sin berma y con pasador VI

I.3 Comparación de los valores del espesor (h) determinado por el método de la PCA y los valores calculados por el modelo matemático para un pavimento rígido con subbase granular sin berma y sin pasador VII

I.4 Comparación de los valores del espesor (h) determinado por el método de la PCA y los valores calculados por el modelo matemático para un pavimento rígido con subbase cementada con berma y con pasador VIII

I.5 Comparación de los valores del espesor (h) determinado por el método de la PCA y los valores calculados por el modelo matemático para un pavimento rígido con subbase cementada con berma y sin pasador IX

I.6 Comparación de los valores del espesor (h) determinado por el método de la PCA y los valores calculados por el modelo matemático para un pavimento rígido con subbase cementada sin berma y con pasador X

I.7 Comparación de los valores del espesor (h) determinado por el método de la PCA y los valores calculados por el modelo matemático para un pavimento rígido con subbase cementada sin berma y sin pasador XI

ÍNDICE DE TABLAS

2.1	Incremento del valor k según el espesor de la subbase granular [13].	8
2.2	Incremento del valor k según el espesor de la subbase tratada con cemento [13].	8
2.3	Factor de dirección según el número de carriles [13].	9
2.4	Categorías de carga por eje [13].	11
2.5	Factor de seguridad a partir del tipo de tránsito [13].	11
2.6	Cálculo del espesor del pavimento [13].	13
2.7	Periodo de análisis recomendado [5].	20
2.8	Factor de distribución por carril [5].	22
2.9	Factores de la confiabilidad [18].	22
2.10	Valores para la desviación estándar [5].	23
2.11	Índice de serviciabilidad final [18].	24
2.12	Valores recomendados del coeficiente de drenaje (Cd) [15].	26
2.13	Coeficiente de transferencia de carga J [15].	27
2.14	Valores de la Pérdida de Soporte [15].	28
2.15	Consideraciones para el trabajo de investigación.	31
2.16	Carga por eje y eje por cada 1000 vehículos [19].	31
2.17	Valores utilizados para las iteraciones en una subbase granular [13].	32
2.18	Valores utilizados para las iteraciones en una subbase cementada [13].	32
2.19	Valores del módulo de rotura para las iteraciones [13].	32
2.20	Resultados de una iteración del Método de PCA.	37
2.21	Rangos para los diferentes parámetros a iterar.	39
2.22	Módulos Resilientes y Módulos de Elasticidad [16].	40



2.23	Datos tomados del ejemplo de aplicación para el método de estimación del módulo de reacción efectivo de la subrasante [16].	41
2.24	Resultados del cálculo del módulo de reacción efectivo.	54
3.1	Desarrollo codificado y su importancia estadística para matriz codificada de una subbase granular con berma y con pasadores, $R^2=0.999$	60
3.2	Desarrollo un modelo matemático y su importancia estadística para una subbase granular con berma y con pasadores, $R^2 =0.999$	61
3.3	Desarrollo un modelo matemático y su importancia estadística para una subbase granular con bermas y sin pasadores, $R^2 =0.991$	62
3.4	Desarrollo un modelo matemático y su importancia estadística para una subbase granular sin bermas y con pasadores, $R^2=0.999$	63
3.5	Desarrollo un modelo matemático y su importancia estadística para una subbase granular sin bermas y sin pasadores, $R^2=0.988$	64
3.6	Desarrollo del modelo matemático y su importancia estadística para una subbase cementada con bermas y con pasadores, $R^2 =0.997$	65
3.7	Desarrollo del modelo matemático y su importancia estadística para una subbase cementada con bermas y sin pasadores, $R^2 =0.984$	66
3.8	Desarrollo del modelo matemático y su importancia estadística para una subbase cementada sin bermas y con pasadores, $R^2 =0.991$	67
3.9	Desarrollo del modelo matemático y su importancia estadística para una subbase cementada sin bermas y sin pasadores, $R^2 =0.987$	68
3.10	Número de términos para cada uno de los casos de estudio, después del proceso de eliminación estadística.	68
3.11	Tabla comparativa de los espesores del pavimento rígido a partir de una variación de la tasa anual de crecimiento de tránsito para un pavimento granular sin berma y sin pasador.	81
3.12	Propiedades aleatorias para un pavimento rígido con subbase granular con berma y con pasador.	86
3.13	Coefficiente de correlación de cada análisis de comparación de los valores del espesor (h) determinado por el método de la PCA y los calculados por el modelo matemático.	87
3.14	Combinación de parámetros para el máximo y mínimo valor del espesor de la losa del pavimento.	88
3.15	Modelo matemático y su importancia estadística para la matriz codificada, $R^2=0.997$	90
3.16	Modelo matemático y su importancia estadística para la matriz real, $R^2=0.998$	92
3.17	Parámetros de entrada para la obtención del espesor de la losa del pavimento por el método de la AASHTO y el modelo matemático.	101



3.18	Combinación de parámetros para el máximo y mínimo valor del espesor de la losa del método de la AASHTO.	102
I.1	Desarrollo del modelo matemático y su importancia estadística para matriz codificada de una subbase granular con berma y sin pasadores, $R^2=0.991$. . .	I
I.2	Desarrollo del modelo matemático y su importancia estadística para matriz codificada de una subbase granular sin berma y con pasadores, $R^2=0.999$. . .	II
I.3	Desarrollo del modelo matemático y su importancia estadística para matriz codificada de una subbase granular sin berma y sin pasadores, $R^2=0.988$. . .	II
I.4	Desarrollo del modelo matemático y su importancia estadística para matriz codificada de una subbase cementada con berma y con pasadores, $R^2=0.997$. . .	III
I.5	Desarrollo del modelo matemático y su importancia estadística para matriz codificada de una subbase cementada con berma y sin pasadores, $R^2=0.984$. . .	III
I.6	Desarrollo del modelo matemático y su importancia estadística para matriz codificada de una subbase granular sin berma y con pasadores, $R^2=0.991$. . .	IV
I.7	Desarrollo del modelo matemático y su importancia estadística para matriz codificada de una subbase cementada sin berma y sin pasadores, $R^2=0.987$. . .	IV
I.8	Propiedades aleatorias para un pavimento rígido con subbase granular con berma y sin pasador.	V
I.9	Propiedades aleatorias para un pavimento rígido con subbase granular sin berma y con pasador	VI
I.10	Propiedades aleatorias para un pavimento rígido con subbase granular sin berma y sin pasador	VII
I.11	Propiedades para un pavimento rígido con subbase cementada con berma y con pasador	VIII
I.12	Propiedades para un pavimento rígido con subbase cementada con berma y sin pasador	IX
I.13	Propiedades para un pavimento rígido con subbase cementada sin berma y con pasador	X
I.14	Propiedades para un pavimento rígido con subbase cementada sin berma y sin pasador	XI

DECLARACIÓN



Universidad de Cuenca
Cláusula de propiedad intelectual

CABRERA ILLESCAS ABEL BERNARDO, autor del Trabajo de Titulación “Análisis de sensibilidad de parámetros en el diseño de pavimentos rígidos por los métodos de la AASHTO y PCA.”, certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor.

Cuenca, 28 de Marzo de 2017

A handwritten signature in blue ink that reads "Abel Illescas".

CABRERA ILLESCAS ABEL BERNARDO

C.I: 0104089164



Universidad de Cuenca
Cláusula de derechos de autor

CABRERA ILLESCAS ABEL BERNARDO, autor del trabajo de Titulación "Análisis de sensibilidad de parámetros en el diseño de pavimentos rígidos por los métodos de la AASHTO y PCA.", reconoce y acepta el derecho de la Universidad de Cuenca, en base al Art. 5 literal c) de su Reglamento de Propiedad Intelectual, de publicar este trabajo por cualquier medio conocido o por conocer, al ser requisito para la obtención de mi título de Ingeniero Civil. El uso que la Universidad de Cuenca hiciere de este trabajo, no implicará afección alguna de mis derechos morales o patrimoniales como autor.

Cuenca, 28 de Marzo de 2017

CABRERA ILLESCAS ABEL BERNARDO

C.I: 0104089164



Universidad de Cuenca
Cláusula de propiedad intelectual

URGILES PARRA DIANA DEL ROCIO, autora del Trabajo de Titulación "Análisis de sensibilidad de parámetros en el diseño de pavimentos rígidos por los métodos de la AASHTO y PCA.", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor.

Cuenca, 28 de Marzo de 2017



URGILES PARRA DIANA DEL ROCIO

C.I: 0105759450



Universidad de Cuenca
Cláusula de derechos de autor

URGILES PARRA DIANA DEL ROCIO, autor del trabajo de Titulación "Análisis de sensibilidad de parámetros en el diseño de pavimentos rígidos por los métodos de la AASHTO y PCA.", reconoce y acepta el derecho de la Universidad de Cuenca, en base al Art. 5 literal c) de su Reglamento de Propiedad Intelectual, de publicar este trabajo por cualquier medio conocido o por conocer, al ser requisito para la obtención de mi título de Ingeniero Civil. El uso que la Universidad de Cuenca hiciera de este trabajo, no implicará afección alguna de mis derechos morales o patrimoniales como autor.

Cuenca, 28 de Marzo de 2017

URGILES PARRA DIANA DEL ROCIO

C.I: 0105759450

“A partir de cierto punto no hay retorno. Ese es el punto que hay que alcanzar.”

– Franz Kafka

AGRADECIMIENTO

Abel.

De manera muy especial, quiero agradecer a Dios y a mi familia, a mis hermanos a los que veo como una referencia y un ejemplo a seguir, a mis padres que siempre me han presionado y han intentado sacar lo mejor de mí, pues, si no fuera por ellos no estaría donde estoy, y a todos aquellos que siempre se preocupan y quieren lo mejor para mí, a mis abuelitos Gonzalito y Yolita que siempre lo llevo en mi mente y en mi corazón. Y claro que también a Diana, a mi corazón, a mi amor, a mi compañera, que siempre será lo mejor que me pudo haber pasado en la vida. Finalmente, quiero dedicarle nuestra tesis a mi querido tío Enrique, que siempre sera para mi un gran ejemplo de trabajo duro, esfuerzo y sacrificio en la vida.

Diana.

A todos aquellos que estuvieron presentes a lo largo de este camino, a Dios, a mis padres que siempre han sido incondicionales, olvidando sus propios intereses por ver lo mejor para mí, a mi hermana y mi familia que con cada consejo han hecho de mi una persona mejor, y aun más a Abel, pues somos un gran equipo, hemos creado un presente, y no dudo que un futuro. Y como olvidar a Poli, los quiero.

De manera especial, queremos agradecer al Ing Jaime Bojorque al ser un guía y mentor en este proceso de aprendizaje, brindandonos sus conocimientos de manera desinteresada.

GRACIAS!

CABRERA ILLESCAS ABEL BERNARDO,
URGILES PARRA DIANA DEL ROCIO,
Cuenca, 28 de Marzo de 2017

LISTA DE SÍMBOLOS

En la siguiente lista se proporciona la simbología utilizada en el presente documento. Símbolos generales, abreviaturas y convenciones en el orden en el que son introducidas.

Símbolos generales

μ	Coefficiente de Poisson
E_c	Módulo elástico de concreto
f'_c	Resistencia a la compresión del concreto
k	Resistencia de la de reacción de la subrasante
n	Periodo de diseño estructural
r	Tasa anual de crecimiento vehicular
F_{proy}	Factor de proyección
FD	Factor por dirección
FL	Factor por carril
VC	Porcentaje de vehículos comerciales
TPD	Tránsito promedio diario
$TPDA$	Tráfico promedio diario anual

Acrónimos

AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
PCA	The Portland Cement Association
CBR	California Bearing Ratio (Valor Relativo de Soporte)

Estado del arte

Método PCA

N	Número de repeticiones esperadas para cada eje
-----	------------------------------------------------



Mr	Módulo de reacción de la subrasante
MR	Resistencia a la flexión del concreto a 28 días (Módulo de Rotura)
$TPD_{diseño}$	Tránsito promedio diario de diseño
FSC	Factor de seguridad de la carga
σ_{eq}	Esfuerzo equivalente
Ds	Espesor de la subbase
h	Espesor de la losa de pavimento
f_1	Factor de ajuste del efecto del peso de los ejes
f_2	Factor de ajuste para losas sin bermas
f_3	Factor de ajuste debido al efecto en el esfuerzo
f_4	Factor de ajuste por el aumento de la resistencia
SAL	Cargas de los ejes simples
TAL	Cargas de los ejes tándem
N_f	Número de repeticiones máximas admisibles
δ_{eq}	Deflexión equivalente en la esquina de la losa
f_5	Factor de ajuste por el efecto de las cargas por eje
f_6	Factor de ajuste para losas sin dovelas en las juntas y sin berma
f_7	Factor de ajuste debido a los camiones
pc	Presión entre la losa y su superficie de soporte
P	Índice de trabajo o potencia que relaciona la deflexión de esquina y la presión en la losa
C_1	Factor de ajuste para subbases no tratadas y estabilizadas
C_2	Factor de ajuste para pavimento sin bermas
Ne	Número máximo de repeticiones admisibles que cumple el criterio de erosión

Método AASHTO

W18	Número de cargar de 18 kips (80 kN)
ZR	Valor correspondiente a la curva estandarizada para una confiabilidad
So	Desviación estandar
Sc	Módulo de ruptura del concreto
Mre	Módulo resiliente
D	Espesor de la losa del pavimento
Δ PSI	Pérdida de serviciabilidad prevista en el diseño
Po	Serviciabilidad inicial
Pt	Serviciabilidad final
J	Coefficiente de transferencia de carga
Cd	Coefficiente de drenaje
Ls	Pérdida de soporte
H1	Espesor de subbase
H2	Profundidad al estrato firme

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

En la Ingeniería Civil, para el diseño de pavimentos rígidos se cuenta con dos métodos ampliamente empleados en nuestro medio, AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials)[16] y PCA (Portland Cement Association) [19]. Métodos muy utilizados desde mediados del siglo XX, basados en una metodología empírica destacados por su sencillez y confiabilidad en el diseño, donde se busca un espesor óptimo de la losa de concreto, ambos parten de diversos parámetros como: materiales disponibles, factores de tránsito y características estructurales del pavimento. El método AASHTO se basa en un modelo matemático por fatiga mientras que PCA considera la fatiga y erosión que son los modos de falla empleados. Estos parámetros no han sido analizados considerando los parámetros locales, por lo que los resultados obtenidos no siempre otorgan una opción sustentable, sin olvidar que al elegir una estructura, ésta se verá afectada por las particularidades de los datos de entrada y el medio donde se implementará. Los factores teóricos no son los únicos que influyen, pues muchas veces los presupuestos son limitados, de ahí que poder verificar diseños analizando la variación de varios parámetros. Por consiguiente, en el presente trabajo se investigó los resultados de un análisis estadístico, los mismos que fueron determinados a partir de la implementación de los métodos en el paquete computacional Matlab tanto para PCA como AASHTO. El programa codificado en este estudio cuenta con un proceso iterativo que consiste en la variación de los parámetros de diseño, dando como resultado los espesores del pavimento en función del cambio de parámetros y así encontrar el diseño óptimo. Determinar el espesor adecuado traen consigo las alternativas más eficientes, que generen una mejor gestión sobre: la reducción del deterioro inicial que produciría una disminución de la frecuencia de mantenimiento. Contar con los métodos codificados resulta de mucha utilidad para procesos de diseño de proyectos, ya que además de encontrar un diseño eficiente otorga un análisis de las variables que es uno de los enfoques principales de la Ingeniería Civil.



1.1. Antecedentes

Los seres humanos siempre han buscado la manera de comunicarse con sus semejantes. Con el paso de los años se han presentado varias formas de hacerlo, la más importante la vialidad, siendo una manera de unir pueblos y mover la economía. Se estima que el primer camino fue construido en el año 3000 a.C. por el Imperio Hilita seguidos por los esclavos egipcios y el imperio romano [6]. A mediados del siglo XVIII se desarrolla el uso de la cal para la construcción de vías en países como Inglaterra, generando cambios hasta llegar al uso del pavimento rígido hace ya más de 100 años en Estados Unidos. Debido a la necesidad de vías transitables para el transporte masivo además del crecimiento demográfico experimentado durante el siglo XIX, a partir de 1905 se implementa el concreto como material de construcción para carreteras, este descubrimiento dio inicio a una serie de proyectos de obras públicas cambiando así la historia [6].

Hoy en día existen varios métodos para el diseño de pavimento rígido, de los cuales los métodos de American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) y The Portland Cement Association (PCA) son los más representativos, creados en la década de los 60 con el fin de hallar los espesores mínimos de pavimento que traduzcan en los menores costos anuales cumpliendo con los criterios de fatiga y erosión en caso del segundo método [13]. Los métodos están basados en ensayos con el fin de desarrollar tablas, gráficos y fórmulas que representen las relaciones deterioro y demanda de las distintas secciones ensayadas. Estos métodos se basan en la actualidad del empleo de varios diagramas, ecuaciones, ábacos y tablas. Haciendo el diseño dificultoso de determinas los valores.

1.2. Alcance

En el presente trabajo investigativo se implementaron los métodos en un programa computacional que analiza cada uno de los parámetros que intervienen en el diseño de pavimento rígido y que forman parte de los métodos de la AASHTO y PCA con la implementación de los métodos programados en el software Matlab, del cual se obtendrá las muestras a analizar estadísticamente con el fin de conocer los parámetros más influyentes en el momento de buscar un espesor óptimo de concreto que refleje un balance entre resistencia y costos de la estructura de un pavimento.

1.3. Justificación

Con el pasar de los años la ingeniería en pavimentos se ha desarrollado notablemente, sin embargo, no se ha logrado optimizar ciertos métodos de diseño de pavimento rígido, los métodos de la AASHTO y PCA están basados en ensayos con el fin de desarrollar tablas, gráficos y fórmulas que representen las relaciones deterioro-demanda de las distintas secciones ensayadas lo cual genera error en el momento de elegir el espesor óptimo, generando un mayor e innecesario acrecentamiento de presupuesto, es por ello que un análisis de cada uno de los parámetros de entrada para cada método es necesario y puesto que esto podría solucionar el uso de recursos económicos de manera justificada.



Adicionalmente, la implementación de un programa computacional con los métodos ya antes mencionados genera una menor inversión de tiempo, al entender cada parámetro que se emplea.

1.4. Objetivos

1.4.1. General

- Investigar el desempeño de los métodos de la AASHTO y PCA para el diseño de pavimentos rígidos evaluando la sensibilidad de los parámetros de entrada más influyentes con el fin de determinar el diseño adecuado.

1.4.2. Específicos

- Investigar y analizar los parámetros de entrada en los métodos de la AASHTO y PCA para el diseño de los pavimentos rígidos.
- Elaborar un software en Matlab con el método de la AASHTO y PCA que incluya un proceso iterativo para obtener los espesores del pavimento.
- Realizar un análisis estadístico, a partir de los datos obtenidos, para encontrar los parámetros más influyentes en el diseño de un pavimento rígido.
- Emitir las sugerencias y recomendaciones en el uso de los métodos de diseño implementados.

1.5. Metodología

De entre las principales guías para la investigación se encuentran la guía de diseño AASHTO [16], Pavement Analysis and Design [8], Diseño de espesores de pavimento de hormigón en carreteras y calles según el Método de la PCA [19], Ingeniería de Pavimento para Carreteras [13], PCA cálculo Software libre para el Diseño de Pavimentos de Concreto [1], las mismas que fueron implementados para el conocimiento de los métodos estudiados, además de otras fuentes bibliográficas como libros, artículos, y otros documentos que han complementado el estudio, y se presentan en la sección bibliográfica.

Se procedió al desarrollo del software con ayuda de Matlab [14], y los conocimientos de los métodos de diseño de pavimento rígido AASHTO Y PCA. Mediante el programa se realiza un análisis exhaustivo de los métodos implementados.

Finalmente, la información obtenida se analiza a partir de estudios estadísticos para conocer cuáles son los parámetros más influyentes en cada uno de los métodos, y así presentar las respectivas conclusiones y recomendaciones.



1.6. Sumario

El presente trabajo de investigación está organizado de la siguiente manera:

Capítulo 1 – Introducción –

En el capítulo 1 se encuentra la introducción al documento acerca de los métodos de diseño de pavimento rígido AASHTO y PCA, posteriormente se exhibe los antecedentes al presente trabajo, su alcance y la justificación que motiva al desarrollo de este trabajo. Además, se presenta los objetivos, general y específicos que se cumplirán a medida que se desarrolle el trabajo de investigación. En la metodología se presenta la información utilizada para finalmente mostrar cada uno de los capítulos que conforman el cuerpo del presente documento.

Capítulo 2 – Marco Teórico –

En el capítulo 2 se presentan los conceptos necesarios para abordar el tema de estudio, con un enfoque en los métodos de la AASHTO y PCA con su respectiva introducción, descripción de los métodos, criterios y factores de diseño, criterios de comportamiento, propiedades de los materiales y procedimiento de diseño. Para finalizar con el capítulo, se presenta el uso de Matlab para obtener resultados según los métodos de AASHTO y PCA. Los cuatro subtemas del capítulo son:

- Método de la PCA
- Método de la AASHTO
- Desarrollo del método de la PCA en Matlab
- Desarrollo del método de la AASHTO en Matlab

Capítulo 3 – Análisis Estadístico. –

En el capítulo 3 se presenta el análisis estadístico de resultados, procedimiento, suposiciones tomadas para el desarrollo del documento investigativo. Además de la presentación de resultados con mayor influencia para cada uno de los métodos.

Capítulo 4 – Conclusiones y Recomendaciones –

En el capítulo 4 se presenta las conclusiones a partir de los resultados obtenidos en el desarrollo de la investigación, así como las recomendaciones para conseguir un diseño de pavimento rígido óptimo, comprendiendo el capítulo en dos subcapítulos:

- Conclusiones y recomendaciones
- Líneas futuras de investigación

CAPÍTULO 2

MARCO TEÓRICO

En el presente capítulo se revisa de una manera introductoria la información necesaria que debe conocerse previo al estudio del trabajo investigativo. Primero, se investigará el método del PCA, seguido por el método de la AASHTO. Finalmente, se realizará la presentación del desarrollo de la codificación de los métodos en el programa en Matlab. Los cuatro subcapítulos que forman parte de este capítulo introductorio de conceptos son:

- Método de la PCA
- Método de la AASHTO
- Desarrollo del método de la PCA en Matlab
- Desarrollo del método de la AASHTO en Matlab

2.1. Método de PCA

El método de diseño de la Portland Cement Association (PCA) para autopistas y carreteras fue publicado inicialmente en 1933, el cual fue actualizado en 1966 y 1984, el mismo que es usado exclusivamente para pavimentos de concreto hidráulico [1]. El objetivo de este método es encontrar el espesor mínimo de pavimento que produzca menor costo anual tanto en mantenimiento como en construcción. Si el espesor es alto representa mayor costo inicial y uno menor en mantenimiento, por el contrario, si es bajo, el costo inicial será bajo con costos de mantenimiento elevados [13]. Por lo que se busca un balance entre los costos. En 1984 una nueva versión del método incluye aspectos como [7]:

- Modos de falla por fatiga no tradicionales como erosión del terreno de cimentación del pavimento.
- Concreto sin refuerzo como capa de subbase.
- Pavimentos sin mecanismos de transferencia de cargas en las juntas transversales.



El criterio de la PCA está basado en investigaciones de experiencias, correlación del desempeño de los pavimentos en la prueba AASHO Road Test [11] y los estudios de falla en diseños de pavimentos generales. El método incluye una serie de nomogramas y tablas de diseño, como se muestra en la publicación de PCA 1984 [1]. Estos nomogramas y tablas pueden ser remplazados por ecuaciones originales del método de diseño, dichas ecuaciones no fueron publicadas por la PCA en su boletín, pero se conocieron en el software PCAPAV, un software desarrollado para el sistema operativo DOS 2.0.

El método trabaja con diferentes tipos de pavimento rígido: concreto simple, concreto simple con varillas de transferencia de carga o pasadores, de concreto reforzado y con refuerzo continuo donde la selección de un espesor adecuado depende de varios factores como el sistema de juntas o el tipo de bermas, además este método requiere conocer el número, tipo y peso de los ejes de cada vehículo. En la Figura 2.1 se puede visualizar los tipos de pavimento rígido que considera el método.

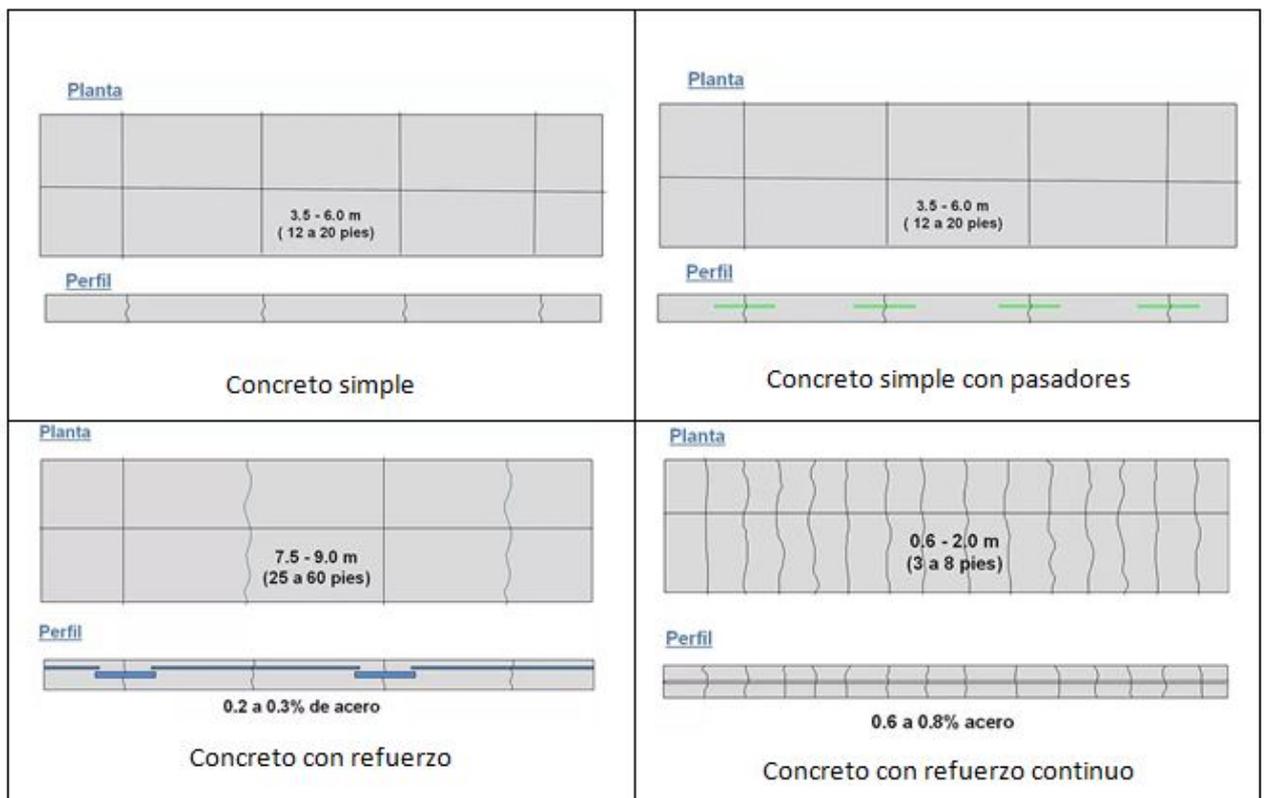


Figura 2.1: Tipos de pavimento rígido [12].

2.1.1. Criterios de diseño

El método de diseño de PCA considera dos criterios de diseño [13]:



Fatiga

Con el fin de proteger al pavimento de agrietamiento de los esfuerzos producidos por las excesivas repeticiones de carga. El criterio de fatiga influye especialmente en diseños de pavimentos de tráfico ligero independientemente de la presencia de pasadores y pavimentos con tráfico mediano con pasadores.

Erosión

Para limitar los efectos de la deflexión del pavimento que se genera en bordes juntas y esquinas de las losas y controlar así la erosión en el momento de su construcción. El criterio de erosión reconoce que el pavimento puede fallar por un excesivo bombeo, erosión del terreno de soporte y diferencias de elevaciones en las juntas. En el análisis por erosión influye principalmente el diseño de pavimentos con tráfico mediano a pesado cuando existe trabazón de agregados y pavimentos de tráfico pesado con pasadores.

2.1.2. Factores de diseño

Los parámetros de diseño que se considera en la PCA son [13]:

a) Resistencia del concreto a la flexión

Este parámetro es considerado en el diseño por fatiga puesto que las cargas de tránsito producen esfuerzos de compresión y tensión en el pavimento controlando así el agrietamiento del pavimento causado por vehículos pesados. La relación entre los esfuerzos a compresión y la resistencia que presenta el concreto es baja por lo que se considera despreciable mientras que la relación con la tensión es notoria por lo que los factores considerados para el diseño de pavimento son los esfuerzos a flexión.

El método de la PCA recomienda emplear la resistencia a la flexión, medida por ensayos de módulo de rotura (MR) sobre vigas de 15 x 15 x 75 cm, cargados en los tercios de la luz, en un periodo de curado de 28 días, o correlacionar con otros ensayos como el de compresión simple.

b) Soporte de la subrasante y subbase

La resistencia de la subrasante y subbase se mide en términos del módulo de reacción (k), no es necesario conocer el valor exacto de este debido a que la variación de este parámetro se encuentra en un rango pequeño. Las Tablas 2.1 y 2.2 muestran los valores del módulo de reacción para una subbase granular y tratada con cemento.



Tabla 2.1: Incremento del valor k según el espesor de la subbase granular [13].

k para subrasante	k para subbase							
	100 mm		150 mm		225 mm		300 mm	
MPa/m	MPa/m	lb/pulg ³	MPa/m	lb/pulg ³	MPa/m	lb/pulg ³	MPa/m	lb/pulg ³
20	23	85	26	96	32	117	38	140
40	45	165	49	180	57	210	66	245
60	64	235	66	245	76	280	90	330
80	87	320	90	330	100	370	117	430

Tabla 2.2: Incremento del valor k según el espesor de la subbase tratada con cemento [13].

k para subrasante	k para subbase							
	100 mm		150 mm		225 mm		250 mm	
MPa/m	MPa/m	lb/pulg ³	MPa/m	lb/pulg ³	MPa/m	lb/pulg ³	MPa/m	lb/pulg ³
20	60	220	80	300	105	400	135	500
40	100	370	130	500	185	680	230	850
60	140	520	190	700	245	900	-	-

c) Periodo de diseño estructural

Es el tiempo para el cual se determinan las características del pavimento, evaluando su comportamiento a largo plazo, con el fin de satisfacer las exigencias del servicio durante dicho periodo, con un costo razonable. Comúnmente, se diseña para los pavimentos rígidos un lapso de 10-20 años. El periodo de diseño (n) afecta el espesor de diseño puesto que determina la cantidad de vehículos que servirá la vía.

d) Factor de tránsito

Los principales factores de tránsito que inciden en el diseño son el número y la magnitud de las cargas por eje que ocurrirá durante el periodo de diseño. Estos valores se obtienen a partir del estudio de tránsito, a través del tránsito promedio diario en ambas direcciones (TPD), el tránsito promedio diario en vehículos comerciales en ambas direcciones (TPDVC) y las cargas por eje de vehículos comerciales.

e) Tasa de crecimiento anual de tránsito

Es indispensable para realizar proyecciones a pequeño, mediano y largo plazo. Este factor indica en que medida el tráfico crece en el tiempo. Su valor se determina a partir de eventos históricos del parque automotor u otros indicadores como el crecimiento poblacional o el consumo de combustible. Comúnmente varía entre el 1 % al 6 %.



f) Proyección de tránsito

Para obtener el factor de proyección se necesita conocer la tasa de crecimiento anual de tránsito y el periodo de diseño. La ecuación 2.1 presenta la relación entre estos factores empleados en la PCA.

$$F_{proy} = \frac{(1 + r)^n - 1}{r \cdot n} \quad (2.1)$$

donde:

F_{proy}	Factor de proyección
n	periodo de diseño estructural
r	Tasa anual de crecimiento vehicular

Factores como el tránsito atraído, crecimiento normal del tránsito, tránsito generado y tránsito desarrollado influyen sobre la tasa de crecimiento de tránsito. Estos factores deben ser analizados si se espera una alta contribución.

g) Factor de dirección

El factor de dirección (FD) se emplea para diferenciar las vías de uno o doble sentido, donde vías de un sentido tienen un factor de uno. En la Tabla 2.3 se presenta otros valores del factor de dirección en función del número de carriles.

Tabla 2.3: Factor de dirección según el número de carriles [13].

Número de carriles	Factor de dirección
2	50 %
4	45 %
6	40 %

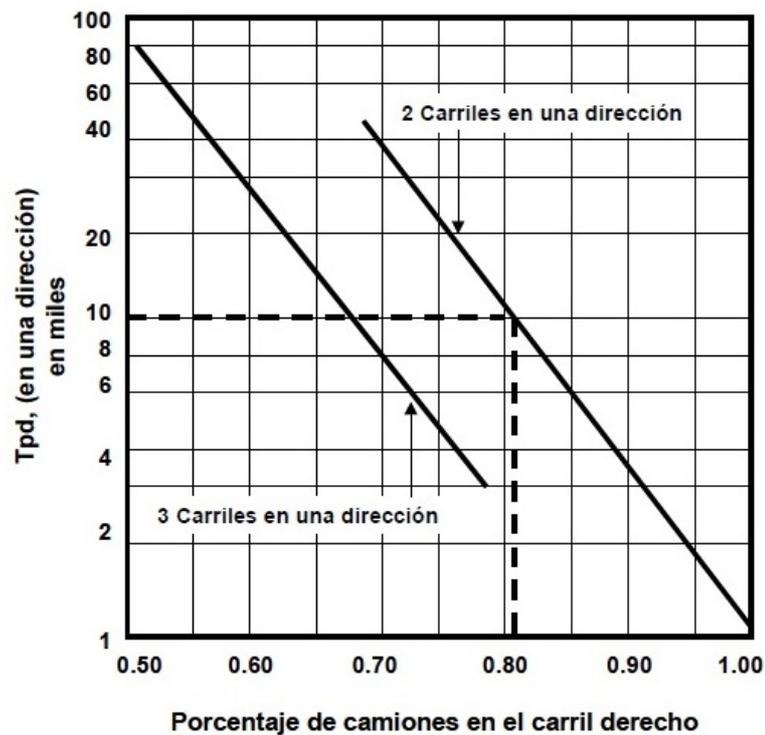


Figura 2.2: Factor carril (FL) [13].

i) Factor carril

El factor de carril (FL) muestra el porcentaje de vehículos que circulan por el carril con más tráfico (generalmente carril derecho). La PCA usa la Figura 2.2 en donde el factor depende del número de carriles por sentido y del tránsito promedio diario de diseño. A través de la ecuación 2.2 se obtiene el tránsito promedio diario de diseño, dato necesario para el uso de la Figura 2.2 que junto al número de carriles por dirección se obtiene el factor carril.

h) Tránsito promedio diario de vehículos comerciales

Es el número de vehículos pesados que circulan durante determinado periodo, dividido por el número de días del periodo de diseño, para vías de 4 o más carriles, el porcentaje de vehículos comerciales debe ajustarse mediante el empleo de la Figura 2.2.

$$TPD_{diseño} = TPD * F_{proy} * FD \quad (2.2)$$

donde:

- $TPD_{diseño}$ Tránsito promedio diario de diseño.
- TPD Tránsito promedio diario en ambas direcciones.
- F_{proy} Factor de proyección.
- FD Factor por dirección.



j) Factor de seguridad de carga

El método de diseño exige que se contemple un factor de seguridad (FSC) que se multiplica por las cargas esperadas. En la Tabla 2.4 se presenta la categoría de carga por eje a partir de su TPD y de las máximas cargas a partir del eje simple y tándem para posteriormente elegir el respectivo factor de seguridad en la Tabla 2.5.

Tabla 2.4: Categorías de carga por eje [13].

Categoría de carga por eje	Descripción	Tránsito			Máximas cargas por eje (kN)	
		TPD	TPDC		Eje simple	Eje tándem
			%	Diario		
1	Calles residenciales carreteras rurales y secundarias (bajo a medio)	200-800	5-3	hasta 25	98	160
2	Calles colectoras, carreteras rurales y secundarias (alto). Calles arterias y carreteras primarias (bajo)	700-5000	5-18	40-1000	115	195
3	Calles arterias y carreteras primarias (alto), vías expresas y autopistas urbanas e interestatales (bajo a medio)	3000-1200 (2 Carriles) 3000- 50000+ (4 Carriles o más)	8-30	500-5000+	133	230
4	Calles arterias, carreteras primarias y vías expresas (alto) autopista urbanas e interestatales (medio bajo)	3000-20000 (2 Carriles) 3000- 150000 (4 Carriles o más)	8-30	1500-8000+	151	267

Tabla 2.5: Factor de seguridad a partir del tipo de tránsito [13].

Tránsito	Factor de Seguridad
Pesado	1.2
Medio	1.1
Bajo	1.0

k) Módulo de elasticidad y coeficiente de Poisson

Tiene una importante relación con el módulo de rotura. Para este trabajo de investigación se considera un valor típico del módulo de elasticidad del concreto 4'000,000 psi, así como un coeficiente de Poisson de 0.15 de [11].

l) Número de repeticiones esperadas

Para obtener el número de repeticiones esperadas en el periodo de diseño para cada tipo de eje se necesita conocer el tránsito promedio diario anual y sus respectivo porcentajes



de vehículos comerciales, factor carril, factor de proyección y periodo de diseño. Mediante la ecuación 2.3 se determina el número de repeticiones esperadas para cada eje.

$$N = TPD_{diseño} * VC * FL * n * 365 \quad (2.3)$$

donde:

N	Número de repeticiones esperadas para cada eje
$TPD_{diseño}$	Tránsito promedio diario de diseño (Estudio de tránsito)
VC	Porcentaje de vehículos comerciales (Estudio de tránsito)
FL	Factor por carril
n	Periodo de diseño estructural

2.1.3. Procedimiento de diseño

Para realizar el diseño de pavimento rígido es necesario conocer los factores de diseño como:

- Tipos de juntas y bermas
- Resistencia a la flexión del concreto (MR) a 28 días.
- El valor del módulo de reacción (k) del terreno de apoyo
- Factor de seguridad de la carga (FSC)
- Número de repeticiones esperadas (N) durante el periodo de diseño estructural

En la Tabla 2.6 se visualiza los datos de entrada necesarios para la construcción del método, otros datos de entrada son la carga por eje y el número de ejes por 1000 vehículos tanto para eje simple como tándem.

La carga por eje se multiplica por los factores de seguridad.

Mientras que la repetición esperada se calcula a partir de la ecuación 2.4.

$$R_{esperadas} = \frac{N * EjeX}{1000} \quad (2.4)$$

donde:

$R_{esperadas}$	Repeticiones esperadas
N	Número de repeticiones esperadas para cada eje
EjeX	Eje por cada 1000 vehículos

A continuación se presenta el análisis de fatiga y erosión que son los principios fundamentales para el método de la PCA.

**Tabla 2.6: Cálculo del espesor del pavimento [13].**

Cálculo del Espesor del Pavimento							
Espesor de tanteo	mm	Junta con pasador	si	no		
k combinado	Mpa/m	Berma de concreto	si	no		
Módulo de rotura	Mpa	Periodo de diseño	....	años		
Factor de seguridad de carga						
Carga por eje KN	Eje x 1000 veh	Carga*fsc	Repetición esperada	Análisis de Fatiga		Análisis de Erosión	
				repet. Admisible	% fatiga	repet. Admisible	% erosión
eje simple							
Esfuerzo equivalente		....	Factor de erosión		....	
		Factor de relación de esfuerzos	....			
eje tandem							
Esfuerzo equivalente		....	Factor de erosión		....	
		Factor de relación de esfuerzos	....			

Análisis de fatiga:

Es necesario recalcar que tanto en el análisis de fatiga como de erosión, las ecuaciones utilizadas se encuentran en unidades del sistema inglés.

Para el análisis de fatiga se presentan las siguientes consideraciones. [1]

- El módulo elástico del concreto $E = 4'000,000$ psi.
- Largo de la losa $L = 457.2$ cm (180 pulgadas)(15 pies).
- El ancho de la losa $W = 365.76$ cm (144 pulgadas)(12 pies).
- La carga de los ejes simples de la rueda doble es igual a 18 kips, con 4500 lb en cada una de las ruedas del eje, espacio entre ruedas, $s = 30.48$ cm (12 pulgadas)(1 pies), área de contacto de la rueda $A = 451.612$ cm^2 (70 pulgadas²)(0.486 pies²), distancia entre el centro de las dos ruedas $D = 182$ cm (71.65 pulgadas)(5.97 pies).
- La carga utilizada para los ejes tandem de ruedas dobles es igual a 36 kips con espaciamiento entre ejes $t = 127$ cm (50 pulgadas)(4.17 pies).
- Coeficiente de Poisson de la losa $\mu = 0.15$.

Es importante mencionar que la PCA emplea nomogramas y tablas para determinar los esfuerzos con la finalidad de desarrollar el programa, por lo que es necesario emplear las siguientes ecuaciones [1].



Esfuerzo equivalente:

El esfuerzo equivalente se define a partir de la ecuación 2.5

$$\sigma_{eq} = \frac{6 * Me}{h^2} * f_1 * f_2 * f_3 * f_4 \quad (2.5)$$

donde:

- Sin berma de concreto

Eje simple

$$Me = -1600 + 2525 * \log(l) + 24,42 * l + 0,204 * l^2 \quad (2.6)$$

Eje tándem

$$Me = 3029 - 2966,8 * \log(l) + 133,69 * l - 0,0632 * l^2 \quad (2.7)$$

- Con berma de concreto

Eje simple

$$Me = (-970,4 + 1202,6 * \log(l) + 53,587 * l)(0,8742 + 0,01088 * k^{0,447}) \quad (2.8)$$

Eje tándem

$$Me = (2005,4 - 1980,9 * \log(l) + 99,008 * l)(0,8742 + 0,01088 * k^{0,447}) \quad (2.9)$$

$$l = \frac{E * h^3}{12 * (1 - u^2) * k} \quad (2.10)$$

Eje simple

$$f_1 = \left(\frac{24}{SAL}\right)^{0,06} * \left(\frac{SAL}{18}\right) \quad (2.11)$$

Eje tándem

$$f_1 = \left(\frac{48}{TAL}\right)^{0,06} * \left(\frac{TAL}{36}\right) \quad (2.12)$$

- Sin berma de concreto

$$f_2 = 0,892 + \frac{h}{87,71} - \frac{h^2}{3000} \quad (2.13)$$

- Con berma de concreto



$$f_2 = 1 \quad (2.14)$$

$$f_3 = 0,894 \quad (2.15)$$

Para el 6 % de camiones en el borde de la losa

$$f_4 = \frac{1}{1,235 * (1 - CV)} \quad (2.16)$$

PCA recomienda un CV = 15 %, $f_4 = 0.953$

Si: $\frac{\sigma_{eq}}{MR} \geq 0,55$

$$\log N_f = 11,737 - 12,077 * \frac{\sigma_{eq}}{MR} \quad (2.17)$$

Si: $0.45 < \frac{\sigma_{eq}}{MR} < 0.55$

$$N_f = \left(\frac{4,2577}{\frac{\sigma_{eq}}{MR} - 0,4325} \right)^{3,268} \quad (2.18)$$

Si: $0.45 > \frac{\sigma_{eq}}{MR}$

$$N_f = \textit{ilimitado} \quad (2.19)$$

donde:

σ_{eq}	Esfuerzo equivalente, en psi
h	Espesor de la losa, en pulg
k	Módulo de reacción de la subrasante, en pci
f_1	Factor de ajuste del efecto del peso de los ejes
f_2	Factor de ajuste para losas sin bermas
f_3	Factor de ajuste por el efecto en el esfuerzo
f_4	Factor de ajuste por el aumento de la resistencia
SAL	Cargas de los ejes simples, en kips
TAL	Cargas de los ejes tándem, en kips
N_f	Número de repeticiones máximas admisibles

El porcentaje de daño por fatiga se calcula dividiendo el número de repeticiones esperadas por el número de repeticiones máximas admisibles, para que el espesor de la losa cumpla con el criterio de diseño el porcentaje acumulado total de daño por fatiga debe ser igual o inferior a 100 %, de lo contrario se debe evaluar un espesor de losa mayor.



Análisis de erosión:

Deformación equivalente:

La deformación equivalente se define a partir de la ecuación 2.20

$$\delta_{eq} = \frac{pc}{k} * f_5 * f_6 * f_7 \quad (2.20)$$

■ Sin pasadores

- Sin berma de concreto

Eje simple

$$pc = \frac{46,127}{l} + \frac{4372,7}{l^2} + \frac{22886}{l^3} \quad (2.21)$$

Eje tándem

$$pc = 1,847 + \frac{213,68}{l} + \frac{1260,8}{l^2} + \frac{22989}{l^3} \quad (2.22)$$

- Con berma de concreto

Eje simple

$$pc = 0,5874 + \frac{65,108}{l} + \frac{1130,9}{l^2} + \frac{5245,8}{l^3} \quad (2.23)$$

Eje tándem

$$pc = 1,47 + \frac{102,2}{l} + \frac{1072}{l^2} + \frac{14451}{l^3} \quad (2.24)$$

■ Con pasadores

- Sin berma de concreto

Eje simple

$$pc = -0,3019 + \frac{128,85}{l} + \frac{1105,8}{l^2} + \frac{3269,1}{l^3} \quad (2.25)$$

Eje tándem

$$pc = 1,258 + \frac{97,491}{l} + \frac{1484,1}{l^2} + \frac{180}{l^3} \quad (2.26)$$

- Con berma de concreto



Eje simple

$$pc = 0,018 + \frac{72,99}{l} + \frac{323,1}{l^2} + \frac{1620}{l^3} \quad (2.27)$$

Eje tándem

$$pc = 0,0345 + \frac{146,25}{l} + \frac{2385,6}{l^2} + \frac{23848}{l^3} \quad (2.28)$$

Eje simple

$$f_5 = \frac{SAL}{18} \quad (2.29)$$

Eje tándem

$$f_5 = \frac{TAL}{36} \quad (2.30)$$

- Sin pasadores

Sin berma

$$f_6 = 0,95 \quad (2.31)$$

Con berma de concreto

$$f_6 = 1,001 - \left(0,266363 - \frac{k}{3034,5}\right)^2 \quad (2.32)$$

- Con pasadores

$$f_6 = 1 \quad (2.33)$$

Sin berma

$$f_7 = 0,896 \quad (2.34)$$

Con berma de concreto



$$f_7 = 1 \quad (2.35)$$

$$EF = \log \left(\frac{111111 * (0,896 * P)^2 * C1}{h * k^{0,73}} \right) \quad (2.36)$$

$$P = 268,7 * \frac{k^{1,27} * (\delta_{eq})^2}{h} \quad (2.37)$$

$$C_1 = 1 - \left(\frac{k}{2000} * \frac{4}{h} \right)^2 \quad (2.38)$$

Sin berma

$$C_2 = 0,06 \quad (2.39)$$

Con berma

$$C_2 = 0,94 \quad (2.40)$$

Si: $C_1 * P < 9$

$$\log(N_e) = 14,524 - 6,777 * (C_1 * P - 9)^{0,103} - \log(C_2) \quad (2.41)$$

Si: $C_1 * P \leq 9$

$$N_e = \textit{ilimitado} \quad (2.42)$$

donde:

δ_{eq}	Deflexión equivalente en la esquina de la losa
f_5	Factor de ajuste por el efecto de las cargas por eje
f_6	Factor de ajuste para losas sin dovelas en las juntas y sin berma
f_7	Factor de ajuste por el efecto de los camiones
pc	Presión entre la losa y la superficie de soporte
P	Índice de trabajo o potencia que relaciona la deflexión de esquina y la presión en la losa
C_1	Factor de ajuste para subbases no tratadas y estabilizadas
C_2	Factor de ajuste para pavimento sin bermas
Ne	Número máximo de repeticiones admisibles que cumple el criterio de erosión

SAL, TAL, k, l tiene las mismas definiciones descritas anteriormente.

El porcentaje de daño por erosión se calcula dividiendo el número repeticiones esperadas de cargas por el número máximo de repeticiones admisibles. Para que el espesor de la losa evaluado cumpla con este criterio, el daño total acumulado por erosión debe ser igual o inferior a 100 %.



2.2. Método AASHTO-93

El método AASHTO fue desarrollado en los Estados Unidos en la década de los 60, basándose en un ensayo a escala real con el fin de desarrollar tablas, gráficos y fórmulas que representen las relaciones deterioro-carga de las distintas secciones ensayadas. A diferencia de otros métodos, este método introduce el concepto de serviciabilidad en el diseño de pavimentos como una medida de su capacidad para brindar una superficie adecuada al usuario [5].

El cálculo del espesor se realiza mediante la ecuación 2.43, de la cual se obtiene la solución a partir de la iteración del espesor hasta que cumpla la igualdad de la ecuación [5].

$$\log(W18) = Z_R * S_o + 7,35 \log(D + 1) - 0,06 + \frac{\log\left(\frac{\Delta PSI}{4,5-1,5}\right)}{\frac{1,624*10^7}{(D+1)^{8,46}}} + (4,22 - 0,32Pt) * \log\left[\frac{S_c * C_d(D^{0,75} - 1,132)}{215,63J\left(D^{0,75} - \frac{18,42}{\left(\frac{E_c}{kefe}\right)^{0,25}}\right)}\right] \quad (2.43)$$

W18	Número de cargas de 18 kips (80 kN) previstas
ZR	Valor correspondiente a la curva estandarizada para una confiabilidad R (Depende del tipo de vía)
So	Desviación estándar de 0.35-0.45
D	Espesor de la losa del pavimento en pulgadas
Δ PSI	Pérdida de serviciabilidad prevista en el diseño
Po	Serviciabilidad inicial
Pt	Serviciabilidad final
Sc	Módulo de rotura del concreto en psi
J	Coefficiente de transferencia de carga
Cd	Coefficiente de drenaje
Ec	Módulo elástico de concreto en psi
kefe	Módulo de reacción de la subrasante en pci

Para este método y diseño de un pavimento rígido se cuenta con variables de diseño, criterios de comportamiento y propiedades de los materiales.

2.2.1. Variables de diseño

Las variables de diseño son:

a) Espesor de la losa del pavimento

El espesor del pavimento de concreto es la variable que se pretende determinar al realizar el diseño del pavimento, el resultado del espesor se ve afectado por todas las demás variables que interviene en los cálculos.



b) Variables de tiempo

Las variables de tiempo que se emplean sirven para determinar las características del pavimento, evaluando su comportamiento para distintas alternativas a largo plazo, con el fin de satisfacer las exigencias económicas y de servicio durante el periodo de diseño elegido [5].

Se consideran dos variables: periodo de análisis y vida útil del pavimento. La vida útil se refiere al tiempo transcurrido desde que entra en operación y el momento en que se requiere una rehabilitación [18]. El periodo de análisis se refiere al periodo de tiempo para el cual va a ser conducido el análisis, es decir, el tiempo que puede ser cubierto por cualquier estrategia de diseño. Por lo tanto, para efectos económicos se considera el periodo de vida útil, mientras que el periodo de análisis se utiliza para la comparación de alternativas de diseño, es decir, para el análisis económico del proyecto. Los periodos de análisis recomendados se muestran en la Tabla 2.7.

Tabla 2.7: Periodo de análisis recomendado [5].

Descripción de la Vía	Periodo de Análisis (años)
Urbano de alto volumen de tráfico	30-50
Rural de alto volumen de tráfico	20-50
Pavimentada de bajo volumen de tráfico	15-25
No pavimentada de bajo volumen de tráfico	10-20

c) Análisis de tráfico

El tráfico es uno de los parámetros más importantes para el diseño de pavimentos. Para obtener este dato es necesario determinar el número de repeticiones de cada tipo de eje durante el periodo de diseño. El número y composición de los ejes se determina a partir de la siguiente información [5]:

- Periodo de diseño
- Distribución de ejes solicitantes en cada rango de cargas
- Tránsito promedio diario anual de todos los vehículos TPDA
- Espesor de la losa del pavimento
- Tasas de crecimiento anuales de cada tipo de vehículo
- Número de sentido de tráfico
- Número de carriles por sentido de tráfico
- Porcentaje del tránsito sobre el carril más solicitado
- Índice de serviciabilidad
- Factores de equivalencia de carga



d) Tránsito medio diario anual

El TPDA representa el promedio aritmético de los volúmenes diarios de tránsito aforados durante un año, en forma diferenciada para cada tipo de vehículo mediante la siguiente clasificación:

- Automóviles y camionetas.
- Buses.
- Camiones

e) Tasa de crecimiento

Representa el crecimiento promedio anual del tránsito. Generalmente las tasas de crecimiento son diferentes para cada tipo de vehículo que se determinan en base de revisiones historiales.

f) Proyección del tránsito

El tránsito puede proyectarse en el tiempo con un crecimiento constante o exponencial mediante incrementos anuales mediante la siguiente ecuación 2.44.

$$F_{proy} = \frac{(1 + r)^n - 1}{r} \quad (2.44)$$

donde:

- | | |
|---|-------------------------------------------|
| n | Periodo de diseño estructural (vida útil) |
| r | Tasa anual de crecimiento vehicular |

g) Distribución por dirección

A menos que existan consideraciones especiales, se considera una distribución del 50 % del tránsito para los dos sentidos. Para vías de 2 carriles en cada dirección se tiene 50 %, para vías de 4 carriles en cada dirección se tiene 45 % y de 6 o más se tiene el 40 %.

h) Factor de distribución por carril

En una carretera de dos carriles, uno en cada dirección, el carril de diseño es uno de ellos, por lo tanto el factor de distribución por carril es 100 %. Para autopistas multicarriles el carril de diseño es el carril exterior y el factor de distribución depende del número de carriles en cada dirección que tenga la autopista. En la tabla 2.8 se muestran los valores utilizados por la AASHTO:



Tabla 2.8: Factor de distribución por carril [5].

Número de carriles en cada dirección	Porcentajes de ejes simples equivalentes 18 kips en el carril de diseño
1	100
2	80-100
3	60-80
4 o más	50-75

i) Confiabilidad

La confiabilidad es la probabilidad de que la estructura del pavimento se desenvuelva de una forma satisfactoria durante periodo de diseño, resistiendo el tráfico en ese periodo. Por lo tanto, la confiabilidad está asociada a la aparición de fallas en el pavimento [5]. Cuando se habla del comportamiento del pavimento se relaciona a la capacidad estructural y funcional de éste, es decir, a la capacidad de soportar las cargas impuestas por el tránsito, y asimismo de brindar seguridad y confort al usuario durante el periodo para el cual fue diseñado.

La confiabilidad y la calidad del diseño dependerá de varios factores durante la construcción como: la variación en las propiedades de los materiales a lo largo del pavimento, produce como resultado una variación en el desarrollo de fallas y rugosidades en ese pavimento, la variación de la ubicación de los pasadores en las juntas y profundidad de colocación de la armadura da como resultado una variación en el desarrollo de fallas, la variación entre los datos de diseño del pavimento y los reales puede significar un aumento o disminución de la vida útil [5]. Es así que es necesario una variable que acote la incertidumbre de todos estos factores dentro de los límites permisibles, con el fin de asegurar que la estructura del pavimento se comporte adecuadamente durante su periodo de diseño. El grado de importancia de la carretera tiene que ver con el uso esperado de la carretera. Así, para carreteras principales el nivel de confiabilidad es alto. En la Tabla 2.9 se dan niveles de confiabilidad aconsejados por la AASHTO.

Tabla 2.9: Factores de la confiabilidad [18].

Confiabilidad	Zr	Confiabilidad	Zr
50	0	92	-1.405
60	-0.253	94	-1.555
70	-0.524	95	-1.645
75	-0.674	96	-1.751
80	-0.841	97	-1.881
85	-1.037	98	-2.054
90	-1.282	99	-2.327

j) Desviación estándar

La desviación estándar es la desviación de la población de valores obtenidos que involucra la variabilidad inesperada de los materiales y su proceso constructivo. En la Tabla 2.10 se muestran valores para la desviación estándar.

Tabla 2.10: Valores para la desviación estándar [5].

Condición de diseño	Desviación estándar (So)	
	Pav. Rígido	Pav. Flexible
Variación en la predicción del comportamiento del pavimento sin errores en el tránsito	0.35	0.45
Variación en la predicción del comportamiento del pavimento con errores en el tránsito	0.40	0.50

k) Serviciabilidad

La serviciabilidad se usa como una medida del comportamiento del pavimento, la misma que se relaciona con la seguridad y comodidad que puede brindar al usuario (comportamiento funcional), cuando éste circula por la vialidad. También se relaciona con las características físicas que puede presentar el pavimento como grietas, fallas, peladuras, etc., que podrían afectar la capacidad de soporte de la estructura (comportamiento estructural)[15]. El concepto de serviciabilidad está basado en cinco aspectos fundamentales resumidos como sigue:

- Las carreteras están hechas para el confort y conveniencia del público usuario.
- El confort, o calidad de la transitabilidad, es materia de una respuesta subjetiva de la opinión del usuario.
- La serviciabilidad puede ser expresada por medio de la calificación hecha por los usuarios de la carretera y se denomina la calificación de la serviciabilidad.
- Existen características físicas de un pavimento que pueden ser medidas objetivamente y que pueden relacionarse a las evaluaciones subjetivas. Este procedimiento produce un índice de serviciabilidad objetivo.
- El comportamiento puede representarse por la historia de la serviciabilidad del pavimento.

El principal factor asociado a la seguridad y comodidad del usuario es la calidad de rodamiento que depende de la rugosidad superficial del pavimento. La valoración de este parámetro define el concepto de Índice de Serviciabilidad Presente (psi, por sus siglas en inglés, Present Serviceability Index) [18]. El psi califica a la superficie del pavimento de



acuerdo a una escala de valores de 0 (nulo) a 5 (bueno). El diseño estructural basado en la serviciabilidad, considera necesario determinar el índice de serviciabilidad inicial (P_o) y el índice de serviciabilidad final (P_t), para la vida útil o de diseño del pavimento.

a) El índice de serviciabilidad inicial (P_o) se establece como la condición original del pavimento inmediatamente después de su construcción. La AASHTO estableció para pavimentos rígidos un valor inicial deseable de 4.5, si es que no se tiene información disponible para el diseño.

b) El índice de serviciabilidad final (P_t) ocurre cuando la superficie del pavimento ya no cumple con las expectativas del usuario. Dependiendo de la importancia de la vialidad, pueden considerarse los valores P_t indicados en la Tabla 2.11.

Tabla 2.11: Índice de serviciabilidad final [18].

P_t	Clasificados
3.00	Autopistas
2.50	Colectores
2.25	Calles comerciales e industriales
2.00	Calles residenciales y estacionamientos

La pérdida de serviciabilidad se define como la diferencia entre el índice de servicio inicial y terminal. $\Delta PSI = P_0 - P_t$ Los factores que influyen mayormente en la pérdida de serviciabilidad de un pavimento son: el tráfico, el medio ambiente y la edad del pavimento. Los efectos que causan éstos factores en el comportamiento del pavimento han sido considerados en este método [15].

2.2.2. Propiedades de los materiales

a) Módulo de reacción de la subrasante (k)

Este factor da un valor de cuánto se asienta la subrasante cuando se le aplica un esfuerzo de compresión. Es igual a la carga en libras por pulgada cuadrada sobre un área de carga, dividido por la deflexión en pulgadas para esa carga. Los valores de k son expresados en libras por pulgada cuadrada por pulgada (pci). Puesto que la prueba de carga sobre placa, requiere tiempo y es costosa, el valor de k generalmente es estimado por correlación con otros ensayos, tal como el valor relativo del soporte (CBR) o las pruebas de valores R [5].

b) Módulo de rotura del concreto

Este parámetro controla el agrietamiento por fatiga del pavimento, originado por las cargas repetitivas. Se le conoce también como resistencia a la tracción del concreto por



flexión. El módulo de rotura requerido por el procedimiento de diseño es el valor medio determinado después de 28 días utilizando el ensayo de carga en los tercios [15]. De esta manera, se obtiene en el tercio medio una zona sometida a un momento flector constante igual a $PL/3$ y la rotura se producirá en cualquier punto de este tercio medio con la única condición que exista allí una debilidad. Este ensayo es recomendable frente al ensayo de carga en el punto medio, en el cuál la rotura se producirá indefectiblemente en dicho punto (punto de aplicación de la carga) donde el momento flector es máximo [5]. El módulo de rotura también se puede determinar a través de las siguientes correlaciones:

1. Estimación a través de la resistencia a compresión del concreto.

$$S_c = k(f'c)^{0,5} \quad (2.45)$$

7 < k < 12 donde:

f'c Resistencia a la compresión del concreto en psi.

2. Estimación a través de la resistencia a la tracción indirecta.

$$S_c = 210 + 1,02IT \quad (2.46)$$

donde:

IT Tracción indirecta medida en las probetas en psi.

c) Módulo de elasticidad del concreto

El módulo de Elasticidad indica la rigidez y la capacidad de distribuir cargas que tiene una losa de pavimento. Es la relación entre la tensión y la deformación. Las deflexiones, curvaturas y tensiones están directamente relacionadas con el módulo de elasticidad del concreto [18]. En los pavimentos de concreto armado continuo, el módulo de elasticidad junto con el coeficiente de expansión térmica y el de contracción del concreto, son los que rigen el estado de tensiones en la armadura. Para concreto de peso normal, el Instituto del Concreto Americano propone:

$$E_c = 57000(f'c)^{0,5} \quad (2.47)$$

donde E_c y $f'c$ están dados en psi.

2.2.3. Características estructurales

a) Drenaje

El drenaje es el proceso mediante el cual el agua de infiltración superficial o agua de filtración subterránea es removida de los suelos por medios naturales o artificiales [16]. El drenaje es uno de los factores más importantes en el diseño de pavimentos. El agua es el causante principal del deterioro de la estructura del pavimento, originando principalmente



la pérdida de soporte del pavimento. Para minimizar los efectos del agua sobre los pavimentos se debe [5]:

- Prevenir el ingreso del agua al pavimento (drenaje superficial).
- Proveer de un drenaje para remover el agua rápidamente (drenaje subterráneo).
- Construir un pavimento suficientemente fuerte para resistir el efecto combinado de carga y agua.

Adicionalmente depende de:

- Calidad del drenaje. Viene determinado por el tiempo que tarda el agua infiltrada en ser evacuada de la estructura del pavimento.
- Exposición a la saturación. Porcentaje de tiempo durante el año en que un pavimento está expuesto a niveles de humedad que se aproximan a la saturación. Este valor depende de la precipitación media anual y de las condiciones del drenaje [15].

Los efectos del drenaje sobre el comportamiento del pavimento han sido considerados en el método AASHTO por medio del coeficiente de drenaje (Cd). La Tabla 2.12 proporciona los valores recomendados por la AASHTO para el coeficiente de drenaje, que depende de la propiedad con que cuentan las capas que constituyen la estructura del pavimento para liberar el agua entre sus granos, en función del tiempo durante el cual la estructura del pavimento está expuesta a niveles de humedad próximos a la saturación [15].

Tabla 2.12: Valores recomendados del coeficiente de drenaje (Cd) [15].

Cd	Tiempo transcurrido para que el suelo libere el 50 % de su agua libre	Porcentaje de tiempo en que la estructura del pavimento está expuesta a niveles de humedad cercanas a la saturación			
		<1 %	1-5 %	5-25 %	>25 %
Calificación					
Excelente	2 horas	1.25-1.20	1.20-1.15	1.15-1.10	1.10
Bueno	1 día	1.20-1.15	1.15-1.10	1.10-0.90	1.00
Regular	1 semana	1.15-1.10	1.10-0.90	1.00-0.90	0.90
Pobre	1 mes	1.10-0.90	1.00-0.90	0.90-0.80	0.80
Muy pobre	nunca	1.00-0.90	0.90-0.80	0.80-0.70	0.70

b) Transferencia de carga

La capacidad de una estructura de pavimento de concreto para transferir (distribuir) cargas a través de las juntas o grietas se lo realiza mediante la disposición de transferencia de carga siendo J el coeficiente empleado para analizar este efecto. Los dispositivos de transferencia de carga, trabazón de agregados y la presencia de bermas de concreto tienen efecto sobre éste valor, la Tabla 2.13 establece rangos de los coeficientes de transferencia de carga para diferentes condiciones desarrolladas a partir de la experiencia y del análisis mecánico de esfuerzos [15]. Como se puede apreciar en la tabla 2.13 el valor de J se



incrementa a medida que aumentan las cargas de tráfico, esto se debe a que la transferencia de carga disminuye con las repeticiones de carga.

El uso de bermas de concreto unidas o losas ensanchadas reducen las tensiones y deformaciones en una losa. Es por eso que se usan valores menores de J . La razón para tomar J menores en pavimentos con bermas de concreto unida es porque se supone que los vehículos no transitarán por la misma.

Tabla 2.13: Coeficiente de transferencia de carga J [15].

Soporte lateral	Si	No	Si	No	Si	No	Tipo
	Con pasadores con o sin refuerzo de temperatura		Con refuerzo continuo		Sin pasadores (fricción entre agregados)		
ESALs en millones							
Hasta 0.3	2.7	3.2	2.8	3.2	-	-	Calles y
0.3-1	2.7	3.2	3.0	3.4	-	-	caminos
1-3	2.7	3.2	3.1	3.6	-	-	vecinales
3-10	2.7	3.2	3.2	3.8	2.5	2.9	Camino y autopistas
10-30	2.7	3.2	3.4	4.1	2.6	3.0	principales
más de 30	2.7	3.2	3.6	4.3	2.6	3.1	autopistas

c) Pérdida de soporte

Este factor, LS (loss of support = pérdida de soporte) es incluido en el diseño de pavimentos rígidos para tomar en cuenta la pérdida potencial de soporte proveniente de la erosión de la subbase y/o movimientos diferenciales verticales del suelo. Deberá también considerarse este factor en términos de los movimientos verticales del suelo que pueden resultar de vacíos bajo el pavimento [16]. Aun cuando se utilice una subbase no erosionable, pueden desarrollarse vacíos, reduciendo la vida del pavimento.

En la Tabla 2.14 se proporciona algunos rangos sugeridos por las AASHTO para la pérdida de soporte, dependiendo del tipo de material (específicamente su rigidez o módulo elástico).



Tabla 2.14: Valores de la Pérdida de Soporte [15].

Tipo de material	Pérdida de soporte
Base granular tratada con cemento (E=1000000 a 2000000 psi)	0.0-1.0
Mezclas de agregados con Cementos (E=500000 a 1000000 psi)	0.0-1.0
Bases tratadas con Asfalto (E=500000 a 1000000 psi)	0.0-1.0
Mezclas bituminosas estabilizadas (E=40000 a 300000 psi)	0.0-1.0
Estabilizados con cal (E=20000 a 70000 psi)	1.0-3.0
Materiales granulares sin ligante (E=20000 a 70000 psi)	1.0-3.0
Materiales granulares finos o subrasante natural (E=20000 a 70000 psi)	2.0-3.0

2.2.4. Metodología

La metodología para determinar el espesor de la losa del pavimento rígido mediante el método de la AASHTO se resuelve siguiendo el siguiente proceso. Primero, una vez determinado todos los parámetros de diseño, criterios de comportamiento, propiedades de los materiales y características estructurales, se obtiene el número de ejes equivalentes que corresponderá al número de cargas de 18 kips (80 kN) previstas (W18) de la ecuación 2.43 determinado este valor en la ecuación, el único paso que queda es el de encontrar el valor del módulo de reacción de la subrasante (k) mediante el nomograma de la Figura 2.3 en los que ya se han establecido previamente los espesores de la subbase, subrasante natural y una primera aproximación del espesor de la losa. Obtenido este valor se itera el espesor del pavimento hasta que la ecuación 2.43 se satisfaga, obteniendo finalmente el espesor de la losa del pavimento hidráulico.

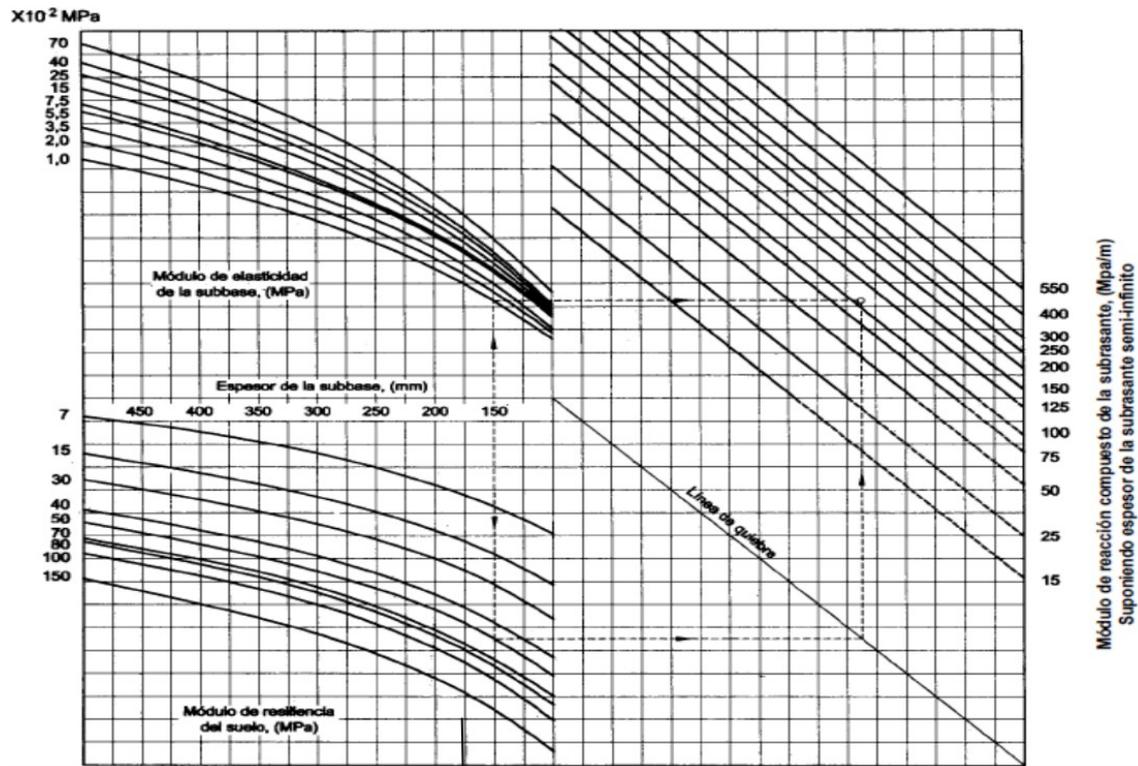


Figura 2.3: Nomograma para determinar el módulo de reacción de la subrasante [16].

2.3. Desarrollo del método de PCA y AASHTO en Matlab.

La programación de los métodos de la AASHTO y la PCA fue realizada por medio del software Matlab, mediante el uso de subrutinas, iteraciones y condicionales para obtener como resultado el espesor de la losa juntos con todos los parámetros que influyen en su cálculo, los mismos que han sido guardados en formato texto para su posterior análisis. Adicionalmente, se implementó una función que contiene una serie de las iteraciones en donde se establecieron rangos para ciertos parámetros que serán analizados a continuación para cada uno de los métodos. Estos rangos han sido tomados de los valores establecidos por la American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) y Portland Cement Association (PCA). Se obtendrán matrices cuyas dimensiones son la cantidad de parámetros más los resultados, por el número de iteraciones resultantes a partir de los rangos de los parámetros de entrada, tomando valores máximos, mínimos y medios de cada parámetro, siendo esto suficiente para la obtención de muestras que serán analizadas estadísticamente en el Capítulo 3.

A continuación se explicará la estructura y consideraciones tomadas para cada método.



2.3.1. Desarrollo del método de la PCA

La programación del método consta de 8 funciones: PCA_UC17, CALCU_PCA, TRAFICO_PCA, FSC_PCA, SUELO_PCA, FAT_ERO_PCA, RESULT_PCA y FIG_PCA. Donde PCA_UC17 es la subrutina principal. En la Figura 2.4 se aprecia la subdivisión de funciones que llama el programa principal así como las sub funciones que llaman las funciones secundarias.

La programación del método de la PCA se puede encontrar en los Anexos, Sección I.2.

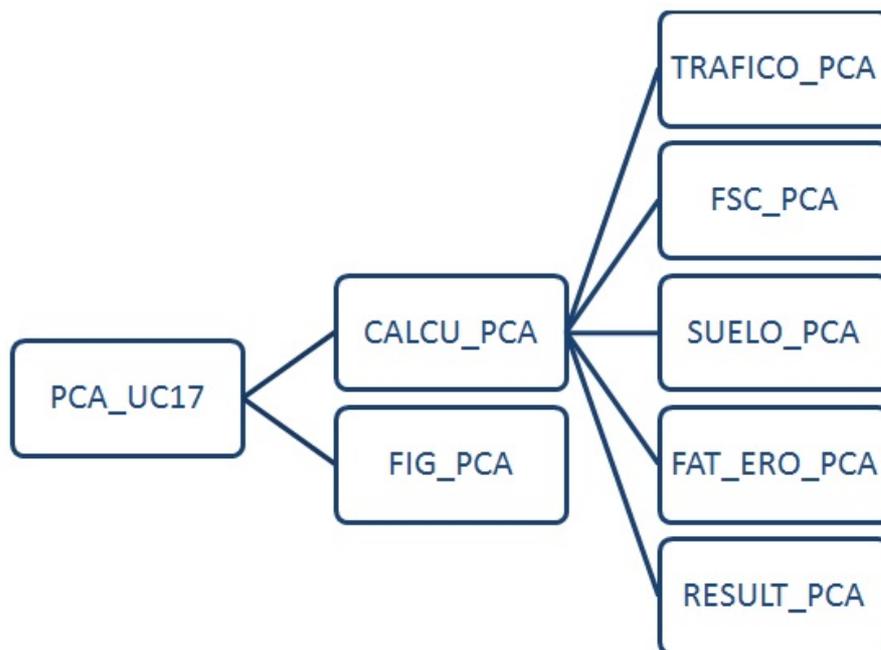


Figura 2.4: División de funciones del programa PCA.

A continuación, se describirán cada una de las subrutinas con el fin de conocer cuál es su función.

Función PCA_UC17

La función principal es PCA_UC17, está encargada de la declaración de datos y a la vez de la llamada de funciones CALCU_PCA y FIG_PCA. Encargadas de encontrar la solución del método PCA, así como la presentación gráfica de los resultados de fatiga y erosión vs espesor de la losa de concreto. En la Tabla 2.15 se presenta los valores asumidos para el estudio. Adicionalmente, se tomarán los valores para carga por eje y eje por cada 1000 vehículos de acuerdo a la Tabla 2.16.

**Tabla 2.15: Consideraciones para el trabajo de investigación.**

Detalles	Nomenclatura	Valor	Unidad
Módulo de elasticidad	E	4E+06	psi
Coefficiente de Poisson del concreto	μ	0.15	
Porcentaje de vehículos comerciales	VC	19	%
Tráfico promedio diario	TPD	2900	vehículos
Número de carriles	carril	4	U
Dirección por carril	dirección	2	U

Tabla 2.16: Carga por eje y eje por cada 1000 vehículos [19].

Carga por Eje kN	Eje por 1000 Vehículos
Simple	
22	0.96
20	4.23
18	15.81
16	38.02
14	56.11
12	124.00
10	204.96
8	483.10
6	732.28
4	1693.31
Tándem	
36	4.19
32	69.59
28	68.48
24	39.18
20	57.10
16	75.02
12	139.30
8	85.59
4	31.90

El programa cuenta con una serie de iteraciones de los parámetros que serán analizados estadísticamente, los mismos que son presentados en las Tablas 2.17 y 2.18 con sus respectivos rangos e intervalos aplicados para subbase granular y cementada, respectivamente. La Tabla 2.19 presenta los valores de módulo de rotura usados tanto para subbases granulares y cementadas. Los rangos para módulo de reacción de la subrasante y espesor de la base han sido establecidos a partir de las Tablas 2.1 y 2.2, el periodo



de diseño estructural y la tasa de crecimiento vehicular han sido elegidos a partir de los conceptos empleados por A. Montejó Fonseca [13].

La función `CALCU_PCA` se encuentra localizada dentro de las iteraciones de la función `PCA_UC17` con el fin de encontrar el espesor para cada uno de los valores correspondientes a cada iteración, al igual que la función `FIG_PCA`. A estas dos funciones le acompaña una matriz, encargada del almacenamiento de cada una de las iteraciones, necesarias para el análisis estadístico.

Tabla 2.17: Valores utilizados para las iteraciones en una subbase granular [13].

Descripción	Nomenclatura	Rango		
		Inferior	Medio	Superior
Bermas	Berma	CB		SB
Pasador	Pasador	CP		SP
Módulo de reacción de la subrasante	Mr	20	50	80
Espesor de la subbase	Ds	100	200	300
Periodo de diseño estructural	n	20	30	40
Tasa de crecimiento vehicular	r	1 %	3.5 %	6 %

CB con berma, SB sin berma, CP con pasador, SP sin pasador

Tabla 2.18: Valores utilizados para las iteraciones en una subbase cementada [13].

Descripción	Nomenclatura	Rango		
		Inferior	Medio	Superior
Bermas	berma	CB		SB
Pasador	pasador	CP		SP
Módulo de reacción de la subrasante	Mr	20	40	60
Espesor de la subbase	Ds	100	175	250
Periodo de diseño estructural	n	20	30	40
Tasa de crecimiento vehicular	r	1 %	3.5 %	6 %

CB con berma, SB sin berma, CP con pasador, SP sin pasador

Tabla 2.19: Valores del módulo de rotura para las iteraciones [13].

Descripción	Nomenclatura	Rango		
		Inferior	Medio	Superior
Módulo de rotura	MR (lb/pulg ²)	550	600	650

Función `CALCU_PCA`

La subrutina `CALCU_PCA` obtiene la resolución del método PCA, es decir, determina el espesor para las condiciones impuestas. Para la resolución del problema se necesita a



su vez llamar a cuatro funciones para la obtención del espesor a saber, TRAFICO_PCA, SUELO_PCA, FSC_PCA y FAT_ERO_PCA, y una quinta encargada del almacenamiento en formato texto (RESULT_PCA) descritos a continuación. Para la obtención del espesor se creó dos matrices, Matfatiga y Materosion, las mismas que se encuentran dentro de una iteración donde la variable espesor del pavimento varía desde 100 a 350 mm, las matrices son las encargadas de almacenar cada una de las sumatorias de porcentaje de fatiga y erosión de cada iteración para posteriormente encontrar el porcentaje de fatiga y erosión más cercano a 100 %, encontrando así el espesor de diseño. La función RESULT_PCA es llamada una vez se obtiene el espesor con sus respectivos datos.

Función TRAFICO_PCA

Esta función obtiene el número de ejes por vehículo, según el procedimiento descrito en el subcapítulo 2.1 para este análisis se necesita como datos de entrada el porcentaje de vehículos comerciales, tráfico promedio diario, periodo de diseño, tasa anual de crecimiento de tránsito, número de carriles y dirección de los mismos. Calculando así el factor de proyección de tránsito de acuerdo a la ecuación 2.1 y el factor sentido a partir de la Tabla 2.3. Para el factor carril se han implementado un ajuste logarítmico para obtener ecuaciones a partir de la Figura 2.2 dando como resultado:

dirección = 1

$$FL = 1 \quad (2.48)$$

dirección = 2

$$FL = -0,083 * \log(TPD_{diseño}) + 1,5775 \quad (2.49)$$

dirección = 3

$$FL = -0,082 * \log(TPD_{diseño}) + 1,4330 \quad (2.50)$$

Finalmente, se aplica la ecuación 2.3, devolviendo así el número de repeticiones esperadas para cada eje.

Función SUELO_PCA

Esta función determina el valor de la resistencia de la subrasante (k) para lo cual se necesita como datos de entrada el módulo de reacción de la subrasante, el espesor de la subbase y si esta es granular o cuenta con un tratamiento de cemento. La programación de esta función está enfocada en las Tablas 2.1 y 2.2 devolviendo así la resistencia de la subrasante.

Función FSC_PCA

La función FSC_PCA obtiene el factor de seguridad tanto para eje Simple como Tándem. La subrutina necesita como valores de entrada la máxima carga por eje simple y tándem, el TPD y el número de carriles. La función utiliza la Tabla 2.4 para obtener la categoría de carga por eje y la Tabla 2.5 para obtener el factor de seguridad.



Función FAT_ERO_PCA

Esta función determina el valor de fatiga y erosión a través del factor de erosión y esfuerzo equivalente para cada carga por eje tanto para eje simple como tándem, además de la sumatoria total de fatiga y erosión. Para que la subrutina inicie se necesita como datos de entrada, la carga por eje simple y tándem, carga por 1000 vehículos, Tabla 2.16 módulo de rotura, módulo de elasticidad y coeficiente de Poisson, existencia de bermas y pasadores, espesor del pavimento rígido, factor de seguridad y resistencia de la subrasante, las dos últimas obtenidas por funciones FSC_PCA y SUELO_PCA, respectivamente. En esta subrutina se implementan las ecuaciones 2.4 a 2.42 correspondientes al análisis de fatiga y erosión del método PCA.

Es importante indicar que este método se basa en prueba y error. Se debe imponer un tanteo del espesor del pavimento y determinar los porcentajes de fatiga y erosión hasta obtener el adecuado, es decir, aquel espesor que se aproxime al 100 % de fatiga y/o erosión

Función RESULT_PCA

La finalidad de esta función es mostrar en una hoja de formato texto los datos más relevantes del análisis y almacenar los mismos, los datos almacenados corresponden a:

Datos de entrada:

- Porcentaje de vehículos comerciales (%)
- Periodo de diseño (n), en años
- Tasa de crecimiento de tránsito (r)
- Número de carriles
- Dirección y sentido de vía
- Material de subbase granular o cementada
- Espesor de subbase
- Diseño con (CB) o sin (SB) berma
- Diseño con (CP) o sin (SP) pasador
- Módulo de rotura de concreto (MR)
- Número de ejes equivalentes (N)
- Espesor del pavimento rígido
- Repeticiones de carga cada 1000 vehículos

Fatiga (para eje simple y tándem):

- Esfuerzo equivalente
- Esfuerzo equivalente/ Módulo de rotura del concreto.
- Repeticiones admisibles



- Porcentaje de fatiga
- Sumatoria de porcentaje de fatiga

Erosión (para eje simple y tándem):

- Factor de erosión
- Potencia que relaciona la deflexión de esquina de la losa y la presión entre losa y suelo de soporte
- Repeticiones admisibles
- Porcentaje de erosión
- Sumatoria de porcentaje de erosión

En los Anexos, Sección I.6 se presenta el archivo de salida (txt).

Función FIG_PCA

La subrutina FIG_PCA está programada para generar un gráfico donde se presente los porcentajes de erosión y fatiga vs el espesor de la losa de pavimento rígido, para lo cual se utilizan las matrices Matfatiga y Materosion donde están almacenados cada uno de los porcentajes de fatiga y erosión respectivamente. De esta manera se puede visualizar cual es el porcentaje de fatiga y erosión según el espesor de pavimento rígido calculado. En la Figura 2.5 se presenta un ejemplo del resultado aleatorio obtenido de la función FIG_PCA.

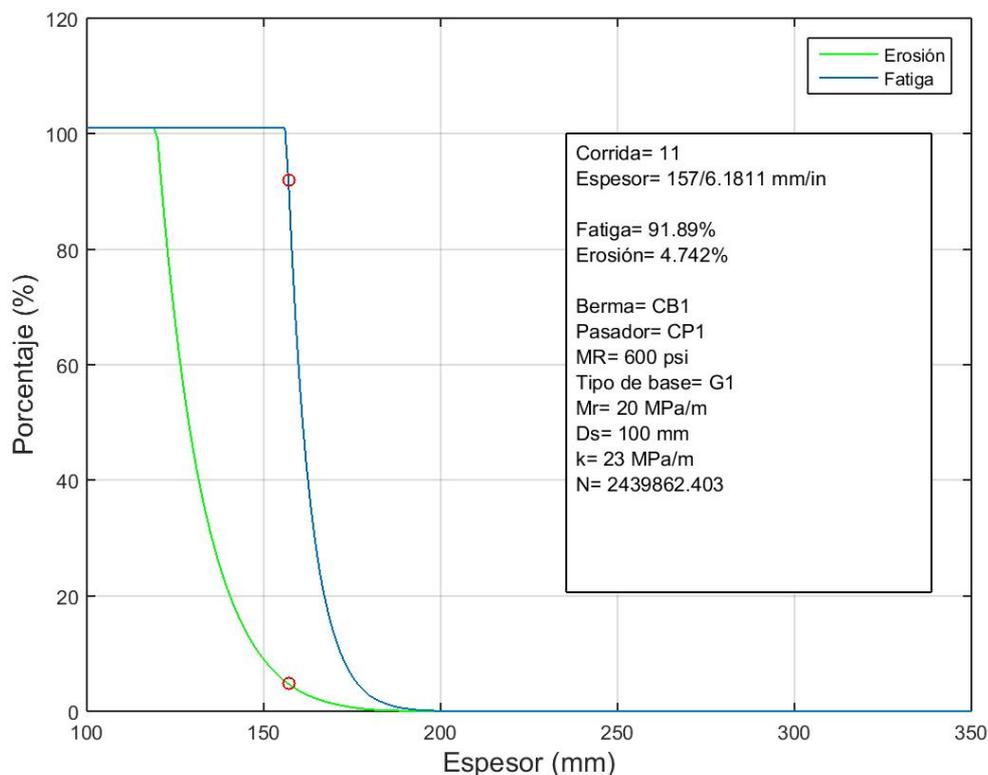


Figura 2.5: Gráfico de resultados de la función FIG_PCA.



Ejemplo de aplicación

Para una mayor explicación, se presenta un ejemplo correspondiente a la primera iteración del método de PCA para una subbase cementada donde como datos de entrada se cuenta: con bermas pasadores, un módulo de reacción de la subrasante $M_r = 20 \text{ MPa/m}$, espesor de la subbase $D_s = 100 \text{ mm}$, resistencia a la flexión del concreto a 28 días (Módulo de rotura) $M_R = 550 \text{ psi}$, periodo de diseño estructural $n = 20$ años, una tasa anual de crecimiento vehicular $r = 1\%$, porcentaje de vehículos comerciales $VC = 19\%$, y un número de carril $= 4$, en dos direcciones, dirección $= 2$.

En la Tabla 2.20 se muestra los valores calculados por la función PCA_UC17, donde primero se realiza un recuento de los datos de entrada así como también resultados generados por el programa; como k combinado, factor de seguridad de carga, y el número de ejes equivalentes. En las columnas 1 y 2 se visualiza los datos de entrada, carga por ejes y eje por 1000 vehículos respectivamente, los valores obtenidos en CALCU_PCA se presentan en la columna 3 hasta la 11. Finalmente, se presenta el factor de esfuerzo equivalente, factor de erosión y factor de relación de esfuerzo tanto para eje simple como tándem y la sumatoria de fatiga y erosión.



Tabla 2.20: Resultados de una iteración del Método de PCA.

Cálculo del Espesor del Pavimento													
Espesor de tanteo	146	mm	Junta con pasador	Si									
k combinado	60	MPa/m	Berma de concreto	Si									
Módulo de rotura	550	psi	Tipo de Subbase	Cementada									
Factor de seguridad de carga	1.0		Periodo de diseño	20	años								
TPD	2900.0		Tasa de Crecimiento de Tránsito	1	%								
			Porcentaje Vehículos comerciales	19	%								
			Número de ejes equivalentes	1.94E+06									
Carga por eje KN (1)	Eje x 1000 veh (2)	Carga*fsc (3)	Repetición Esperada (4)	Análisis de Fatiga				Análisis de Erosión					
				Esfuerzo Equivalente	ESF EQUIV/MR	Repetición Admisible	% fatiga	Factor de erosión	Potencia	Repetición Admisible	% erosión		
Eje Simple													
22	0.96	22	1863.46	363.25	0.66	5.76E+03	32.33	4.10	20.44	7.08E+05	0.26		
20	4.23	20	8210.87	332.12	0.60	2.78E+04	29.52	3.93	16.89	1.51E+06	0.54		
18	15.81	18	30688.86	300.80	0.55	1.36E+05	22.59	3.75	13.68	4.17E+06	0.74		
16	38.02	16	73800.78	269.28	0.49	1.32E+06	5.60	3.54	10.81	2.36E+07	0.31		
14	56.11	14	108915.40	237.51	0.43	0	0.00	3.31	8.28	0	0.00		
12	124.00	12	240696.90	205.47	0.37	0	0.00	3.04	6.08	0	0.00		
10	204.96	10	397848.70	173.11	0.31	0	0.00	2.73	4.22	0	0.00		
8	483.10	8	937747.40	140.36	0.26	0	0.00	2.34	2.70	0	0.00		
6	732.28	6	1421432.00	107.10	0.19	0	0.00	1.84	1.52	0	0.00		
4	1693.31	4	3286891.00	73.16	0.13	0	0.00	1.14	0.68	0	0.00		
Esfuerzo equivalente				220.22	Factor de erosión				2.97				
Factor de relación de esfuerzos							0.40						
Eje Tándem													
36	4.19	36	8133.23	250.92	0.46	2.32E+07	0.03	3.72	13.17	5.20E+06	0.16		
32	69.59	32	135081.40	224.62	0.41	0	0.00	3.51	10.40	3.68E+07	0.37		
28	68.48	28	132926.80	198.13	0.36	0	0.00	3.28	7.96	0	0.00		
24	39.18	24	76052.46	171.40	0.31	0	0.00	3.01	5.85	0	0.00		
20	57.10	20	110837.00	144.40	0.26	0	0.00	2.69	4.06	0	0.00		
16	75.02	16	145621.60	117.08	0.21	0	0.00	2.31	2.60	0	0.00		
12	139.30	12	270395.80	89.34	0.16	0	0.00	1.81	1.46	0	0.00		
8	85.59	8	166139.10	61.03	0.11	0	0.00	1.10	0.65	0	0.00		
4	31.9	4	61921.22	31.81	0.06	0	0.00	-0.10	0.16	0	0.00		
Esfuerzo equivalente							143.19	Sumatoria fatiga		90.08	Sumatoria de erosión		2.38
Factor de relación de esfuerzos							0.26	Factor de erosión		2.37			

En la Figura 2.6 se encuentran graficados el porcentaje de fatiga y erosión vs el espesor de la losa de pavimento en mm, dando un porcentaje para cada espesor y señalando con un círculo en el espesor ideal correspondiente a 146 mm. Cabe mencionar que para espesores menores para 150 en fatiga y 115 mm en erosión, los porcentajes son mayores a 100 % por lo que por motivos de presentación de resultados, se decidió restringirlos hasta el 101 %.

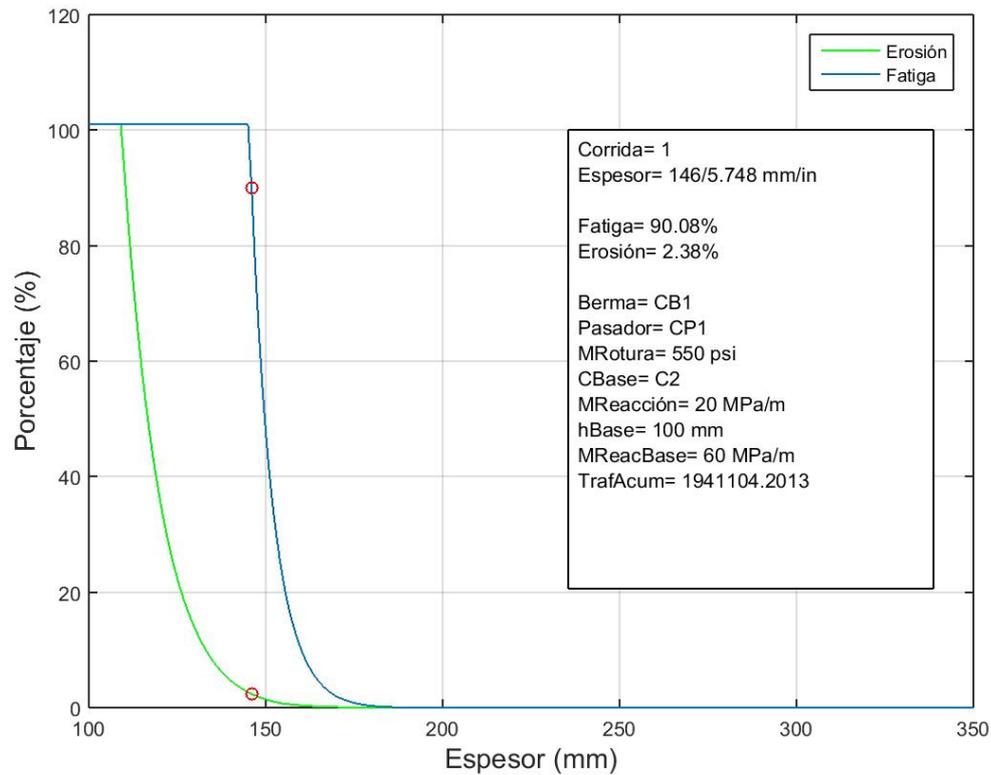


Figura 2.6: Resultados generados por la función FIG_PCA del ejemplo de aplicación.

2.3.2. Desarrollo del método de la AASHTO.

Para el método de la AASHTO primero se explicará cada una de las funciones que se emplearon, que juntas arman el programa, y como determinan los resultados. El programa consiste en el llamado de funciones o subrutinas que son subdivisiones del método principal. A continuación en la Figura 2.7 se muestra la subdivisión de las funciones, así como también las subrutinas que llaman las funciones secundarias.

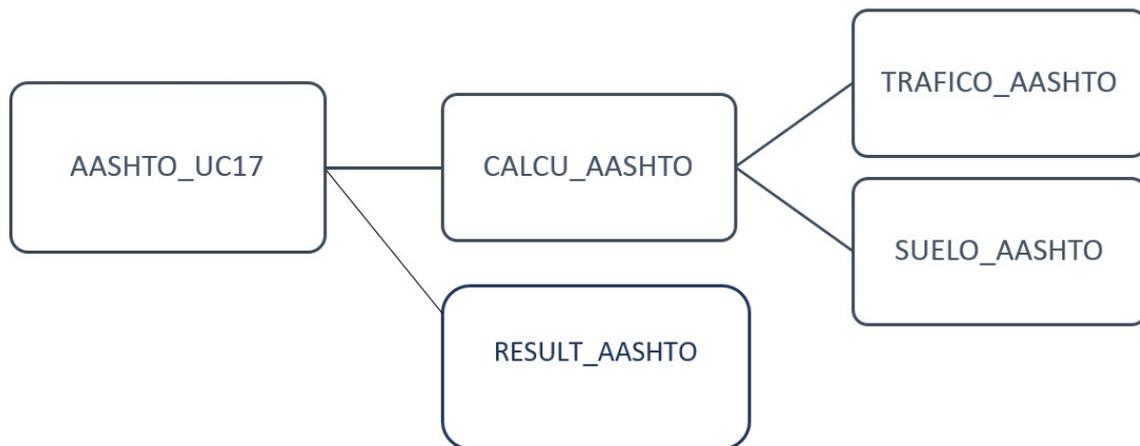


Figura 2.7: Funciones del programa AASHTO en Matlab.

Función AASHTO_UC17.

La función AASHTO_UC17, contiene la iteración de los principales parámetros que influyen directamente en el espesor de la losa, parámetros que serán analizados estadísticamente, los mismos que son presentados en la Tabla 2.21 con sus respectivos rangos máximos, mínimos y medios. Una vez que el programa llama a la función CALCU_AASHTO, múltiples iteraciones en función de los diferentes parámetros realizan la iteración, llegando un número de permutaciones de 6561, formando una matriz de resultados cuyas dimensiones es el número de iteraciones por los datos que entrega.

Tabla 2.21: Rangos para los diferentes parámetros a iterar.

Descripción	Nomenclatura	Rango		
		inferior	media	superior
Confiabilidad (%)	-	50.00	72.50	95.00
Periodo de diseño estructural	n	20.00	30.00	40.00
Desviación estándar	So	0.34	0.37	0.40
Pérdida por soporte	Ls	0.00	1.50	3.00
Coef. de drenaje	Cd	0.80	1.00	1.20
Coef. de transferencia de carga	J	2.40	3.80	4.40
Espesor de la subbase (pulg)	H1	4.00	12.00	20.00
Profundidad del estrato firme (pulg)	H2	2.00	7.00	12.00

Función RESULT_AASHTO.

Esta función contiene la programación para el almacenamiento de todos los resultados y parámetros del programa, resumidas en un archivo en formato texto, que presenta de



forma ordenada el resultado de las iteraciones como un resumen rápido de la solución del problema. Un ejemplo será presentado en Anexos, Sección I.7

Función CALCU_AASHTO.

La función CALCU_AASHTO contiene el cálculo del espesor de la losa del pavimento rígido, a partir de los siguientes parámetros: la confiabilidad, el espesor de la subbase en pulgadas (H1), la profundidad al estrato firme en pies (H2), el periodo de diseño estructural (n), el coeficiente de drenaje (Cd), el coeficiente de transferencia de carga (J), el coeficiente por pérdida de soporte (Ls) y la desviación estándar (So). Se asumen valores fijos de: la tasa de crecimiento vehicular de 4 % (r), 31000 MPa (3981427 psi) para el módulo elástico del concreto hidráulico (ME2), 5.2 MPa (652 psi) para el módulo de rotura del concreto hidráulico, índice de servicio inicial de 4.8, índice de servicio final de 2.8 y aproximación inicial del espesor de la losa de 6 pulgadas. En la Tabla 2.22 se muestra los valores de los módulos resilientes de la subrasante y los módulos de elasticidad de la subbase por mes adoptados [16], pues se desarrolló una subrutina que determina el módulo efectivo según el método propuesto por AASHTO.

Tabla 2.22: Módulos Resilientes y Módulos de Elasticidad [16].

	MR_vector (psi)	ME1 (psi)
Ene	20000	50000
Feb	20000	50000
Mar	2500	15000
Abr	4000	15000
May	4000	15000
Jun	7000	20000
Jul	7000	20000
Ago	7000	20000
Sep	7000	20000
Oct	7000	20000
Nov	4000	15000
Dic	20000	15000

Con el propósito de verificación todos los parámetros fijos mencionados, estos son impuestos a partir del ejemplo de aplicación del método de estimación del espesor de la losa del pavimento rígido del libro de AASHTO Guide for Design of Pavement Structures, de la página II-43 [16].

La función CALCU_AASHTO parte primero a partir de la solución de la ecuación 2.43 mediante la programación de la iteración del espesor de la losa usando una iteración hasta



que esta se iguale con la parte izquierda de esta ecuación ($\log(W18)$). Esta subrutina determina el espesor de la losa tanto en pulgadas como en cm, número de ejes equivalente y el módulo de reacción efectivo de la subrasante en psi.

Función TRAFICO_AASHTO.

La función TRAFICO_AASHTO, contiene la programación para el cálculo del número de ejes equivalente a partir de: tráfico promedio diario anual (TPDA), factor camión (Fc), factor para el número de carriles (FD) y de dirección (FL), periodo de diseño estructural (n) y la tasa anual de crecimiento vehicular (r). Asumiendo valores fijos de 6 carriles en total y 3 por dirección, tasa de crecimiento vehicular del 4%, y para los TPDA y factor camión se resume en la Tabla 2.23:

Tabla 2.23: Datos tomados del ejemplo de aplicación para el método de estimación del módulo de reacción efectivo de la subrasante [16].

Tipo de Vehículos	TPDA	FC
A	500	0.10
B	1600	1.00
C	250	2.50
D	2000	0.34

La fórmula para el cálculo del número de ejes equivalentes es:

$$N = TPDA * \%Vc * FD * FL * Fproy * FE * 365 \quad (2.51)$$

donde:

- El factor equivalente se programa mediante la siguiente ecuación:

$$FE = \frac{\sum_1^4 TPDA_i * FC_i}{\sum_1^4 TPDA_i} \quad (2.52)$$

- El factor de proyección para AASHTO es:

$$Fproy = \frac{(1 + r)^n - 1}{r} \quad (2.53)$$

con r siendo la tasa de crecimiento vehicular ya mencionada de 4%.

- TPDA total en ambas direcciones de 4350.
- El porcentaje de vehículos comerciales será:

$$\%Vc = \frac{(TPDA - Livianos)}{TPDA} \quad (2.54)$$

- FD y FL son los factores por dirección y carriles respectivamente.



Función SUELO_AASHTO.

Esta función contiene el cálculo del módulo de reacción efectivo de la subrasante, esto se logra utilizando las Figuras 2.8 a la 2.10, que realizan su cálculo a partir del espesor de la subbase y la profundidad al estrato firme, la pérdida por soporte, los módulos elásticos de la subbase de todo el año y los módulos resilientes de la subrasante de todo el año. Antes de proceder con el algoritmo de esta subrutina para la estimación del valor kefe es necesario tomar en cuenta varios aspectos como el módulo de elasticidad de la subbase analizando que para aquellos tipos de material de subbase que sean insensibles a la estación (por ejemplo, materiales tratados con cemento), puede asignarse un valor constante de módulo de subbase para cada estación (para cada mes). Para aquellos materiales que son sensibles pero no se han probado para condiciones extremas, los valores para los módulos de elasticidad deben estar entre 50.000 y 15.000 psi. Se pueden utilizar para los periodos de congelación y de deshielo, respectivamente. También es importante considerar que si el lecho rocoso se encuentra a menos de 10 pies de la superficie de la subrasante para cualquier longitud significativa a lo largo del proyecto, su efecto sobre el valor kefe y el espesor de la losa de diseño para ese segmento debe ser considerado, caso contrario no se realizaría la corrección del valor del Kcomp basado en la erosión potencial del material de la subbase por pérdida de soporte. Todas estas consideraciones son evaluadas en esta subrutina. El modo en el que esta función trabaja, consiste en el uso de modelos matemáticos que representan las tablas y figuras, de los cuales partirá el cálculo del kefe.

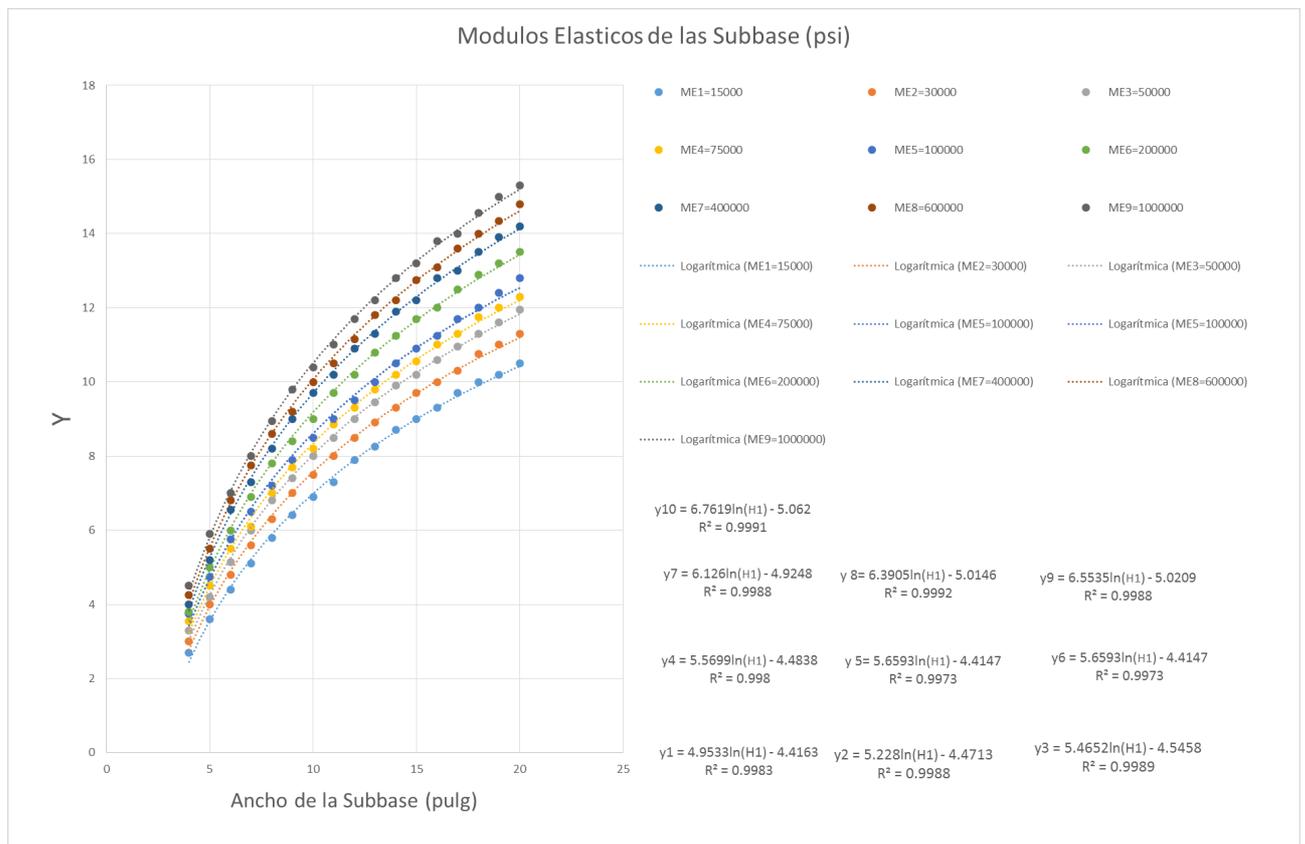


Figura 2.8: Obtención del “Y” equivalente de la Figura 2.10 para el cálculo del Kcomp.

En la Figura 2.8, primero se obtiene el valor de “Y” equivalente al de la Figura 2.10 trabajando de tal forma que los módulos de elasticidad que se tienen, representan cada una de las curvas, y con el espesor de la subbase que se tenga se proyecta el valor de “Y”.

Con el fin de emplear los nomogramas para el proceso de cálculo, cada una de las curvas representa los ajustes logarítmicos (ya que fue el ajuste que representó un menor error) para los diferentes módulos elásticos con los que el método puede trabajar, por lo que para un espesor de subbase se determina 12 valores de “Y” para los 12 módulos elásticos que se tienen de dato. La forma en que calcula el programa es mediante una interpolación entre curvas para el valor de módulo elástico que se tiene. Este valor de “Y” obtenido representa la proyección del mismo valor de “Y” para la Figura 2.10. Por ejemplo si se tuviera de dato de entrada un módulo de elasticidad de 20000 psi y un espesor de subbase de 10 pulgadas se toman las ecuaciones 1 y 2 de la Figura 2.8 que corresponden a las rectas para módulos de elasticidad de 15000 y 30000 psi respectivamente, por lo que, el resultado vendría a ser la interpolación entre las dos curvas, dando como resultado para el valor de “Y” un valor de 7.181.

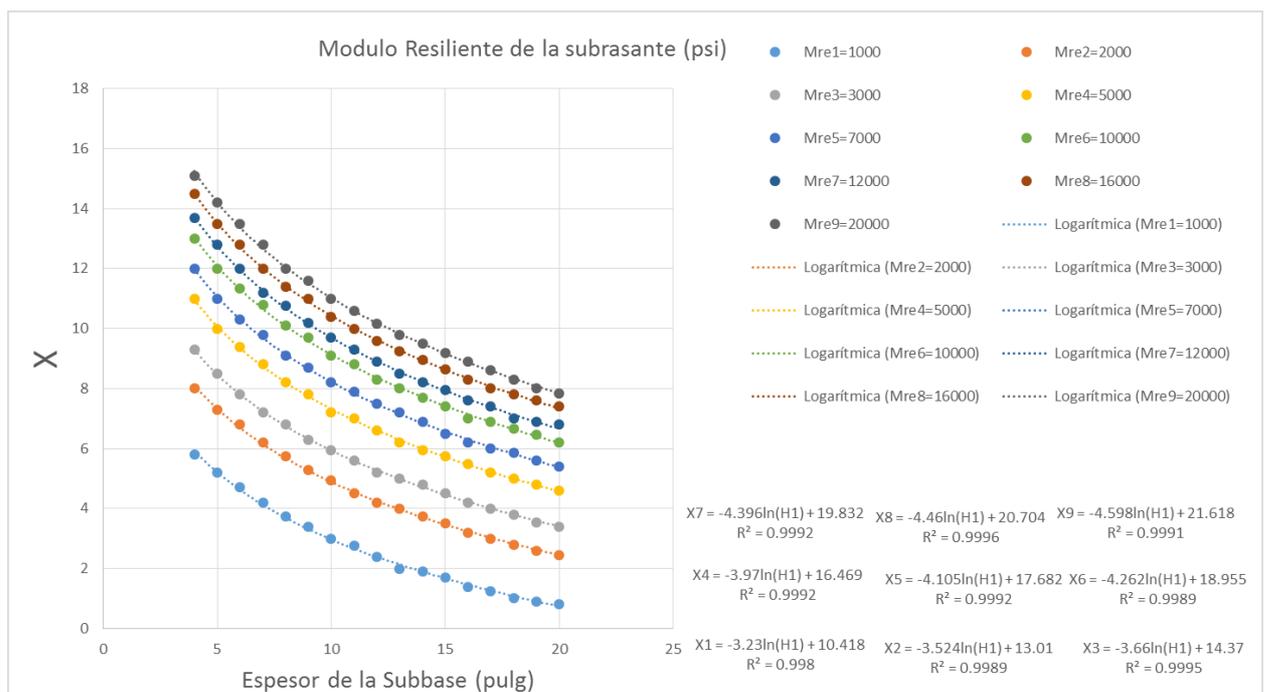


Figura 2.9: Obtención del “X” equivalente de la Figura 2.10 para el cálculo del Kcomp.

El siguiente paso es la obtención de los valores de “X” de la Figura 2.9 que representan la proyección del mismo para la Figura 2.10, a partir del mismo valor para la subbase y de los módulos resilientes del estrato firme que se tiene para los doce meses del año. Los ajustes de estas curvas se realizaron de igual forma que la Figura 2.8 mediante un ajuste logarítmico. El modo en el que la programación obtiene el valor de “X” es de igual manera, mediante una interpolación para el valor del módulo resiliente que se tiene de dato y las curvas en las que se encuentra para el mismo valor del espesor de la subbase. Por ejemplo, continuando con los datos anteriores de espesor de la subbase de 10 pulgadas y módulo



resiliente de la subbase de 9000 psi, se tomarían las curvas 5 y 6 de la Figura 2.9 para módulos resilientes de 7000 y 10000 psi respectivamente, por lo que la interpolación se realizaría entre estas dos curvas para un espesor de subbase de 10 pulgadas, obteniendo como resultado el valor de “X” de 8.837.

Una vez obtenido los valores de “Y” y “X” en la Figura 2.10 se determina el valor del módulo de reacción compuesto de la subrasante (K_{comp}). La determinación de estos valores se realiza proyectando los valores de “X” usando las rectas de los K_{comp} y encontrando varios valores de “Y” que corresponden a cada recta, una vez hecho esto se toma los valores de los “Y” obtenidos en la Figura 2.8, y se determina los dos “Y” más próximos a los proyectados por las rectas, tanto menor como mayor, con estos valores se realiza la interpolación y se encuentra el K_{comp} . Este proceso se repite para todos los datos obtenidos para los 12 meses del año y se los almacena en un vector. Por ejemplo con “Y” igual 7.182 y “X” igual a 8.837, el valor de “X” se reemplaza en cada una de las rectas de la Figura 2.10 obteniendo varios resultados de “Y”, se encuentra dentro de las proyecciones realizadas para las rectas de K_{comp} de 600 y 500 pci, por lo que la interpolación realizada hacia estas dos rectas da como resultado un K_{comp} de 531.25 pci.

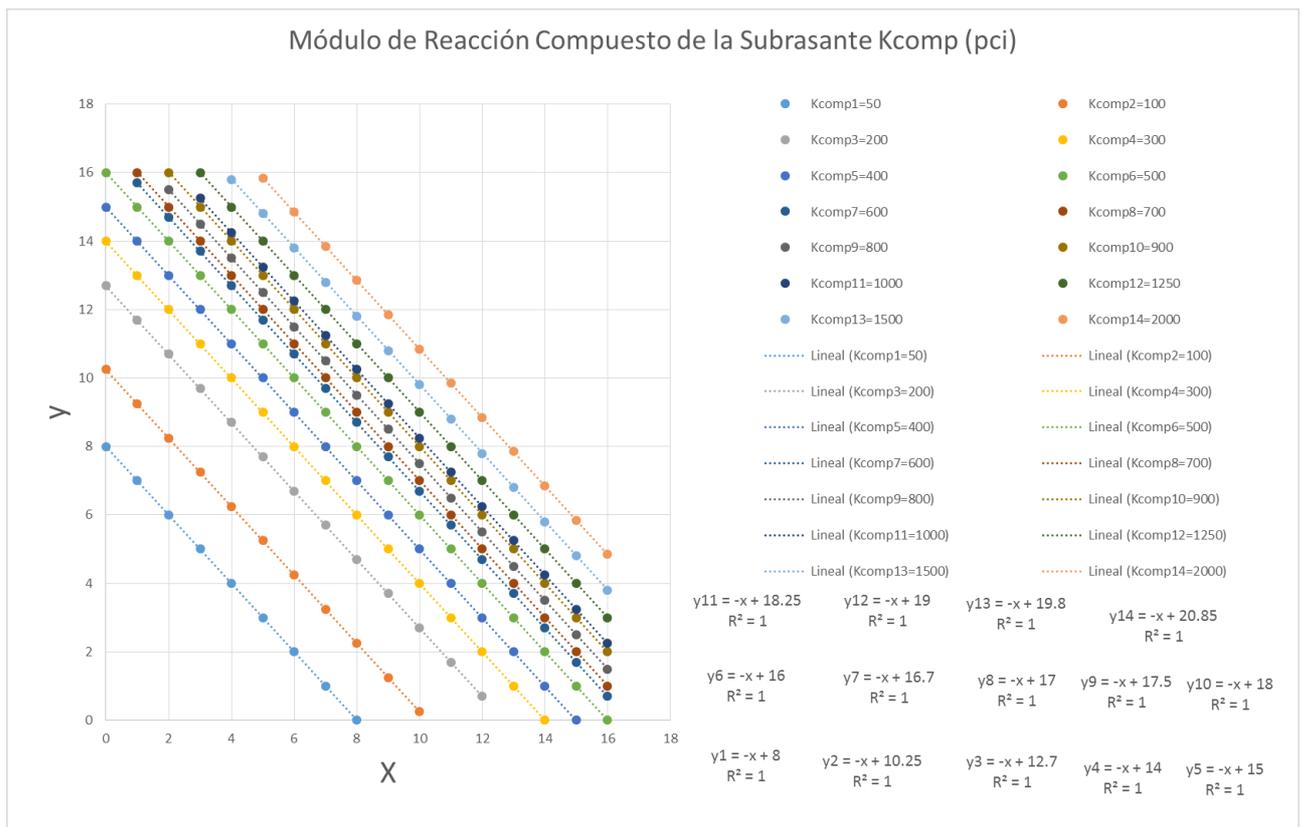


Figura 2.10: Módulos de reacción compuestos de la subrasante K_{comp} (pci)(Asumiendo una profundidad al estrato firme semi infinita).

Con este valor obtenido, la primera modificación que se le aplicará será debido a los efectos producidos por el estrato firme para una profundidad menor a 10 pies, caso contrario, si la profundidad es mayor el K_{comp} obtenido no se lo modificará.

La programación de la modificación se realiza a partir de la Figura 2.11 a la 2.13.

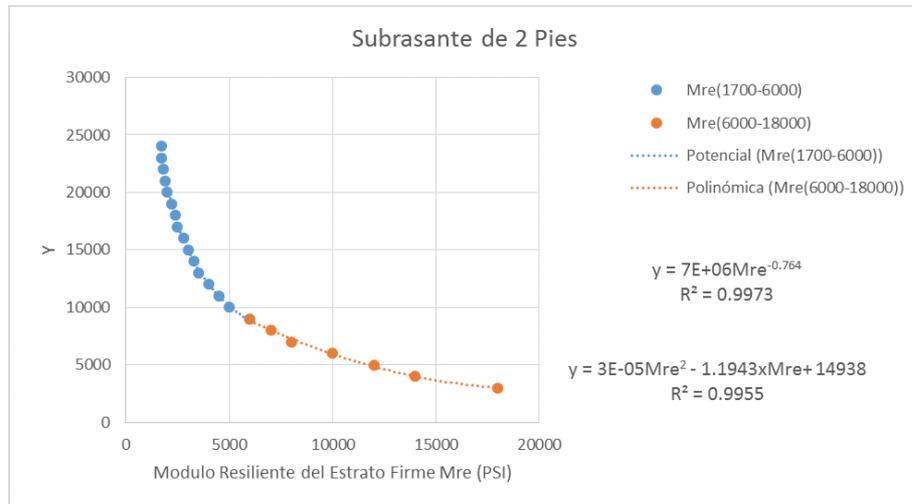


Figura 2.11: Curva para profundidad al estrato firme de 2 pies.

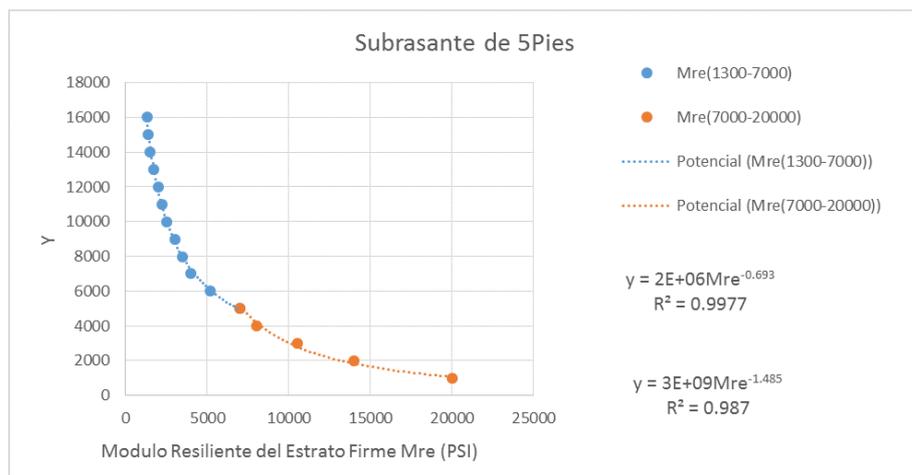


Figura 2.12: Curva para profundidad al estrato firme de 5 pies.

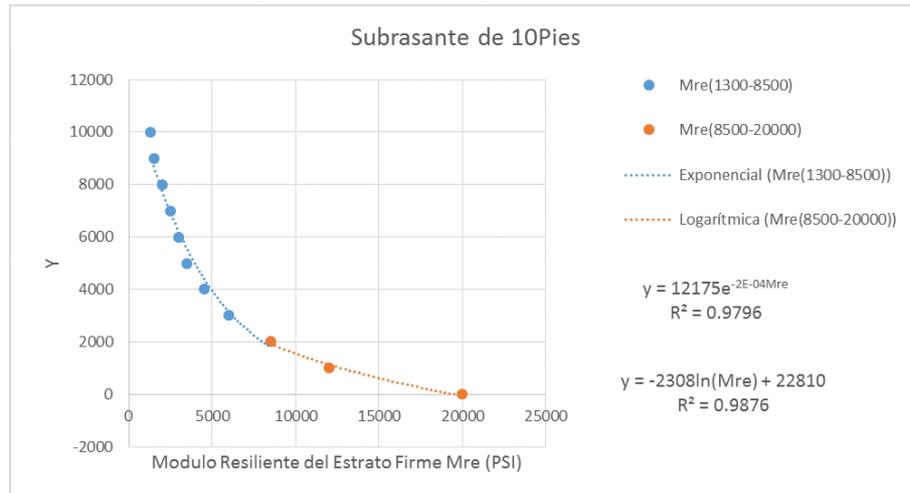


Figura 2.13: Curva para profundidad al estrato firme de 10 pies.

En la Figura 2.11 a la 2.13 se dividió a cada curva en dos intervalos, realizando dos ajustes para cada una, ya que al realizar una sola el valor del coeficiente de correlación era insatisfactorio, por lo que se optó por esta solución. Cada curva corresponde a cada estrato de 2, 5 y 10 pies para obtener modelos matemáticos que proporcionen un menor error. Una vez obtenidos estos modelos, la programación consiste en entrar con los valores fijos que se tiene de los módulos resilientes del estrato firme y obtener el valor de “Y” correspondiente a cada Figura. Este “Y” representará el mismo valor para la Figura 2.14, en caso de que el dato del estrato firme no corresponda exactamente a 2, 5 o 10 pies, la programación contiene una interpolación para cualquier valor diferente a estos. Al final de este paso se tendrá 12 valores de “Y” almacenados en un vector. El siguiente paso es mediante el “Y” calculado por la Figura 2.11 a la 2.13, que corresponde al de la Figura 2.14, se obtendrá el valor del módulo de reacción de la subrasante. Por ejemplo, para una profundidad al estrato firme de 8 pies y módulo resiliente de 9000 psi, se proyecta este valor para las rectas de 5 y 10 pies de las Figuras 2.12 y 2.13, obteniendo 2 valores del “Y” de 4027.82 y 1795.70 respectivamente, por lo que la interpolación se realizará entre estos dos valores para la profundidad al estrato firme de 8 pies dando como resultado un “Y” de 2688.54.

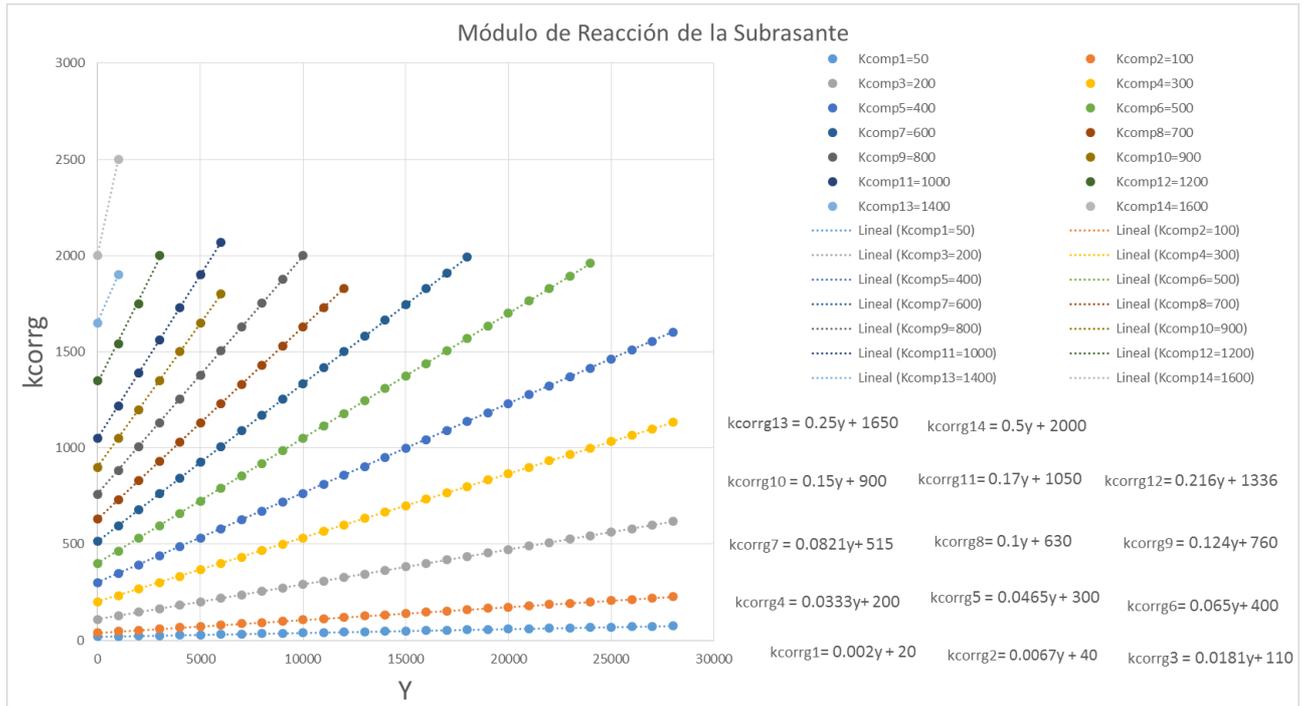


Figura 2.14: Modificación del módulo de reacción de la subrasante considerando efectos por proximidad al estrato firme (dentro de los 10 pies).

En la Figura 2.14 se puede ver cada una de las rectas que representa los diferentes valores de K_{comp} para los que el método funciona, por lo que la forma de determinar los valores para los módulos de reacción corregidos de la subrasante (K_{corr}) en la programación, es realizando una interpolación, en la que se determina entre que rectas se encuentran los valores de K_{comp} ya calculados de la Figura 2.10, después para el valor de “Y” que se tiene, se proyecta usando estas dos rectas, dando dos resultados de k_{corr} , con estos dos resultados se realiza la interpolación para el K_{comp} calculado. Determinando al final 12 valores de k_{corr} almacenados en un vector. Siguiendo el ejemplo anterior, se tiene el valor de “Y” de la Figura 2.14 de 2688.54 y como se obtuvo un K_{comp} de 531.25 pci, este se encuentra entre las rectas para 500 y 600 pci de la Figura 2.15 reemplazando el valor de “Y” en las ecuaciones que corresponden a estas rectas, dan valores de 574.75 y 735.72 respectivamente, por lo tanto la interpolación se realizará entre estos dos valores, los de las rectas y el K_{comp} , dando como resultado un k_{corr} de 625.05 pci.

En el siguiente paso, usando la Figura 2.15 a la 2.21 se estimará el daño relativo del pavimento rígido basado en el espesor de la losa y el soporte subyacente.

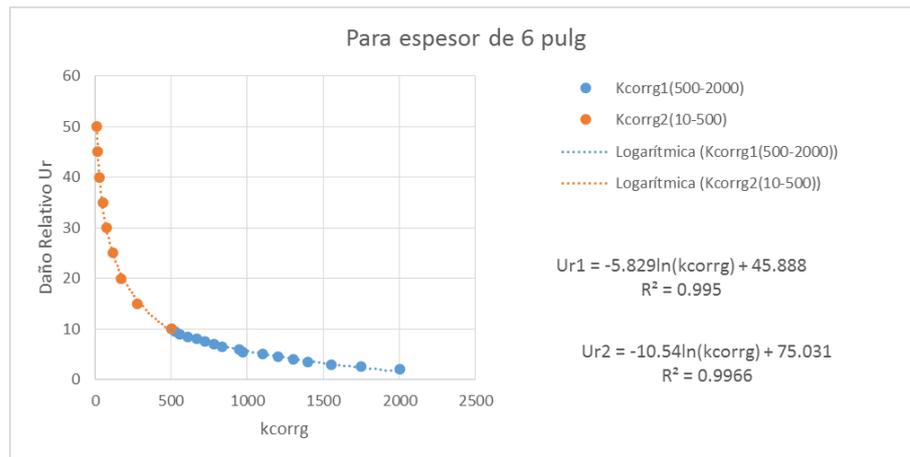


Figura 2.15: Obtención del daño relativo para una aproximación inicial del espesor de la losa del pavimento de 6 pulgadas.

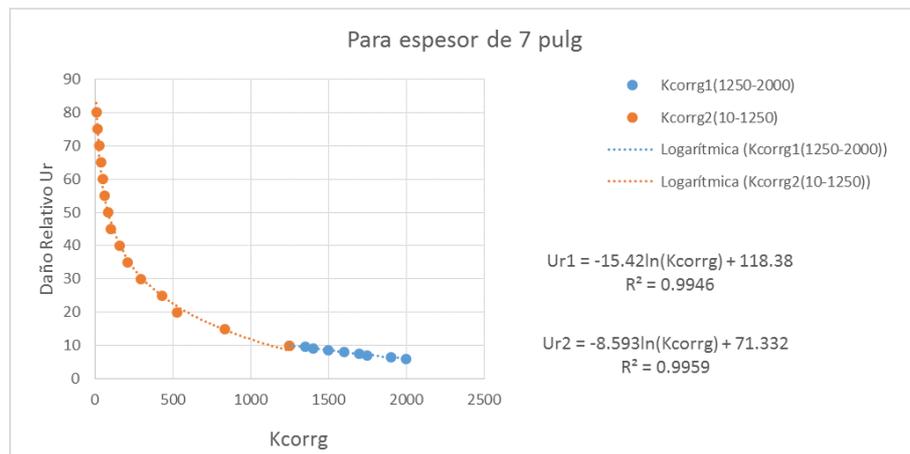


Figura 2.16: Obtención del daño relativo para una aproximación inicial del espesor de la losa del pavimento de 7 pulgadas.

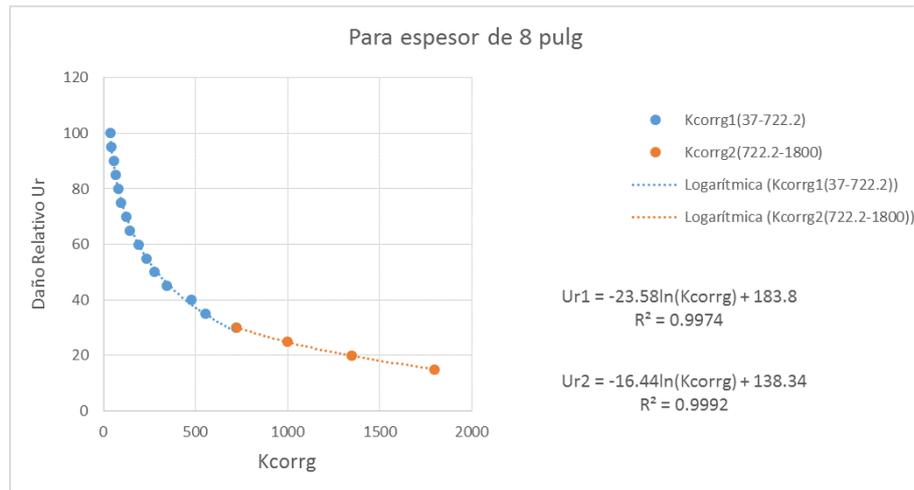


Figura 2.17: Obtención del daño relativo para una aproximación inicial del espesor de la losa del pavimento de 8 pulgadas.

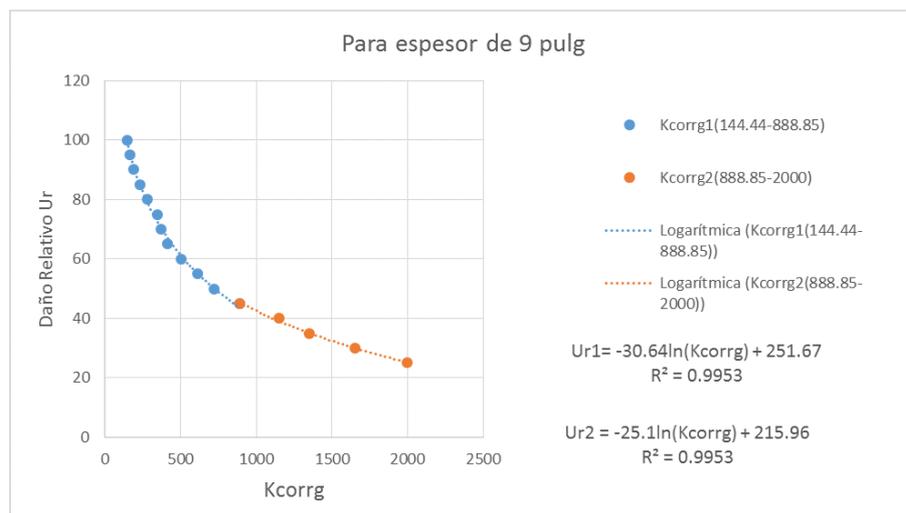


Figura 2.18: Obtención del daño relativo para una aproximación inicial del espesor de la losa del pavimento de 9 pulgadas.

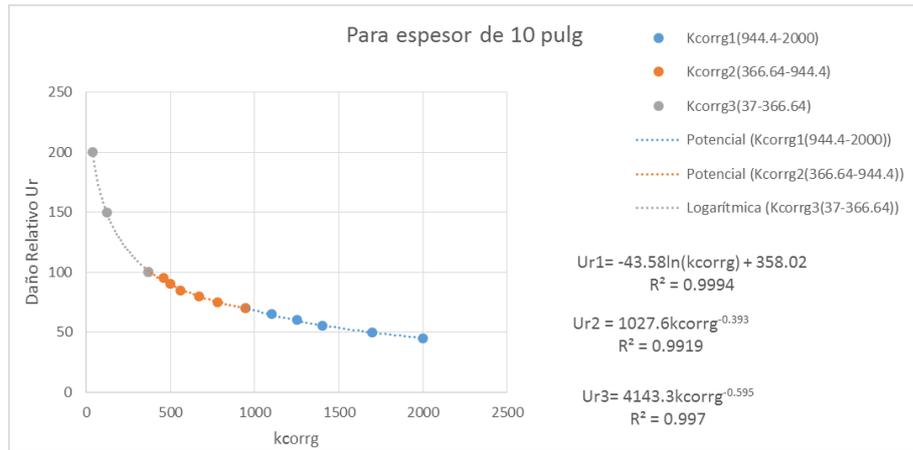


Figura 2.19: Obtención del daño relativo para una aproximación inicial del espesor de la losa del pavimento de 10 pulgadas.

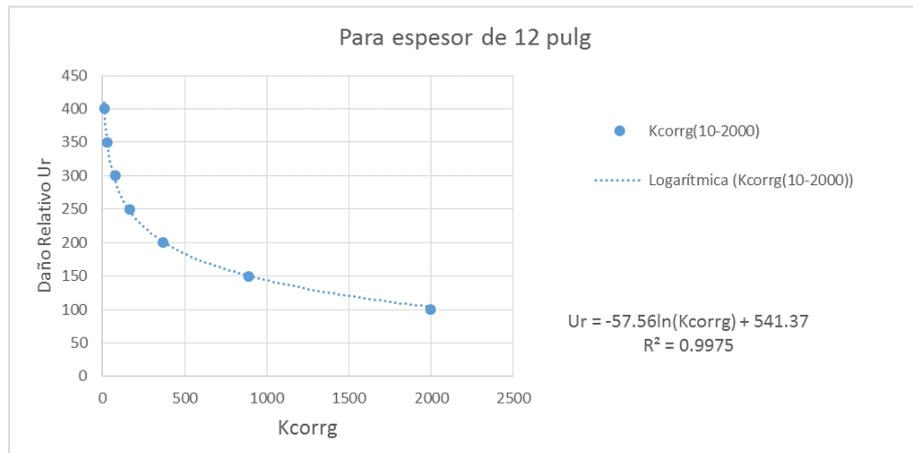


Figura 2.20: Obtención del daño relativo para una aproximación inicial del espesor de la losa del pavimento de 12 pulgadas.

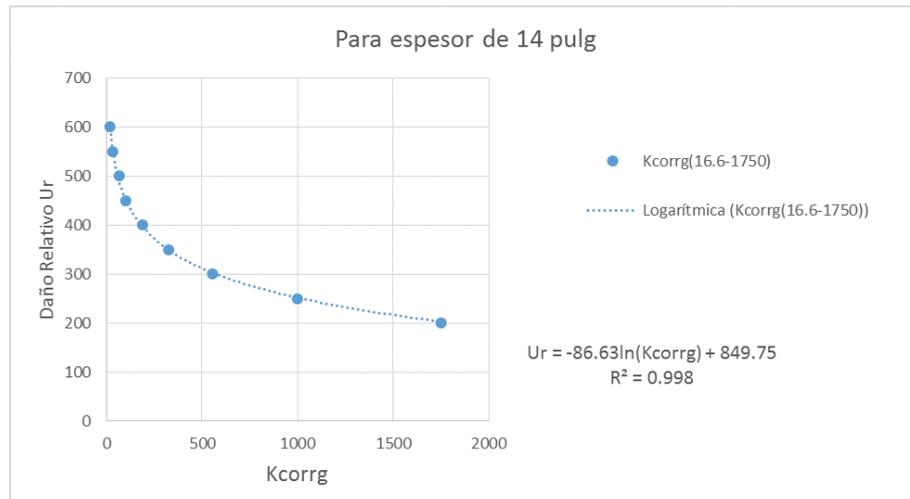


Figura 2.21: Obtención del daño relativo para una aproximación inicial del espesor de la losa del pavimento de 14 pulgadas.

La programación de este paso se basa en encontrar 12 valores de daño relativo para cada mes del año. Se debe tener una aproximación inicial del espesor de la losa (6 pulgadas) y a partir de esta se determina el daño relativo. Una vez obtenidos los 12 resultados se realiza un promedio de estos, y se repite el mismo proceso, pero de forma inversa, con el daño relativo promedio se determina un solo valor para kcorr. De igual manera, siguiendo el mismo ejemplo y para la aproximación inicial del espesor de la losa de 6 pulgadas, se usa la Figura 2.15 para una aproximación inicial del espesor de la losa del pavimento de 6 pulg, por lo que para el kcorr de 625.05 pci se tiene un daño relativo de 8.36. Con este valor, se utiliza las Figuras de la 2.22 a la 2.24 para realizar la corrección por posible pérdida de soporte de la subrasante que surge de la erosión de la superficie y obtener el kefe (módulo de reacción efectivo de la subrasante).

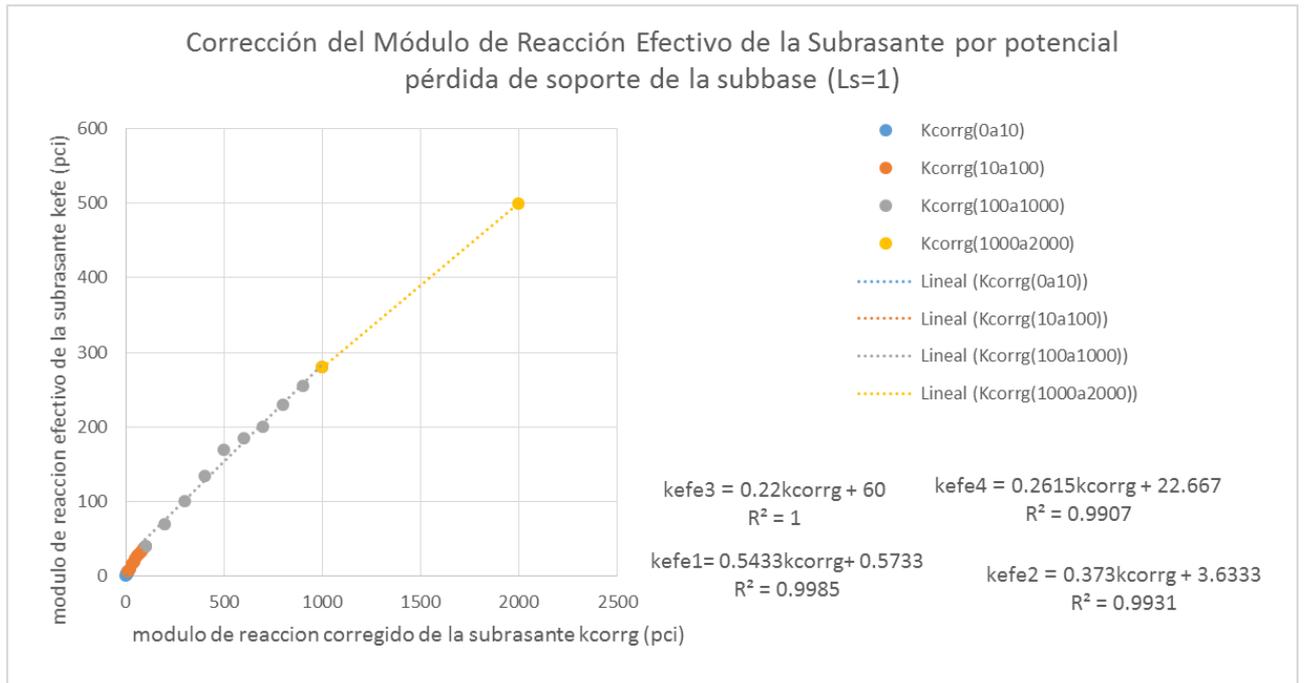


Figura 2.22: Corrección del módulo de reacción efectivo de la subrasante para una pérdida de soporte igual a 1.

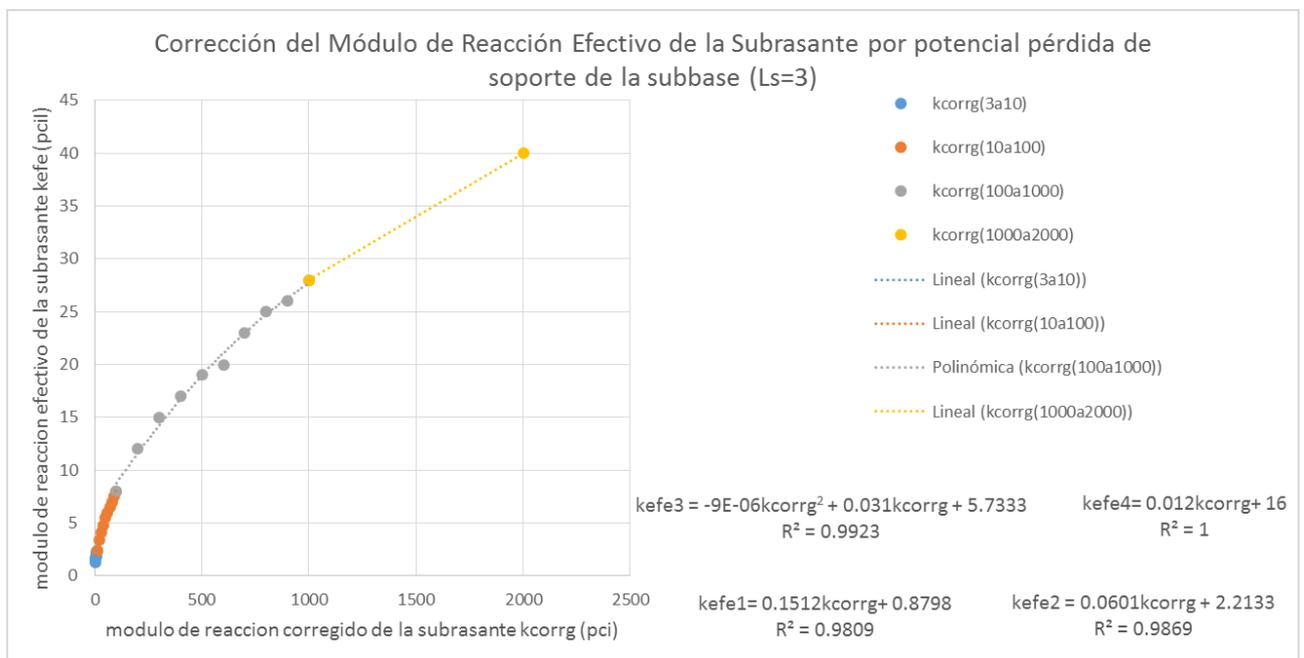


Figura 2.23: Corrección del módulo de reacción efectivo de la subrasante para una pérdida de soporte igual a 3.

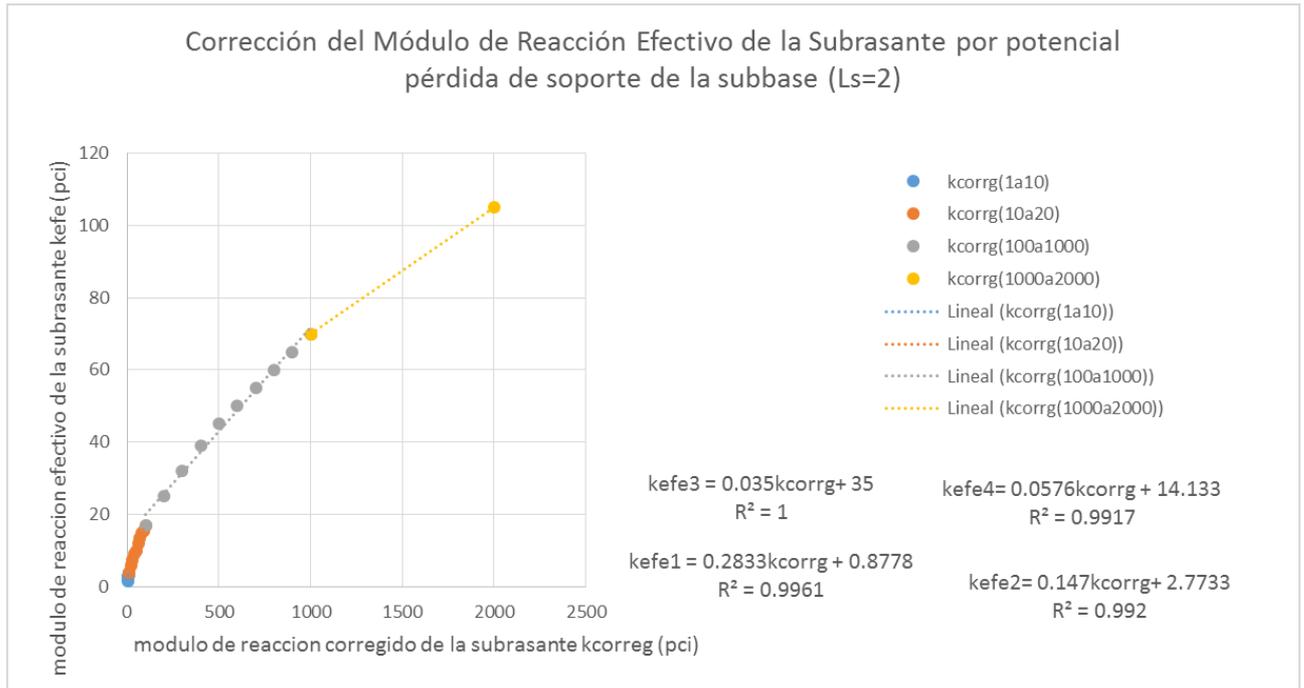


Figura 2.24: Corrección del módulo de reacción efectivo de la subrasante para una pérdida de soporte igual a 2.

En la Figura 2.22 a la 2.24 se tiene las diferentes pérdidas de soporte en base al tratamiento que reciban los materiales. Cada una de las figuras es dividida en varios intervalos y ecuaciones, para tener un mínimo de error al momento de realizar el ajuste. Una vez obtenido el valor de k_{correg} del paso anterior y con el valor de L_s que se tenga, se proyecta en el nomograma mediante las ecuaciones y se determina finalmente el valor del módulo de reacción efectivo de la subrasante ($kefe$), que para el ejemplo y para un L_s igual 1 se proyectará el k_{correg} de 625.05 pci mediante la ecuación 3 de la Figura 2.22, obteniendo como resultado un $kefe$ de 197.511 pci

La subrutina SUELO_AASHTO y su programación, siguen todos estos pasos y metodología para entregar únicamente el valor de $kefe$ a la función que es llamada (subrutina CALCULO_AASHTO). El código de programación se encuentra en Anexos, Sección I.3.

Ejemplo de aplicación.

Para una mayor explicación se presenta un ejemplo de una de las iteraciones del método de la AASHTO para los siguientes datos:

Para el ejemplo se tiene una confiabilidad del 80 %, periodo de diseño estructural de 35 años, desviación estándar de 0.4, coeficiente de drenaje de 0.8, coeficiente de transferencia de carga de 4.4, pérdida de soporte de 1, número de carriles de 3 en cada dirección. La tasa anual del crecimiento del tráfico es del 4 %, los datos de TPDA y factores camión son los presentados en la Tabla 2.23. Los módulos resilientes de la subrasante y los módulos de elasticidad de la subbase son los de la Tabla 2.22. El módulo elástico del concreto



hidráulico es de 31,000 MPa (3'981,427 psi) y un módulo de rotura 5.2 MPa (652.66 psi), el índice de servicio inicial es de 4.5 y el final de 2.8 y aproximación inicial del espesor de la losa del pavimento de 9 pulgadas.

Para estos datos se presentan los siguientes resultados (Tabla 2.24):

Tabla 2.24: Resultados del cálculo del módulo de reacción efectivo.

Tabla para la Estimación del Módulo de Reacción Efectivo de la Subrasante					
Datos de Entrada					
	Aproximación inicial (D) (pulg)	9	Espesor de la subbase (pulg)	6	
	Pérdida por soporte, Ls	1	Profundidad al estrato firme (pies)	5	
Mes	Módulos Resilientes de la subrasante (psi)	Módulos Elásticos de la subbase (psi)	Módulo de Reacción Compuesto de la subrasante (pci)	Módulos de Reacción Corregidos de la subrasante (pci)	Daño Relativo
Ene	20000	50000	1125.30	1473.90	32.83
Feb	20000	50000	1125.30	1473.90	32.83
Mar	2500	15000	159.70	195.70	90.00
Abr	4000	15000	226.40	267.90	80.37
May	4000	15000	226.40	267.90	80.37
Jun	7000	20000	393.10	559.90	57.78
Jul	7000	20000	393.10	559.90	57.78
Ago	7000	20000	393.10	559.90	57.78
Sep	7000	20000	393.10	559.90	57.78
Oct	7000	20000	393.10	559.90	57.78
Nov	4000	15000	226.40	267.90	80.37
Dic	20000	50000	1125.30	1473.90	32.83
				$\Sigma_{ur} =$	718.50
promedio	$\Sigma_{ur} / \#meses =$	59.88			
	Módulo de Reacción Corregido (pci) =		537.51		
	Módulo de Reacción Efectivo (pci) =		163.22		

En la Tabla 2.24 se presenta de forma ordenada el cálculo del kefe para una aproximación inicial del espesor de la losa del pavimento de 9 pulgadas, pérdida de soporte igual a 1, espesor de la subbase de 6 pulgadas y profundidad al estrato firme de 5 pies, dando como resultado un módulo de reacción efectivo de la subrasante de 163.22 psi.

Con el valor del módulo de reacción efectivo de la subrasante ya calculado, se emplea la ecuación 2.43 y se despeja el valor del espesor de la losa del pavimento, dando como resultado un espesor de 8.40 pulgadas (21.33 cm) para un número de ejes equivalentes de 7'959,300, coeficiente de drenaje de 0.8, coeficiente de transferencia de carga de 2.4,



confiabilidad de 70 %, desviación estándar de 0.34 y periodo de diseño estructural de 20 años.

CAPÍTULO 3

ANÁLISIS ESTADÍSTICO

En el presente capítulo se indica el procedimiento y las suposiciones empleadas en el desarrollo de las ecuaciones matemáticas a través de un análisis estadístico de los métodos de la PCA y AASHTO, evitando así el empleo complejo de tablas y nomogramas. Se presenta también los resultados de los parámetros de mayor influencia para cada uno de los métodos de diseño. Para el análisis estadístico se ha implementado el método experimental que busca una ecuación no lineal de mejor ajuste, donde la muestra de estudio ha sido obtenida con la aplicación del método de la PCA y la AASHTO. El método experimental emplea la función en Matlab (`LinearModel.fit`). Este método controla las relaciones entre las variables a partir de un grupo de datos experimentales, genera conocimientos sobre un proceso, busca combinaciones óptimas de las variables de entrada y obtiene un conjunto de pruebas sometidas a cambios sistemáticos que serán analizadas estadísticamente con el fin de obtener conclusiones válidas y objetivas [22]. Para el presente estudio se busca los coeficientes de la ecuación, que relacione las variables dependientes que son las analizadas y las variables independientes que son los datos de entrada. Para la aplicación del método experimental se han considerado dos principios, reproducción y aleatoriedad, es decir, el método puede realizarse bajo las mismas condiciones y las veces que sean necesarias y puede realizarse con un orden de procesos y valores de variables aleatorias [20].

Para el análisis de los métodos de la PCA y la AASHTO se ha determinado un modelo de ecuación cuadrática dando un coeficiente de correlación R^2 semejante a 0.98 en ambos métodos. Es importante mencionar que se han tomado valores máximos, medios y mínimos para cada uno de los parámetros de entrada, generando así una muestra ideal para el método experimental no lineal. Esto se discutirá a medida que se desarrolla el análisis de los dos métodos.

3.1. Análisis del método de la PCA

Para el análisis estadístico de la PCA, se aplicó el método experimental no lineal para desarrollar una ecuación que abarca cada uno de los parámetros de entrada y



representa una aproximación del espesor de la losa con un resultado semejante al espesor obtenido a través de las ecuaciones y tablas propuestas por la PCA. Adicionalmente, se identificarán los parámetros más influyentes en el diseño de un pavimento rígido y las etapas consideradas para el análisis estadístico [10].

El proceso empleado en este análisis se presenta a continuación:

3.1.1. Selección de los parámetros de entrada más influyentes para la estructura del pavimento y determinación de sus rangos.

Los rangos de análisis han sido establecidos anteriormente en las Tablas 2.17, 2.18 y 2.19. Es importante seleccionar un número razonable de factores, ya que un gran número de parámetros de entrada implica un mayor número de análisis del método. Para el método de la PCA se ha determinado con anterioridad 5 parámetros, empleando el valor máximo, medio y mínimo para cada caso, y codificándolos +1(máximo), 0 (media) y -1 (mínimo) para el análisis respectivo y homogeneidad.

Los parámetros considerados son:

- Periodo de diseño estructural (n)
- Tasa anual de crecimiento vehicular (r)
- Módulo de rotura del concreto (MR)
- Módulo de reacción de la subrasante (Mr)
- Espesor de la subbase (Ds)

Los mismos que han sido analizados para ocho casos, a saber:

- subbase granular
 - con berma - con pasador
 - con berma - sin pasador
 - sin berma - con pasador
 - sin berma - sin pasador
- subbase tratada con cemento
 - con berma - con pasador
 - con berma - sin pasador
 - sin berma - con pasador
 - sin berma - sin pasador

A partir de la subrutina PCA_UC17 (Sección 2.3.1) y los rangos ya mencionados, se obtiene un total de 1944 iteraciones guardadas en dos matrices (MDATOSGM y MDATOSCM), para subbase granular y tratada con cemento, respectivamente, las mismas que serán usadas para la aplicación del método experimental.



3.1.2. Realización de la codificación de las matrices de análisis

Los valores de las matrices son reemplazados por los siguientes valores: +1 para el nivel más alto del intervalo, 0 para los valores medios y -1 para el punto mínimo del intervalo. La codificación de los valores de la matriz real es necesaria para realizar la comparación de impacto de cada parámetro de entrada en el espesor de losa de pavimento, independientemente de su unidad de medida [10].

3.1.3. Aplicación del método experimental no lineal en la matriz codificada

Para lo cual se empleó la función LinearModel.fit en el software Matlab, planteando una ecuación cuadrática del tipo:

$$y = a + \sum_{i=1}^n (b_i x_i) + \sum_{i=1}^n \sum_{j=i}^n (b_{ij} x_i x_j) \quad (3.1)$$

Donde $n=5$, corresponde a los 5 parámetros de entrada.

Obteniendo así 21 coeficientes incluyendo un interceptor, 5 coeficientes de términos lineales, 10 coeficientes de interacción de dos factores y 5 coeficientes con términos cuadráticos para cada uno de los análisis. Al contar con 21 coeficientes, es necesario 21 análisis de estabilidad, siendo aplicados 486 análisis para cada uno de los casos. Además, se obtiene como resultado los coeficientes de estimación codificados, error estándar, la división (tStat) y la probabilidad de haber obtenido el resultado confiable si la hipótesis nula es correcta (pValue) [4].

En la Tabla 3.1 se presenta los resultados estadísticos obtenidos de la aplicación del método experimental no lineal sobre la matriz codificada para un pavimento rígido para una subbase granular con berma y con pasadores, correspondiente al primer caso de estudio, los siguientes casos son adjuntados a Anexo I.1 comenzando con la Tabla I.1 hasta la Tabla I.7 que varía desde la subbase granular o cementada como la presencia de bermas y pasadores.



Tabla 3.1: Desarrollo codificado y su importancia estadística para matriz codificada de una subbase granular con berma y con pasadores, $R^2=0.999$.

Términos	Coef. de estimación	Error estándar	tStat	pValue
interceptor	140.07	0.095	1472.726	0
n	3.247	0.035	92.448	3.26E-179
r	2.272	0.035	64.679	5.05E-146
MR	-9.173	0.035	-261.175	2.88E-278
Mr	-11.772	0.035	-335.169	2.95E-302
Ds	-3.796	0.035	-108.091	5.88E-194
n*r	0.907	0.043	21.095	6.05E-55
n*MR	-0.185	0.043	-4.305	2.50E-05
n*Mr	-0.194	0.043	-4.52	1.00E-05
n*D _s	-0.093	0.043	-2.153	3.24E-02
r*MR	-0.12	0.043	-2.798	5.59E-03
r*Mr	-0.185	0.043	-4.305	2.50E-05
r*D _s	-0.065	0.043	-1.507	1.33E-01
MR*Mr	0.528	0.043	12.27	9.26E-27
MR*D _s	0.185	0.043	4.305	2.50E-05
Mr*D _s	1.278	0.043	29.706	2.72E-79
n ²	-0.235	0.061	-3.856	1.51E-04
r ²	0.062	0.061	1.015	3.11E-01
MR ²	0.691	0.061	11.365	6.85E-24
Mr ²	3.673	0.061	60.377	9.62E-140
D _s ²	-0.29	0.061	-4.769	3.35E-06

3.1.4. Selección del modelo matemático apropiado para la predicción del espesor (h)

Para la selección del modelo matemático de mejor ajuste, se realiza un análisis estadístico preliminar, donde a partir de los resultados determinados, se descartan aquellos cuyo valor (pValue) sea mayor a 0.05, omitiéndose así los parámetros que no influyen en el modelo [10]. Cabe recalcar que los coeficientes de la estimación real han sido obtenidos de un modelo matemático reducido, donde no incluyen los términos con valores de pValue > 0.05. En las Tablas 3.2 hasta la Tabla 3.9 se presentan los valores para el modelo reducido, de los diferentes casos de estudio.

En la Tabla 3.2 se muestra cada uno de los términos significativos del modelo matemático reducido, para una subbase granular con berma y con pasador, no se encuentran presentes los términos correspondientes a una interacción entre dos factores ($r*D_s$) y un factor cuadrático (r^2) al no ser significativos.



Para el primer caso, subbase granular, con berma y con pasador, el modelo que se determina corresponde a la ecuación 3.2 con un $R^2=0.999$:

$$\begin{aligned}
 h = & 383,38 + 0,61 * n + 52,099 * r - 0,53 * MR - 1,068 * Mr - \\
 & 0,07 * Ds + 3,63 * n * r - 0,00037 * n * MR - 0,00065 * n * Mr \\
 & - 0,000093 * n * Ds - 0,096 * r * MR - 0,25 * r * Mr + 0,00035 \\
 & * MR * Ds + 0,000037 * MR * Ds + 0,00043 * Mr * Ds - 0,0024 \\
 & * n^2 + 0,00028 * MR^2 + 0,0041 * Mr^2 - 0,000029 * Ds^2
 \end{aligned} \tag{3.2}$$

Tabla 3.2: Desarrollo un modelo matemático y su importancia estadística para una subbase granular con berma y con pasadores, $R^2 = 0.999$.

Términos	Coefficiente de estimación codificado	Coefficiente de estimación real	Error estándar	tStat	pValue
Interceptor	140.07	383.38	0.095	1472.726	0
n	3.247	0.61	0.035	92.448	3.26E-179
r	2.272	52.010	0.035	64.679	5.05E-146
MR	-9.173	-0.53	0.035	-261.175	2.88E-278
Mr	-11.772	-1.069	0.035	-335.169	2.95E-302
Ds	-3.796	-0.067	0.035	-108.091	5.88E-194
n*r	0.907	3.63	0.043	21.095	6.05E-55
n*MR	-0.185	-0.00037	0.043	-4.305	2.50E-05
n*Mr	-0.194	-0.00065	0.043	-4.52	1.00E-05
n*Ds	-0.093	-0.000093	0.043	-2.153	0.0324
r*MR	-0.12	-0.096	0.043	-2.798	0.0056
r*Mr	-0.185	-0.25	0.043	-4.305	2.50E-05
MR*Mr	0.528	0.00035	0.043	12.27	9.26E-27
MR*Ds	0.185	0.000037	0.043	4.305	2.50E-05
Mr*Ds	1.278	0.00043	0.043	29.706	2.72E-79
n²	-0.235	-0.0023	0.061	-3.856	0.000151
MR²	0.691	0.00028	0.061	11.365	6.85E-24
Mr²	3.673	0.0041	0.061	60.377	9.62E-140
Ds²	-0.29	-0.000029	0.061	-4.769	3.35E-06

En la Tabla 3.3 se muestra cada uno de los términos significativos del modelo matemático, para una subbase granular con berma y sin pasador, no se encuentran presentes los términos correspondientes a cuatro interacciones entre dos factores ($n*Mr$, $n*Ds$, $r*Mr$, $r*Ds$) y tres factores cuadráticos (n^2 , r^2 , Ds^2) que no son significativos.

Para el segundo caso subbase granular con berma y sin pasador, el modelo que se determina corresponde a la ecuación 3.3, con un $R^2 = 0.991$:

$$\begin{aligned}
 h = & 767,60 - 2,084 * n - 739,75 * r - 1,65 * MR - 1,77 * Mr \\
 & - 0,14 * Ds + 7,63 * n * r + 0,0039 * n * MR + 1,11 * r * MR \\
 & + 0,0014 * MR * Mr + 0,00012 * MR * Ds + 0,00058 * Mr \\
 & * Ds + 0,0011 * MR^2 + 0,0046 * Mr^2
 \end{aligned} \tag{3.3}$$



Tabla 3.3: Desarrollo un modelo matemático y su importancia estadística para una subbase granular con bermas y sin pasadores, $R^2 = 0.991$.

Términos	Coefficiente de estimación codificado	Coefficiente de estimación real	Error estándar	tStat	pValue
Interceptor	141.72	767.60	0.231	613.851	0
n	5.494	-2.08	0.085	64.44	1.10E-145
r	3.895	-739.75	0.085	45.687	7.05E-115
MR	-4.895	-1.65	0.085	-57.417	3.46E-135
Mr	-10.08	-1.77	0.085	-118.237	1.85E-202
Ds	-3.29	-0.14	0.085	-38.592	2.01E-100
n*r	1.907	7.63	0.104	18.268	4.03E-46
n*MR	1.972	0.0039	0.104	18.888	4.36E-48
r*MR	1.389	1.11	0.104	13.302	4.44E-30
MR*Mr	2.148	0.0014	0.104	20.573	2.42E-53
MR*D _s	0.611	0.00012	0.104	5.853	1.72E-08
Mr*D _s	1.741	0.00058	0.104	16.671	5.25E-41
MR ²	2.698	0.0011	0.148	18.268	4.02E-46
Mr ²	4.105	0.0046	0.148	27.799	3.02E-74

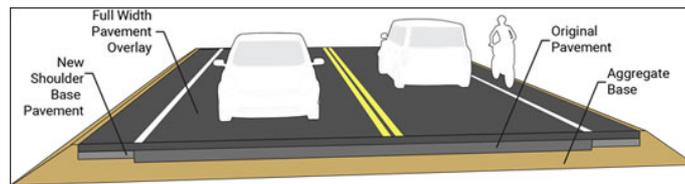


Figura 3.1: Pavimento rígido con berma [17].

En la Tabla 3.4 se muestra cada uno de los términos significativos del modelo matemático para una subbase granular sin berma y con pasador, los términos correspondientes a tres interacciones entre dos factores ($n \cdot D_s$, $r \cdot MR$, $r \cdot D_s$) han sido eliminados al no ser significativos.

Para el tercer caso subbase granular sin berma y con pasador, el modelo que se determina corresponde a la ecuación 3.4 con un $R^2=0.999$:

$$\begin{aligned}
 h = & 436,85 + 0,69 * n - 27,90 * r - 0,58 * MR - 1,24 * Mr - 0,086 * Ds \\
 & + 3,99 * n * r - 0,00039 * n * MR - 0,00071 * n * Mr - 0,15 * r * Mr + \\
 & 0,00046 * MR * Mr + 0,000052 * MR * Mr + 0,00046 * Mr * Ds - 0,0035 \\
 & * n^2 + 246,91 * r^2 + 0,0003 * MR^2 + 0,0045 * Mr^2 - 0,000027 * Ds^2
 \end{aligned} \tag{3.4}$$

Tabla 3.4: Desarrollo un modelo matemático y su importancia estadística para una subbase granular sin bermas y con pasadores, $R^2=0.999$.

Términos	Coefficiente de estimación codificado	Coefficiente de estimación real	Error estándar	tStat	pValue
Interceptor	164.996	436.85	0.105	1564.7	0
n	3.543	0.69	0.039	90.9925	1.01E-177
r	2.549	-27.90	0.039	65.47021	3.88E-147
MR	-9.994	-0.58	0.039	-256.6496	1.38E-276
Mr	-13.364	-1.24	0.039	-343.2034	1.55E-304
Ds	-4.247	-0.086	0.039	-109.0642	8.33E-195
n*r	1.000	4.00	0.048	20.96829	1.48E-54
n*MR	-0.194	-0.00039	0.048	-4.077168	6.35E-05
n*Mr	-0.213	-0.00071	0.048	-4.46547	1.27E-05
r*Mr	-0.111	-0.15	0.048	-2.32981	0.02071
MR*Mr	0.685	0.00046	0.048	14.36716	1.56E-33
MR*D _s	0.259	5.19E-05	0.048	5.436224	1.43E-07
Mr*D _s	1.37	0.00046	0.048	28.73433	9.55E-77
n ²	-0.346	-0.0035	0.067	-5.125321	6.45E-07
r ²	0.154	246.91	0.067	2.28809	0.02307
MR ²	0.747	0.0003	0.067	11.07435	5.58E-23
Mr ²	4.08	0.0045	0.067	60.4971	6.34E-140
D _s ²	-0.272	-2.72E-05	0.067	-4.027038	7.76E-05

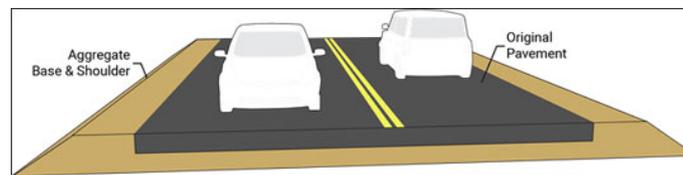


Figura 3.2: Pavimento rígido sin berma [17].

En la Tabla 3.5 se muestra cada uno de los términos significativos del modelo matemático para una subbase granular sin berma y sin pasador, los términos correspondientes a tres interacciones entre dos factores ($n*D_s$, $r*Mr$, $r*D_s$) y un factor cuadrático (D_s^2) han sido eliminados al tener un $pValue > 0.05$. Para el cuarto caso subbase granular sin berma y sin pasador, el modelo que se determina corresponde a la ecuación 3.5, con un $R^2=0.988$:

$$\begin{aligned}
 h = & 780,25 - 3,44 * n - 1276,17 * r - 1,47 * MR - 1,77 * Mr - 0,13 \\
 & *Ds + 13,074 * n * r + 0,0054 * n * MR + 0,0015 * n * Mr + 1,64 \\
 & *r * MR + 0,0012 * MR * Mr + 0,00011 * MR * Ds + 0,00057 * Mr \\
 & *Ds + 0,0055 * n^2 + 1382,72 * r^2 + 0,00086 * MR^2 + 0,005 * Mr^2
 \end{aligned} \tag{3.5}$$



Tabla 3.5: Desarrollo un modelo matemático y su importancia estadística para una subbase granular sin bermas y sin pasadores, $R^2=0.988$.

Términos	Coefficiente de estimación codificado	Coefficiente de estimación real	Error estándar	tStat	pValue
interceptor	165.498	780.25	0.337	490.496	0
n	6.438	-3.44	0.125	51.673	9.91E-126
r	4.877	-1276.17	0.125	39.139	1.32E-101
MR	-6.765	-1.47	0.125	-54.299	3.68E-130
Mr	-12.198	-1.77	0.125	-97.896	1.33E-184
Ds	-3.895	-0.13	0.125	-31.261	2.87E-83
n*r	3.269	13.074	0.153	21.419	6.24E-56
n*MR	2.685	0.0054	0.153	17.596	5.58E-44
n*Mr	0.444	0.0015	0.153	2.912	0.00395
r*MR	2.046	1.64	0.153	13.41	1.99E-30
MR*Mr	1.769	0.0012	0.153	11.589	1.35E-24
MR*D _s	0.556	0.00011	0.153	3.641	0.0003
Mr*D _s	1.722	0.00057	0.153	11.286	1.21E-23
n ²	0.549	0.0055	0.216	2.546	0.01158
r ²	0.864	1382.72	0.216	4.004	8.48E-05
MR ²	2.16	0.00086	0.216	10.011	1.04E-19
Mr ²	4.494	0.0050	0.216	20.823	4.12E-54

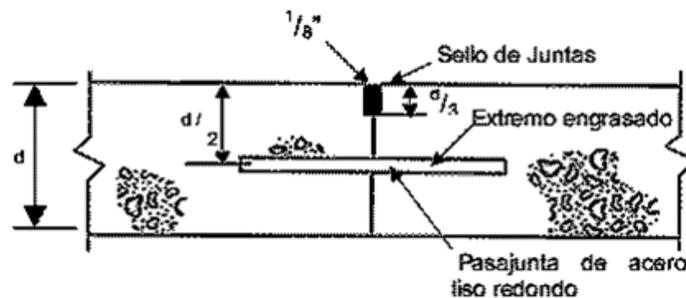


Figura 3.3: Pavimento rígido con pasador [2].

En la Tabla 3.6 se muestra cada uno de los términos significativos del modelo matemático para una subbase cementada, con berma y con pasador, no se encuentran presentes los términos correspondientes a seis interacciones entre dos factores (n^*MR , n^*Mr , n^*Ds , r^*MR , r^*Mr , r^*Ds) al no ser significativos con un $pValue > 0.05$.

Para este caso subbase cementada con berma y con pasador, el modelo que se determina corresponde a la ecuación 3.6 con un $R^2 = 0.997$:

$$\begin{aligned}
 h = & 409,088 + 0,34 * n - 51,98 * r - 0,62 * MR - 1,19 * Mr - 0,26 * Ds + \\
 & 3,81 * n * r + 0,00042 * MR * Mr + 0,00012 * MR * Ds + 0,0007 * Mr * Ds \quad (3.6) \\
 & -0,0028 * n^2 + 345,68 * r^2 + 0,00035 * MR^2 + 0,0059 * Mr^2 + 0,00021 * Ds^2
 \end{aligned}$$

Tabla 3.6: Desarrollo del modelo matemático y su importancia estadística para una subbase cementada con bermas y con pasadores, $R^2 = 0.997$.

Términos	Coefficiente de estimación codificado	Coefficiente de estimación real	Error estándar	tStat	pValue
interceptor	123.189	409.088	0.135	912.362	0
n	3.025	0.34	0.05	60.663	3.57E-140
r	2.167	-51.98	0.05	43.455	1.57E-110
MR	-8.247	-0.62	0.05	-165.4	1.86E-234
Mr	-6.969	-1.19	0.05	-139.773	2.22E-218
Ds	-6.728	-0.26	0.05	-134.945	4.98E-215
n*r	0.954	3.81	0.061	15.618	1.35E-37
MR*Mr	0.417	0.00042	0.061	6.823	8.36E-11
MR*D _s	0.435	0.00012	0.061	7.126	1.43E-11
Mr*D _s	1.056	0.0007	0.061	17.285	5.54E-43
n ²	-0.284	-0.0028	0.086	-3.288	0.0012
r ²	0.216	345.68	0.086	2.502	0.0131
MR ²	0.864	0.00035	0.086	10.007	1.07E-19
Mr ²	2.364	0.0059	0.086	27.376	4.23E-73
D _s ²	1.198	0.00021	0.086	13.867	6.58E-32

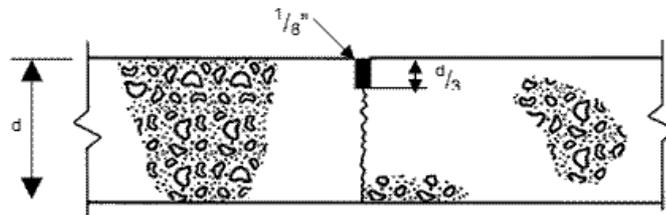


Figura 3.4: Pavimento rígido sin pasador [3].

En la Tabla 3.7 se muestra cada uno de los términos significativos del modelo matemático, para una subbase cementada con berma y sin pasador, los términos correspondientes a cinco interacciones entre dos factores (n^*Mr , n^*Ds , r^*Mr , r^*Ds , Mr^*Ds) y un factor cuadrático (r^2) han sido eliminados al no ser significativos.

Para el sexto caso subbase cementada con berma y sin pasador, el modelo que se determina corresponde a la ecuación 3.7 con un $R^2 = 0.984$:

$$\begin{aligned}
 h = & 503,032 - 0,97 * n - 449,87 * r - 0,97 * MR - 1,24 * Mr - 0,27 \\
 & *Ds + 7,63 * n * r + 0,0024 * n * MR + 0,644 * r * MR + 0,0011 * MR \\
 & *Mr + 0,00028 * MR * Ds - 0,0031 * n^2 + 0,00061 * MR^2 + 0,0034 * \\
 & Mr^2 + 0,00007 * Ds^2
 \end{aligned} \tag{3.7}$$



Tabla 3.7: Desarrollo del modelo matemático y su importancia estadística para una subbase cementada con bermas y sin pasadores, $R^2 = 0.984$.

Términos	Coeficiente de estimación codificado	Coeficiente de estimación real	Error estándar	tStat	pValue
interceptor	130.934	503.032	0.24	544.606	0
n	5.667	-0.97	0.089	63.828	8.23E-145
r	4.142	-449.88	0.089	46.654	1.05E-116
MR	-1.815	-0.97	0.089	-20.441	6.16E-53
Mr	-5.451	-1.24	0.089	-61.394	2.90E-141
Ds	-5.407	-0.27	0.089	-60.907	1.54E-140
n*r	1.907	7.63	0.109	17.542	8.33E-44
n*MR	1.213	0.0024	0.109	11.155	3.12E-23
r*MR	0.806	0.64	0.109	7.408	2.64E-12
MR*Mr	1.148	0.0011	0.109	10.559	2.21E-21
MR*D_s	1.056	0.00028	0.109	9.708	8.51E-19
n²	-0.309	-0.0031	0.154	-2.007	0.0459
MR²	1.543	0.00062	0.154	10.036	8.78E-20
Mr²	1.377	0.0034	0.154	8.952	1.43E-16
D_s²	0.395	7.02E-05	0.154	2.569	0.0109

En la Tabla 3.8 se muestra cada uno de los términos significativos del modelo matemático, para una subbase cementada sin berma y con pasador, los términos correspondientes dos factores cuadráticos (n^2 , r^2) han sido eliminados al no ser significativos.

Para el séptimo caso subbase cementada sin berma y con pasador, el modelo que se determina corresponde a la ecuación 3.8 con un $R^2 = 0.991$:

$$\begin{aligned}
 h = & 536,065 - 0,60 * n - 312,35 * r - 0,83 * MR - 1,67 * Mr \\
 & - 0,36 * D_s + 5,37 * n * r + 0,0011 * n * MR + 0,0019 * n * Mr \\
 & + 0,00038 * n * D_s + 0,36 * r * MR + 0,54 * r * Mr + 0,12 * r * \\
 & D_s + 0,00088 * MR * Mr + 0,00022 * MR * D_s + 0,00067 * \\
 & Mr * D_s + 0,00045 * MR^2 + 0,0068 * Mr^2 + 0,00023 * D_s^2
 \end{aligned} \tag{3.8}$$



Tabla 3.8: Desarrollo del modelo matemático y su importancia estadística para una subbase cementada sin bermas y con pasadores, $R^2 = 0.991$.

Términos	Coefficiente de estimación codificado	Coefficiente de estimación real	Error estándar	tStat	pValue
interceptor	145.255	536.066	0.25	580.51	0
n	3.759	-0.60	0.092	40.685	6.91E-105
r	2.741	-312.35	0.092	29.662	3.53E-79
MR	-8.481	-0.83	0.092	-91.791	1.53E-178
Mr	-8.198	-1.67	0.092	-88.718	2.40E-175
Ds	-7.883	-0.36	0.092	-85.311	1.12E-171
n*r	1.343	5.37	0.113	11.864	1.82E-25
n*MR	0.537	0.0011	0.113	4.746	3.72E-06
n*Mr	0.37	0.0019	0.113	3.273	0.001235
n*D_s	0.287	0.00038	0.113	2.536	0.011886
r*MR	0.454	0.36	0.113	4.009	8.32E-05
r*Mr	0.269	0.54	0.113	2.373	0.018508
r*D_s	0.231	0.12	0.113	2.046	0.041985
MR*Mr	0.88	0.00088	0.113	7.773	2.83E-13
MR*D_s	0.843	0.00022	0.113	7.446	2.11E-12
Mr*D_s	1	0.00067	0.113	8.837	3.06E-16
MR²	1.136	0.00045	0.16	7.097	1.70E-11
Mr²	2.728	0.0068	0.16	17.048	3.21E-42
D_s²	1.302	0.00023	0.16	8.138	2.85E-14

Para el último análisis, en la Tabla 3.9 se muestra cada uno de los términos significativos del modelo matemático, para una subbase cementada sin berma y sin pasador, no se encuentra presente el término correspondiente a un factor cuadrático (n^2) al no ser significativo. Es interesante mencionar que éste es el modelo que menor parámetros se reduce, en este caso uno solo.

Para el octavo caso subbase cementada sin berma y sin pasador, el modelo que se determina corresponde a la ecuación 3.9 con un $R^2 = 0.987$:

$$\begin{aligned}
 h = & 716,82 - 2,76 * n - 1005,36 * r - 1,37 * MR - 1,93 * Mr \\
 & - 0,44 * Ds + 12,78 * n * r + 0,0047 * n * Mr + 0,0032 * n * Mr + \\
 & 0,00077 * n * Ds + 1,19 * r * MR + 0,78 * r * Mr + 0,20 * r * Ds \\
 & + 0,0016 * MR * Mr + 0,0004 * MR * Ds + 0,00057 * Mr * Ds \\
 & + 928,40 * r^2 + 0,00082 * MR^2 + 0,0053 * Mr^2 + 0,00017 * Ds^2
 \end{aligned} \tag{3.9}$$



Tabla 3.9: Desarrollo del modelo matemático y su importancia estadística para una subbase cementada sin bermas y sin pasadores, $R^2 = 0.987$.

Términos	Coefficiente de estimación codificado	Coefficiente de estimación real	Error estándar	tStat	pValue
interceptor	150.737	716.81	0.281	535.9	0
n	7.531	-2.76	0.104	72.504	1.54E-156
r	5.494	-1005.36	0.104	52.892	8.24E-128
MR	-3.488	-1.37	0.104	-33.578	5.82E-89
Mr	-6.525	-1.93	0.104	-62.817	2.36E-143
Ds	-6.179	-0.44	0.104	-59.489	2.13E-138
n*r	3.194	12.78	0.127	25.111	8.46E-67
n*MR	2.333	0.0047	0.127	18.342	2.34E-46
n*Mr	0.639	0.0032	0.127	5.022	1.05E-06
n*D _s	0.574	0.00077	0.127	4.513	1.04E-05
r*MR	1.481	1.19	0.127	11.646	8.93E-25
r*Mr	0.389	0.78	0.127	3.057	0.00251
r*D _s	0.37	0.20	0.127	2.911	0.003965
MR*Mr	1.593	0.0016	0.127	12.519	1.47E-27
MR*D _s	1.546	0.00041	0.127	12.155	2.15E-26
Mr*D _s	0.861	0.00057	0.127	6.769	1.14E-10
r ²	0.58	928.40	0.18	3.225	0.001448
MR ²	2.043	0.00082	0.18	11.357	7.26E-24
Mr ²	2.117	0.0053	0.18	11.769	3.64E-25
D _s ²	0.932	0.00017	0.18	5.181	4.95E-07

Después del análisis estadístico se han definido los términos significativos para el modelo matemático simplificado, en la Tabla 3.10 se presenta un resumen de los términos obtenidos para cada uno de los casos de estudio.

Tabla 3.10: Número de términos para cada uno de los casos de estudio, después del proceso de eliminación estadística.

Caso	Descripción	Términos			
		intercepción	lineal	combinados	cuadráticos
1	granular con berma con pasador	1	5	9	4
2	granular con berma sin pasador	1	5	6	2
3	granular sin berma con pasador	1	5	7	5
4	granular sin berma sin pasador	1	5	7	4
5	cementado con berma con pasador	1	5	4	5
6	cementado con berma sin pasador	1	5	5	4
7	cementado sin berma con pasador	1	5	10	3
8	cementado sin berma sin pasador	1	5	10	4

Se puede observar que todos los parámetros influyen de una manera lineal, existiendo una relación entre algunos indicando que la selección de los parámetros es adecuada, lo que se expresa también con el valor de correlación $R^2 \geq 0,98$.

3.1.5. Identificación de los factores más importantes a partir del gráfico de Pareto

Dividiendo cada uno de los coeficientes codificados para su respectivo error estándar, se obtiene (tStat). Al graficar estos resultados se obtiene el denominado gráfico de Pareto, con este diagrama se puede detectar los problemas más relevantes mediante la aplicación de Pareto. La gráfica permite identificar visualmente en una sola revisión tales minorías de características vitales a las que es importante prestar atención [21]. Los valores absolutos de los efectos de coeficiente, indican las magnitudes de impacto de cada parámetro de entrada y su signo sugiere el efecto creciente (+) o decreciente (-) [10]. En las Figuras 3.5 hasta 3.12 se presentan los gráficos de Pareto con su respectivo modelo matemático para cada uno de los casos de estudio.

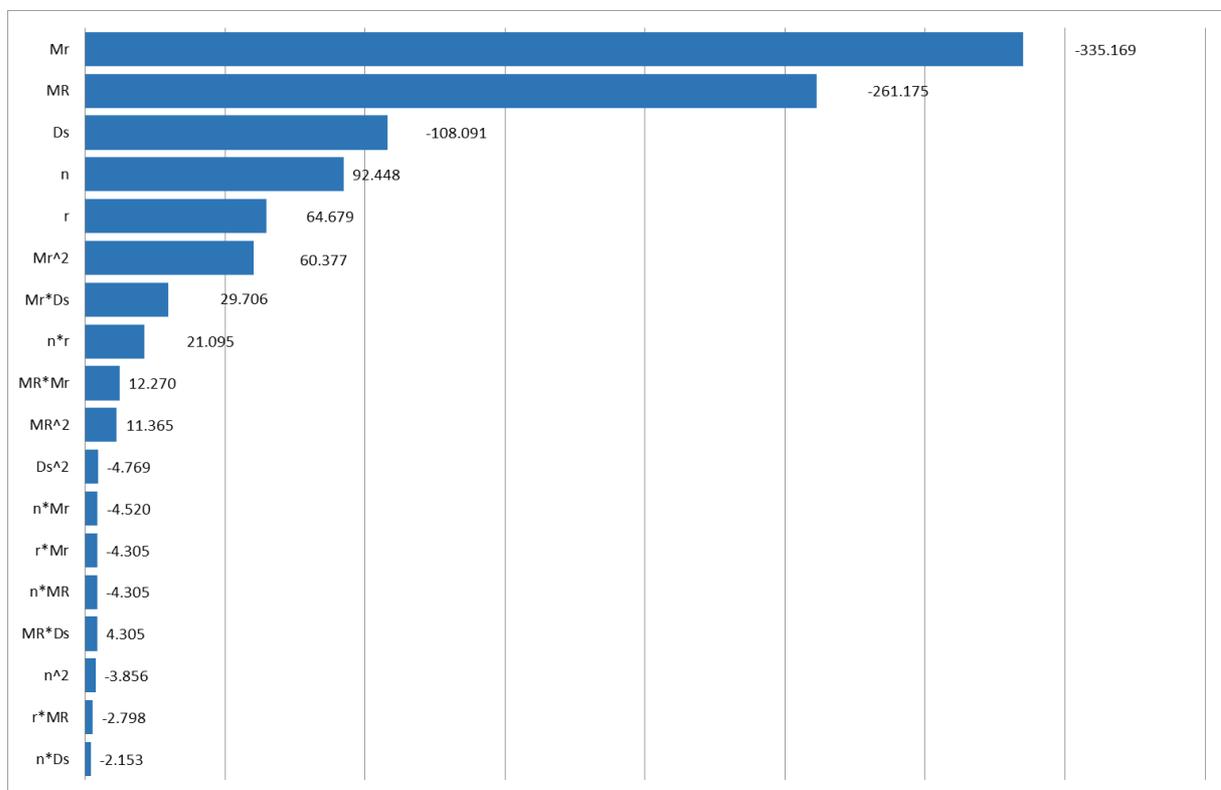


Figura 3.5: Gráfico de Pareto para pavimento rígido con subbase granular, con bermas y con pasadores.

La Figura 3.5 muestra que el parámetro de entrada más influyente para el diseño del espesor de la losa del pavimento, para el caso 1, con subbase granular, con berma y con pasador es el módulo de reacción de la subrasante (M_r), seguido por el módulo de rotura del concreto (M_R) y el espesor de la subbase (D_s), los mismos que tienen una relación inversamente proporcional con el espesor del pavimento, es decir, mientras más alto sea el valor de estos parámetros, se obtendrá un espesor menor, a diferencia del periodo de diseño estructural (n) y la tasa de crecimiento vehicular (r), que son directamente proporcionales al espesor de la losa. La magnitud de los parámetros mostrados en la Figura 3.1 representa la sensibilidad que tiene cada uno con relación al espesor, lo que significa que entre mayor sea dicha magnitud, la variabilidad que este produzca en el espesor de la losa será mayor.

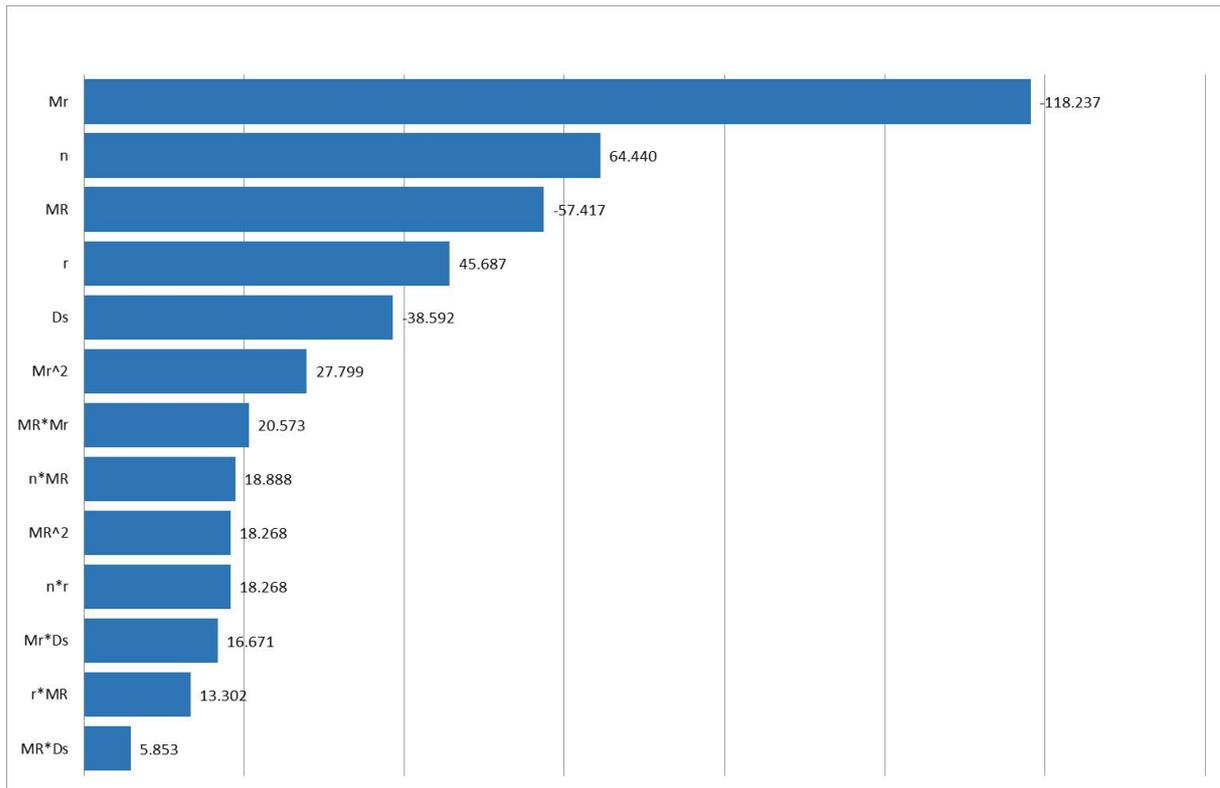


Figura 3.6: Gráfico de Pareto para pavimento rígido con subbase granular, con bermas y sin pasadores.

La Figura 3.6 muestra que el parámetro de entrada más influyente para el diseño del espesor de la losa del pavimento, para el caso 2, con subbase granular, con berma y sin pasador es el módulo de reacción de la subrasante (M_r), seguido por el periodo de diseño estructural (n), el módulo de rotura del concreto (MR), y la tasa de crecimiento vehicular (r). Parámetros como el módulo de reacción de la subrasante y módulo de rotura del concreto cuentan con una relación inversamente proporcional con el espesor del pavimento, mientras que el periodo de diseño estructural, y la tasa de crecimiento vehicular son directamente proporcionales al espesor de la losa. “ M_r ” es el parámetro con mayor sensibilidad con relación al espesor, lo que significa que entre más varíe dicho parámetro, la variabilidad que este produzca en el espesor de la losa será mayor. Además, “ M_r ” influye mayormente en el espesor, ya que los demás parámetros presentan la mitad del impacto que causa “ M_r ” con 118.24, mientras parámetros como “ n ” o “ MR ” cuentan con 64.44 y 57.42, respectivamente.

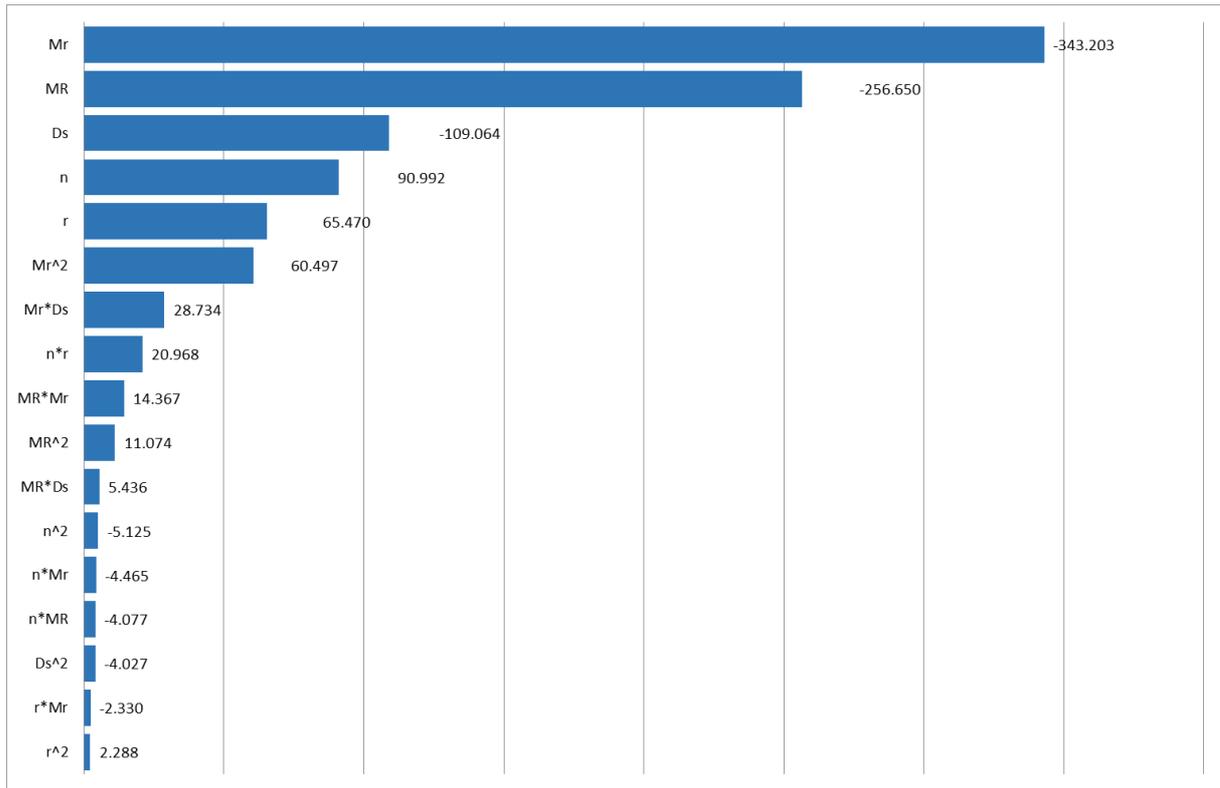


Figura 3.7: Gráfico de Pareto para pavimento rígido con subbase granular, sin bermas y con pasadores.

Para el caso 3, pavimento rígido con subbase granular, sin berma y con pasador, se observada en la Figura 3.7, el parámetro de entrada más influyente es el módulo de reacción de la subrasante (M_r), seguido por el módulo de rotura del concreto (M_R) y el espesor de la subbase (D_s), los mismos que tienen una relación inversamente proporcional con el espesor del pavimento, seguido por el periodo de diseño estructural (n) y la tasa de crecimiento vehicular (r), que son directamente proporcionales al espesor de la losa. En el presenta caso, “ M_r ” tiene un impacto de 343.20, “ M_R ” de 256.65 y “ D_s ” llega a influir con 109.06, por lo que se concluye que el módulo de reacción de la subrasante y el módulo de rotura del concreto cuentan con mayor impacto sobre el espesor de la losa, mientras los demás parámetros influyen en menor medida, por lo que cualquier cambio brusco sobre los dos parámetros más influyentes afectará notoriamente al espesor de la losa.

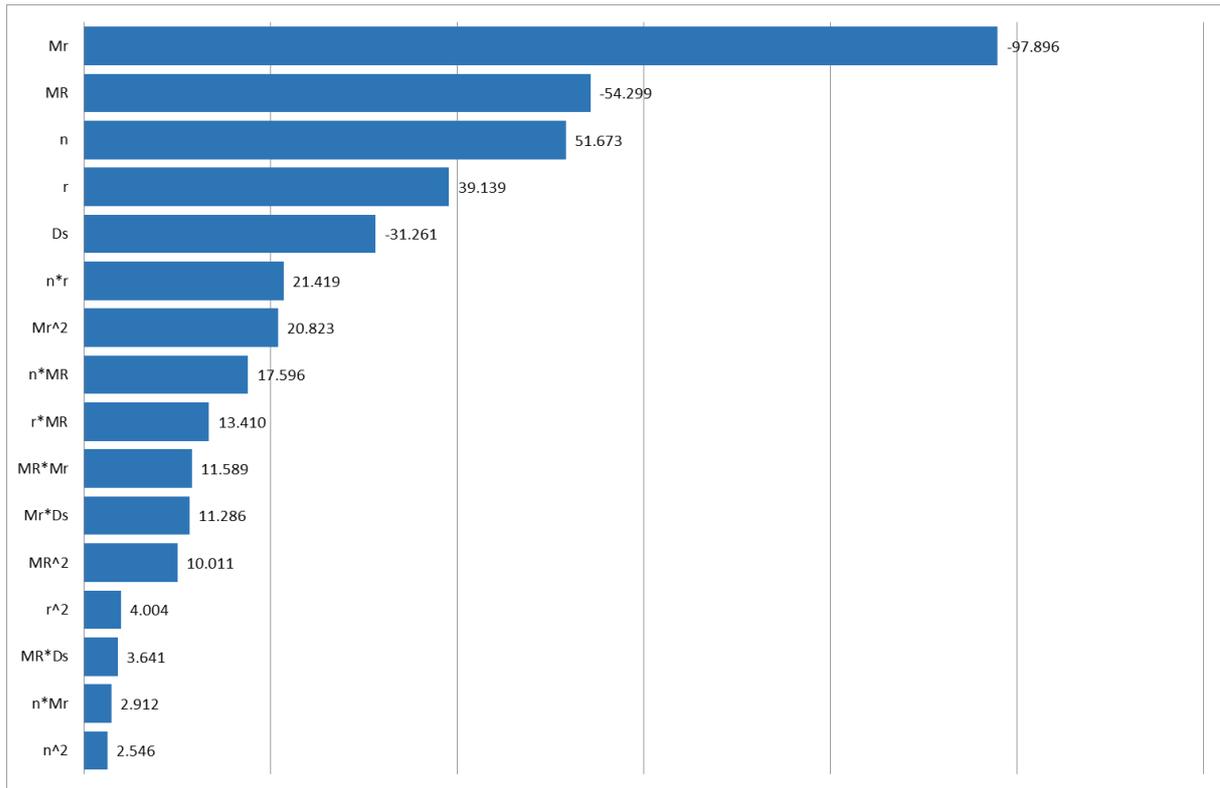


Figura 3.8: Gráfico de Pareto para pavimento rígido con subbase granular, sin bermas y sin pasadores.

Para un pavimento rígido con subbase granular, sin berma y sin pasador, correspondiente al caso 4, Figura 3.8, el parámetro de entrada más influyente es el módulo de reacción de la subrasante (M_r), seguido por el módulo de rotura del concreto (MR), el periodo de diseño estructural (n) y la tasa de crecimiento vehicular (r). El parámetro " M_r " tiene un impacto mayor sobre la losa de pavimento con relación a los demás parámetros, al contar con un valor de 97.89, siendo " MR " el segundo parámetro más influyente con 54.29, cualquier cambio sobre este parámetro se verá reflejado en el espesor de la losa.

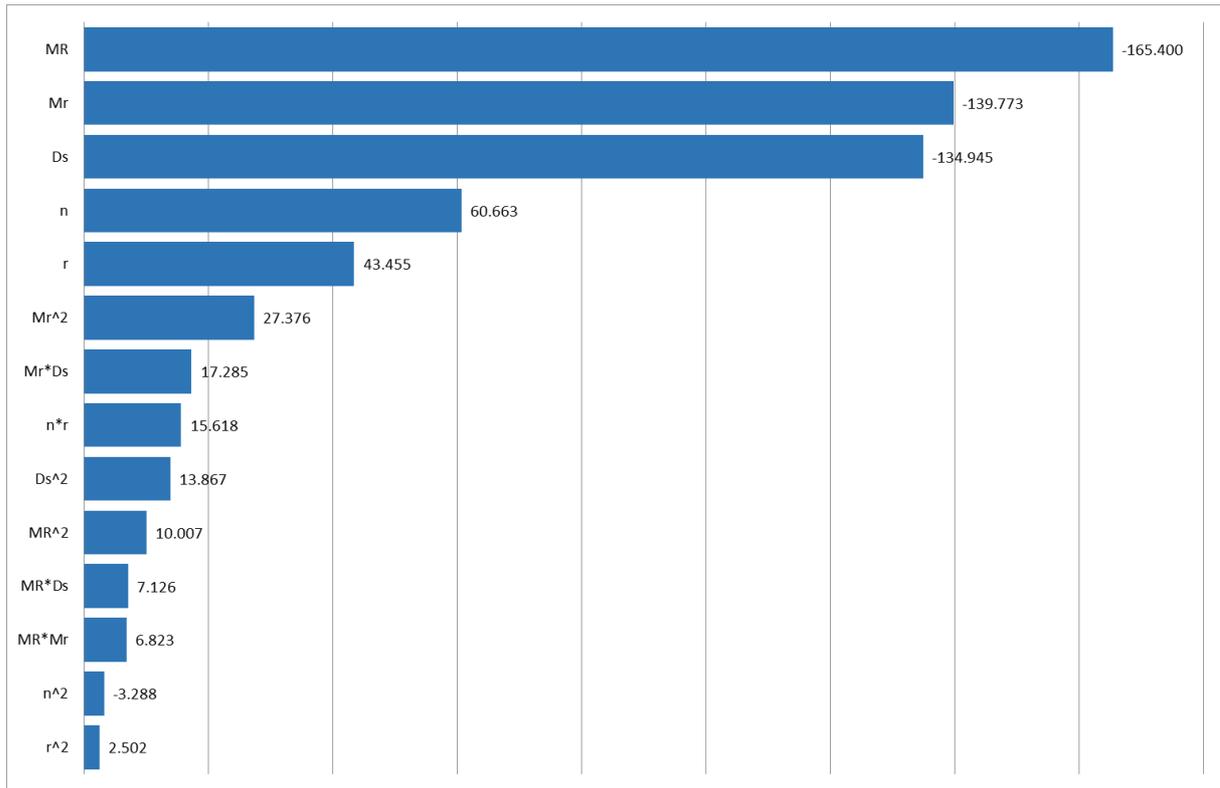


Figura 3.9: 3 Gráfico de Pareto para pavimento rígido con subbase cementada, con bermas y con pasadores.

En la Figura 3.9 se aprecia que el parámetro de entrada más influyente para el diseño del espesor de la losa del pavimento, para el caso 5, con subbase cementada, con berma y con pasador es el módulo de rotura del concreto (MR). Aquí se identifica que para el caso de subbase cementada el parámetro que influye en mayor medida es “MR” a diferencia de los casos anteriores que predominaba “Mr”. El módulo de reacción de la subrasante (Mr), y el espesor de la subbase (Ds), como ya se ha mencionado, tienen una relación inversa con el espesor del pavimento. “MR”, “Mr” y “Ds” son los parámetros con mayor impacto sobre el espesor de la losa, mientras que los demás parámetros muestran la mitad de la influencia o menor.

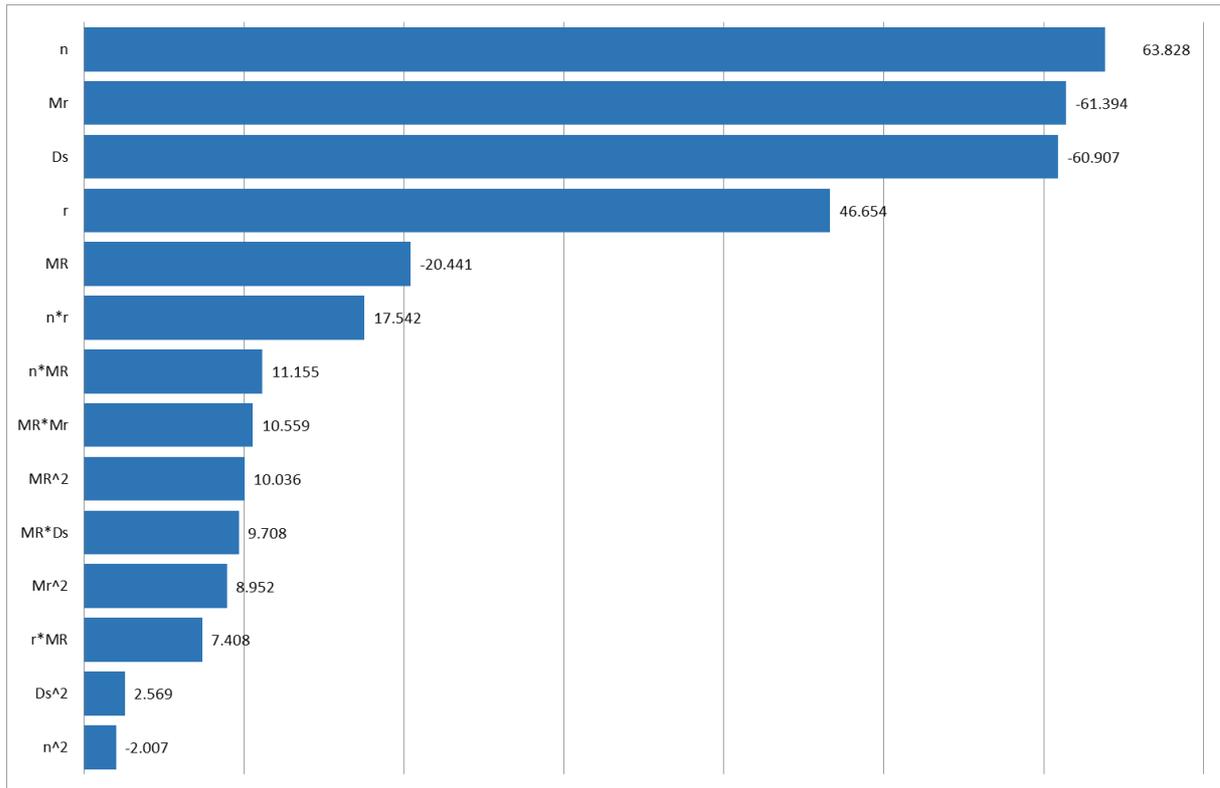


Figura 3.10: Gráfico de Pareto para pavimento rígido con subbase cementada, con bermas y sin pasadores.

Un cambio significativo en la tendencia se presenta en la Figura 3.10 donde el parámetro de entrada más influyente para el diseño del espesor, para el caso 6, con subbase cementada, con berma y sin pasador es el periodo de diseño estructural (n) en este caso, al igual que el caso 2, donde se tiene bermas y no pasadores el parámetro “ n ” juega un papel importante. El módulo de reacción de la subrasante (Mr), el espesor de la subbase (Ds), y la tasa de crecimiento vehicular (r) son los parámetros que influyen significativamente. Si “ n ” y “ r ” aumentan el espesor del pavimento también lo hará, mientras “ Mr ” y “ Ds ” tienen una relación inversa con el espesor de concreto. El periodo de diseño estructural es el parámetro con mayor sensibilidad con 63.83, pero tanto “ Mr ” como “ Ds ” cuentan un impacto de 61.39 y 60.91, por lo que se concluye que para este caso existen tres parámetros cuya variabilidad influye notoriamente sobre el espesor de la losa.

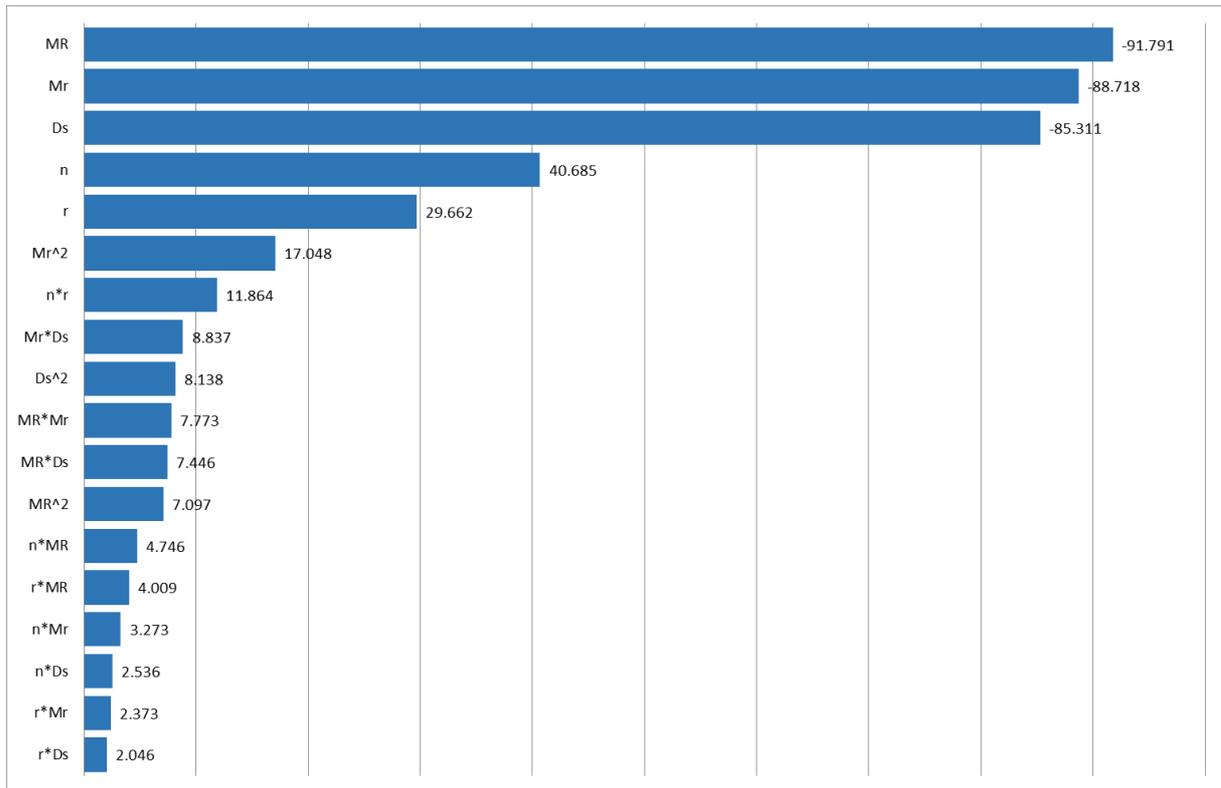


Figura 3.11: Gráfico de Pareto para pavimento rígido con subbase cementada, sin bermas y con pasadores.

Para el caso 7, pavimento rígido con subbase cementada, sin berma y con pasador, se observada en la Figura 3.11, que el parámetro de entrada más influyente es el módulo de rotura del concreto (MR), seguido por el módulo de reacción de la subrasante (Mr), y el espesor de la subbase (Ds), seguido por el periodo de diseño estructural (n) y la tasa de crecimiento vehicular (r). Tendencia similar se observó en el caso 5, pudiendo indicar que con la presencia de pasadores, la secuencia “MR”, “Mr”, “Ds”, “n”, y “r” se mantienen. Finalmente, “MR”, “Mr” y “Ds” cuentan con un impacto de 91.79, 88.72 y 85.31, respectivamente, produciendo estos tres parámetros mayor impacto sobre la losa de pavimento rígido, los demás parámetros influyen en menor medida, por lo que cualquier cambio sobre los tres parámetros más influyentes afectará notoriamente el diseño.

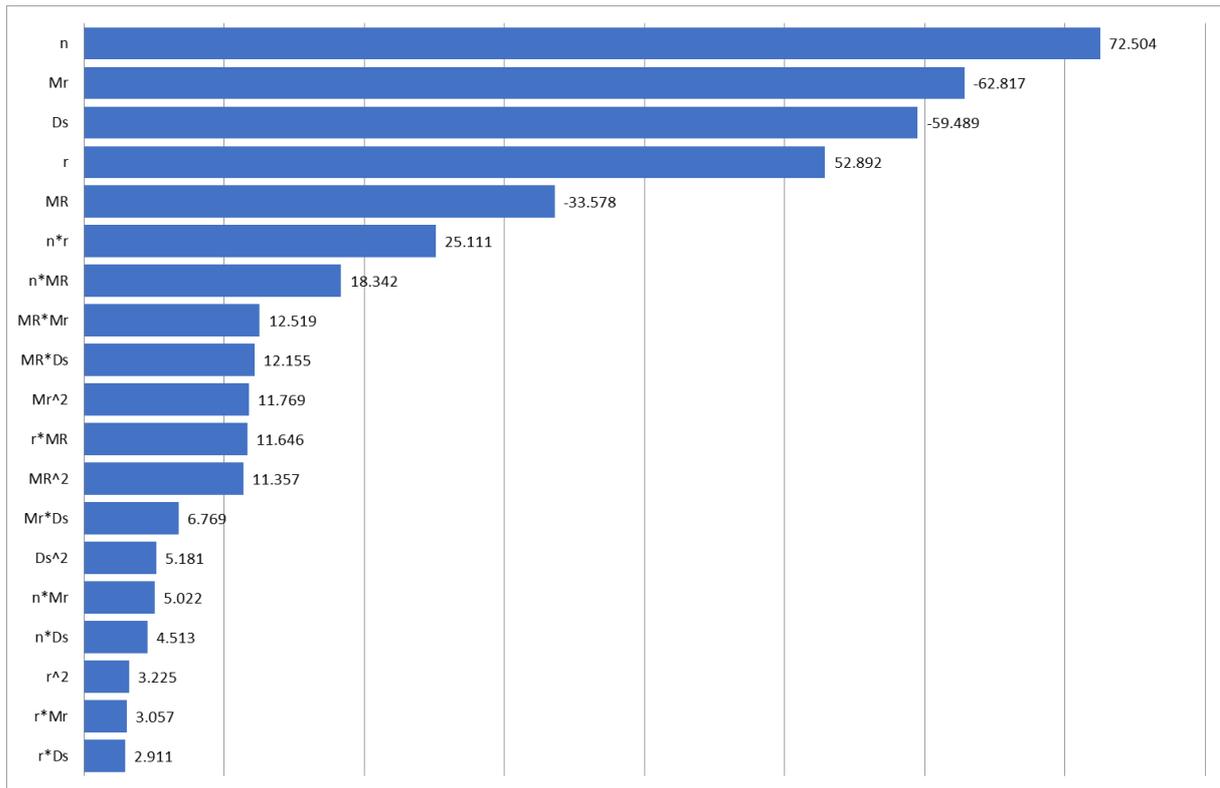


Figura 3.12: Gráfico de Pareto para pavimento rígido con subbase cementada, sin bermas y sin pasadores.

El último caso, para un pavimento rígido con subbase cementada, sin berma y sin pasador, correspondiente al caso 8, Figura 3.12 el parámetro de entrada más influyente es el periodo de diseño estructural (n), similar al caso 6. El módulo de reacción de la subrasante (Mr), el espesor de la subbase (Ds), y la tasa de crecimiento vehicular (r) son los siguientes parámetros en influencia. El parámetro predominante “ n ” cuenta con un impacto de 72.50, mientras “ Mr ”, “ Ds ”, y “ r ” cuentan con un impacto de 62.82, 59.49 y 52.89, respectivamente siendo también factores importantes en el momento del diseño la losa de pavimento rígido.

La combinación de los diferentes parámetros, cuando existe interacción entre dos factores, indica que existe un efecto no lineal en todos los parámetros. Esto era de esperarse debido a la estructura del respectivo proceso que plantea el método de la PCA. De igual manera es similar en el efecto para los términos cuadráticos, además de que su influencia en la variabilidad del espesor de la losa del pavimento es insignificante en relación con la más influyente. A continuación, se presentan los parámetros involucrados en el análisis:

a) Módulo de reacción de la subrasante (Mr). Es el parámetro con mayor influencia para los 4 primeros casos, correspondientes a subbase granular, independientemente de la presencia o no de bermas y/o pasadores. Además, de ser el segundo parámetro más influyente para los demás casos de estudio, correspondientes a subbase cementada, de igual manera, independientemente de la presencia o no de bermas y/o pasadores. El módulo de reacción de la subrasante se emplea para la obtención de la resistencia compuesta de subrasante-subbase (Tabla 2.1) y (Tabla 2.2). Donde los módulos de reacción de la



subrasante para una subbase granular generan un espesor mayor que un pavimento con una subbase cementada.

b) Módulo de rotura del concreto o resistencia del concreto a flexión (MR).

Es el parámetro más significativo para los casos 5 y 7, correspondientes a un pavimento rígido con subbase cementada, con berma-con pasador y sin berma-con pasador así como el segundo para los casos 1, 3 y 4 correspondientes a subbase granular, con berma-con pasador, sin berma-con pasador y sin berma-sin pasador, respectivamente. Este parámetro representa la resistencia a flexión que presenta la losa de pavimento rígido, mientras más resistente sea la losa, menor será el espesor necesario de esta. Para los casos 2 y 6, es el tercer y cuarto parámetro más influyente respectivamente.

c) Periodo de diseño (n). Es el parámetros que influye en mayor medida para el pavimento de los casos 6, 8 y segundo para el caso 2 correspondientes a pavimento con subbase cementada con berma-sin pasador, cementada sin berma-sin pasador y subbase granular con berma-sin pasador, respectivamente. Como es de esperarse, este parámetro siempre se presenta de manera positiva, lo que implica que mientras es creciente, el espesor de la losa de pavimento también lo será, puesto que determina la cantidad de vehículos que servirá el pavimento. Al diseñar para un tiempo corto indica que el pavimento tiene que resistir una cantidad de vehículos menor que si se diseña para un periodo alto. Para el caso 4, “n” representa el tercer parámetro más influyente. Para los demás casos, el periodo de diseño es el cuarto parámetro influyente.

d) Espesor de la subbase (Ds). Este parámetro afecta de manera importante en todos los casos, siendo el tercer parámetro más influyente para los casos del 5 al 8 correspondientes a un pavimento con subbase cementada independientemente de la presencia o no de bermas y/o pasadores, y para los casos 1 y 3, correspondientes a pavimentos con subbase granular con berma-con pasador y sin berma-con pasador. Este parámetro resulta ser inversamente proporcional con el espesor de la losa de concreto, mientras mayor sea este valor, el espesor de la losa será menor. El espesor de la subbase es utilizado para determinar de la resistencia de la subrasante y subbase, (Tabla 2.1) y (Tabla 2.2), donde para un pavimento con subbase cementada el espesor obtenido es menor que para un pavimento con subbase granular.

e) Tasa de crecimiento vehicular (r). Es el parámetro que menos afecta de forma lineal en el diseño, siendo el cuarto parámetro más significativa para pavimentos sin pasadores independientemente de la presencia o no de bermas, o si la subbase es granular o cementada, y quinto para pavimentos con pasadores independientemente de la presencia o no de bermas, o si la subbase es granular o cementada. Cuando mayor es la tasa de crecimiento vehicular, mayor será el espesor de la losa de pavimento rígido, puesto que determina el número de vehículos acumulados.



3.1.6. Análisis del comportamiento del espesor del pavimento

En esta sección se presenta, el comportamiento del espesor de pavimento en relación de los parámetros considerados individualmente. Para poder entender el comportamiento del espesor en relación a las variables se utiliza cada uno de los modelos matemáticos presentados en las ecuaciones 3.2 hasta 3.9, donde un parámetro varía desde su valor mínimo hasta el máximo de su rango, mientras los demás parámetros permanecen constantes. De esta manera se puede visualizar con mayor facilidad el efecto que causa un parámetro sobre el espesor de pavimento, complementando así los resultados obtenidos a partir de los gráficos de Pareto. Las Figuras 3.13 y 3.14 corresponden a la variación del periodo de diseño, las Figuras 3.15 y 3.16 muestran la variación de la tasa de crecimiento vehicular, las Figuras 3.17 y 3.18 para módulo de rotura, la 3.19 y 3.20 del módulo de reacción de la subrasante, 3.21 y 3.22 para el espesor de la subbase, correspondiente a la subbase granular y cementada, respectivamente. En cada figura, se ha graficado cuatro funciones, correspondiente a un parámetro con berma-con pasador, con berma-sin pasador, sin berma-con pasador, y sin berma-sin pasador.

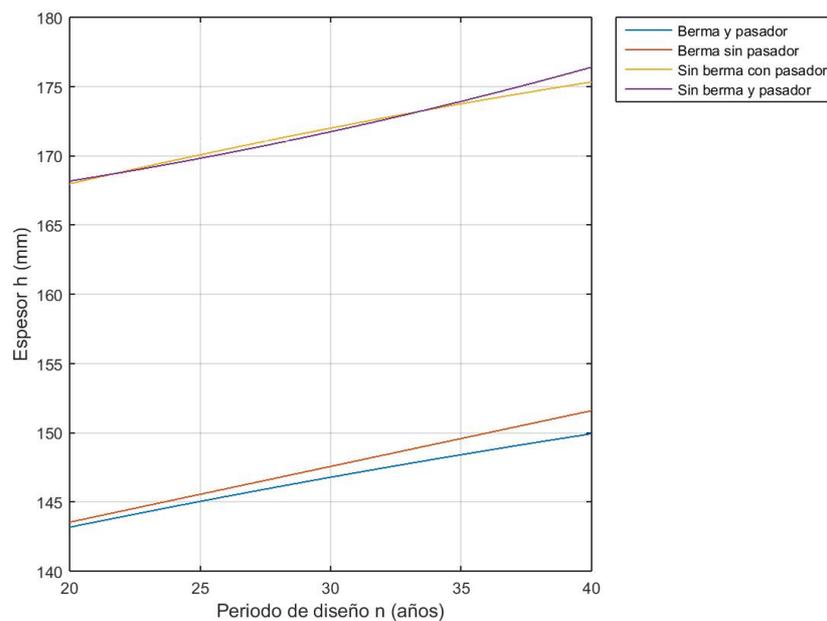


Figura 3.13: Efecto del periodo de diseño (n) sobre el espesor (h) para subbase granular, $h=f(n)$, donde $r=3.5\%$, $MR=555$ psi, $Mr=55$ MPa/m, $D_s=203$ mm.

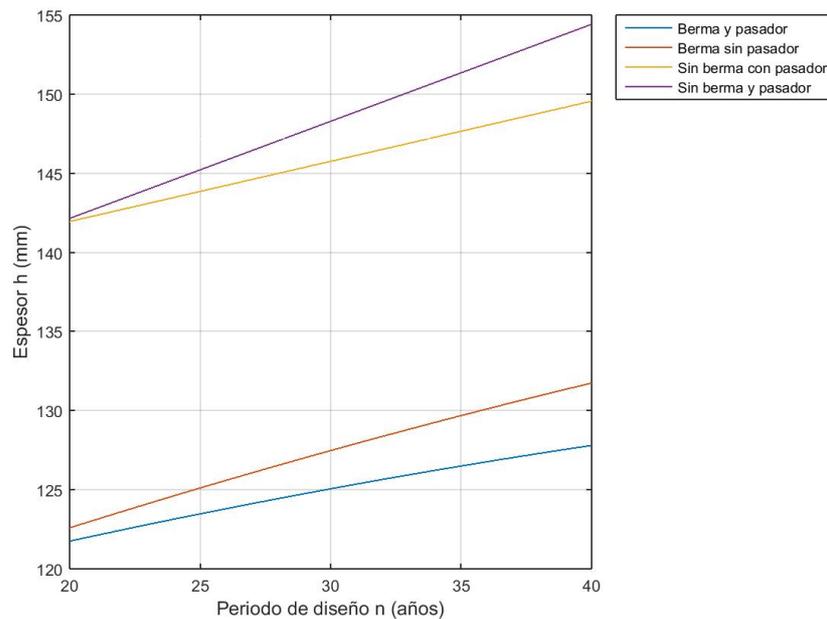


Figura 3.14: Efecto del periodo de diseño (n) sobre el espesor (h) para subbase cementada, $h=f(n)$, donde $r=3.5\%$, $MR=555$ psi, $Mr=55$ MPa/m, $D_s=203$ mm.

En las Figuras 3.13 y 3.14 se ve claramente la variación lineal creciente del parámetro periodo de diseño estructural (n), para los casos de estudio pertenecientes a un pavimento con una subbase granular y cementada, respectivamente. Además, muestra una confirmación de lo que ya se mencionó en los gráficos de Pareto, al realizar un análisis individual del periodo de diseño, donde se muestra que la relación entre este y el espesor de la losa del pavimento es creciente, lo que quiere decir que a medida que el periodo de diseño aumente, el espesor de la losa del pavimento aumentará. Para ambos casos, el diseño de un pavimento rígido sin bermas produce un mayor espesor de la losa de pavimento, por lo que se puede decir que el uso de bermas puede mejorar el confinamiento del pavimento, así como la transferencia de carga. No existe una mayor variación del espesor ante la presencia de pasadores para un pavimento con subbase granular, pero si para una subbase cementada, en especial cuando se considera un periodo de diseño a largo plazo. Pero es claro que, siempre que exista pasadores se presentará un espesor menor que sin la presencia de los mismos. Este resultado muestra que la presencia de pasadores distribuye de una mejor manera las cargas en el pavimento y por lo tanto, el espesor es más delgado. Finalmente, se puede observar que para un mismo periodo de diseño el pavimento con una subbase granular presenta un mayor espesor de la losa de concreto, con una diferencia de al menos 20 mm con relación a un pavimento con una subbase cementada lo que significa que usar subbases tratadas con cemento produce una mayor eficiencia del espesor del pavimento a diferencia de usar simplemente subbases con materiales granulares. Sin embargo, se debe verificar los costos de cada material para determinar el de mejor relación costo-beneficio.

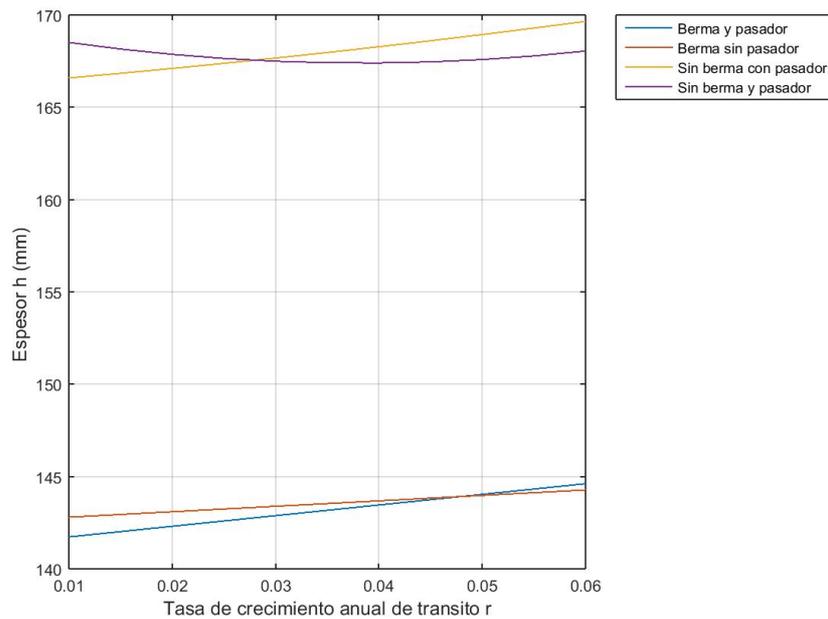


Figura 3.15: Efecto de la tasa de crecimiento vehicular (r) sobre el espesor (h) para subbase granular, $h=f(r)$, donde $n=20$ años, $MR=555$ psi, $Mr=55$ MPa/m, $D_s=203$ mm.

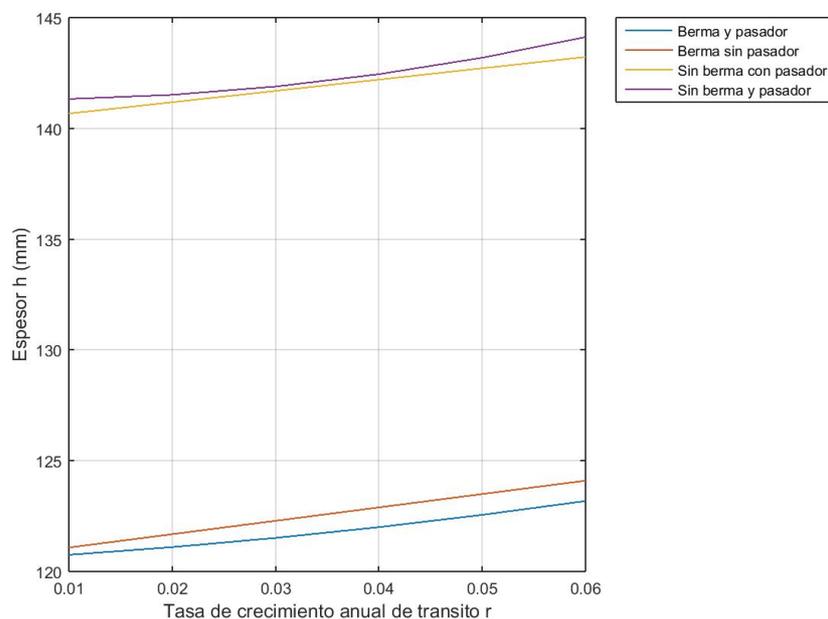


Figura 3.16: Efecto de la tasa de crecimiento vehicular (r) sobre el espesor (h) para subbase cementada, $h=f(r)$, donde $n=20$ años, $MR=555$ psi, $Mr=55$ MPa/m, $D_s=203$ mm.

En las Figuras 3.15 y 3.16 se presenta una variación lineal creciente del parámetro tasa de crecimiento vehicular (r) pertenecientes a un pavimento con una subbase granular



y cementada, respectivamente donde cada figura cuenta con cuatro casos de estudio y muestra una confirmación de lo que ya se mencionó en los gráficos de Pareto. Al realizar un análisis individual de la tasa anual de crecimiento de tránsito, donde para ambos casos, el diseño sin bermas produce un mayor espesor de la losa de pavimento, por lo que se puede decir que el uso de bermas puede mejorar el confinamiento del pavimento, así como la transferencia de carga. No existe una mayor variación del espesor ante la presencia de pasadores tanto para una subbase granular, como para una subbase cementada, siendo siempre un espesor mayor para diseños sin pasadores. Este resultado muestra que la presencia de pasadores distribuye de una mejor manera las cargas en el pavimento y por lo tanto, el espesor es más delgado. Para un mismo periodo de diseño el pavimento con una subbase granular presenta un mayor espesor de la losa de concreto, con una diferencia de al menos 20 mm con relación a un pavimento con una subbase cementada lo que significa que usar subbases tratadas con cemento produce una mayor eficiencia del espesor del pavimento a diferencia de usar simplemente subbases con materiales granulares, pero se debe considerar los costos. Finalmente, se puede concluir que al ser el parámetro de menor influencia en el diseño, su relación tiende a una variación lineal creciente casi horizontal a diferencia del caso de sin berma (Figura 3.15) y pasador donde tiende a una curva parabólica, al ser obtenida a partir de una ecuación cuadrática, con valores decrecientes del espesor de la losa desde el inicio de la parábola hasta el vértice ubicado a 0.035 de la tasa de crecimiento y crecientes desde 0.035 hasta 0.06, donde la máxima variación decreciente es 1.11 mm y creciente 0.64 mm, que resultan ser valores despreciables, esto se debe al error presente en la ecuación que cuenta con un ajuste correspondiente a $R^2 = 0.988$. Para comprobar lo indicado se presenta la Tabla 3.11 donde se observa la diferencia entre la aplicación del modelo matemático y el método de la PCA, demostrando así que el error relativo no sobrepasa el 2%.

Tabla 3.11: Tabla comparativa de los espesores del pavimento rígido a partir de una variación de la tasa anual de crecimiento de tránsito para un pavimento granular sin berma y sin pasador.

r	modelo matemático h(mm)	método de PCA h(mm)	error relativo %
0.010	168.51	167	0.90
0.015	168.15	168	0.09
0.020	167.86	168	0.08
0.025	167.64	168	0.21
0.030	167.49	169	0.89
0.035	167.41	169	0.94
0.040	167.40	169	0.95
0.045	167.46	170	1.49
0.050	167.58	170	1.42
0.055	167.78	170	1.31
0.060	168.04	171	1.73

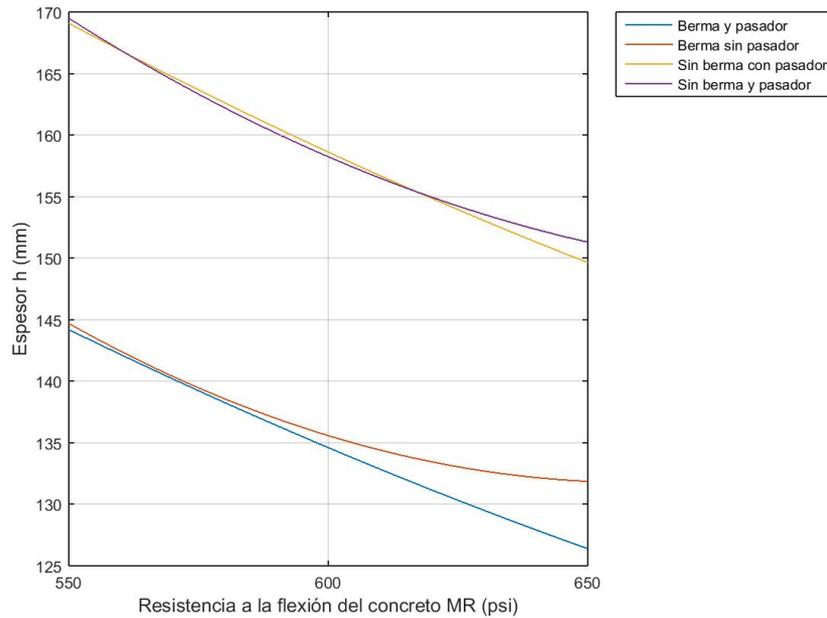


Figura 3.17: Efecto del módulo de rotura (MR) sobre el espesor (h) para subbase granular, $h=f(\text{MR})$, donde $n=20$ años, $r=3.5\%$, $M_r=55$ MPa/m, $D_s=203$ mm.

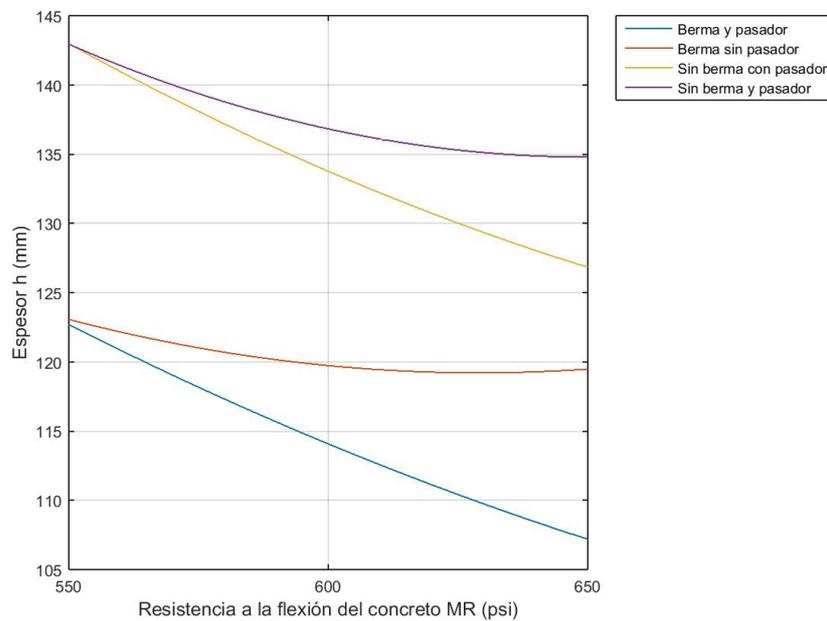


Figura 3.18: Efecto del módulo de rotura (MR) sobre el espesor (h) para subbase cementada, $h=f(\text{MR})$, donde $n=20$ años, $r=3.5\%$, $M_r=55$ MPa/m, $D_s=203$ mm.

En las Figuras 3.17 y 3.18 se presenta el efecto que produce el módulo de rotura (MR) tanto para subbases granulares como cementadas, respectivamente. Donde la variación tiende a ser cuadrática, cada gráfica tiene cuatro casos de estudio. Estas figuras son

un complemento de las gráficas de Pareto donde se concluía que este parámetro es inversamente proporcional a la losa del pavimento rígido, lo que quiere decir que a medida que el módulo de rotura aumenta, el espesor de la losa del pavimento disminuirá. Para ambas gráficas, el diseño de un pavimento rígido sin bermas produce un mayor espesor de la losa de pavimento, al mejorar el confinamiento del pavimento, así como la transferencia de carga. Existe una variación del espesor de la losa ante la presencia de pasadores, variando entre 2 a 7 mm en el caso de la existencia de subbases granulares y entre 7 y 12 mm para subbases cementadas, en especial cuando se considera un periodo de diseño a largo plazo, por lo cual se prevé que, siempre que exista pasadores se presentara un espesor menor que sin la presencia de los mismos. Este resultado muestra que la presencia de pasadores distribuye de una mejor manera las cargas en el pavimento y por lo tanto, el espesor es más delgado. Finalmente, se puede observar que para un módulo de rotura para un pavimento con una subbase granular se presenta un mayor espesor de la losa de concreto, con una diferencia de al menos 23 mm con relación a un pavimento con una subbase cementada lo que significa que usar subbases tratadas con cemento produce una mayor eficiencia del espesor del pavimento a diferencia de usar simplemente subbases con materiales granulares. Sin embargo, como se ha indicado se debe analizar los costos de ambas alternativas.

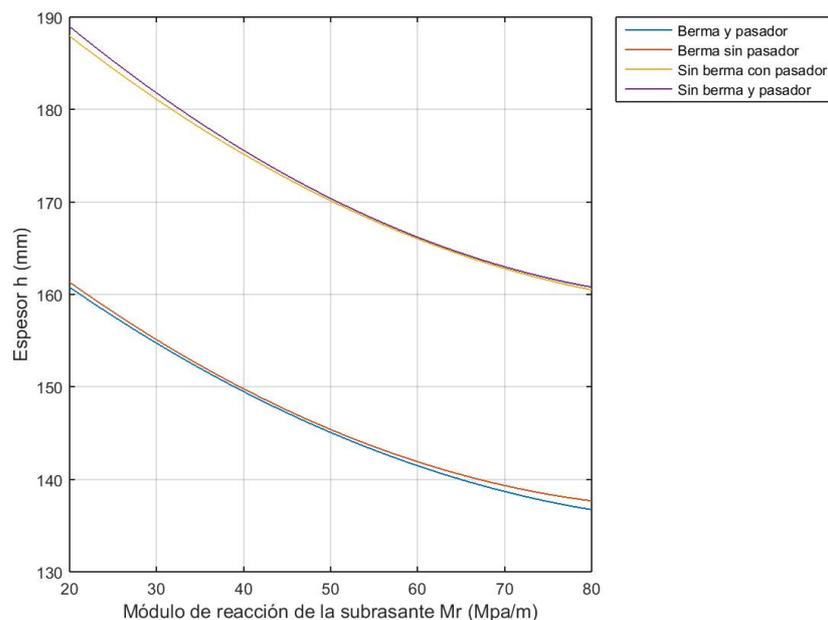


Figura 3.19: Efecto del módulo de reacción de la subrasante (M_r) sobre el espesor (h) para subbase granular, $h=f(M_r)$, donde $n=20$ años, $r=3.5\%$, $MR=555$ psi, $D_s=203$ mm.

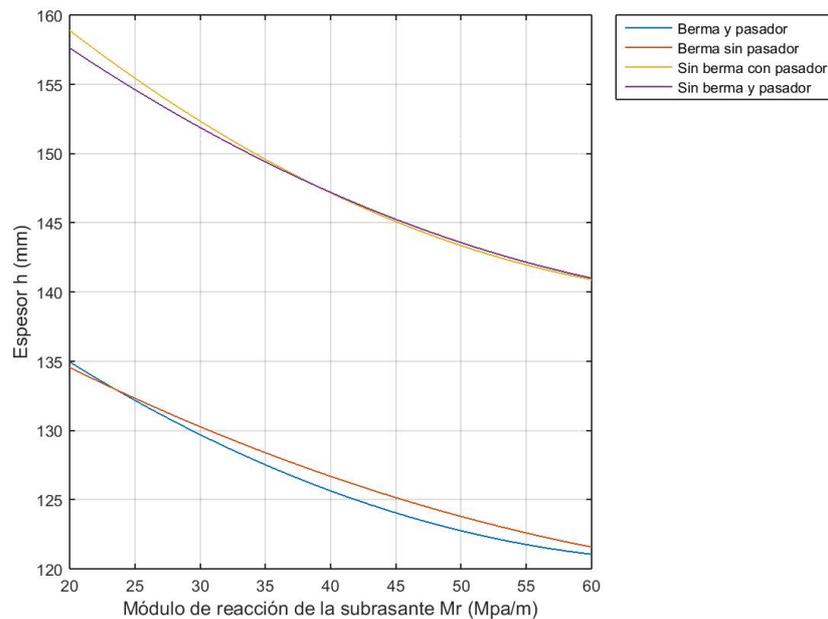


Figura 3.20: Efecto del módulo de reacción de la subrasante (M_r) sobre el espesor (h) para subbase cementada, $h=f(M_r)$ donde $n=20$ años, $r=3.5\%$, $MR=555$ psi, $D_s=203$ mm.

En las Figuras 3.19 y 3.20 se presenta el efecto que produce el módulo de reacción de la subrasante (M_r) para subbases granulares y cementadas, respectivamente. La variación tiende a ser cuadrática, cada gráfica tiene cuatro casos de estudio, por la presencia o no de bermas y/o pasadores. Este parámetro es inversamente proporcional a la losa del pavimento, lo que quiere decir que a medida que el módulo de reacción de la subrasante aumenta, el espesor de la losa del pavimento disminuye. Para ambas gráficas, el diseño de un pavimento rígido sin bermas produce un mayor espesor de la losa de pavimento. La presencia de pasadores distribuye de una mejor manera las cargas en el pavimento, por lo que, el espesor debe ser menor, pero en este caso, para un mismo módulo de reacción de la subrasante se obtiene un espesor similar independientemente de la presencia o no de pasadores. Finalmente, se puede observar que para un módulo de rotura para un pavimento con una subbase granular se presenta un mayor espesor de la losa de concreto, con una diferencia de al menos 25 mm con relación a un pavimento con una subbase cementada.

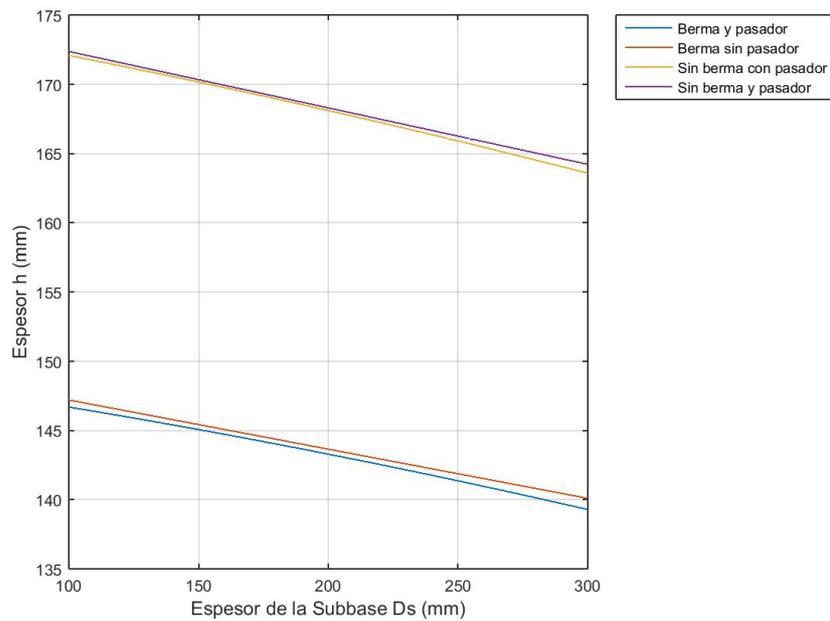


Figura 3.21: Efecto del espesor de la subbase (D_s) sobre el espesor (h) para subbase granular, $h=f(D_s)$, donde $n=20$ años, $r=3.5\%$, $MR=555$ psi, $Mr=55$ MPa/m.

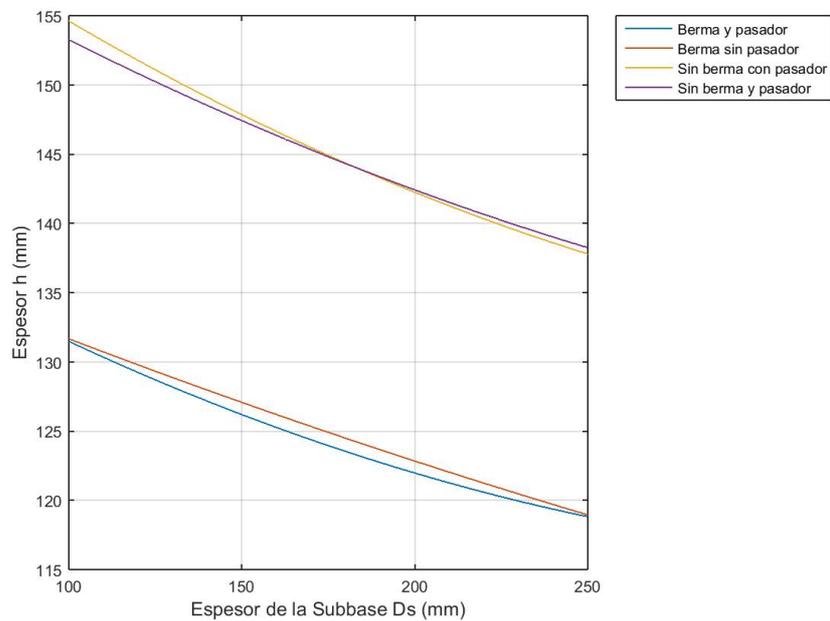


Figura 3.22: Efecto del espesor de la subbase (D_s) sobre el espesor (h) para subbase cementada, $h=f(D_s)$, donde $n=20$ años, $r=3.5\%$, $MR=555$ psi, $Mr=55$ MPa/m.

En las Figuras 3.21 y 3.22 se presenta el efecto que produce el espesor de la subbase, tanto para subbases granulares y cementadas, respectivamente. La variación tiende a ser lineal, afirmando así los resultados obtenidos en las figuras de Pareto, donde se observaba que



este parámetro es inversamente proporcional a la losa del pavimento rígido, a medida que el espesor de la subbase aumenta, el espesor de la losa del pavimento disminuirá. Para ambas gráficas, el diseño de un pavimento rígido sin bermas produce un mayor espesor de la losa de pavimento. Tanto para la Figura 3.21 como para la Figura 3.22 se observa que la presencia de pasadores genera un menor espesor de la losa, puesto que estos distribuyen de una mejor manera las cargas en el pavimento, por lo que, el espesor debe ser menor, pero, para un mismo espesor de la base se obtiene un espesor similar independientemente de la presencia o no de pasadores. Se puede observar que para un pavimento con una subbase granular se presenta un mayor espesor de la losa de concreto, con una diferencia de al menos 15 mm con relación a un pavimento con una subbase cementada.

3.1.7. Verificación de los modelos propuestos

Para validar complementariamente los modelos propuestos se ha tomado aleatoriamente 10 ejemplos diferentes de los utilizados para construir el modelo matemático, para lo cual se ha corrido el programa de la PCA y se ha empleado en el respectivo modelo matemático obteniendo así dos valores del espesor del pavimento para ser comparados. En las Tablas 3.12 se presenta un ejemplo con datos de entrada aleatorios, así como el espesor obtenido por medio del método de la PCA, y el obtenido por su respectivo modelo matemático. Además se indica el error relativo existente entre los dos espesores, siendo el error máximo de 1.05 % validando el modelo. Esto se verifica también con el coeficiente de correlación R^2 . La Figura 3.23 corresponde al gráfico de comparación del espesor de la losa para cada uno de los valores randómicos obtenidos tanto por el método de la PCA como por el modelo matemático, siendo este caso para un pavimento rígido con subbase con berma y con pasador. Las tablas y las figuras correspondientes a las verificaciones de los 7 casos restantes se encuentran en el Anexo I.1 en las Tablas I.8 hasta I.14, donde se detecta que el modelo matemático para cada uno de los casos de estudio es válido.

Tabla 3.12: Propiedades aleatorias para un pavimento rígido con subbase granular con berma y con pasador.

n (años)	r (%)	MR (psi)	Mr (psi)	Ds (mm)	h PCA (mm)	h fórmula (mm)	error (%)
40	0.05	551	70	250	147	146.6	0.29
20	0.06	551	80	175	140	139.7	0.23
20	0.01	551	20	300	155	154.9	0.08
35	0.01	595	80	175	133	132.5	0.36
30	0.04	650	60	175	131	129.6	1.05
30	0.02	551	20	250	161	161.6	0.38
35	0.02	595	30	300	145	145.6	0.42
25	0.05	595	50	275	138	137.6	0.31
40	0.05	551	80	250	145	144.6	0.27
25	0.04	650	80	250	122	121.8	0.20

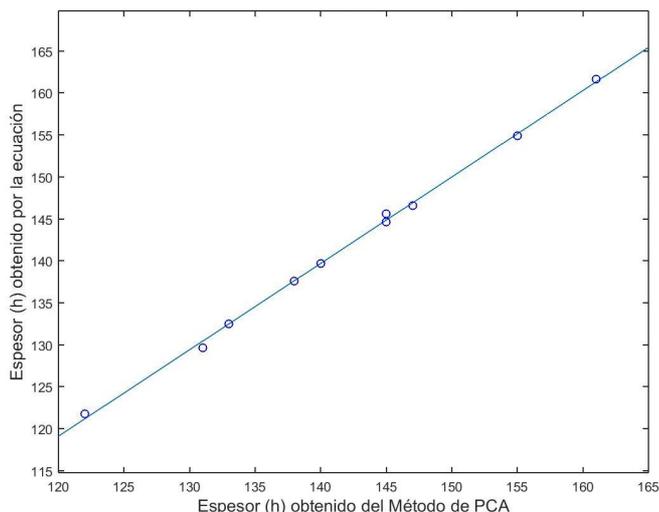


Figura 3.23: Comparación de los valores del espesor (h) determinado por el método de la PCA y los valores calculados por el modelo matemático para un pavimento rígido con subbase granular con berma y con pasador.

La Figura 3.23 muestra la comparación de los valores del espesor de la losa del pavimento obtenida mediante el método de la PCA y los valores determinados mediante el método experimental no lineal, indicando así, el nivel de confianza predictivo del modelo matemática desarrollado por el ajuste que se aplicó, con un $R^2=0.998$. Con esto se puede concluir que el modelo que se desarrolló es válido. Adicionalmente, en la Tabla 3.13 se presenta el coeficiente de correlación de cada análisis de comparación de los valores del espesor (h) determinado por el método de la PCA y los valores calculados por el modelo matemático, determinándose que el modelo matemático tiene un $R^2 \geq 0.95$ de ajuste, lo que da una confianza adecuada para el empleo de las ecuaciones.

Tabla 3.13: Coeficiente de correlación de cada análisis de comparación de los valores del espesor (h) determinado por el método de la PCA y los calculados por el modelo matemático.

Caso	Descripción	R^2
1	granular con berma con pasador	0.998
2	granular con berma sin pasador	0.991
3	granular sin berma con pasador	0.998
4	granular sin berma sin pasador	0.988
5	cementado con berma con pasador	0.996
6	cementado con berma sin pasador	0.990
7	cementado sin berma con pasador	0.992
8	cementado sin berma sin pasador	0.959



3.1.8. Análisis complementario

Uno de los resultados obtenidos fue la determinación de la combinación de parámetros que produce el máximo y el mínimo valor para el espesor de la losa del pavimento de toda la iteración de los parámetros de entrada. En la Tabla 3.14 se presenta los espesores máximos y mínimos para con su respectiva combinación.

Tabla 3.14: Combinación de parámetros para el máximo y mínimo valor del espesor de la losa del pavimento.

	n	r	MR	Mr	Ds	h mm
Máximo	40	0.06	550	20	100	208
Mínimo	20	0.01	650	60	250	104

Para la combinación que produce el mayor espesor de la losa de pavimento (208 mm) se tiene un periodo de diseño estructural de 40 años, correspondiente al límite superior de este parámetro, lo que significa que el volumen de tráfico será el mayor esperado; al igual que la tasa anual de crecimiento de 0.06, siendo también el límite superior indicando que el diseño se realizará con un crecimiento anual alto. En cuanto a la resistencia a la flexión del concreto de 550 psi, el módulo de reacción de la subrasante de 20 MPa/m y el espesor de la subbase de 100 mm, correspondientes a los límites inferiores de cada uno de los parámetros mencionados, indicando así que, el concreto tiene la resistencia a la flexión mínima con características del subrasante bajas, y un espesor de subbase pequeño, que genera un aumento significativo en el espesor de la losa de pavimento rígido para que pueda soportar las cargas para el periodo de diseño y la tasa de crecimiento impuestas. Además, estas condiciones se desarrollan para un pavimento con subbase granular, sin berma independientemente de la presencia de pasador, confirmando así las condiciones más críticas que dan como resultado el máximo espesor de todo el análisis.

Por el contrario, para la combinación que produce el menor espesor de la losa de pavimento (104 mm) se tiene un periodo de diseño estructural de 20 años, correspondiente al límite inferior, lo que significa que el volumen de tráfico será el menor esperado; al igual que la tasa anual de crecimiento de 0.01, siendo también el límite inferior indicando que el diseño se realizará con un crecimiento anual mínimo. En cuanto a la resistencia a la flexión del concreto de 650 psi, el módulo de reacción de la subrasante de 60 MPa/m y el espesor de la subbase de 250 mm, correspondientes a los límites superiores de cada uno de los parámetros mencionados, indicando así que, el concreto tiene una resistencia a la flexión alta con características del subrasante excelentes, y un espesor de subbase grande, que dan como resultado un espesor de la losa de pavimento rígido mínimo. Además, estas condiciones se desarrollan para un pavimento con subbase cementada, con berma y con pasador, confirmando así las condiciones más favorables que dan como resultado un mínimo espesor de todo el análisis.

La programación realizada para el análisis estadístico del método de la PCA se puede encontrar en los Anexos, Sección I.4.



3.2. Análisis del método de la AASHTO

Para el análisis estadístico de la AASHTO, al igual que el de la PCA, se aplicó el método experimental no lineal para desarrollar un modelo de predicción de los parámetros más influyentes en el espesor de la losa del pavimento rígido. Basado en los rangos de factores de entrada, utilizando los valores del máximo (+1), medio (0) y mínimo (-1) de estos rangos, se generaron combinaciones de entrada, los cuales están uniformemente distribuidos a través del espacio de los parámetros escogido. Para la aplicación del método, se siguieron las siguientes etapas:

3.2.1. Selección de los parámetros de entrada más influyentes para la estructura del pavimento

Los parámetros de entrada han sido establecidos en las Tablas 2.21. Cabe señalar que, en esta etapa, es necesario seleccionar un número razonable de factores, ya que un gran número de parámetros de entrada requeriría un mayor número de análisis del método, pues la iteración de estas variables de entrada para el método de la AASHTO explicadas en la sección 2.3.2, llegan a un número de permutaciones de 6561 con 8 parámetros de entrada.

3.2.2. Determinación de los intervalos de los parámetros de entrada

Se emplean valores de máximo, medio y mínimo, que refleja lo que se espera normalmente para estos parámetros, generando la matriz de análisis, de tal forma que se almacenan los diferentes parámetros de entrada y el espesor resultante.

3.2.3. Codificación de las matrices de análisis

El siguiente paso es codificar la matriz resultante de la iteración del máximo, medio y mínimo de los parámetros de entrada obteniendo una matriz codificada, para la cual se creó la subrutina `método_lineal`, en la cual se realizó el reemplazo de los siguientes valores: +1 para los valores máximos, 0 para los medios y -1 para los mínimos. Esto con el fin de homogenizar todas las variables hacia una misma medida de valores, ya que hay diferentes parámetros que se encuentran con valores muy distanciados entre ellos, lo que podría llevar a una mala interpretación de los factores más influyentes, debido a que ese distanciamiento puede generar distorsiones en el análisis.

3.2.4. Aplicación del método experimental no lineal en la matriz codificada

Usando la función por defecto en Matlab del método experimental, el ajuste cuadrático a la matriz codificada, para el resultado del espesor, da como resultado una ecuación



cuadrática (ecuación 3.1), donde $n=8$, correspondiente a los 8 parámetros con los siguiente coeficientes codificados que se presentan en la Tabla 3.15.

Tabla 3.15: Modelo matemático y su importancia estadística para la matriz codificada, $R^2=0.997$.

Términos	Coefficiente de Estimación Codificado	Error estándar	tStat	pValue
intercep	25.8077	0.0156	1,655.20	0
confiabilidad	2.9632	0.0046	639.8128	0
H1	-0.2285	0.0046	-49.3422	0
H2	0.4929	0.0046	106.4205	0
n	2.4316	0.0046	525.0209	0
Cd	-2.8365	0.0046	-612.4482	0
J	4.1969	0.0046	906.1871	0
Js	1.9667	0.0046	424.6487	0
So	0.2299	0.0046	49.6377	0
confiabilidad*H1	0.0184	0.0057	3.252	1.20E-03
confiabilidad*H2	-0.0409	0.0057	-7.2129	6.10E-13
confiabilidad*n	0.1914	0.0057	33.7387	3.93E-230
confiabilidad*Cd	-0.2216	0.0057	-39.0694	3.60E-300
confiabilidad*J	0.3209	0.0057	56.5707	0
confiabilidad*Js	-0.0999	0.0057	-17.604	8.36E-68
confiabilidad*So	0.2599	0.0057	45.8238	0
H1*H2	0.0646	0.0057	11.3949	8.47E-30
H1*n	0.0156	0.0057	2.7465	6.00E-03
H1*Cd	-0.0179	0.0057	-3.1634	1.60E-03
H1*J	0.0284	0.0057	5.0036	5.77E-07
H1*Js	0.1945	0.0057	34.2946	4.12E-237
H2*n	-0.0322	0.0057	-5.682	1.39E-08
H2*Cd	0.0395	0.0057	6.964	3.63E-12
H2*J	-0.0645	0.0057	-11.3722	1.09E-29
H2*Js	-0.4297	0.0057	-75.7489	0
n*Cd	-0.1831	0.0057	-32.2822	3.16E-212
n*J	0.2628	0.0057	46.3315	0
n*Js	-0.0846	0.0057	-14.9171	1.66E-49
n*So	0.0155	0.0057	2.7408	6.10E-03
Cd*J	-0.3055	0.0057	-53.8511	0.00E+00
Cd*Js	0.0982	0.0057	17.3075	1.19E-65
Cd*So	-0.0182	0.0057	-3.2087	1.30E-03
J*Js	-0.1529	0.0057	-26.9476	9.79E-152
J*So	0.0268	0.0057	4.7329	2.26E-06
confiabilidad ²	0.9151	0.008	114.0744	0
H1 ²	0.4714	0.008	58.7626	0
H2 ²	-0.0267	0.008	-3.3321	8.67E-04
n ²	-0.1423	0.008	-17.7361	8.95E-69
Cd ²	0.3908	0.008	48.7204	0
J ²	-0.4023	0.008	-50.1457	0
Js ²	-0.6387	0.008	-79.223	0

El ajuste determinó 44 coeficientes, incluyendo una intercepción, 8 coeficientes de términos lineales, 28 coeficientes de interacción de dos factores y 8 coeficientes de términos cuadráticos.



3.2.5. Selección del modelo matemático apropiado para la predicción del espesor

Cabe recalcar que los coeficientes de la estimación real han sido obtenidos de un modelo matemático reducido, donde no incluyen los términos con valores de pValue > 0.05, ya que estos valores no son significativos, así se elimina 3 coeficientes de interacción de dos factores (H1*So, H2*So y Ls*So) y un coeficiente de términos cuadráticos (So²).

Dentro de la subrutina metodo_lineal, se aplica nuevamente el método experimental, con la matriz no codificada para la obtención de los coeficientes de estimación reales, pero con un ajuste hacia un modelo matemático específico donde no incluyen los términos eliminados, obteniendo los resultados presentes en la Tabla 3.16.

$$\begin{aligned}
 D_{comp} = & 23,87 - 29,25 * confiabilidad - 0,16 * H1 + \\
 & 0,22 * H2 + 0,26 * n - 21,65 * Cd + 6,48 * J + 2,66 * \\
 & Ls - 21,82 * So + 0,16 * confiabilidad * H1 - 0,036 \\
 & * confiabilidad * H2 + 0,0025 * H1 * H2 + 0,085 * n * \\
 & confiabilidad + 0,00027 * H1 * n - 0,00064 * H2 * n \\
 & - 4,92 * confiabilidad * Cd - 0,017 * H1 * Cd + 0,04 \\
 & * H2 * Cd - 0,092 * n * Cd + 1,43 * confiabilidad * J \\
 & + 0,0056 * H1 * J - 0,013 * H2 * J + 0,026 * n * J - \\
 & 1,53 * Cd * J - 0,30 * confiabilidad * Ls + 0,025 \\
 & * H1 * Ls - 0,057 * H2 * Ls - 0,0056 * n * Ls + 0,33 * \\
 & Cd * Ls - 0,10 * J * Ls + 38,51 * confiabilidad * So \\
 & + 0,052 * n * So - 3,033 * Cd * So + 0,89 * J * So + \\
 & 18,0756 * confiabilidad^2 + 0,00167 * H1^2 \\
 & - 0,0011 * H2^2 - 0,0014 * n^2 + 9,77 * Cd^2 - 0,40 * \\
 & J^2 - 0,28 * Ls^2
 \end{aligned}
 \tag{3.10}$$



Tabla 3.16: Modelo matemático y su importancia estadística para la matriz real, $R^2=0.998$

Terminos	Coefficiente de Estimación Real	Error estandar	tStat	pValue
intercep	23.865	0.513	46.519	0
confiabilidad	-29.255	0.355	-82.331	0
H1	-0.162	0.005	-31.08	6.90E-198
H2	0.219	0.008	26.694	4.53E-149
n	0.26	0.008	33.026	2.58E-221
Cd	-21.652	0.466	-46.496	0
J	6.481	0.081	79.928	0
Ls	2.661	0.026	101.875	0
So	-21.818	1.184	-18.422	6.45E-74
confiabilidad*H1	0.016	0.003	6.03	1.73E-09
confiabilidad*H2	-0.036	0.004	-8.664	5.70E-18
confiabilidad*n	0.085	0.002	40.524	1.995E-320
confiabilidad*Cd	-4.925	0.105	-46.927	0
confiabilidad*J	1.426	0.021	67.948	0
confiabilidad*Ls	-0.296	0.014	-21.144	4.91E-96
confiabilidad*So	38.507	0.7	55.039	0
H1*H2	0.003	0	21.47	7.44E-99
H1*n	0.00028	0	4.674	3.01E-06
H1*Cd	-0.017	0.003	-5.843	5.39E-09
H1*J	0.006	0.001	9.561	1.61E-21
H1*Ls	0.025	0	64.792	0
H2*n	-0.001	0	-6.825	9.60E-12
H2*Cd	0.04	0.005	8.365	7.31E-17
H2*J	-0.013	0.001	-13.659	6.68E-42
H2*Ls	-0.057	0.001	-90.983	0
n*Cd	-0.092	0.002	-38.774	3.86E-296
n*J	0.026	0	55.649	0
n*Ls	-0.006	0	-17.917	4.08E-70
n*So	0.052	0.016	3.292	1.00E-04
Cd*J	-1.527	0.024	-64.681	0
Cd*Ls	0.327	0.016	20.788	5.44E-93
Cd*So	-3.033	0.787	-3.854	1.17E-04
J*Ls	-0.102	0.003	-32.367	2.90E-213
J*So	0.895	0.157	5.685	1.37E-08
confiabilidad ²	18.076	0.132	137.016	0
H1 ²	0.002	0	16.035	8.75E-57
H2 ²	-0.001	0	-4.002	6.35E-05
n ²	-0.001	0	-21.303	2.09E-97
Cd ²	9.771	0.167	58.519	0
J ²	-0.402	0.007	-60.231	0
Ls ²	-0.284	0.003	-95.635	0

3.2.6. Identificación de los factores más importantes a partir del gráfico de Pareto

Con la finalidad de determinar los factores más relevantes se dividió cada uno de los coeficientes codificados para su respectivo error estándar (SE), obteniendo así (tStat), el valor absoluto es el efecto que provoca cada parámetro en el resultado. El signo positivo o

negativo indica el efecto creciente o decreciente, respectivamente [10]. En la Figura 3.24 se muestra el gráfico de Pareto, mediante el modelo matemático representado en la ecuación 3.10.

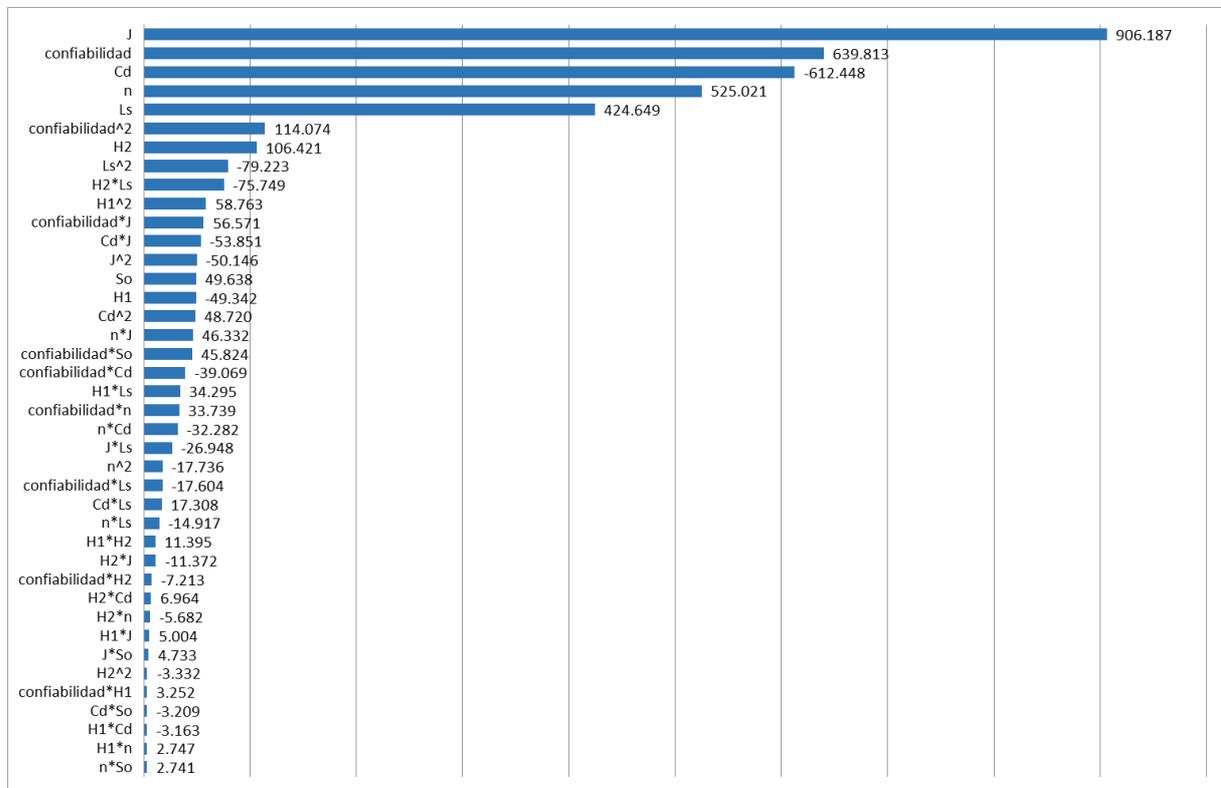


Figura 3.24: Gráfico de Pareto para el método de la AASHTO.

La combinación de los diferentes parámetros cuando existe interacción entre dos factores, indica que existe un efecto no lineal. Esto era de esperarse debido a la estructura de la ecuación que plantea el método de la AASHTO, de igual manera es similar en el efecto para los términos cuadráticos.

A continuación se presenta el efecto en cada uno de los parámetros de diseño.

a) Coeficiente de Transferencia de Carga (J). La Figura 3.24 muestra que el parámetro de entrada más influyente para el método de la AASHTO es el coeficiente de transferencia de carga, ya que entre más alto sea este valor, mayor será el valor del espesor de la losa. Este parámetro tiene un coeficiente de 906.187 siendo este el más sensible de los parámetros de entrada, el mínimo cambio en él provoca una alta variabilidad en el espesor de la losa. Esta variable, al estar en función de las cargas del tráfico, aumenta su valor a medida que se incrementa las cargas debido a los diferentes propósitos que tendrá el pavimento (calles vecinales y caminos principales y autopistas), mientras que sus rangos son definidos por la presencia o no de diferentes mecanismos de transferencia de carga (como pasadores, refuerzo de temperatura, refuerzo continuo, fricción entre agregados y el uso de bermas).



Por ejemplo, mediante la Tabla 2.13 se puede ver que para el caso de que se use pasadores como elementos de transferencia de carga, el valor que toma “J” será un valor de 2.7, y este será el mismo para cualquier carga de tráfico, por lo tanto se puede concluir que el pasador es el mecanismo que genera una mayor eficiencia en el espesor del pavimento, lo que produce un espesor más delgado para cargas de tráfico elevadas, mientras que para el caso de que se use refuerzo continuo como elemento de transferencia de carga, da un valor del coeficiente de transferencia de carga desde 2.8 para una carga de 300,000 veh/año, y hasta 3.6 para 30’000,000 veh/año, por lo que se puede deducir que el refuerzo continuo como mecanismo de transferencia de carga no es tan eficiente como el pasador, ya que mientras aumenta la carga de tráfico este mecanismo aumentará el valor de “J”, y por ende el espesor de la losa del pavimento.

b) Confiabilidad. El siguiente parámetro más influyente es la confiabilidad, ya que el incremento de este valor produce un incremento en el valor final del espesor de la losa, pero de una forma menos sensible que el coeficiente de transferencia de carga, con un impacto del 639.81. Este parámetro representa la probabilidad de que la estructura del pavimento se desempeñe de una forma satisfactoria durante el periodo de diseño, por lo que el análisis muestra que, entre más se espere un mejor comportamiento del pavimento, como respuesta este incrementará su espesor.

c) Coeficiente de drenaje (Cd). El tercer puesto de influencia está el coeficiente de drenaje, pero a diferencia de los que ya se mencionaron, este influye de forma inversa, lo que significa que a medida que aumente el valor de este parámetro el espesor de la losa disminuye. El “Cd” representa los efectos del drenaje sobre el comportamiento del pavimento, que depende de las propiedades con las que cuentan las capas que constituyen la estructura del pavimento para liberar el agua entre sus granos en función del tiempo durante el cual la estructura del pavimento está expuesta a niveles húmedos próximos a la saturación [15]. Tiene un impacto de 612.45. Por ejemplo, a partir de la Tabla 2.12 se puede observar que mientras más corto sea el tiempo para que el suelo libere el 50 % de su agua libre (condición más favorable) mayor será el valor de “Cd”, por lo que el análisis muestra que este parámetro ayuda a mejorar el espesor del pavimento, produciendo menores espesores para las mismas condiciones de carga, al aumentar el valor de “Cd”.

d) Periodo de diseño estructural (n). La siguiente variable es el periodo de diseño estructural, este parámetro de entrada influye en la determinación del espesor de la losa del pavimento de tal forma que al aumentar su valor, aumenta el espesor de la losa, pero con un impacto de 525.02. El periodo de diseño estructural es el periodo de tiempo que constituye la vida útil del servicio de la estructura antes de que requiera una rehabilitación [18]. En la Tabla 2.7 se puede apreciar que mientras más importante sea el tipo del proyecto y el volumen de tráfico mayor será el periodo de diseño, por lo que se puede concluir que entre más importancia y volumen de tráfico tenga el proyecto, mayor será el espesor de la losa del pavimento.

e) Pérdida de soporte (Ls). El siguiente parámetro en orden de influencia es la pérdida de soporte, este parámetro al igual que el anterior aumenta el valor del espesor de la



losa del pavimento a medida que “ L_s ” aumenta, pero con una sensibilidad que representa 424.65. Este parámetro representa la pérdida de soporte potencial proveniente de la erosión de la subbase y/o movimientos diferenciales del suelo [16]. Como se puede ver en la Tabla 2.14, dependiendo del tipo de rigidez que posea la subbase o del módulo de elasticidad, se le dará un valor a “ L_s ” entre 0 y 3, por lo que para un mejor tratamiento que reciba la subbase menor será el valor de “ L_s ”, por lo que se puede llegar a la conclusión de que al no implementar tratamientos en el material de la subbase, provoca que se tenga que realizar una compensación y aumentar el espesor de la losa, a diferencia de que si se la trata con algún tipo de método (agregados con cemento, tratadas con asfalto, mezclas bituminosas estabilizadas, etc.) y se mejora la eficiencia reduciendo el espesor de la losa del pavimento. Pero siempre es importante verificar los costos de los tratamientos.

f) Profundidad del estrato firme (H2). El siguiente parámetro en orden de importancia es la profundidad del estrato firme, este parámetro aumenta el valor del espesor de la losa del pavimento a medida que éste aumenta, pero con una sensibilidad que representa el 106.42. La subrasante es definida como el suelo preparado y compactado para soportar la estructura del pavimento, donde el módulo de reacción es el valor de la capacidad soporte del suelo, la cual depende del módulo resiliente de la subrasante [9], así como del módulo de elasticidad de la subbase, por lo que el análisis muestra que entre mayor sea la profundidad del estrato firme menor será el valor de dicho módulo de reacción que a su vez compensará en un mayor valor del espesor de la losa del pavimento.

g) Desviación Estándar (So). El siguiente parámetro es la desviación estándar, éste incrementa el valor del espesor de la losa a medida que “ S_o ” aumenta, pero con una sensibilidad que representa un 49.63. La desviación estándar es la discrepancia de la población de valores obtenidos que involucra la variabilidad de los materiales, su proceso constructivo y comparación entre datos del diseño del pavimento y los datos reales, todo esto pueden significar un aumento o disminución de la vida útil del parámetro [5]. De acuerdo con la Tabla 2.10 para pavimento rígido se tiene dos condiciones para establecer el rango de “ S_o ”, la primera para una variación en la predicción del comportamiento del pavimento sin errores en el tránsito, donde “ S_o ” tomará un valor de 0.34, mientras que para una variación en la predicción del comportamiento del pavimento con errores en el tránsito da un valor a “ S_o ” de 0.38. Por lo que se puede concluir que el análisis indica que cuando se realicen predicciones más aproximadas a un comportamiento real el valor de “ S_o ” será menor, por lo tanto en valor del espesor del pavimento disminuirá ya que este no tendría que realizar compensaciones en su espesor, mientras que para aproximaciones menos exactas con mayor número de errores da valores para “ S_o ” mayores, lo que implica el aumento del espesor de la losa del pavimento ya que tendría que realizar compensaciones debido a esta imprecisiones.

h) Espesor de la Subbase (H1). El último parámetro en orden de importancia es el espesor de la subbase, pero a diferencia de los que ya se mencionaron, este influye de forma inversa, lo que significa que a medida que aumente el valor de este parámetro el espesor de la losa disminuye con una sensibilidad de 49.34. La subbase es la capa de la estructura del pavimento destinada fundamentalmente a soportar, transmitir y distribuir con uniformidad las cargas aplicadas a la superficie de rodadura del pavimento, de tal manera que la capa de subrasante la pueda soportar absorbiendo las variaciones inherentes



a dicho suelo que puedan afectar la subbase [9]. Por lo que el análisis indica que se debe encontrar el equilibrio de eficiencia entre el espesor de la subbase y el espesor de la losa del pavimento. Entre mayor sea el espesor de la subbase, se producirá una mejor recepción de las cargas aplicadas y una mejor distribución de los esfuerzo transmitidos, a su vez que se reduce el espesor de la losa del pavimento.

3.2.7. Análisis del comportamiento del espesor del pavimento

En esta sección se presenta el análisis del comportamiento del espesor (D) a partir de la variación de los parámetros de entrada del modelo matemático (ecuación 3.10). Para este análisis se considera que los parámetros varían desde su rango inferior hasta el superior, mientras los demás valores se mantienen constantes con un valor aleatorio dentro de su respectivo rango. Se puede visualizar el comportamiento del espesor (D) a partir de la variación de la confiabilidad, espesor de la subbase, profundidad del estrato firme, periodo de diseño, coeficiente de drenaje, coeficiente de transferencia de carga, pérdida de soporte, y desviación estándar. A partir de las Figuras 3.25 hasta la Figura 3.32 se dan los gráficos determinados que se discuten a continuación.

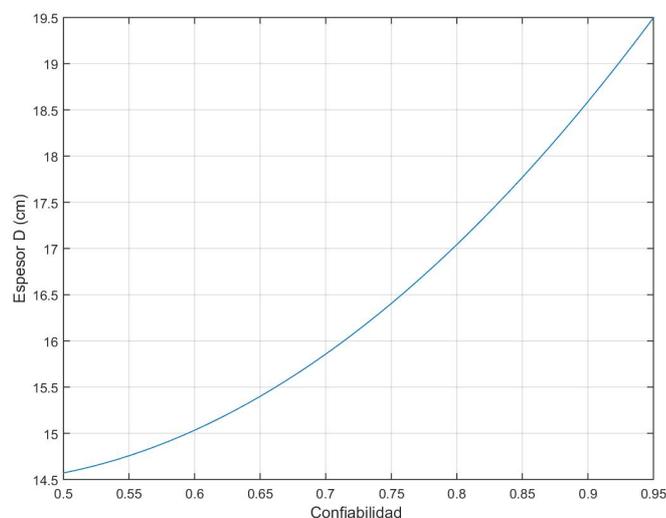


Figura 3.25: Efecto de la confiabilidad sobre el espesor D, $D=f(\text{confiabilidad})$, donde $H1=7$ pulg, $H2=3$ pulg, $n=26$ años, $Cd=1.2$, $J=2.5$, $Ls=0$ y $So=0.34$.

La Figura 3.25 presenta una confirmación de lo que ya se mencionó en la Figura 3.20, donde se realiza un análisis individual de la confiabilidad, obteniéndose la relación entre esta y el espesor de la losa. Esta relación es creciente con una tendencia a una curva potencial, lo que quiere decir que a medida que la confiabilidad aumente el espesor de la losa del pavimento incrementa. Siendo mayor el incremento en cuanto mayor sea la confiabilidad.

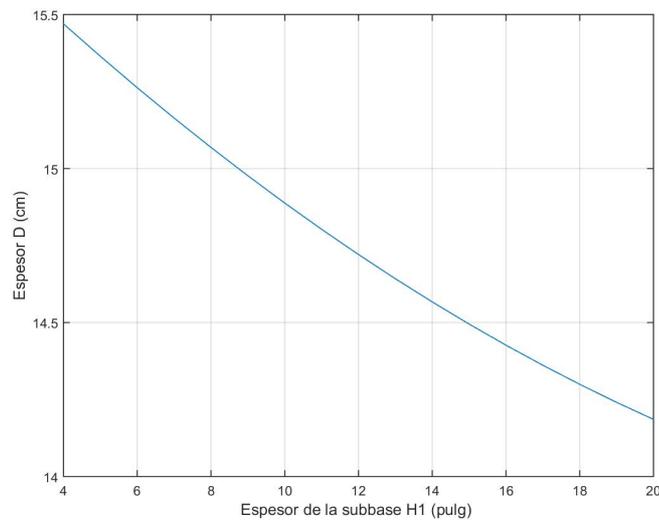


Figura 3.26: Efecto del espesor de la subbase sobre el espesor D, $D=f(H1)$, donde confiabilidad=63 %, $H2=3$ pies, $n=26$ años, $Cd=1.2$, $J=2.5$, $Ls=0$ y $So=0.34$.

La Figura 3.26 muestra el comportamiento del espesor de la subbase, donde se observa que la relación entre este y el espesor de la losa es decreciente, lo que quiere decir que a medida que el espesor de la subbase aumente, el espesor de la losa del pavimento disminuirá. Es importante mencionar que el espesor de la losa varía 1.6 cm a lo largo del rango del espesor de la subbase (4 a 20 pulgadas).

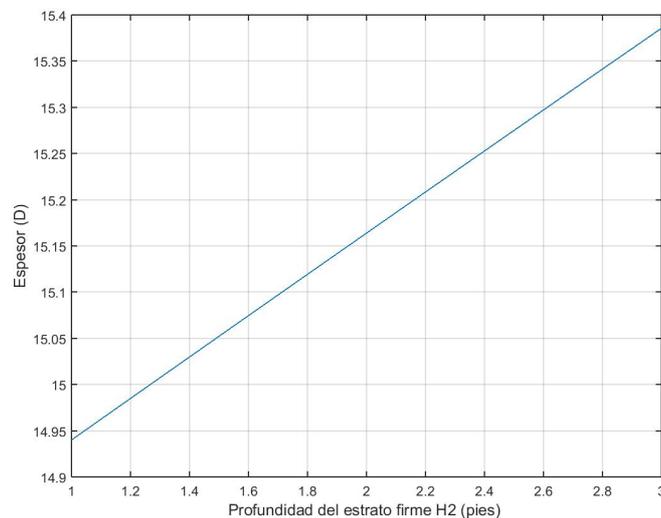


Figura 3.27: Efecto de la profundidad al estrato firme sobre el espesor D, $D=f(H2)$, donde confiabilidad=63 %, $H1=7$ pulg, $n=26$ años, $Cd=1.2$, $J=2.5$, $Ls=0$ y $So=0.34$.

La Figura 3.27 presenta el efecto de la profundidad al estrato firme sobre el espesor de la losa. La relación es creciente con una tendencia lineal, es decir, a medida que este



parámetro aumente el espesor de la losa del pavimento incrementa. Esto se debe a que entre más profundidad haya al estrato rocoso, el efecto en la resistencia de la subrasante será menor.

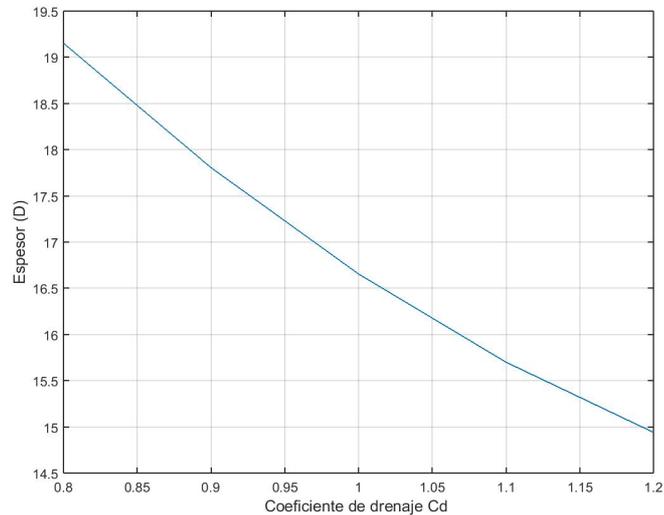


Figura 3.28: Efecto del coeficiente de drenaje sobre el espesor D , $D=f(Cd)$, donde confiabilidad=63 %, $H1=7$ pulg, $H2=3$ pulg, $n=26$ años, $J=2.5$, $Ls=0$ y $So=0.34$.

La Figura 3.28 muestra el comportamiento del coeficiente de drenaje Cd , donde se observa que la relación entre este y el espesor de la losa del pavimento es decreciente con una tendencia a una curva exponencial, lo que quiere decir que a medida que “ Cd ” aumente el espesor de la losa disminuirá.

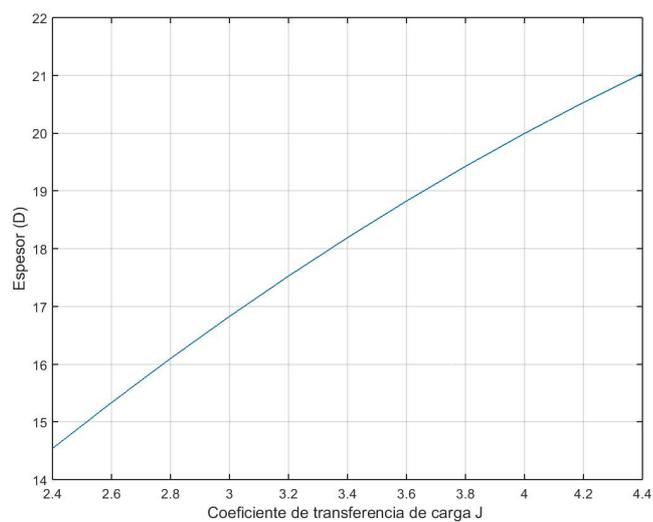


Figura 3.29: Efecto del coeficiente de transferencia de carga sobre el espesor D , $D=f(J)$, donde confiabilidad=63 %, $H1=7$ pulg, $H2=3$ pulg, $n=26$ años, $Cd=1.2$, $Ls=0$ y $So=0.34$.

En la Figura 3.29 se presenta el análisis del coeficiente de transferencia de carga (J). Al ser su relación creciente con una tendencia exponencial, muestra que a medida que “ J ” aumente el espesor de la losa del pavimento aumenta, con la mayor sensibilidad entre los parámetros de entrada, haciendo que los diferentes mecanismos de transferencia que se usen, mejoren la eficiencia del diseño.

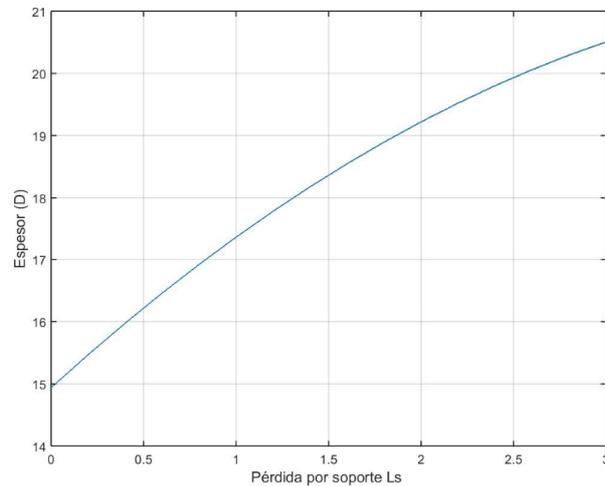


Figura 3.30: Efecto de La pérdida de soporte sobre el espesor D , $D=f(L_s)$, donde confiabilidad=63 % , $H_1=7$ pulg, $H_2=3$ pulg, $n=26$ años, $C_d=1.2$, $J=2.5$ y $S_o=0.34$.

En la Figura 3.30 se presenta el análisis individual de la pérdida por soporte L_s , donde se muestra que la relación entre este y el espesor de la losa es creciente con una tendencia potencial. Este parámetro depende principalmente del tratamiento especializado que reciba la subbase haciendo que disminuya el valor de “ L_s ” reduciendo el espesor de la losa.

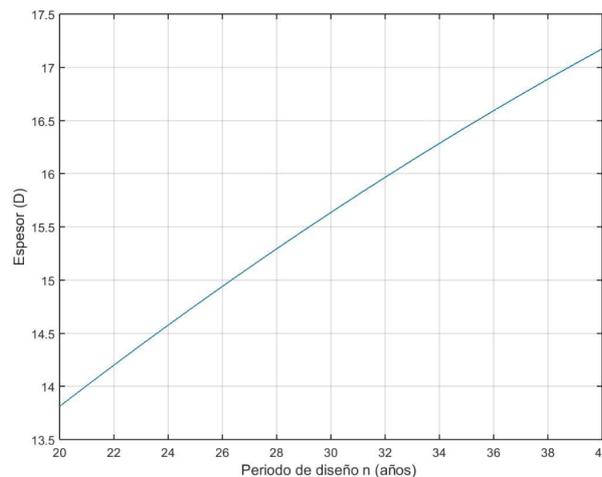


Figura 3.31: Efecto del periodo de diseño estructural sobre el espesor D , $D=f(n)$, donde confiabilidad=63 % , $H_1=7$ pulg, $H_2=3$ pulg, $C_d=1.2$, $J=2.5$, $L_s=0$, $S_o=0.34$.



La Figura 3.31 muestra que la relación entre “n” y el espesor de la losa del pavimento es creciente con una tendencia lineal, lo que quiere decir que a medida que el periodo de diseño aumente el espesor de la losa del pavimento aumentara.

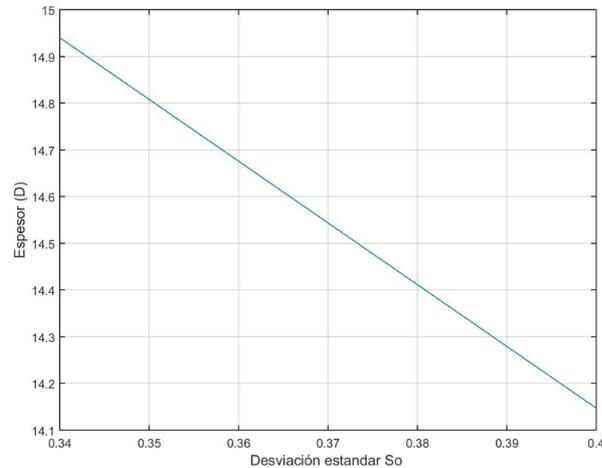


Figura 3.32: Efecto individual de la desviación estándar sobre el espesor D , $D=f(S_o)$, donde confiabilidad=63 %, $H_1=7$ pulg, $H_2=3$ pulg, $n=26$ años, $C_d=1.2$, $J=2.5$ y $L_s=0$.

Finalmente, en la Figura 3.32 se indica el análisis de la desviación estándar (S_o), donde se muestra que la relación entre este y el espesor de la losa del pavimento es decreciente con una tendencia lineal, lo que quiere decir que a medida que “ S_o ” aumente el espesor de la losa del pavimento disminuye con una pendiente de 12.5 %. La diferencia en el espesor del rango de “ S_o ” es únicamente 0.8 cm.

3.2.8. Verificación de los modelos propuestos

Se ha tomado aleatoriamente 10 ejemplos diferentes para obtener un los resultado de espesor del método de la AASHTO así como también en el respectivo modelo matemático, para comparar estos dos procesos. En la Tabla 3.17 se muestran los ejemplos aleatorios así como los espesores obtenidos por medio del método de la AASHTO y los del modelo matemático determinado en este capítulo. En la Figura 3.33 se puede visualizar esta comparación. La mayor diferencia alcanzada es de 9.99 % para el caso de la AASHTO de 19 cm y el modelo matemático de 21 cm. El coeficiente de correlación para este análisis es de 0.997, indicando el buen ajuste.

Tabla 3.17: Parámetros de entrada para la obtención del espesor de la losa del pavimento por el método de la AASHTO y el modelo matemático.

confiabilidad (%)	H1 (pulg)	H2 (pies)	n (años)	Cd	J	Ls	So	D AASHTO (cm)	D fórmula (cm)	error (%)
95	16	12	25	1.2	2.40	0	0.36	19	21	9.99
95	8	10	35	1.2	3.60	1	0.34	28	30	4.55
50	12	5	30	1.0	4.40	0	0.38	25	25	2.47
95	4	2	35	0.8	4.40	0	0.36	37	37	1.13
80	8	12	30	1.0	2.40	2	0.38	24	25	4.29
50	20	5	25	0.8	3.60	3	0.40	28	29	5.47
65	4	12	20	0.8	3.20	1	0.38	25	26	1.36
80	4	2	20	0.8	2.40	3	0.40	24	25	3.35
95	4	12	40	1.0	2.80	2	0.34	30	31	2.00
95	16	10	40	1.2	2.80	0	0.36	24	26	9.08

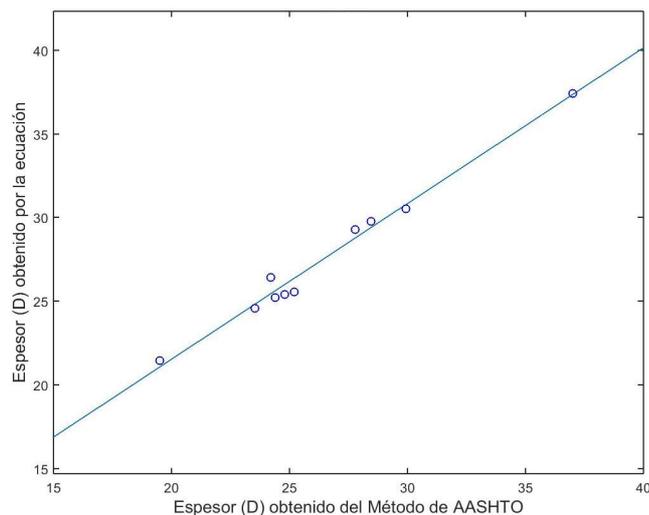


Figura 3.33: Comprobación de los valores del espesor (D) determinados por el método de la AASHTO y los valores calculados por el modelo matemático con un coeficiente de ajuste de $R^2=0.997$.

3.2.9. Análisis complementario

Uno de los resultados obtenidos fue la determinación de la combinación que produce el mayor y el menor valor para el espesor de la losa del pavimento de toda la iteración de los parámetros de entrada, expresados en la Tabla 3.18.



Tabla 3.18: Combinación de parámetros para el máximo y mínimo valor del espesor de la losa del método de la AASHTO.

	confiabilidad	H1	H2	n	Cd	J	Ls	So	D(mm)
Máximo	0.95	4	12	40	0.8	4.4	3	0.4	432.1
Mínimo	0.50	12	5	20	1.2	2.4	0	0.36	102.0

Para la combinación que produce el mayor espesor de la losa (43.21 cm) se tiene primero una confiabilidad del 95 % lo que significa que se espera la máxima probabilidad de que el pavimento se desenvuelva de forma satisfactoria, el valor de “H1” de 4 pulgadas, siendo el mínimo valor para este parámetro lo que provoca que se tenga que compensar aumentando el espesor de la losa, para la profundidad del estrato firme (H2) de 12 pies es el máximo valor para este parámetro lo que significa que el módulo de reacción será menor, lo que producirá un aumento en el espesor de la losa. El valor del periodo de diseño de 40 años, al ser el mayor valor del rango de este parámetro significa que la importancia y volumen de tráfico será el mayor esperado, por lo que se traduce en el aumento del espesor de la losa del pavimento. El valor del coeficiente de drenaje (Cd) de 0.8 significa que la capacidad de drenaje de las capas de la estructura del pavimento es muy pobre y que estas estarán sometidas a altos tiempos de exposición a niveles de humedad cercanas a la saturación, por lo que se compensará en el aumento del espesor de la losa. El valor del coeficiente de transferencia de carga (J) de 4.4 implica que no se usa ningún elemento de transferencia de carga en la estructura del pavimento para cargas de tráfico. El valor de “Ls” de 3 representaría a tipos de bases no tratadas con materiales granulares finos o subrasante natural, lo que implica mayores espesores de la losa del pavimento, y por último el valor de “So” de 0.4 que representa aproximaciones menos exactas con mayores números de errores.

Mientras que para la combinación de parámetros que producen el espesor más pequeño de 10.20 cm, lleva a los parámetros a su total opuesto en cada uno de sus rangos. Primero, una confiabilidad del 50 % lo que significa que se espera la mínima probabilidad de que el pavimento se desenvuelva de la forma más satisfactoria, el valor de H1 de 12 pulgadas, siendo el máximo valor para este parámetro. Para la profundidad de estrato firme (H2) de 5 pies es el mínimo valor para este parámetro lo que significa que el módulo de reacción será mayor, lo que producirá una disminución en el espesor de la losa. El valor del periodo de diseño de 20 años, al ser el menor valor del rango de este parámetro significa que la importancia y volumen de tráfico será la menor esperada, por lo que se traduce en la disminución del espesor de la losa del pavimento. El valor del coeficiente de drenaje (Cd) de 1.2 significa que la capacidad de drenaje de las capas de la estructura del pavimento es excelente y que estas estarán sometidas a cortos tiempos de exposición a niveles de humedad cercanas a la saturación, por lo que se compensará en la disminución del espesor de la losa. El valor del coeficiente de transferencia de carga (J) de 2.4 implica que se puede estar usando pasadores con o sin refuerzo para cualquier carga de tráfico. El valor de (Ls) de 0 representaría a tipos de bases tratadas con cemento o asfalto. El valor de “So” de 0.36 que representa aproximaciones más confiables del desempeño del diseño.



La programación realizada para el análisis estadístico del método de la AASHTO se puede encontrar en los Anexos, Sección I.5.

CAPÍTULO 4

CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

En el presente capítulo, en base al estudio realizado, se concluye sobre la información obtenida, alcanzando el resultado de la investigación. Se realizan una serie de recomendaciones sobre varios componentes y de los resultados obtenidos. Finalmente, se proponen futuras líneas de investigación encaminadas a ampliar el conocimiento sobre el tema abordado. Los tres subcapítulos que forman parte de este capítulo final son:

- Conclusiones
- Recomendaciones
- Futuras líneas de investigación

4.1. Conclusiones

En este trabajo investigativo se programó los métodos de la PCA y la AASHTO para el diseño de pavimentos rígidos, empleando el software Matlab, con el fin de optimizar los métodos, así como evaluar la sensibilidad de los parámetros de entrada, para lo cual se desarrolló modelos de predicción del espesor de la losa de pavimento utilizando el método experimental no lineal. A partir de la variación de los parámetros principales que establece cada método, se determinó la influencia de estos parámetros, para la AASHTO corresponden la: confiabilidad, profundidad al estrato firme (H2), espesor de la subbase (H1), desviación estándar (So), periodo de diseño (n), coeficiente de transferencia de carga (J), coeficiente de drenaje (Cd) y la pérdida de soporte (Ls). Mientras que para la PCA son: el periodo de diseño estructural (n), la tasa anual de crecimiento vehicular (r), la resistencia a la flexión del concreto (MR), el módulo de reacción de la subrasante (Mr) y el espesor de la subbase (Ds). Del análisis de los modelos se puede indicar que:



En este trabajo investigativo se establecieron algunas constantes para ambos métodos. Para el método de la PCA se mantuvieron constantes: el módulo de elasticidad de 4'000,000 psi, el coeficiente de Poisson del concreto de 0.15, el porcentaje de vehículos comerciales de 19 %, el tráfico promedio diario de 2900 vehículos, número de carriles igual a 4 y dirección por carril igual a 2. Mientras que para el método de la AASHTO fueron: la tasa anual de crecimiento vehicular de 4 %, el módulo elástico del concreto hidráulico de 31,000 MPa, el módulo de rotura del concreto hidráulico de 5.2 MPa, el índice de servicio inicial de 4.8, el índice de servicio final de 2.8, aproximación inicial del espesor de la losa de 6 pulg, número de carriles igual a 6, dirección por carril igual a 3, los módulos resilientes de la subrasante y módulos de la elasticidad de la subbase presentados en la Tabla 2.22, y los TPDA y el factor camión de la Tabla 2.23. Estas consideraciones deben tenerse en cuenta cuando se requiera realizar estudios con otros valores diferentes a los establecidos como constantes.

4.1.1. Conclusiones para el método de la PCA

El coeficiente de correlación (R^2) promedio entre los casos de estudio correspondientes al método de la PCA es 0.992, próximo a 1, esto indica que el nivel de confianza predictivo de la expresión matemática desarrollada por el ajuste que se aplicó es altamente satisfactorio. Además, el coeficiente de correlación promedio para la comprobación del método donde se comparó el modelo matemático y el método programado es de 0.988, por lo que se puede indicar que la comprobación que se realiza es válida para todos los modelos desarrollados.

El desarrollo del método de la PCA a partir de las ecuaciones obtenidas por el Software Libre para el Diseño de Pavimentos de Concreto (PCAcálculo), permite la sistematización de los cálculos y la eliminación de las lecturas de los nomogramas del método PCA 1984, lo que resulta beneficioso al disminuir imprecisiones en el momento de la lectura de nomogramas, convirtiéndose en un procedimiento rápido y más fiable.

Es importante mencionar que la programación del método de la PCA con el uso de la herramienta computacional Matlab brinda menor errores así como mayor rapidez en el momento de la obtención de una muestra de gran tamaño, a partir de 8 funciones: PCA_UC17, CALCU_PCA, TRAFICO_PCA, FSC_PCA, SUELO_PCA, FAT_ERO_PCA, RESULT_PCA y FIG_PCA. Empleando el programa PCA_UC17 se generó la matriz para el análisis estadístico con 1944 iteraciones, así como al contar con la función LinearModel.fit correspondiente al método experimental no lineal, facilitó la ejecución del análisis estadístico, encontrando los parámetros con mayor impacto sobre el pavimento rígido. Se utilizó una muestra real y una codificada, la primera implementada para la obtención del modelo matemático y la segunda para la eliminación de términos no significativos.

En los modelos matemáticos propuestos, del análisis realizado se determinó el impacto que tienen los diferentes parámetros en el diseño, ya que la influencia de un parámetro radica en el aumento del espesor de la losa del pavimento con el incremento de: n y r , mientras que el espesor de la losa del pavimento disminuye con el aumento de: MR , Mr ,



Ds, y Cd.

Se determinó que el parámetro con mayor influencia para los casos, correspondientes al diseño de pavimento rígido con subbase granular, independientemente de la presencia de bermas y pasadores es el módulo de reacción de la subrasante (M_r). Además, de ser el segundo parámetro más influyente para los pavimentos con subbase cementada, independientemente de la presencia o no de bermas y pasadores, ya que la influencia de este parámetro radica en la disminución del espesor de la losa al aumentar el mismo. El impacto del parámetro M_r sobre el espesor de la losa es el más significativo pues, manteniendo el resto de parámetros constantes en sus valores medios y variando éste únicamente de 20 a 80 MPa/m, genera una disminución del espesor de la losa de 16 cm a 13.7 cm para pavimentos con subbase granular con berma, independientemente de la presencia de pasadores, y de 18.9 cm hasta 16 cm para pavimentos con subbase granular sin berma, independientemente de la presencia de pasadores. En cuanto a pavimentos con subbase cementadas se encuentra una variación de M_r de 20 a 60 MPa, generando una disminución del espesor de la losa de 13.5 cm a 12.2 cm para pavimentos con subbase cementada con berma, independientemente de la presencia de pasadores, y de 15.7 cm hasta 14.1 cm para pavimentos con subbase cementada sin berma, independientemente de la presencia de pasadores. Se observó que la variación individual del resto de parámetros da como resultado menores rangos de espesores en la losa en comparación al que se obtuvo con M_r , por lo que se concluye que para el método de la PCA, el espesor depende ampliamente de la resistencia de la subrasante.

El módulo de rotura del concreto o resistencia del concreto a flexión (MR) es el segundo parámetro de entrada más influyente para el método de la PCA, siendo el segundo para los caso correspondientes a un pavimento rígido con subbase cementada, con berma-con pasador y sin berma-con pasador así como el segundo para los casos de pavimentos con subbase granular, con berma-con pasador, sin berma-con pasador y sin berma-sin pasador. Como su nombre lo indica, este parámetro representa la resistencia a flexión que presenta la losa de pavimento rígido, mientras más resistencia presenta la losa, menor será el espesor de la losa requerida.

El periodo de diseño (n) es el tercer parámetros con mayor influencia para el método de la PCA, siendo el primero para el pavimento para los casos 6, 8 y segundo para el caso 2 correspondientes a pavimento con subbase cementada con berma-sin pasador, subbase cementada sin berma-sin pasador y subbase granular con berma-sin pasador, respectivamente. Para el caso 4, pavimento con subbase granular, sin berma-sin pasador “ n ” representa el tercer parámetro más influyente. Para los demás casos, el periodo de diseño es el cuarto parámetro influyente.

El espesor de la subbase (D_s) es el siguiente parámetro influyente en todo el estudio, siendo el tercer parámetro más influyente para los casos del 5 al 8 correspondientes a un pavimento con subbase cementada independientemente de la presencia de berma o pasador, y para los casos 1 y 3, correspondientes a pavimentos con subbase granular con berma-con pasador y sin berma-con pasador.



El parámetro menos influyente es la tasa anual de crecimiento vehicular (r), siendo el cuarto parámetro más significativo para pavimentos sin pasadores independientemente de la presencia de bermas, o si la subbase es granular o cementada, y quinto para pavimentos con pasadores independientemente de la presencia o no de bermas, o si la subbase es granular o cementada. Para un ejemplo, manteniendo el resto de parámetros constantes en sus valores medios y variando únicamente “ r ” en un rango entre 1 al 6 %, se genera un aumento mínimo del espesor que es despreciable, de una losa de 14.2 cm a 14.4 cm para pavimentos con subbase granular con berma, independientemente de la presencia de pasadores, y entre 16.6 cm hasta 17 cm para pavimentos con subbase granular sin berma con pasador. En cuanto a pavimentos con subbase cementadas con “ r ” en el mismo rango que en el caso anterior, genera un aumento del espesor de la losa de 12.1 cm a 12.4 cm para pavimentos con berma, independientemente de la presencia de pasadores, y entre 14.1 cm hasta 14.4 cm para pavimentos con subbase cementada sin berma, independientemente de la presencia de pasadores.

El máximo espesor obtenido en el análisis es 20.8 cm con la siguiente combinación: periodo de diseño estructural (n) de 40 años, una tasa anual de crecimiento poblacional (r) de 0.06, siendo los límites superiores de ambos parámetros. Resistencia a la flexión del concreto (MR) de 550 psi, módulo de reacción de la subrasante (M_r) de 20 MPa/m y espesor de la subbase (D_s) de 100 mm, correspondientes a los límites inferiores de cada uno de los parámetros mencionados, indicando así que, el concreto tiene la resistencia a la flexión mínima con características del subrasante bajas, y un espesor de subbase pequeño, que implica un incremento en el espesor de la losa de pavimento rígido para que pueda soportar las cargas establecidas. Además, estas condiciones se desarrollan para un pavimento con subbase granular, sin berma independientemente de la presencia de pasador, confirmando así las condiciones más críticas que dan como resultado el máximo espesor de todo el análisis. Por el contrario, el mínimo espesor obtenido es 10.4 cm con una combinación de: periodo de diseño estructural (n) de 20 años, tasa anual de crecimiento poblacional (r) de 0.01, resistencia a la flexión del concreto (MR) de 650 psi, módulo de reacción de la subrasante (M_r) de 60 MPa/m y espesor de la subbase (D_s) de 250 mm, indicando así que, el concreto tiene una resistencia a la flexión alta con características del subrasante excelentes, y un espesor de subbase grande, que dan como resultado un espesor de la losa de pavimento rígido mínimo y al tener que soportar unas cargas de diseño bajas a causa de las condiciones impuestas. Además, estas condiciones se desarrollan para un pavimento con subbase cementada, con berma y con pasador, dando así las condiciones más favorables que dan como resultado un mínimo espesor de todo el análisis.

Para el diseño de un pavimento rígido por el método de la PCA no solo se debe diseñar a partir de los espesores de las capas, sino tomar en cuenta las características de cada una de estas capas, el material del que están compuestas, así como la resistencia que presentan cada una de ellas, puesto que los parámetros con mayor influencia son el módulo de reacción de la subrasante y la resistencia a flexión del concreto. Es importante mencionar que los resultados han mostrado que una de las variaciones más influyentes en el espesor de la losa, es el material del que está compuesta la subbase, pues se debe considerar que un pavimento con una subbase granular presenta un mayor espesor de la losa de concreto, con relación a un pavimento con una subbase cementada, lo que significa que usar subbases tratadas con cemento produce una mayor eficiencia del espesor del pavimento a diferencia



de usar simplemente subbases con materiales granulares, sin embargo, se debe verificar los costos y materiales disponibles. De igual manera, la presencia de bermas genera un menor espesor en la losa que cuando estas no están presentes, puesto que al contar con estas, el pavimento tiene un mejor confinamiento además de una mejor distribución de cargas. La presencia de pasadores es uno de los factores que influye levemente, puesto que la variación del espesor de concreto es pequeña con la existencia o no de los mismos. La resistencia a flexión de concreto es el único parámetro que presenta una variación notable en el momento de diseñar con o sin pasadores en donde el rango es semejante a 0.7 a 1.2 cm. Es importante mencionar que los pasadores son mecanismos adecuados para transferir las cargas y garantizar una adecuada vida del pavimento.

4.1.2. Conclusiones para el método de la AASHTO

Se puede indicar que el modelo matemático propuesto para encontrar el espesor de la losa por el método de la AASHTO es adecuado, ya que el coeficiente de correlación (R^2) es alrededor de 0.997, próximo a 1, esto indica que el nivel de confianza de la expresión matemática desarrollada es altamente satisfactoria.

Del análisis realizado se determinó el impacto que tienen los diferentes parámetros en el diseño, ya que la influencia radica en el aumento del espesor de la losa del pavimento con el incremento de: J , confiabilidad, n , L_s , H_2 y S_o , mientras que el espesor de la losa disminuye con el aumento de: H_1 y C_d .

El impacto del uso de elementos de transferencia de carga en el espesor de la losa del pavimento es el más significativo ya que manteniendo el resto de parámetros constantes en sus valores medios y variando únicamente “ J ” de 2.4 a 4.4 da un aumento del espesor de la losa de 21.7 cm a 29.7 cm. Mientras que para la variación individual del resto de parámetros da como resultado menores rangos de espesores de la losa en comparación al que se obtuvo con “ J ”, por lo que se puede decir que para el método de la AASHTO, el uso de elementos de transferencia de carga es la forma más eficiente de reducir el espesor de la losa para las mismas condiciones de carga de tráfico.

Otro parámetro que puede llegar a ser representativo y con el que se puede mejorar la eficiencia del diseño del pavimento es la confiabilidad, ya que el incremento de este valor produce un incremento en el valor final del espesor de la losa, pero de una forma menos sensible que el coeficiente de transferencia de carga. Entre más se espere un mejor comportamiento del pavimento, como respuesta, éste incrementará su espesor.

El coeficiente de drenaje (C_d) es el siguiente parámetro más influyente después de la confiabilidad, con un impacto significativo en el espesor de la losa, pero la diferencia es que este influye de forma inversa, lo que significa que a medida que aumente el valor de este parámetro el espesor de la losa disminuye, por lo que ayuda a mejorar el espesor del pavimento, produciendo menores espesores para las mismas condiciones de carga, al aumentar el valor de C_d .



El periodo de diseño estructural (n) tiene una influencia positiva significativa, pese a que sea menos al del coeficiente de drenaje. Al aumentar su valor, aumenta el espesor de la losa, ya que entre más importancia y volumen de tráfico tenga el proyecto, mayor será el espesor esperado de la losa del pavimento.

La pérdida de soporte potencial proveniente de la erosión de la subbase y/o movimientos diferenciales del suelo, el cual es representado por el parámetro L_s . Éste tiene aproximadamente la mitad de influencia del parámetro (J), pese a eso es un parámetro muy importante pues se puede mejorar la eficiencia del diseño al tener materiales de la estructura del pavimento tratados con diferentes métodos, por lo que entre mejor sea el método de tratamiento menor será el valor de L_s y en consecuencia el espesor de la losa del pavimento disminuirá. Sin embargo, cualquier tipo de tratamiento representa costos, lo que debe ser analizado.

La profundidad al estrato firme (H_2), indica que si la estructura del pavimento está más cerca a este estrato se compensa con un menor espesor de la losa, pese a eso tiene una baja influencia sobre este, siendo su medida poco significativa, pero debido a lo que se menciona en los parámetros anteriores, son las características físicas de este estrato las que influyen en el diseño ya que depende del tratamiento que este reciba y los valores de los módulos resilientes a lo largo del año que esta posea, los que dan como resultado el módulo efectivo de reacción de la subrasante, valor representativo en el diseño del pavimento.

La desviación estándar (S_o) al ser la representación del error debido a la variabilidad de los materiales, su proceso constructivo y comparación entre datos del diseño del pavimento y los datos reales, tiene una baja influencia en el espesor de la losa del pavimento, debido a que estas imprecisiones no tiene un gran impacto en el diseño.

El parámetro menos influyente es el espesor de la subbase (H_1), que muestra una relación decreciente con relación al espesor de la losa de pavimento rígido, por ejemplo, el espesor de la subbase cuenta con un rango de 4 a 20 pulgadas generando un cambio en el espesor de la losa de 15.7 cm a 14.4 cm, lo que representa una variación mínima de 1.3 cm.

El espesor máximo obtenido por el método de la AASHTO en este análisis es 43.21 cm, con la siguiente combinación: confiabilidad del 95 %, H_1 de 4 pulgadas, profundidad de estrato firme H_2 de 12 pies, periodo de diseño de 40 años, coeficiente de drenaje C_d de 0.8, coeficiente de transferencia de carga J de 4.4, L_s de 3 y S_o de 0.4. Mientras que para la combinación de parámetros que producen el espesor mínimo de 10.20 cm, se tiene: confiabilidad del 50 %, H_1 de 12 pulgadas, profundidad de estrato firme H_2 de 5 pies, periodo de diseño de 20 años, coeficiente de drenaje C_d de 1.2, coeficiente de transferencia de carga J de 2.4, L_s de 0 y S_o de 0.36.

Como una conclusión general, se puede decir que el diseño de un pavimento rígido por el método de la AASHTO no se basa únicamente en diseñar a partir de los espesores de la subbase y de la profundidad al estrato firme, que al ser las capas de la estructura del pavimento donde la losa se apoya, se podría pensar que su espesor depende directamente



de ellos, cuando en realidad el análisis muestra que el espesor de la losa del pavimento es mucho más dependiente de los parámetros y características físicas de estas dos capas, ya que el estudio muestra que H2 y H1 son el sexto y octavo parámetros más influyentes en el espesor de la losa, por lo que la aplicación del método de la AASHTO en un proyecto es recomendable establecer valores medios de los rangos de H1 y H2, y concentrar más el diseño en la determinación de los módulos resilientes de la subbase y subrasante, módulo de reacción efectivo de la subrasante, la confiabilidad, las capacidades físicas que tendrían las capas para drenar el agua saturada, el periodo de tiempo para el que se piensa diseñar el proyecto y el tipo de tratamiento que podría recibir la subbase para compensar la pérdida por soporte, y como el análisis muestra, hacer especial énfasis en el mecanismo de transferencia de carga que se decida usar, ya que con este se puede mejorar ampliamente la eficiencia del diseño.

4.2. Recomendaciones

Debido a los altos costos de la infraestructura vial, una herramienta que brinde un diseño de pavimento rígido, donde se conoce cuáles son los parámetros que influyen mayormente, y poder manejarlos, puede economizar notoriamente la construcción, de forma que se pueda alcanzar una armonía entre los diversos intereses que intervienen, sin reducir, de ninguna manera, la confiabilidad y la seguridad.

Siempre que se desee realizar un análisis por el método de la PCA es necesario identificar en cuál de los 8 casos de estudio está el análisis; subbase granular: (1) con berma - con pasador, (2) con berma - sin pasador, (3) sin berma - con pasador, (4) sin berma - sin pasador; subbase tratada con cemento: (5) con berma - con pasador, (6) con berma - sin pasador, (7) sin berma - con pasador, (8) sin berma - sin pasador. De esta manera se podrá observar con mayor facilidad cuales son las diferencias entre cada uno de los casos. Además, para el análisis estadístico es necesario plantear tres valores por parámetro, correspondientes a máximo, media y mínimo, lo que significa que si se realiza un solo caso de estudio, no se podrá cubrir con estos tres valores necesarios para obtener una muestra satisfactoria ya que las condiciones como con berma, con pasador o subbase granular o cementada cuentan apenas con 2 valores correspondientes a la presencia o ausencia de los mismos, y sin un valor medio.

Para la comprobación de los métodos de la PCA y la AASHTO es necesario que los valores aleatorios de los parámetros no pertenezcan a ninguno de los valores empleados para la construcción del modelo, para que dicha comprobación sea válida.

Cuando se partió con el desarrollo de los nomogramas obtenidos en la AASHTO Guide for Design of Pavement Structures, en la sección 3.2 Design of a Rigid Pavement, lo que se realizó fue tomar estos nomogramas mediante lectura manual y pasarlos a Excel para poder obtener un modelo real de la representación de los nomogramas así como de sus datos de entrada y de salida. En la subrutina SUELO_AASHTO los diferentes ajustes que se realizaron a los nomogramas para desarrollar los modelos matemáticos fueron ajustes logarítmicos, lineales, polinomiales, exponenciales y potenciales, tomando en cuenta que



sus coeficientes de correlación sean lo más próximos a 1, para tener ajustes que representen una aproximación real y satisfactoria del comportamiento de los nomogramas, mientras que en varios se realizó más de un ajuste a la misma curva ya que si estos quedaban con uno solo, el valor de R^2 se alejaba demasiado del valor ideal de 1.

Cuando se determina el rango para el análisis del parámetro profundidad de la superficie hasta llegar a estrato firme H2, para el método de la AASHTO es importante conocer que a partir de un espesor mayor a 10 pies no existe ningún tipo de corrección, por lo que al realizar una análisis con espesores mayores a este valor, se obtendrán los mismos valores que los obtenidos con el valor de 10 pies, por lo que se recomienda implementar un rango de 1 a 10 pies, y así evitar la obtención de muestras con espesores no representativos.

Es importante que para un análisis estadístico confiable, y la obtención de los modelos matemáticos con errores mínimos, se utilice una muestra lo suficientemente grande para que se realice un mejor ajuste.

4.3. Futuras líneas de investigación

Diariamente el mundo está sometido a nuevos conocimientos, siendo la investigación la mejor herramienta para generar ciencia. Una vez concluido este documento, se abren las puertas para la realización de varias investigaciones similares a las del presente documento que pueden aportar información valiosa a la ingeniería de pavimentos. Este mismo análisis puede ser ampliado para la evaluación de pavimentos flexibles, de esta manera se podrá conocer los parámetros en este tipo de pavimento y se podrá diseñar diversos tipos de pavimento con mayor eficiencia. Así como se optimizó el proceso para ambos métodos, con la eliminación de nomogramas y la implementación de ecuaciones, se puede realizar un cambio para los métodos enfocados a pavimentos flexibles. La optimización de los métodos para el diseño de pavimentos puede economizar los costos de la estructura.

Se puede plantear como una futura línea de investigación, el análisis de la presencia de pasadores más a fondo, al presentarse en esta investigación, la importancia de ellos para el método de la AASHTO y el efecto no claro que presenta en la mayoría de casos de estudio del método de la PCA, con el fin de conocer el comportamiento del pavimento ante la presencia de estos elementos.

La implementación de materiales tratados con cemento en el uso de la subbase, se debe investigar ya que desempeña un mejor papel a diferencia de los materiales granulares. Una opción para investigaciones futuras, es la implementación de subbases con tratamientos diferentes al cementado, por ejemplo, con betún o cal. Con el fin de encontrar nuevos resultados que podrían ser comparados de la misma manera que se presentó en este trabajo de investigación.

Un tema importante es el análisis económico de las diferentes alternativas teniendo en consideración que cualquier cambio en el diseño repercute en los costos.



La investigación abre el camino para obtener nuevos conocimientos, superar las limitaciones, poner a trabajar la mente y buscar nuevos conocimientos que siempre serán útiles en el ejercicio de la vida profesional.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Jefferson Castro and Armando Orobio. PAcálculo: Software libre para diseño de pavimentos de concreto. 2015.
- [2] Constructor Civil. Canastas pasajuntas en juntas transversales de contracción. Disponible en: http://www.elconstructorcivil.com/2011/04/croquis-no-2-corte-y-sellado-de-junta_24.html, 2011.
- [3] Constructor Civil. Formación de juntas de construcción. Disponible en: <http://www.elconstructorcivil.com/2011/04/2-junta-transversal-de-construccion.html>, 2011.
- [4] Elena F. de Carrera, Liliana E. Contini, and Stella M. Vaira. Algo de la estadística de todos los días: el valor p o p-value. 3(1):163–166, 2005.
- [5] Universidad de Piura. Método AASHTO 93 para el diseño de pavimentos rígidos. pages 4–28, 2002.
- [6] Equipo de redacción de Arkiplus. Historia del pavimento. Disponible en: <http://www.arkiplus.com/>, 2013.
- [7] Verónica Echeverry. Blog 360 grados en concreto, diseño de pavimentos de concreto, método PCA. Disponible en: <http://blog.360gradosenconcreto.com/>.
- [8] Yang Hsien Huang. *Pavement analysis and design*. Pearson Education. Inc., 1993.
- [9] Jorge Coronado Iturbide. Manual centroamericano para diseño de pavimentos. *SIECA. Guatemala*, 2002.
- [10] Srđan Kostić, Nebojša Vasović, and Duško Sunarić. Slope stability analysis based on experimental design. *International Journal of Geomechanics*, 16(5), 2016.
- [11] Ying-Haur Lee and Samuel H Carpenter. PCAWIN program for jointed concrete pavement design. 4(4):293–300, 2001.
- [12] Gisselle Miitre. Pavimentos rígidos. Disponible en: <http://docslide.com.br/documents/pavimentos-rigidos-5783395beb2ae.html>, 2016.
- [13] Alfonso Montejo Fonseca. *Ingeniería de pavimentos para carreteras*. Agora Editoriales, 1998.
- [14] Holly Moore. *MATLAB para ingenieros*. Pearson, 2007.
- [15] Samuel Mora. Pavimentos de concreto hidráulico. *Ministerio de transportes*



- y comunicaciones, Dirección general de caminos y ferrocarriles, III Seminario Nacional de Gestión y Normatividad vial, FIC-UNI, ASOCEM. Disponible en: http://www.mtc.gob.pe/portal/transportes/caminos_ferro/Seminario2006/3.%20Pavimento_Concreto_%20Ing_Mora.pdf, 2006.*
- [16] American Association of State Highway and Transportation Officials. *AASHTO Guide for Design of Pavement Structures, 1993*, volume 1. AASHTO, 1993.
- [17] US Department of Transportation. Incorporating on road bicycle networks into resurfacing projects. Disponible en: https://www.fhwa.dot.gov/environment/bicycle_pedestrian/publications/resurfacing/page04.cfm, 2016.
- [18] José Fredy Ortuño Flores, Segundo David Pila Caiza, Diego Xavier Viteri Nicolalde, and Édison Francisco Yagchirema Arboleda. Diseño vial definitivo de la avenida Escalón 2. *Aparece en las colecciones: Ingeniería Civil SUR - Tesis de Pregrado*, pages 291–317, Junio 2011.
- [19] Robert G Packard. Thickness design for concrete highway and street pavements. 1984.
- [20] Primitivo. Reyes Aguilar. Introducción al diseño de experimento. Disponible en: <http://studylib.es/doc/234306/introducci%C3%B3n-al-dise%C3%B1o-de-experimentos-dr.-primitivo-reye...>, 2001.
- [21] Matías Sales. Diagrama de pareto. 15, 2006.
- [22] Enrique Yacuzzi, Fernando Martín, Hugo Marcelo Quiñones, and Matías Julián Popovsky. El diseño experimental y los métodos de Taguchi: Conceptos y aplicaciones en la industria farmacéutica. Technical report, Serie Documentos de Trabajo, Universidad del CEMA, 2004.

ANEXO I

ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE PARÁMETROS EN EL DISEÑO DE PAVIMENTOS RÍGIDOS POR LOS MÉTODOS DE LA AASHTO Y PCA.

I.1. Análisis del método de la PCA

Tabla I.1: Desarrollo del modelo matemático y su importancia estadística para matriz codificada de una subbase granular con berma y sin pasadores, $R^2=0.991$.

Términos	Coef. de estimación	Error estándar	tStat	pValue
interceptor	141.72	0.231	613.851	0
n	5.494	0.085	64.44	1.10E-145
r	3.895	0.085	45.687	7.05E-115
MR	-4.895	0.085	-57.417	3.46E-135
Mr	-10.08	0.085	-118.237	1.85E-202
Ds	-3.29	0.085	-38.592	2.01E-100
n*r	1.907	0.104	18.268	4.03E-46
n*MR	1.972	0.104	18.888	4.36E-48
n*Mr	0.028	0.104	0.266	7.90E-01
n*D _s	0.028	0.104	0.266	7.90E-01
r*MR	1.389	0.104	13.302	4.44E-30
r*Mr	-0.083	0.104	-0.798	4.26E-01
r*D _s	0	0.104	0	1.00E+00
MR*Mr	2.148	0.104	20.573	2.42E-53
MR*D _s	0.611	0.104	5.853	1.72E-08
Mr*D _s	1.741	0.104	16.671	5.25E-41
n ²	-0.099	0.148	-0.669	5.04E-01
r ²	0.29	0.148	1.965	5.07E-02
MR ²	2.698	0.148	18.268	4.02E-46
Mr ²	4.105	0.148	27.799	3.02E-74
D _s ²	-0.08	0.148	-0.543	5.87E-01



Tabla I.2: Desarrollo del modelo matemático y su importancia estadística para matriz codificada de una subbase granular sin berma y con pasadores, $R^2=0.999$.

Términos	Coef. de estimación	Error estándar	tStat	pValue
interceptor	164.996	0.105	1564.7	0
n	3.543	0.039	90.992	1.01E-177
r	2.549	0.039	65.47	3.88E-147
MR	-9.994	0.039	-256.65	1.38E-276
Mr	-13.364	0.039	-343.203	1.55E-304
Ds	-4.247	0.039	-109.064	8.33E-195
n*r	1	0.048	20.968	1.48E-54
n*MR	-0.194	0.048	-4.077	6.35E-05
n*Mr	-0.213	0.048	-4.465	1.27E-05
n*Ds	-0.083	0.048	-1.747	8.20E-02
r*MR	-0.093	0.048	-1.942	5.35E-02
r*Mr	-0.111	0.048	-2.33	2.07E-02
r*Ds	-0.074	0.048	-1.553	1.22E-01
MR*Mr	0.685	0.048	14.367	1.56E-33
MR*Ds	0.259	0.048	5.436	1.43E-07
Mr*Ds	1.37	0.048	28.734	9.55E-77
n ²	-0.346	0.067	-5.125	6.45E-07
r ²	0.154	0.067	2.288	2.31E-02
MR ²	0.747	0.067	11.074	5.58E-23
Mr ²	4.08	0.067	60.497	6.34E-140
Ds ²	-0.272	0.067	-4.027	7.76E-05

Tabla I.3: Desarrollo del modelo matemático y su importancia estadística para matriz codificada de una subbase granular sin berma y sin pasadores, $R^2=0.988$.

Términos	Coef. de estimación	Error estándar	tStat	pValue
interceptor	165.498	0.337	490.496	0
n	6.438	0.125	51.673	9.91E-126
r	4.877	0.125	39.139	1.32E-101
MR	-6.765	0.125	-54.299	3.68E-130
Mr	-12.198	0.125	-97.896	1.33E-184
Ds	-3.895	0.125	-31.261	2.87E-83
n*r	3.269	0.153	21.419	6.24E-56
n*MR	2.685	0.153	17.596	5.58E-44
n*Mr	0.444	0.153	2.912	3.95E-03
n*Ds	0.028	0.153	0.182	8.56E-01
r*MR	2.046	0.153	13.41	1.99E-30
r*Mr	0.157	0.153	1.032	3.03E-01
r*Ds	0	0.153	0	1.00E+00
MR*Mr	1.769	0.153	11.589	1.35E-24
MR*Ds	0.556	0.153	3.641	3.38E-04
Mr*Ds	1.722	0.153	11.286	1.21E-23
n ²	0.549	0.216	2.546	1.16E-02
r ²	0.864	0.216	4.004	8.48E-05
MR ²	2.16	0.216	10.011	1.04E-19
Mr ²	4.494	0.216	20.823	4.12E-54
Ds ²	-0.117	0.216	-0.543	5.87E-01



Tabla I.4: Desarrollo del modelo matemático y su importancia estadística para matriz codificada de una subbase cementada con berma y con pasadores, $R^2=0.997$.

Términos	Coef. de estimación	Error estándar	tStat	pValue
interceptor	123.189	0.135	912.362	0
n	3.025	0.05	60.663	3.57E-140
r	2.167	0.05	43.455	1.57E-110
MR	-8.247	0.05	-165.4	1.86E-234
Mr	-6.969	0.05	-139.773	2.22E-218
Ds	-6.728	0.05	-134.945	4.98E-215
n*r	0.954	0.061	15.618	1.35E-37
n*MR	-0.093	0.061	-1.516	1.31E-01
n*Mr	-0.083	0.061	-1.365	1.74E-01
n*Ds	-0.083	0.061	-1.365	1.74E-01
r*MR	0.008	0.061	0.137	1.00E+00
r*Mr	-0.028	0.061	-0.455	6.50E-01
r*Ds	0.028	0.061	0.455	6.50E-01
MR*Mr	0.417	0.061	6.823	8.36E-11
MR*Ds	0.435	0.061	7.126	1.43E-11
Mr*Ds	1.056	0.061	17.285	5.54E-43
n ²	-0.284	0.086	-3.288	1.17E-03
r ²	0.216	0.086	2.502	1.31E-02
MR ²	0.864	0.086	10.007	1.07E-19
Mr ²	2.364	0.086	27.376	4.23E-73
Ds ²	1.198	0.086	13.867	6.58E-32

Tabla I.5: Desarrollo del modelo matemático y su importancia estadística para matriz codificada de una subbase cementada con berma y sin pasadores, $R^2=0.984$.

Términos	Coef. de estimación	Error estándar	tStat	pValue
interceptor	130.934	0.24	544.606	0
n	5.667	0.089	63.828	8.23E-145
r	4.142	0.089	46.654	1.05E-116
MR	-1.815	0.089	-20.441	6.16E-53
Mr	-5.451	0.089	-61.394	2.90E-141
Ds	-5.407	0.089	-60.907	1.54E-140
n*r	1.907	0.109	17.542	8.33E-44
n*MR	1.213	0.109	11.155	3.12E-23
n*Mr	0.102	0.109	0.937	3.50E-01
n*Ds	0.056	0.109	0.511	6.10E-01
r*MR	0.806	0.109	7.408	2.64E-12
r*Mr	0.148	0.109	1.362	1.74E-01
r*Ds	0.13	0.109	1.192	2.34E-01
MR*Mr	1.148	0.109	10.559	2.21E-21
MR*Ds	1.056	0.109	9.708	8.51E-19
Mr*Ds	-0.037	0.109	-0.341	7.34E-01
n ²	-0.309	0.154	-2.007	4.59E-02
r ²	0.265	0.154	1.726	8.57E-02
MR ²	1.543	0.154	10.036	8.78E-20
Mr ²	1.377	0.154	8.952	1.43E-16
Ds ²	0.395	0.154	2.569	1.09E-02



Tabla I.6: Desarrollo del modelo matemático y su importancia estadística para matriz codificada de una subbase granular sin berma y con pasadores, $R^2=0.991$.

Términos	Coef. de estimación	Error estándar	tStat	pValue
interceptor	145.255	0.25	580.51	0
n	3.759	0.092	40.685	6.91E-105
r	2.741	0.092	29.662	3.53E-79
MR	-8.481	0.092	-91.791	1.53E-178
Mr	-8.198	0.092	-88.718	2.40E-175
Ds	-7.883	0.092	-85.311	1.12E-171
n*r	1.343	0.113	11.864	1.82E-25
n*MR	0.537	0.113	4.746	3.72E-06
n*Mr	0.37	0.113	3.273	1.23E-03
n*Ds	0.287	0.113	2.536	1.19E-02
r*MR	0.454	0.113	4.009	8.32E-05
r*Mr	0.269	0.113	2.373	1.85E-02
r*Ds	0.231	0.113	2.046	4.20E-02
MR*Mr	0.88	0.113	7.773	2.83E-13
MR*Ds	0.843	0.113	7.446	2.11E-12
Mr*Ds	1	0.113	8.837	3.06E-16
n ²	-0.142	0.16	-0.887	3.76E-01
r ²	0.284	0.16	1.774	7.74E-02
MR ²	1.136	0.16	7.097	1.70E-11
Mr ²	2.728	0.16	17.048	3.21E-42
Ds ²	1.302	0.16	8.138	2.85E-14

Tabla I.7: Desarrollo del modelo matemático y su importancia estadística para matriz codificada de una subbase cementada sin berma y sin pasadores, $R^2=0.987$.

Términos	Coef. de estimación	Error estándar	tStat	pValue
interceptor	150.737	0.281	535.9	0
n	7.531	0.104	72.504	1.54E-156
r	5.494	0.104	52.892	8.24E-128
MR	-3.488	0.104	-33.578	5.82E-89
Mr	-6.525	0.104	-62.817	2.36E-143
Ds	-6.179	0.104	-59.489	2.13E-138
n*r	3.194	0.127	25.111	8.46E-67
n*MR	2.333	0.127	18.342	2.34E-46
n*Mr	0.639	0.127	5.022	1.05E-06
n*Ds	0.574	0.127	4.513	1.04E-05
r*MR	1.481	0.127	11.646	8.93E-25
r*Mr	0.389	0.127	3.057	2.51E-03
r*Ds	0.37	0.127	2.911	3.96E-03
MR*Mr	1.593	0.127	12.519	1.47E-27
MR*Ds	1.546	0.127	12.155	2.15E-26
Mr*Ds	0.861	0.127	6.769	1.14E-10
n ²	0.21	0.18	1.167	2.45E-01
r ²	0.58	0.18	3.225	1.45E-03
MR ²	2.043	0.18	11.357	7.26E-24
Mr ²	2.117	0.18	11.769	3.64E-25
Ds ²	0.932	0.18	5.181	4.95E-07



Tabla I.8: Propiedades aleatorias para un pavimento rígido con subbase granular con berma y sin pasador.

n (años)	r (%)	MR (psi)	Mr (psi)	Ds (mm)	h PCA (mm)	h fórmula (mm)	error (%)
35	0.06	650	30	100	160	160.2	0.14
30	0.02	551	80	275	137	137.5	0.33
40	0.04	551	80	250	143	144.0	0.68
35	0.05	595	50	175	148	148.2	0.16
25	0.02	595	70	225	132	131.9	0.05
40	0.01	650	20	300	146	146.9	0.62
35	0.04	595	40	300	144	145.3	0.91
20	0.03	650	80	175	128	127.4	0.44
35	0.04	650	70	200	142	140.6	0.97
25	0.05	595	80	250	135	133.8	0.86

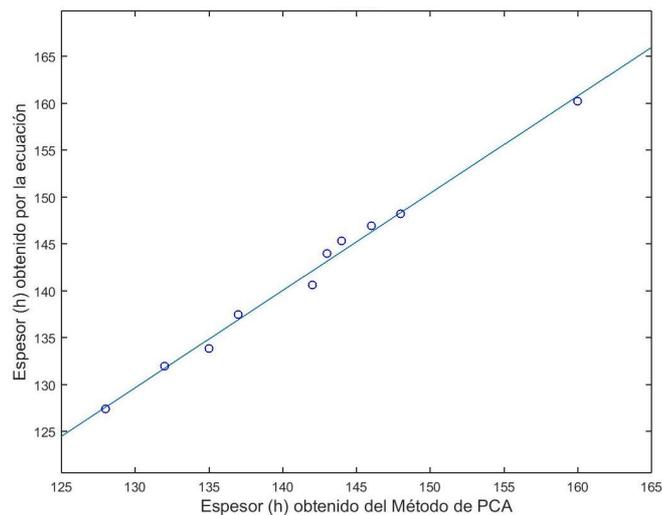


Figura I.1: Comparación de los valores del espesor (h) determinado por el método de la PCA y los valores calculados por el modelo matemático para un pavimento rígido con subbase granular con berma y sin pasador



Tabla I.9: Propiedades aleatorias para un pavimento rígido con subbase granular sin berma y con pasador

n (años)	r (%)	MR (psi)	Mr (psi)	Ds (mm)	h PCA (mm)	h fórmula (mm)	error (%)
40	0.05	551	60	225	177	176	0.81
35	0.05	551	20	150	201	200	0.43
30	0.03	595	70	300	155	155	0.28
30	0.04	650	80	200	148	147	0.41
25	0.03	650	60	250	149	148	0.82
25	0.01	650	70	150	148	147	0.81
30	0.02	650	70	125	151	150	0.96
20	0.04	650	40	250	154	154	0.29
40	0.03	551	60	225	174	173	0.74
25	0.05	650	30	125	168	169	0.45

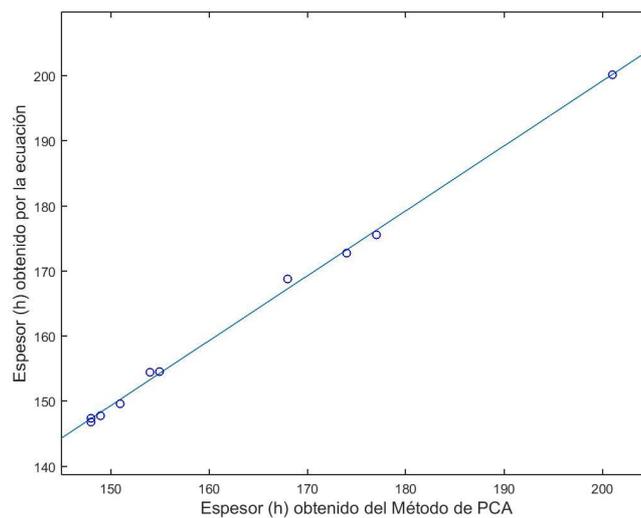


Figura I.2: Comparación de los valores del espesor (h) determinado por el método de la PCA y los valores calculados por el modelo matemático para un pavimento rígido con subbase granular sin berma y con pasador



Tabla I.10: Propiedades aleatorias para un pavimento rígido con subbase granular sin berma y sin pasador

n (años)	r (%)	MR (psi)	Mr (psi)	Ds (mm)	h PCA (mm)	h fórmula (mm)	error (%)
30	0.02	595	60	300	157	155	1.31
20	0.01	551	20	150	191	193	0.90
25	0.05	595	30	300	170	169	0.63
35	0.04	650	20	150	185	183	1.29
25	0.05	551	20	250	190	188	1.28
35	0.02	650	70	250	156	153	2.03
25	0.04	650	60	275	154	150	2.34
40	0.04	650	40	125	178	177	0.30
30	0.06	650	80	225	163	160	1.64
30	0.04	551	20	150	197	195	1.07

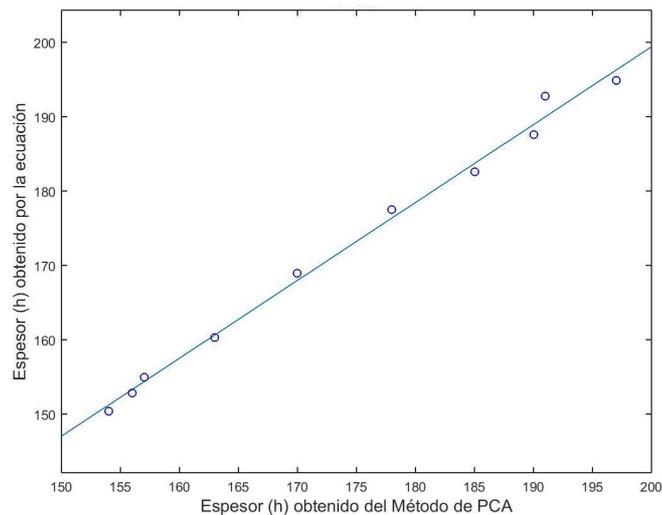


Figura I.3: Comparación de los valores del espesor (h) determinado por el método de la PCA y los valores calculados por el modelo matemático para un pavimento rígido con subbase granular sin berma y sin pasador



Tabla I.11: Propiedades para un pavimento rígido con subbase cementada con berma y con pasador

n (años)	r (%)	MR (psi)	Mr (psi)	Ds (mm)	h PCA (mm)	h fórmula (mm)	error (%)
20	0.03	595	40	125	127	125.7	1.05
20	0.03	595	30	250	118	118.6	0.51
25	0.06	650	50	225	110	110.3	0.27
30	0.04	650	50	250	109	109.2	0.14
35	0.02	595	20	250	127	126.8	0.13
30	0.02	551	40	175	131	131.0	0.00
40	0.01	595	40	125	130	129.0	0.74
40	0.03	595	50	125	129	128.1	0.72
30	0.03	650	50	175	112	112.9	0.77
25	0.02	595	50	225	115	115.1	0.08

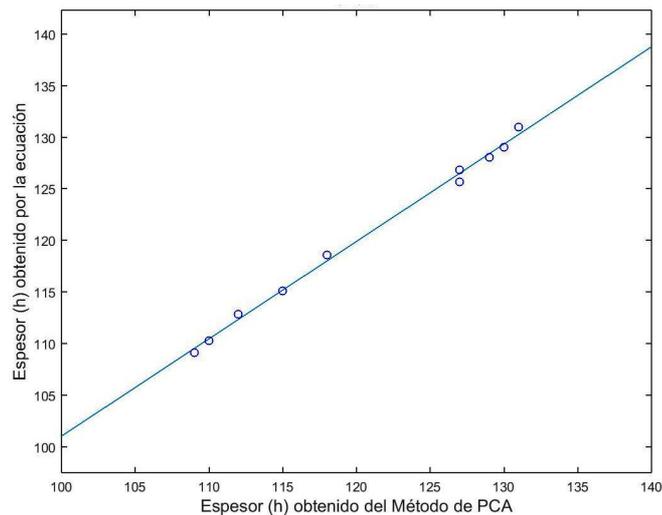


Figura I.4: Comparación de los valores del espesor (h) determinado por el método de la PCA y los valores calculados por el modelo matemático para un pavimento rígido con subbase cementada con berma y con pasador



Tabla I.12: Propiedades para un pavimento rígido con subbase cementada con berma y sin pasador

n (años)	r (%)	MR (psi)	Mr (psi)	Ds (mm)	h PCA (mm)	h fórmula (mm)	error (%)
40	0.06	595	30	150	149	147.4	1.08
25	0.06	650	50	150	132	130.9	0.87
35	0.06	650	50	125	142	141.2	0.55
20	0.03	650	20	225	127	125.8	0.91
30	0.03	551	20	200	139	139.4	0.32
25	0.04	595	40	175	129	129.0	0.04
35	0.06	595	60	225	133	131.2	1.35
35	0.05	650	30	200	139	138.7	0.23
30	0.02	595	40	250	124	123.6	0.30
30	0.04	650	30	100	139	138.9	0.06

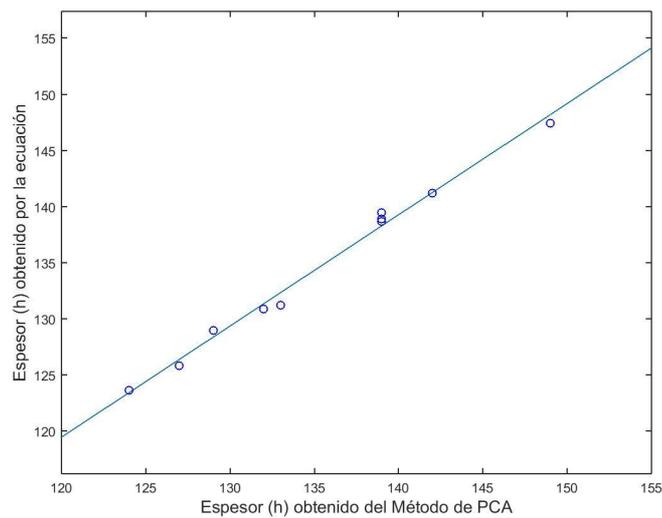


Figura I.5: Comparación de los valores del espesor (h) determinado por el método de la PCA y los valores calculados por el modelo matemático para un pavimento rígido con subbase cementada con berma y sin pasador



Tabla I.13: Propiedades para un pavimento rígido con subbase cementada sin berma y con pasador

n (años)	r (%)	MR (psi)	Mr (psi)	Ds (mm)	h PCA (mm)	h fórmula (mm)	error (%)
40	0.03	551	50	225	149	148.7	0.18
35	0.06	650	30	125	153	153.7	0.43
20	0.04	650	40	175	134	133.8	0.14
30	0.01	595	50	175	141	139.8	0.84
30	0.05	551	60	175	149	149.9	0.58
35	0.04	595	60	225	138	139.3	0.93
30	0.02	551	40	225	148	147.8	0.13
30	0.05	650	20	200	147	147.1	0.09
35	0.03	551	20	225	162	161.4	0.35
20	0.02	551	30	150	160	159.6	0.23

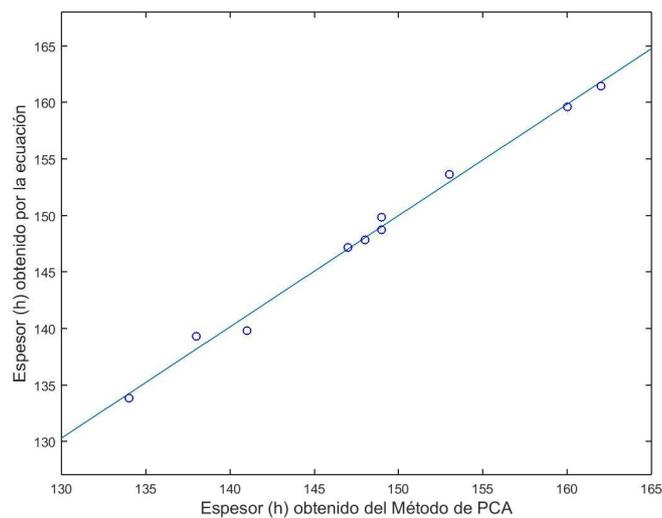


Figura I.6: Comparación de los valores del espesor (h) determinado por el método de la PCA y los valores calculados por el modelo matemático para un pavimento rígido con subbase cementada sin berma y con pasador



Tabla I.14: Propiedades para un pavimento rígido con subbase cementada sin berma y sin pasador

n (años)	r (%)	MR (psi)	Mr (psi)	Ds (mm)	h PCA (mm)	h fórmula (mm)	error (%)
25	0.03	595	60	125	145	146.0	0.70
35	0.03	650	30	125	160	159.0	0.60
30	0.03	595	60	100	151	151.8	0.56
30	0.06	595	30	125	164	165.4	0.85
30	0.06	595	60	200	152	151.2	0.52
35	0.05	551	30	225	160	162.0	1.25
35	0.02	650	20	250	153	151.8	0.81
25	0.05	650	30	125	155	154.7	0.22
35	0.03	595	50	100	157	157.3	0.19
35	0.03	595	40	150	156	155.5	0.30

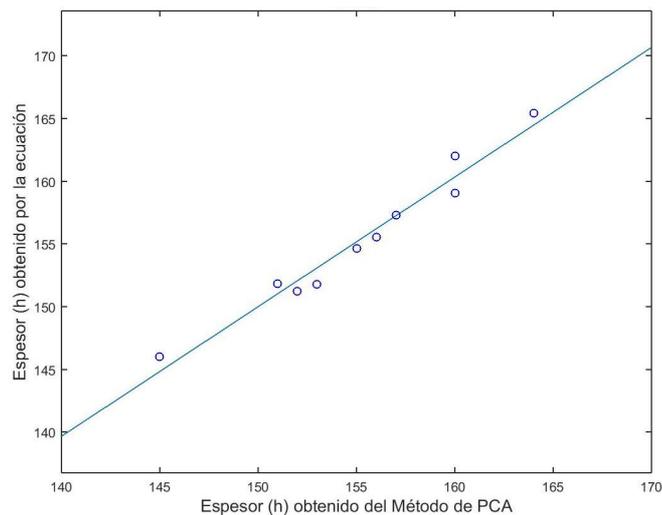


Figura I.7: Comparación de los valores del espesor (h) determinado por el método de la PCA y los valores calculados por el modelo matemático para un pavimento rígido con subbase cementada sin berma y sin pasador

I.2. Líneas de código de Matlab para el método de la PCA

Listing I.1: Función PCA_UC17

```

1 close all % cierra todas las viariables
2 clear all % cierra todas las figuras
3 % se introduce las cargas consideradas para el analisis para ejes
4 % simple y tandem

```



```

5 Simple= [22      20      18      16      14      12      10      8  6  4];
6 Tandem= [36      32      28      24      20      16  12  8  4];
7
8 % se asigna el porcentaje de vehiculos comerciales por cada carga
9 EjexVSimple=[0.96  4.23  15.81  38.02  56.11  124.00  204.96  483.10
10              732.28 1693.31];
11 EjexVTandem=[4.19  69.59  68.48  39.18  57.10  75.02  139.30  85.59
12              31.90];
13
14 % berma=2 % variable para elegir si es con (1) o sin berma de cemento
15 % (2)
16 % pasador=2 % pasadores de cemento (1) sin pasadores de cemento (2)
17 % MR=650 % b/pulg2 modulo de rotura
18
19 % se imponen los factores que no cambian
20 E=4000000;% Psi modulo de elasticidad
21 u=0.15;% adimensional coeficiente de Poisson
22 VC=0.19;% porcentaje de vehiculos comerciales
23 TPD=2900;% vehiculos trafico promedio diario
24 carril=4;% numero de carriles
25 direccion=2;% numero de direcciones
26 ii=0;
27 % SI ES GRANULAR
28 % inicializo las matrices para guardar las respuestas de cada iteración
29 MDATOSG=[];
30 MDATOSGM=[];
31 KGoC='G';% granular (1) cementada(2)
32
33 for berma=[1,2]
34     for pasador=[1,2]
35         for Mr=[20,50,80]
36             for Ks=100:300
37                 for MR=[550, 600, 650]
38                     for n=[20,30,40]
39                         for r=[0.01,0.035,0.06]
40                             ii=ii+1;% Contador de corridas importante
41                             % llamado del programa para el metodo de la PCA
42                             [MTOTFATIGAS,MTOTFATIGAT,MTOTEROSIONS,
43                              MTOTEROSIONT,f,k,N,sumafatiga ,sumaerosion ,
44                              Matfatiga ,Materosion]=CALCU_PCA(ii ,berma ,
45                              pasador ,MR,KGoC,Simple ,Tandem, EjexVSimple ,
46                              EjexVTandem,E,u,VC,TPD,n,r , carril , direccion ,
47                              Mr, Ks)
48                             % LLAMADO PARA GRAFICACION DE FIGURA
49                             [DATOS]=FIG_PCA(N, ii , n ,r ,carril , direccion
50                              , f , MR, Mr, Ks, k,sumafatiga ,sumaerosion ,
51                              Matfatiga ,Materosion ,berma ,pasador ,KGoC);
52                             close all
53                             MDATOSGM(ii ,:)=DATOS;
54                         end
55                     end
56                 end
57             end
58         end
59     end
60 end

```



```
51     end
52 end
53
54 % inicializo las matrices para guardar las respuestas de cada iteración
55 MDATOSCM=[];
56 MDATOSC=[];
57 % Si es cementada
58 KGoC='C'; % granular (1) cementada(2)
59 for berma=[1,2]
60     for pasador=[1,2]
61         for Mr=[20,40,60]
62             for Ks=[100,175,250]
63                 for MR=[550, 600, 650]
64                     for n=[20,30,40]
65                         for r=[0.01,0.035,0.06]
66                             ii=ii+1; % Contador de corridas importante
67                             % llamado del programa para el metodo de la PCA
68                             [MTOTFATIGAS,MTOTFATIGAT,MTOTEROSIONS,
69                             MTOTEROSIONT,f,k,N,sumafatiga,sumaerosion,
70                             Matfatiga,Materosion]=CALCU_PCA(ii,berma,
71                             pasador,MR,KGoC,Simple,Tandem,EjexVSimple,
72                             EjexVTandem,E,u,VC,TPD,n,r,carril,direccion,
73                             Mr,Ks)
74                             % LLAMADO PARA GRAFICACION DE FIGURA
75                             [DATOS]=FIG_PCA(N,ii,n,r,carril,direccion
76                             ,f,MR,Mr,Ks,k,sumafatiga,sumaerosion,
77                             Matfatiga,Materosion,berma,pasador,KGoC);
78                             close all
79                             MDATOSCM(ii,:)=DATOS;
80                         end
81                     end
82                 end
83             end
84         end
85     end
86 end
87
88 %%%%%% ITERACION COMPLETA %%%%%%%%%%%%%%
89
90 ii=0;
91 % SI ES GRANULAR
92 % inicializo las matrices para guardar las respuestas de cada iteración
93 MDATOSG=[];
94 KGoC='G'; % granular (1) cementada(2)
95 for berma=[1,2]
96     for pasador=[1,2]
97         for Mr=20:10:80
98             for Ks=100:25:300
99                 for MR=[551, 595, 650]
100                    for n=20:5:40
101                        for r=0.01:0.01:0.06
102                            ii=ii+1; % Contador de corridas importante
103                            % llamado del programa para el metodo de la PCA
104                            [MTOTFATIGAS,MTOTFATIGAT,MTOTEROSIONS,
105                            MTOTEROSIONT,f,k,N,sumafatiga,sumaerosion,
```



```

    Matfatiga , Materosion]=PROGRAMAPCA( ii , berma ,
    pasador ,MR,KGoC, Simple , Tandem, EjexVSimple ,
    EjexVTandem,E,u,VC,TPD,n,r , carril , direccion ,
    Mr, Ks)
99 %LLAMADO PARA GRAFICACION DE FIGURA
100 [DATOS]=Figura(N, ii , n ,r ,carril , direccion ,
    f , MR, Mr, Ks, k,sumafatiga ,sumaerosion ,
    Matfatiga , Materosion , berma , pasador ,KGoC);
101 close all
102 MDATOSG( ii ,:)=DATOS;
103
104     end
105     end
106     end
107     end
108     end
109     end
110 end
111
112
113 % inicializo las matrices para guardar las respuestas de cada iteración
114 MDATOSC=[];
115 % SI ES cementada
116 KGoC='C'; % granular (1) cementada(2)
117 for berma=[1,2]
118     for pasador=[1,2]
119         for Mr=20:10:60
120             for Ks=100:25:250
121                 for MR=[551, 595, 650]
122                     for n=20:5:40
123                         for r=0.01:0.01:0.06
124                             ii=ii+1 % Contador de corridas importante
125                             % llamado del programa para el metodo de la PCA
126                             [MTOTFATIGAS,MTOTFATIGAT,MTOTEROSIONS,
                                MTOTEROSIONT,f,k,N,sumafatiga , sumaerosion ,
                                Matfatiga , Materosion]=PROGRAMAPCA( ii , berma ,
                                pasador ,MR,KGoC, Simple , Tandem, EjexVSimple ,
                                EjexVTandem,E,u,VC,TPD,n,r , carril , direccion ,
                                Mr, Ks)
127                             %LLAMADO PARA GRAFICACION DE FIGURA
128                             [DATOS]=Figura(N, ii , n ,r ,carril , direccion ,
                                f , MR, Mr, Ks, k,sumafatiga ,sumaerosion ,
                                Matfatiga , Materosion , berma , pasador ,KGoC);
129                             close all
130                             MDATOSC( ii ,:)=DATOS;
131                         end
132                     end
133                 end
134             end
135         end
136     end
137 end
138
139 close all

```



Listing I.2: Función CALCU_PCA

```
1 function [MTOTFATIGAS,MTOTFATIGAT,MTOTEROSIONS,MTOTEROSIONT,f,k,N,
    sumafatiga,sumaerosion,Matfatiga,Materosion]=CALCU_PCA(ii,berma,
    pasador,MR,KGoC,Simple,Tandem,EjexVSimple,EjexVTandem,E,u,VC,TPD,n,r,
    carril,direccion,Mr,Ks)
2
3 % LLAMADA DE FUNCION EJES POR VEHICULO
4 N=TRAFICO_PCA(VC,TPD,n,r,carril,direccion);
5
6 % LLAMADA DE FUNCION RESISTENCIA DE LA SUBRASANTE
7 k=SUELO_PCA(KGoC,Mr,Ks); % Mpa/m
8 % LLAMADA DE FUNCION FACTOR DE SEGURIDAD
9 [FscS,FscT]=FSC_PCA(Simple,Tandem,TPD,carril);
10
11
12 % ELECCION DE ESPESOR
13 opcion1=0;
14 opcion2=0;
15 f=0;
16 g=0;
17 % Repeticiones Esperadas
18 SimpleExp=EjexVSimple*N/1000;
19 TandemExp=EjexVTandem*N/1000;
20
21 Materosion=[];
22 Matfatiga=[];
23
24 for hi=100:350 % mm espesor inicial, se guarda en una matriz todos los
    valores de suma de erosion y fatiga
25     [sumafatiga,sumaerosion]=FAT_ERO_PCA(Simple,Tandem,berma,pasador,FscS,
        FscT,E,u,hi,SimpleExp,TandemExp,MR,k);
26     Materosion(1,hi-99)=sumaerosion;
27     Matfatiga(1,hi-99)=sumafatiga;
28 end
29
30
31 MFE=find(Matfatiga<100 & Materosion<100);
32 f=MFE(1);
33
34 [TotalFatiga,TotalErosion,MTOTFATIGAS,MTOTFATIGAT,MTOTEROSIONS,MTOTEROSIONT
    ]=FAT_ERO_PCA(Simple,Tandem,berma,pasador,FscS,FscT,E,u,f+99,SimpleExp,
    TandemExp,MR,k);
35
36
37 % SALIDA DE DATOS A TXT
38 salida=RESULT_PCA(N,ii,f+99,berma,pasador,MR,KGoC,Mr,Ks,k,VC,FscS,FscT,TPD,
    n,r,carril,direccion,TotalFatiga,TotalErosion,MTOTFATIGAS,MTOTFATIGAT,
    MTOTEROSIONS,MTOTEROSIONT);
```

Listing I.3: Función FIG_PCA



```

1 function [DATOS]=FIG_PCA(N, ii, n, r, carril, direccion, f, MR, Mr, Ks, k,
    sumafatiga, sumaerosion, Matfatiga, Materosion, berma, pasador, KGoC)
2 % para valores de fatiga mayores a 100 se restringe para la grafica
3 MatfatigaT=0;
4 for i=1:251
5     if Matfatiga(1,i)>100
6         MatfatigaT(1,i)=101;
7     else
8         MatfatigaT(1,i)=Matfatiga(1,i);
9     end
10 end
11 % para valores de erosión mayores a 100 se restringe para la grafica
12 MaterosionT=0;
13 for i=1:251
14     if Materosion(1,i)>100
15         MaterosionT(1,i)=101;
16     else
17         MaterosionT(1,i)=Materosion(1,i);
18     end
19 end
20
21
22 if berma==1
23     cberma='CB';
24 else
25     cberma='SB';
26 end
27 if pasador==1
28     cpasador='CP';
29 else
30     cpasador='SP';
31 end
32 if KGoC=='G'
33     cKGoC=1;
34 else
35     cKGoC=2;
36 end
37 % se guarda los datos y la respuesta en la matriz
38 DATOS=[];
39 DATOS=[ii f+99 n r carril direccion berma pasador MR cKGoC Mr Ks k N
    MatfatigaT(f) MaterosionT(f) ];
40 % graficar la figura de todos los % de fatiga y erosion vs espesor
41 A1=['Fatiga=_' num2str(MatfatigaT(f),4) '%'];
42 A2=['Erosión=_' num2str(MaterosionT(f),4) '%'];
43 Espesor=['Espesor=_' num2str(f+99) '/' num2str((f+99)/25.4) 'mm/in'];
44 Tberma=['Berma=_' cberma num2str(berma)];
45 Tpasador=['Pasador=_' cpasador num2str(pasador)];
46 TMR=['MR=_' num2str(MR) 'psi'];
47 TcKGoC=['Tipo de base=_' KGoC num2str(cKGoC)];
48 TMr=['Mr=_' num2str(Mr) 'MPa/m'];
49 TKs=['Ds=_' num2str(Ks) 'mm'];
50 Tk=['k=_' num2str(k) 'MPa/m'];
51 TN=['N=_' num2str(N)];
52 TCorrida=['Corrida=_' num2str(ii)];
53
54

```



```
55 plot([100:350], MaterosionT, 'g'); hold
56 plot([100:350], MatfatigaT);
57 plot(f+99, MaterosionT(f), 'ro');
58 plot(f+99, MatfatigaT(f), 'ro');
59 grid on
60 xlabel('Espesor (mm)', 'FontName', 'Arial', 'FontSize', 14);
61 ylabel('Porcentaje (%)', 'FontName', 'Arial', 'FontSize', 14);
62 legend('Erosión', 'Fatiga')
63 annotation('textbox', [0.55 0.25 0.32 0.54], ...
64     'String', {TCorrida, Espesor, '', A1, A2, '', Tberma, Tpasador, TMR, TcKGoC, TMr,
65     TKs, Tk, TN}, ...
66     'FitBoxToText', 'off', 'BackgroundColor', [1 1 1]);
67 saveas(gcf, ['Fig_' num2str(ii)], 'eps')
68 saveas(gcf, ['Fig_' num2str(ii)], 'jpeg')
```

Listing I.4: Función TRAFICO_PCA

```
1
2 function [N]=TRAFICO_PCA(VC, TPD, n, r, carril, direccion)
3 % obtención de numero de ejes equivalentes
4 FD=0;
5 FL=0;
6 fproy=0;
7
8 % obtengo FD
9 if carril==2
10     FD=0.5;
11 elseif carril==4
12     FD=0.45;
13 elseif carril>=6
14     FD=0.4;
15 end
16
17 % calculo de factor de proyeccion para Fproy tabla 6.3
18
19 fproy=((((1+r)^n)-1)/r)/n;
20 TPDiseno= TPD*(fproy)*FD; % obtengo tpd de diseño
21
22 if direccion==1 % obtengo FL
23     FL=1;
24 elseif direccion==2
25     FL=-0.083* log(TPDiseno)+1.5775; % Ecuacion segun figura 6.2
26 elseif direccion==3
27     FL=-0.082* log(TPDiseno)+1.433; % Ecuacion segun figura 6.2
28 end
29
30 N= TPDiseno * VC * FL* n *365; % no incluye Factor camion
```

Listing I.5: Función FSC_PCA



```
1
2 function [FscS ,FscT]=FSC_PCA(Simple ,Tandem,TPD, carril)
3 % analisis de Fsc factor de seguridad de carga para ele simple o tandem
4 FscS=0;
5 FscT=0;
6 MaxSimpl= max(Simple);
7 MaxTand= max(Tandem);
8 if 200<=TPD && TPD<=800 % CATEGORIA 1
9     if 98>=MaxSimpl
10        FscS=1.0;
11    end
12    if 160>=MaxTand
13        FscT=1.0;
14    end
15 elseif 700<=TPD && TPD<=5000 % CATEGORIA 2
16    if MaxSimpl<=115
17        FscS=1.0;
18    end
19    if MaxTand<=195
20        FscT=1.0;
21    end
22
23 elseif carril==2
24    if 3000<=TPD && TPD<=12000 % CATEGORIA 3
25        if MaxSimpl<=133
26            FscS=1.1;
27        end
28        if MaxTand<=230
29            FscT=1.1 ;
30        end
31    end
32    if 3000<=TPD && TPD<=20000 % CATEGORIA 4
33        if MaxSimpl<=152
34            FscS=1.2;
35
36        end
37        if MaxTand<=267
38            FscT=1.2;
39        end
40    end
41 elseif carril>2
42    if 3000<=TPD && TPD<=50000 % CATEGORIA 3
43        if MaxSimpl<=133
44            FscS=1.1;
45
46        end
47        if MaxTand<=230
48            FscT=1.1 ;
49        end
50    end
51
52    if 3000<=TPD && TPD<=150000 % CATEGORIA 4
53        if MaxSimpl<=152
54            FscS=1.2;
55        end
56        if MaxTand<=267
```



```
57         FscT=1.2;
58     end
59 end
60 end
```

Listing I.6: Función SUELO_PCA

```
1
2 function [k]=SUELO.PCA(KGoC, Mr, Ks)
3 % se obtiene el valor de kcombinado
4 if KGoC=='G' % si es granular
5     Mrmatriz=[20 40 60 80];
6     kmatriz= [23 26 32 38; 45 49 57 66; 64 66 76 90; 87 90 100 117];
7     Ksmatriz=[100 150 225 300];
8     KSO=interp1 (Mrmatriz , kmatriz , Mr);
9     k= interp1 (Ksmatriz ,KSO, Ks);
10 elseif KGoC=='C' % si es cementado
11     Mrmatriz=[20 40 60];
12     kmatriz= [60 80 105 135; 100 130 185 230; 140 190 245 270];
13     Ksmatriz=[100 150 200 250];
14     KSO=interp1 (Mrmatriz , kmatriz , Mr);
15     k= interp1 (Ksmatriz ,KSO, Ks);
16 end
```

Listing I.7: Función FAT_ERO_PCA

```
1
2 function [TotalFatiga , TotalErosion ,MTOTFATIGAS,MTOTFATIGAT,MTOTEROSIONS,
3         MTOTEROSIONI]=FAT_ERO_PCA( Simple , Tandem ,berma , pasador , FscS , FscT ,E, u , hi ,
4         SimpleExp , TandemExp ,MR, k);
5
6 % hi=75*2.54
7 h=hi*0.03937; % pulg transformacion de hi de mm a pulg;
8 K=k*145.037775/39.37; % psi/pulg transformacion de k mpa/m a psi/pulg ,
9
10 % ANALISIS DE FATIGA
11 f3= 0.894; %factor de ajuste que tiene en cuenta el efecto en el esfuerzo
12     de camiones q circula en el borde
13 CV=0.15; % coeficiente de variación
14 f4=1/(1.235*(1-CV)); %reducción en la resistencia del concreto con un
15     coeficiente de variación(PCA recomienda un CV=15%)factor de ahyste por
16     el aumento de la resistencia del concreto a edades superiores
17
18 radius = (E * (h ^ 3) / (12 * (1 - (u ^ 2)) * K)) ^ 0.25; %radio de rigidez
19     relativa del sistema losa-subrasante(pulg)
20
21 sa = Simple*FscS; % carga por factor de seguridad
22 ta = Tandem*FscT;
```



```

19
20 Sf1 = ((24 ./ sa) .^ 0.06) .* (sa ./ 18); % factor de ajuste del efecto del
    peso de ejes y area de contacto
21 Tf1 = ((48 ./ ta) .^ 0.06) .* (ta / 36);
22
23 if berma ==2 % sin berma
24     f2 = 0.892 + h / 85.71 - h ^ 2 / 3000; % factor de ajuste para losa sin
        berma
25     f7 = 0.896; % factor de ajuste que considera deflexion a causa de
        camiones en bordes
26     c2 = 0.06;
27     Same = -1600 + 2525 * (log10(radius)) + (24.42 * radius) + 0.204 *
        radius ^ 2;
28     Tame = 3029 - 2966.8 * (log10(radius)) + 133.69 * radius - 0.0632 *
        radius ^ 2;
29 elseif berma ==1 % con berma
30     f2 = 1;
31     f7 = 1;
32     c2 = 0.94;
33     Same = (-970.4 + 1202.6 * (log10(radius)) + 53.587 * radius) * (0.8742
        + 0.01088 * K ^ 0.447);
34     Tame = (2005.4 - 1980.9 * (log10(radius)) + 99.008 * radius) * (0.8742
        + 0.01088 * K ^ 0.447);
35 end
36 % esfuerzo equivalente
37 Sestress = 6 * Same / (h ^ 2) * Sf1 * f2 * f3 * f4;
38 Testress = 6 * Tame / (h ^ 2) * Tf1 * f2 * f3 * f4;
39 ratiosa = Sestress / MR;
40 ratiota = Testress / MR;
41 % numero de repeticiones máximo permitidas
42 [r, c] = size(ratiosa);
43 nfs = [];
44 for i=1:c
45     if ratiosa(i) >= 0.55
46         nfs(i) = 10 ^ (11.737 - 12.077 * ratiosa(i));
47     elseif 0.45 < ratiosa(i) & ratiosa(i) < 0.55
48         nfs(i) = (4.2577 / (ratiosa(i) - 0.4325)) ^ 3.268;
49     else
50         nfs(i) = 0;
51     end
52 end
53
54 [r, c] = size(ratiota);
55 nft = [];
56 for i=1:c
57     if ratiota(i) >= 0.55
58         nft(i) = 10 ^ (11.737 - 12.077 * ratiota(i));
59     elseif 0.45 < ratiota(i) & ratiota(i) < 0.55
60         nft(i) = (4.2577 / (ratiota(i) - 0.4325)) ^ 3.268;
61     else
62         nft(i) = 0;
63     end
64 end
65 % porcentaje fatiga
66 porFatS = (SimpleExp. / nfs) * 100;
67 porFatT = (TandemExp. / nft) * 100;

```



```
68 for i=1:size(porFatS(1,:),2)
69     if porFatS(i)==Inf
70         porFatS(i)=0;
71     end
72 end
73 for i=1:size(porFatT(1,:),2)
74     if porFatT(i)==Inf
75         porFatT(i)=0;
76     end
77 end
78 SporFatS=sum(porFatS(:));
79 SporFatT=sum(porFatT(:));
80 TotalFatiga=SporFatS+SporFatT;
81
82
83 % ANALISIS EROSION
84
85 if pasador==1 % con pasador
86
87     if berma==1 % con berma
88         Tapc = 0.0345 + (146.25 / radius) - (2385.6 / radius ^ 2) + (23848
89             / radius ^ 3); % presión entre losa y superficie de soporte.
90         Sapc = 0.018 + (72.99 / radius) + (323.1 / radius ^ 2) + (1620 /
91             radius ^ 3);
92         f6 = 1; % factor de ajuste para losas sin pasadores y berma
93     elseif berma==2 % sin berma
94         Tapc = 1.258 + (97.491 / radius) + (1484.1 / radius ^ 2) - (180 /
95             radius ^ 3);
96         Sapc = -0.3019 + (128.85 / radius) + (1105.8 / radius ^ 2) +
97             (3269.1 / radius ^ 3);
98         f6 = 1;
99     end
100 elseif pasador==2 % sin pasador
101     if berma==1 % con berma
102         Tapc = 1.47 + (102.2 / radius) - (1072 / radius ^ 2) + (14451 /
103             radius ^ 3);
104         Sapc = 0.5874 + (65.108 / radius) + (1130.9 / radius ^ 2) - (5245.8
105             / radius ^ 3);
106         f6 = 1.001 - (0.26363 - (K / 3034.5)) ^ 2;
107     elseif berma==2 % sin berma
108         Tapc = 1.847 + (213.68 / radius) - (1260.8 / radius ^ 2) + (22989 /
109             radius ^ 3);
110         Sapc = 1.571 + (46.127 / radius) + (4372.7 / radius ^ 2) - (22886 /
111             radius ^ 3);
112         f6 = 0.95;
113     end
114 end
115
116 Sf5 = (sa ./ 18); % factor de ajuste por el efecto de las cargas por eje
117 Tf5 = (ta ./ 36);
118 % deflexion equivalente en una equina de la losa
119 Sedeflect = Sapc / K * Sf5 * f6 * f7;
120 Tedeflect = Tapc / K * Tf5 * f6 * f7;
121 % potencia o índice de trabajo
122 Powersa = 268.7 * (K ^ 1.27 * Sedeflect .^ 2 / h);
123 Powerta = 268.7 * (K ^ 1.27 * Tedeflect .^ 2 / h);
```



```

116
117 c1 = 1 - (K / 2000 * 4 / h) ^ 2; % factor de ajuste para subbase
118 EFs=log10((11111*(0.896.*Powersa).^2*c1)/(h*K^0.73)); % factor de erosión
119 EFt=log10((11111*(0.896.*Powerta).^2*c1)/(h*K^0.73));
120 % numero maximo de repeticiones permitidas
121 [r , c] = size(Powersa);
122 nes = [];
123 for i=1:c
124     if c1 * Powersa(i) > 9
125         nes(i) = real(10 ^ (14.524 - 6.777 * (c1 * Powersa(i) - 9) ^ 0.103
126             - (log10(c2))));
127     elseif c1 * Powersa(i) <= 9
128         nes(i) = 0;
129     end
130 end
131 [r , c] = size(Powerta);
132 net = [];
133 for i=1:c
134     if c1 * Powerta(i) > 9
135         net(i) = real(10 ^ (14.524 - 6.777 * (c1 * Powerta(i) - 9) ^ 0.103
136             - (log10(c2))));
137     elseif c1 * Powerta(i) <= 9
138         net(i) = 0;
139     end
140 end
141 % porcentaje de erosión
142 porEroS=(SimpleExp./ nes)*100;
143 porEroT=(TandemExp./ net)*100;
144 for i=1:size(porEroS(1,:),2)
145     if porEroS(i)==Inf
146         porEroS(i)=0;
147     end
148 end
149 for i=1:size(porEroT(1,:),2)
150     if porEroT(i)==Inf
151         porEroT(i)=0;
152     end
153 end
154 SporEroS=sum(porEroS(:));
155 SporEroT=sum(porEroT(:));
156 TotalErosion=SporEroS+SporEroT;
157
158 MTOTFATIGAS=[Simple ', SimpleExp ', Sestress ', ratiosa ', nfs ', porFatS '];
159 MTOTFATIGAT=[Tandem ', TandemExp ', Testress ', ratiota ', nft ', porFatT '];
160
161 MTOTEROSIONS=[Simple ', SimpleExp ', EFs ', Powersa ', nes ', porEroS '];
162 MTOTEROSIONT=[Tandem ', TandemExp ', EFt ', Powerta ', net ', porEroT '];

```

Listing I.8: Función RESULT_PCA



```
1 function [salida]=RESULT_PCA(N, ii , f , berma , pasador ,MR, KGoC, Mr, Ks, k, VC, FscS ,
    FscT, TPD, n, r , carril , direccion , TotalFatiga , TotalErosion , MTOTFATIGAS,
    MTOTFATIGAT, MTOTEROSIONS, MTOTEROSIONT)
2 %Se ordena los datos que se presentaran en el txt
3 salida=fopen('salida.txt','wt');
4 fprintf(salida,'ID');
5 fprintf(salida,'\n%d');
6 fprintf(salida,'\n%d',ii);
7 fprintf(salida,'\n%d');
8 fprintf(salida,'DATOS_DE_ENTRADA');
9 fprintf(salida,'\n%d');
10 fprintf(salida,'VEHICULOS_COMERCIALES');
11 fprintf(salida,'\n%d',VC);
12 fprintf(salida,'\n%d');
13 fprintf(salida,'TPD');
14 fprintf(salida,'\n%d',TPD);
15 fprintf(salida,'\n%d');
16 fprintf(salida,'PERIODO_DE_DISEÑO_(n)');
17 fprintf(salida,'\n%d',n);
18 fprintf(salida,'\n%d'); fprintf(salida,'TASA_DE_CRECIMIENTO_DE_TRANSITO_(r)
    ');
19 fprintf(salida,'\n%d',r);
20 fprintf(salida,'\n%d');
21 fprintf(salida,'NUMERO_DE_CARRILES');
22 fprintf(salida,'\n%d',carril);
23 fprintf(salida,'\n%d');
24 fprintf(salida,'SENTIDO_DE_VIA');
25 fprintf(salida,'\n%d',direccion);
26 fprintf(salida,'\n%d');
27 fprintf(salida,'MATERIAL_DE_SUBBASE_GRANULAR_O_CEMENTADA');
28 fprintf(salida,'\n%d');
29 if KGoC==71
30     fprintf(salida,'GRANULAR');
31 elseif KGoC==67
32     fprintf(salida,'CEMENTADA');
33 end
34 fprintf(salida,'\n%d');
35 fprintf(salida,'ESPESOR_DE_SUBBASE');
36 fprintf(salida,'\n%d',Ks);
37 fprintf(salida,'\n%d');
38 fprintf(salida,'MODULO_DE_REACCION_DE_SUBRASANTE_(Mr)_(MPa/m)');
39 fprintf(salida,'\n%d',Mr);
40 fprintf(salida,'\n%d');
41 fprintf(salida,'RESISTENCIA_A_LA_SUBRASANTE_Mpa/m');
42 fprintf(salida,'\n%d',k);
43 fprintf(salida,'\n%d');
44 fprintf(salida,'CON_O_SIN_BERMA');
45 fprintf(salida,'\n%d');
46 if berma==1
47     fprintf(salida,'CON_BERMA');
48 elseif berma==2
49     fprintf(salida,'SIN_BERMA');
50 end
51 fprintf(salida,'\n%d');
52 fprintf(salida,'CON_O_SIN_PASADOR');
53 fprintf(salida,'\n%d');
```



```

54 if pasador==1
55     fprintf(salida , 'CON_PASADOR');
56 elseif pasador==2
57     fprintf(salida , 'SIN_PASADOR');
58 end
59 fprintf(salida , '\n%d');
60 fprintf(salida , 'MODULO_DE_RUPTURA_DE_CONCRETO_(MR) (psi)');
61 fprintf(salida , '\n%d',MR);
62 fprintf(salida , '\n%d');
63 fprintf(salida , 'FACTOR_DE_SEGURIDAD_SIMPLE');
64 fprintf(salida , '\n%d',FscS);
65 fprintf(salida , '\n%d');
66 fprintf(salida , 'FACTOR_DE_SEGURIDAD_TANDEM');
67 fprintf(salida , '\n%d',FscT);
68 fprintf(salida , '\n%d');
69
70 fprintf(salida , 'NUMERO_DE_EJES_EQUIVALENTES');
71 fprintf(salida , '\n%d',N);
72 fprintf(salida , '\n%d');
73 fprintf(salida , 'ESPESOR');
74 fprintf(salida , '\n%d',f);
75
76 [x, c] = size(MTOTFATIGAS)
77 [m, y] = size(MTOTFATIGAT)
78 fprintf(salida , '\n%d');
79 fprintf(salida , 'CARGAS_POR_EJE');
80 fprintf(salida , '\n%d');
81 fprintf(salida , 'SIMPLE');
82 for i=1:x
83     fprintf(salida , '\n%d', MTOTFATIGAS(i,1));
84 end
85 fprintf(salida , '\n%d');
86 fprintf(salida , 'TANDEM');
87 for i=1:m
88     fprintf(salida , '\n%d', MTOTFATIGAT(i,1));
89 end
90 fprintf(salida , '\n%d');
91 fprintf(salida , 'REPETICIONES_ESPERADAS');
92 fprintf(salida , '\n%d');
93 fprintf(salida , 'SIMPLE');
94 for i=1:x
95     fprintf(salida , '\n%d', MTOTFATIGAS(i,2));
96 end
97 fprintf(salida , '\n%d');
98 fprintf(salida , 'TANDEM');
99
100 for i=1:m
101     fprintf(salida , '\n%d', MTOTFATIGAT(i,2));
102 end
103 fprintf(salida , '\n%d');
104 fprintf(salida , 'FATIGA');
105 fprintf(salida , '\n%d');
106 fprintf(salida , 'ESFUERZO_EQUIVALENTE');
107 fprintf(salida , '\n%d');
108 fprintf(salida , 'SIMPLE');
109 esfequivS=0;

```



```
110 esfequivT=0;
111 for i=1:x
112 fprintf(salida , '\n%d', MTOTFATIGAS(i,3));
113 esfequivS=esfequivS+MTOTFATIGAS(i,3);
114 end
115 fprintf(salida , '\n%d');
116 fprintf(salida , 'TANDEM');
117 for i=1:m
118 fprintf(salida , '\n%d', MTOTFATIGAT(i,3));
119 esfequivT=esfequivT+MTOTFATIGAT(i,3);
120 end
121 fprintf(salida , '\n%d');
122 fprintf(salida , 'ESFUERZO_EQUIVALENTE');
123 fprintf(salida , '\n%d');
124 fprintf(salida , 'SIMPLE');
125 fprintf(salida , '\n%d', esfequivS/x);
126 fprintf(salida , '\n%d');
127 fprintf(salida , 'TANDEM');
128 fprintf(salida , '\n%d', esfequivT/m);
129
130
131 fprintf(salida , '\n%d');
132 fprintf(salida , 'ESF_EQUIV/MR');
133 fprintf(salida , '\n%d');
134 fprintf(salida , 'SIMPLE');
135 for i=1:x
136 fprintf(salida , '\n%d', MTOTFATIGAS(i,4));
137 end
138 fprintf(salida , '\n%d');
139 fprintf(salida , 'TANDEM');
140 for i=1:m
141 fprintf(salida , '\n%d', MTOTFATIGAT(i,4));
142 end
143 fprintf(salida , '\n%d');
144 fprintf(salida , 'REPETICIONES_ADMISIBLES');
145 fprintf(salida , '\n%d');
146 fprintf(salida , 'SIMPLE');
147 for i=1:x
148 fprintf(salida , '\n%d', MTOTFATIGAS(i,5));
149 end
150 fprintf(salida , '\n%d');
151 fprintf(salida , 'TANDEM');
152 for i=1:m
153 fprintf(salida , '\n%d', MTOTFATIGAT(i,5));
154 end
155 fprintf(salida , '\n%d');
156 fprintf(salida , 'PORCENTAJE_DE_FATIGA');
157 fprintf(salida , '\n%d');
158 fprintf(salida , 'SIMPLE');
159 for i=1:x
160 fprintf(salida , '\n%d', MTOTFATIGAS(i,6));
161 end
162 fprintf(salida , '\n%d');
163 fprintf(salida , 'TANDEM');
164
165 for i=1:m
```



```
166 fprintf(salida , '\n%d', MTOTFATIGAT(i,6));
167 end
168 fprintf(salida , '\n%d');
169 fprintf(salida , 'SUMATORIA_FATIGA');
170 fprintf(salida , '\n%d', TotalFatiga);
171 fprintf(salida , '\n%d');
172
173 fprintf(salida , '\n%d');
174 fprintf(salida , 'EROSION');
175
176 fprintf(salida , '\n%d');
177 ferosS=0;
178 ferosT=0;
179 fprintf(salida , 'FACTOR_DE_EROSION');
180 fprintf(salida , '\n%d');
181 fprintf(salida , 'SIMPLE');
182 for i=1:x
183 fprintf(salida , '\n%d', MTOTEROSIONS(i,3));
184 ferosS=feroS+MTOTEROSIONS(i,3);
185 end
186 fprintf(salida , '\n%d');
187 fprintf(salida , 'TANDEM');
188 for i=1:m
189 fprintf(salida , '\n%d', MTOTEROSIONT(i,3));
190 ferosT=(feroS+MTOTEROSIONT(i,3));
191 end
192 fprintf(salida , '\n%d');
193 fprintf(salida , 'FACTOR_DE_EROSION');
194 fprintf(salida , '\n%d');
195 fprintf(salida , 'SIMPLE');
196 fprintf(salida , '\n%d', ferosS/x);
197 fprintf(salida , '\n%d');
198 fprintf(salida , 'TANDEM');
199 fprintf(salida , '\n%d', ferosT/m);
200
201
202
203 fprintf(salida , '\n%d');
204 fprintf(salida , 'POTENCIA');
205 fprintf(salida , '\n%d');
206 fprintf(salida , 'SIMPLE');
207 for i=1:x
208 fprintf(salida , '\n%d', MTOTEROSIONS(i,4));
209 end
210 fprintf(salida , '\n%d');
211 fprintf(salida , 'TANDEM');
212 for i=1:m
213 fprintf(salida , '\n%d', MTOTEROSIONT(i,4));
214 end
215 fprintf(salida , '\n%d');
216 fprintf(salida , 'REPETICIONES_ADMISIBLES');
217 fprintf(salida , '\n%d');
218 fprintf(salida , 'SIMPLE');
219 for i=1:x
220 fprintf(salida , '\n%d', MTOTEROSIONS(i,5));
221 end
```



```
222 fprintf(salida, '\n%d');
223 fprintf(salida, 'TANDEM');
224 fprintf(salida, '\n%d');
225 for i=1:m
226 fprintf(salida, '\n%d', MTOTEROSIONT(i,5));
227 end
228 fprintf(salida, '\n%d');
229 fprintf(salida, 'PORCENTAJE_DE_EROSION');
230 fprintf(salida, '\n%d');
231 fprintf(salida, 'SIMPLE');
232 for i=1:x
233 fprintf(salida, '\n%d', MTOTEROSIONS(i,6));
234 end
235 fprintf(salida, '\n%d');
236 fprintf(salida, 'TANDEM');
237 for i=1:m
238 fprintf(salida, '\n%d', MTOTEROSIONT(i,6));
239 end
240 fprintf(salida, '\n%d');
241 fprintf(salida, 'SUMATORIA_EROSION');
242 fprintf(salida, '\n%d', TotalErosion);
243 fprintf(salida, '\n%d');
244 fprintf(salida, 'FACTOR_DE_RELACION_DE_ESFUERZOS');
245 fprintf(salida, '\n%d');
246 fprintf(salida, 'SIMPLE');
247 fprintf(salida, '\n%d', esfequivS/(x*MR));
248 fprintf(salida, '\n%d');
249 fprintf(salida, 'TANDEM');
250 fprintf(salida, '\n%d', esfequivT/(m*MR));
251
252 winopen('salida.txt');
```

I.3. Líneas de código de Matlab para el método de la AASHTO

Listing I.9: Función AASHTO_UC17

```
1 close all % copia todas las variables
2 clear all % crea todas las figuras
3 % MATRIZ ITERACION COMPLETA
4 % bucles para la iteracion de todas las combinaciones posibles de los
   parametros
5 H2v=[2,5,10,12]; % vector de los valores a iterar de la profundidad al
   estrato firme, para obtener un menor numero de iteraciones
6 ii=1; % valor para la inicializacion para la corrida de las iteraciones
7 for confiabilidad=0.5:0.15:0.95
8     for n=20:5:40
9         for so=0.34:0.02:0.40
10            for Ls=0:1:3
11                for Cd=0.8:0.1:1.2
```



```

12         for J=2.4:0.4:4.4
13             for H1=4:4:20
14                 for H2i=1:1:4
15                     H2=H2v(H2i);
16                     % llamado de la subrutina CALCULAASHTO
17                     [N, kefe ,DF_pulg ,DF_cm,]=CALCULAASHTO(
18                         confiabilidad ,H1,H2,n,Cd,J,Ls,so);
19                     % llamado de la subrutina CALCULAASHTO
20                     MA=[confiabilidad H1 H2 n Cd J Ls so N
21                         kefe DF_pulg DF_cm];
22                     % matriz final de todas las
23                     iteraciones
24                     matriz_final(ii ,:)=MA;
25                     ii=ii+1% contador para el numero de
26                     iteraciones
27                 end
28             end
29         end
30     end
31     %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
32     %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
33     % MATRIZ ITERACION unicamente para los valores maximo, medio y minimo de
34     los rangos
35     H2v=[2,7,12];% vector de los valores a iterar de la profundidad al estrato
36     firme , para obtener un menor numero de iteraciones
37     ii=1;% valor para la inicializacion para la corrida de las iteraciones
38     for confiabilidad=0.5:0.225:0.95
39         for n=20:10:40
40             for so=0.34:0.03:0.40
41                 for Ls=0:1.5:3
42                     for Cd=0.8:0.2:1.2
43                         for J=2.4:1:4.4
44                             for H1=4:8:20
45                                 for H2i=1:1:3
46                                     H2=H2v(H2i);
47                                     % llamado de la subrutina CALCULAASHTO
48                                     [N, kefe ,DF_pulg ,DF_cm,]=CALCULAASHTO(
49                                         confiabilidad ,H1,H2,n,Cd,J,Ls,so);
50                                     % llamado de la subrutina CALCULAASHTO
51                                     MA=[confiabilidad H1 H2 n Cd J Ls so N
52                                         kefe DF_pulg DF_cm];
53                                     % matriz final de todas las
54                                     iteraciones
55                                     matriz_MMM(ii ,:)=MA;
56                                     ii=ii+1% contador para el numero de
57                                     iteraciones
58                                 end
59                             end
60                         end
61                     end
62                 end
63             end
64         end
65     end

```



```
58     end
59 end
```

Listing I.10: Función CALCU_AASHTO

```
1  % subrutina para el calculo del espesor de la losa
2  function [N, kefe , DF_pulg , DF_cm]=CALCU_AASHTO( confiabilidad , H1, H2, n, Cd, J, Ls ,
      so)
3  carril=6;% numero de carriles en total
4  direccion=3;% numero de carriles por direccion
5  TPDA=[2000 1600 250 500];% trafico promedio diario anual
6  FC=[0.34 1 2.5 0.1];% factor camion para cada TPDA respectivamente
7  % valores de los modulos resilientes de la subrasante de todo el año en
      psi
8  MR_vector=[20000 20000 2500 4000 4000 7000 7000 7000 7000 7000 4000 20000];
9  % modulo elastico de la subbase en psi
10 ME1=[50000 50000 15000 15000 15000 20000 20000 20000 20000 20000 15000
      50000];
11 ME2=3981427.32;% modulo elastico del concreto hidraulico en PSI
12 MRH=652.66;% modulo de ruptura del concreto hidraulico en PSI
13 Po=4.8;% indice de servicioc inicial
14 PT=2.8;% indice de servicioc final
15 D=9;% primera aproximacion fija del espesor de la losa de hormigon en
      pulgadas
16 r=0.04;% valor para tasa anual de crecimiento vehicular
17 %%%%%%%%%%%
18 %%%%%%%%%%%
19 % DESARROLLO DEL PROGRAMA
20 N=TRAFICO_AASHTO(TPDA,FC,n,r , carril , direccion);% llamado del numero de
      ejes equivalentes
21 ZR=-1*norminv( confiabilidad );% llamado del Valor correspondiente a la
      curva estandarizada para una confiabilidad R
22 [ kefe]=SUELO_AASHTO( MR_vector , ME1, H1, H2, D, Ls );% llamado del valor del
      modulo de reaccion efectivo de la subrasante en psi
23 entrada_izq=round(log10(N) ,3);% valor del logaritmo de base 10 del numero
      de ejes equivalente
24 % determinacion del espesor de la losa en pulgadas , a partir de la primera
25 % aproximacion del espesor de la losa
26 % iniciacion de variables
27 i=0;
28 j=0;
29 k=0;
30 % calculo del solver para la sulucion de la ecuacion 2.43 propuesta por la
      AASHTO
31 for i =1:0.001:20
32     % division de la ecuacion 2.43 para facilidad del calculo
33     g1=ZR*so;
34     g2=7.35*log10( i+1);
35     g3=log10( (Po-PT)/(4.5-1.5) );
36     g4=1+(1.624*10^7)/(( i+1)^8.46);
37     g5=g3/g4;
38     g6=4.22-0.32*PT;
39     g7=MRH*Cd*(( i^0.75)-1.132);
```



```

40     g8=215.63*J*((i^0.75)-(18.42/((ME2/kefe)^0.25)));
41     g9=log10(g7/g8);
42     % solucion de la ecuacion 2.43 y redondeo a 3 decimales
43     entrada_derch=round((g1+g2-0.06+g5+g6*g9),3);
44     j=j+1;% conyador
45     vector(j)=entrada_derch;
46     DF(j)=i;
47 end
48 DF_pulg=0;
49 % igualacion de la ecuacion 2.43 con Log(N) para encontrar la solucion del
50 % espesor de la losa
51 for k=19001:-1:1
52     if entrada_izq==vector(k)
53         DF_pulg=DF(k);
54         DF_cm=DF_pulg*2.54;
55         break
56     end
57 end
58 % solucion para evitar los casos en donde la solucion es negativa o
59 % imaginaria
60 if DF_pulg==0
61     for l=1:1:19001
62         b=imag(vector(l));
63         if vector(l)>0
64             if b==0
65                 resta=vector(l)-vector(l+1);
66                 if resta<0
67                     DF_pulg=DF(l);
68                     DF_cm=DF_pulg*2.54;
69                     break
70                 end
71             end
72         end
73     end
74 end

```

Listing I.11: Función RESULT_AASHTO

```

1 % subrutina para la generacion del documento txt para una iteracion
2 function [salida]=RESULT_AASHTO(confiabilidad ,H1,H2,n,D,so ,Cd,J ,Ls,N, kefe ,
   DF_pulg ,DF_cm)
3 salida=fopen('salida.txt','wt');
4 fprintf(salida,'DATOS_DE_ENTRADA');
5 fprintf(salida,'\n%d');
6 fprintf(salida,'PERIODO_DE_DISEÑO_(n)');
7 fprintf(salida,'\n%d',n);
8 fprintf(salida,'\n%d');
9 fprintf(salida,'confiabilidad');
10 fprintf(salida,'\n%d',confiabilidad);
11 fprintf(salida,'\n%d');
12 fprintf(salida,'espesor_subbase(pulg)');
13 fprintf(salida,'\n%d',H1);
14 fprintf(salida,'\n%d');

```



```
15 fprintf(salida , 'profundidad_al_estrato_firme(pies)');
16 fprintf(salida , '\n%d', H2);
17 fprintf(salida , '\n%d');
18 fprintf(salida , 'aproximacion_inicial_del_espesor_de_la_losa_(pulg)');
19 fprintf(salida , '\n%d', D);
20 fprintf(salida , '\n%d');
21 fprintf(salida , 'desviacion_estandar_(so)');
22 fprintf(salida , '\n%d', so);
23 fprintf(salida , '\n%d');
24 fprintf(salida , 'coeficiente_de_drenaje_(Cd)');
25 fprintf(salida , '\n%d', Cd);
26 fprintf(salida , '\n%d');
27 fprintf(salida , 'coeficiente_de_transferencia_de_carga_(J)');
28 fprintf(salida , '\n%d', J);
29 fprintf(salida , '\n%d');
30 fprintf(salida , 'perdida_por_soporte_(Ls)');
31 fprintf(salida , '\n%d', Ls);
32 fprintf(salida , '\n%d');
33 fprintf(salida , 'DATOS_DE_SALIDA');
34 fprintf(salida , '\n%d');
35 fprintf(salida , 'Numero_de_ejes_equivalente_(N)');
36 fprintf(salida , '\n%d', N);
37 fprintf(salida , '\n%d');
38 fprintf(salida , 'Modulo_de_Reaccion_Efectivo_de_la_Subrasante');
39 fprintf(salida , '\n%d', kefe);
40 fprintf(salida , '\n%d');
41 fprintf(salida , 'espesor_final_de_losa_(cm)');
42 fprintf(salida , '\n%d', DF_cm);
43 fprintf(salida , '\n%d');
44 fprintf(salida , 'espesor_final_de_losa_(pulg)');
45 fprintf(salida , '\n%d', DF_pulg);
46 fprintf(salida , '\n%d');
47 winopen('salida.txt');
```

Listing I.12: Función TRAFICO_AASHTO

```
1 % subrutina para el calculo del numero de ejes equivalentes
2 function [N]=TRAFICO_AASHTO(TPDA,FC,n,r , carril , direccion)
3 FD=0;% iniciacion de variable
4 FL=0;% iniciacion de variable
5 % factor direccion
6 if carril==2
7     FD=0.5;
8 elseif carril==4
9     FD=0.45;
10 elseif carril==6
11     FD=0.4;
12 end
13 % factor carril
14 if direccion==1
15     FL=1;
16 elseif direccion==2
17     FL=0.9;
```



```

18 elseif direccion==3
19     FL=0.7;
20 elseif direccion==4
21     FL=0.625;
22 end
23 Fproy=(((1+r)^n)-1)/r; % factor proyeccion
24 suma1=0; % iniciacion de variable
25 suma2=0; % iniciacion de variable
26 producto=0; % iniciacion de variable
27 % determinacion del factor camion
28 for i=1:1:4
29     producto=TPDA(i)*FC(i);
30     suma1=suma1+producto;
31     suma2=suma2+TPDA(i);
32 end
33 FE=suma1/suma2;
34 vc=(suma2-TPDA(4))/suma2; % factor par vehiculos livianos
35 N=suma2*vc*FD*FL*Fproy*FE*365; % numero de ejes equivalentes

```

Listing I.13: Función SUELO_AASHTO

```

1 % subrutina para el calculo del modulo de reaccion efectivo de la
2 % subrasante
3 function [ kefe]=SUELO_AASHTO(MR_vector,ME1,H1,H2,D,Ls)
4 % DESARROLLO DEL PROGRAMA
5 % calculo del kcomp
6 % modelos matematicos de los modulos elasticos de la subbase(primera
7 % FIGURA 2.8)
8 y1=6.7619*log(H1)-5.0620;
9 y2=6.5535*log(H1)-5.0209;
10 y3=6.3905*log(H1)-5.0146;
11 y4=6.1260*log(H1)-4.9248;
12 y5=5.6593*log(H1)-4.4147;
13 y6=5.5699*log(H1)-4.4838;
14 y7=5.4652*log(H1)-4.5458;
15 y8=5.2280*log(H1)-4.4713;
16 y9=4.9533*log(H1)-4.4163;
17
18 vector1=[y1 y2 y3 y4 y5 y6 y7 y8 y9]; % almacenamiento en un vector
19 % modulos elasticos correspondientes a cada modelo matematico
20 vector2=[1000000 600000 400000 200000 100000 75000 50000 30000 15000];
21 % interpolacion del valor de "Y" para la primera subgrafica de la FIGURA
22 % 2.8
23 % para un modulo de elasticidad dado
24 t=0;
25 for i=1:1:12
26     for j=1:1:8
27         if ME1(i)<=vector2(j) && ME1(i)>=vector2(j+1)
28             t=vector1(j+1)+((vector1(j)-vector1(j+1))/(vector2(j)-vector2(j
29                 +1)))*(ME1(i)-vector2(j+1));
30         end
31     end
32     y(i)=t;

```



```
31 end
32 % modelos matematicos para la FIGURA 2.9 para los
33 % diferentes modulos resilientes del estrato firme
34 x1=-3.230*log(H1)+10.418;
35 x2=-3.524*log(H1)+13.010;
36 x3=-3.660*log(H1)+14.370;
37 x4=-3.970*log(H1)+16.469;
38 x5=-4.105*log(H1)+17.682;
39 x6=-4.262*log(H1)+18.955;
40 x7=-4.396*log(H1)+19.832;
41 x8=-4.460*log(H1)+20.704;
42 x9=-4.598*log(H1)+21.618;
43 % almacenamiento de los valores de los modelos matematicos en un vector
44 vector3=[x1 x2 x3 x4 x5 x6 x7 x8 x9];
45 % modulos resilientes correspondientes a cada modelo matematico
46 vector4=[1000 2000 3000 5000 7000 10000 12000 16000 20000];
47 % interpolacion del valor de "X" para la segunda subgrafica de la FIGURA
48 % para diferentes modulos resilientes a lo largo del año
49 q=0;
50 for j=1:1:12
51     for i=1:1:8
52         if MR_vector(j)>=vector4(i) && MR_vector(j)<=vector4(i+1)
53             q=vector3(i)+((vector3(i+1)-vector3(i))/(vector4(i+1)-vector4(i)
54                 ))*(MR_vector(j)-vector4(i));
55         end
56     end
57     x(j)=q;% almacenamiento para los diferentes meses del año
58 end
59 % valores de los kcomp para los diferentes modelos matematicos
60 vector5=[50 100 200 300 400 500 600 700 800 900 1000 1250 1500 2000];
61 % obtencion de los valores de "Y" para la subgrafica 3 a partir de los
62 % valores de "X" obtenidos para cada mes del año usando los modelos
63 % matematicos de los modulos de reaccion compuestos de la subrasante
64 for i=1:1:12
65     w(i,1)=-x(i)+8;
66     w(i,2)=-x(i)+10.25;
67     w(i,3)=-x(i)+12.7;
68     w(i,4)=-x(i)+14;
69     w(i,5)=-x(i)+15;
70     w(i,6)=-x(i)+16;
71     w(i,7)=-x(i)+16.7;
72     w(i,8)=-x(i)+17;
73     w(i,9)=-x(i)+17.5;
74     w(i,10)=-x(i)+18;
75     w(i,11)=-x(i)+18.25;
76     w(i,12)=-x(i)+19;
77     w(i,13)=-x(i)+19.8;
78     w(i,14)=-x(i)+20.85;
79 end
80 % interpolacion del kcomp para el "Y" calculado y el "X" calculado para
81 % los 12 meses del año de la FIGURA 2.10
82 k=0;
83 for i=1:1:12
84     for j=1:1:13
85         if y(i)>=w(i,j) && y(i)<=w(i,j+1)
```



```

85         k=vector5(j)+(y(i)-w(i,j))*(vector5(j+1)-vector5(j))/(w(i,j+1)-
            w(i,j));
86     elseif y(i)> w(i,j+1)
87         k=2000; % RESTRICCION EN FIGURA 2.10 VALORES FUERA DE 2000
88     end
89 end
90 kcomp(i)=k; % almacenamiento en un vector para los diferentes valores
91             % del kcomp para los 12 meses del año
92 end
93 o=kcomp;
94 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
95 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
96 % calculo del kcorr
97 for i=1:12
98     % aplicacion del modelo matematico para un ancho de estrato fimre de 2
99     m
100    if MR_vector(i)<=20000 && MR_vector(i)>=6000
101        c(1,i)=0.00003*((MR_vector(i))^2)-1.1943*(MR_vector(i))+14938;
102    else
103        if MR_vector(i)<6000
104            c(1,i)=7000000*(MR_vector(i))^(-0.764);
105        else
106            % mensaje para la restriccion del rango del modulo resiliente
107            % para el que el metodo trabaja
108            mensaje='el valor del modulo resiliente esta fuera de rango';
109        end
110    end
111    % aplicacion del modelo matematico para un ancho de estrato fimre de 5
112    m
113    if MR_vector(i)<=20000 && MR_vector(i)>=7000
114        c(2,i)=3000000000*(MR_vector(i))^(-1.485);
115    else
116        if MR_vector(i)<7000 && MR_vector(i)>=2500
117            c(2,i)=2000000*(MR_vector(i))^(-0.699);
118        else
119            if MR_vector(i)<2500
120                c(2,i)=2000000*(MR_vector(i))^(-0.654);
121            else
122                mensaje='el valor del modulo resiliente esta fuera de rango
123                ';
124            end
125        end
126    end
127    % aplicacion del modelo matematico para un ancho de estrato fimre de
128    10m
129    if MR_vector(i)<=20000 && MR_vector(i)>=8500
130        c(3,i)=-2308*log(MR_vector(i))+22810;
131    else
132        if MR_vector(i)<8500 && MR_vector(i)>=3000
133            c(3,i)=20000000*(MR_vector(i))^(-1.035);
134        else
135            if MR_vector(i)<3000
136                c(3,i)=14201*2.71828182^(-0.0003*MR_vector(i));
137            else
138                mensaje='el valor del modulo resiliente esta fuera de rango
139                ';

```



```
135         end
136     end
137 end
138 end
139 vector6=[2 5 10]; % almacenamiento de los valores de las tres rectas de
140                 % la Figura 2.11 a la 2.13
141 % interpolacion final para la obtencion de los 12 valores del kcomp
142 if H2>10
143     ct(i)=kcomp(i);
144 elseif H2<=10
145     for j=1:1:3
146         if H2>=vector6(j) && H2<=vector6(j+1)
147             for i=1:1:12
148                 ct(i)=c(j,i)+(H2-vector6(j))*(-c(j,i)+c(j+1,i))/(vector6(j)
149                     +1)-vector6(j));
149             end
150             break
151         end
152     end
153 end
154 for i=1:1:12
155     if kcomp(i)>1600 % Restriccion Figura 3.4 hasta 1600 pci kinf
156         ct(i)=1599;
157         kcomp(i)=1599;
158     end
159 end
160 % obtencion final del k corr g mediante de la FIGURA 2.14
161 j=1;
162 for i=1:1:12
163     % modelos matematicos de la FIGURA 2.14
164     % para obtener el kcorr g
165     kcomp_mod(i,j)=0.002*ct(i)+20;
166     kcomp_mod(i,j+1)=0.0067*ct(i)+40;
167     kcomp_mod(i,j+2)=0.0181*ct(i)+110;
168     kcomp_mod(i,j+3)=0.0333*ct(i)+200;
169     kcomp_mod(i,j+4)=0.0465*ct(i)+300;
170     kcomp_mod(i,j+5)=0.065*ct(i)+400;
171     kcomp_mod(i,j+6)=0.0821*ct(i)+515;
172     kcomp_mod(i,j+7)=0.1*ct(i)+360;
173     kcomp_mod(i,j+8)=0.124*ct(i)+760;
174     kcomp_mod(i,j+9)=0.15*ct(i)+900;
175     kcomp_mod(i,j+10)=0.17*ct(i)+1050;
176     kcomp_mod(i,j+11)=0.216*ct(i)+1336;
177     kcomp_mod(i,j+12)=0.25*ct(i)+1650;
178     kcomp_mod(i,j+13)=0.5*ct(i)+2000;
179 end
180 % almacenamiento en vector de los diferentes kcorregidos para cada modelo
181 % matematico respectivamente
182 vector7=[50 100 200 300 400 500 600 700 800 900 1000 1200 1400 1600];
183 % interpolacion de para obtener los kcorr g respectivos para los doce
184 % meses del año
185 a=0;
186 for i=1:1:12
187     for j=1:1:13
188         if kcomp(i)>=vector7(j) && kcomp(i)<vector7(j+1)
```



```

189         a=kcomp_mod(i , j)+(kcomp(i)-vector7(j))*(kcomp_mod(i , j+1)-
           kcomp_mod(i , j))/(vector7(j+1)-vector7(j));
190     end
191 end
192     kcorreg(i)=a;
193 end
194 f=kcorreg;
195 % calculo del daño relativo
196 for i=1:12
197     % modelo matematico para un espesor de losa de 6 pulg
198     if D==6
199         if kcorreg(i)>=500
200             ur(i)=-5.829*log(kcorreg(i))+45.888;
201         else
202             ur(i)=-10.54*log(kcorreg(i))+75.031;
203         end
204     end
205     if D==7
206         % modelo matematico para un espesor de losa de 7 pulg
207         if kcorreg(i)>=1250
208             ur(i)=-8.593*log(kcorreg(i))+71.332;
209         else
210             ur(i)=-15.42*log(kcorreg(i))+118.38;
211         end
212     end
213     if D==8
214         % modelo matematico para un espesor de losa de 8 pulg
215         if kcorreg(i)>=722.2
216             ur(i)=-16.44*log(kcorreg(i))+138.34;
217         else
218             ur(i)=-23.58*log(kcorreg(i))+183.8;
219         end
220     end
221     if D==9
222         % modelo matematico para un espesor de losa de 9 pulg
223         if kcorreg(i)>=888.85
224             ur(i)=-25.1*log(kcorreg(i))+215.96;
225
226         else
227             ur(i)=-30.64*log(kcorreg(i))+251.67;
228         end
229     end
230     if D==10
231         % modelo matematico para un espesor de losa de 10 pulg
232         if kcorreg(i)>=944.4
233             ur(i)=4143.3*(kcorreg(i)^(-0.595));
234         elseif kcorreg(i)<944.4&kcorreg(i)>=366.64
235             ur(i)=1027.6*(kcorreg(i)^(-0.393));
236         else
237             ur(i)=-43.58*log(kcorreg(i))+358.02;
238         end
239     end
240     if D==12
241         % modelo matematico para un espesor de losa de 12 pulg
242         ur(i)=-57.56*log(kcorreg(i))+541.37;
243     end

```



```
244     if D==14
245         % modelo matematico para un espesor de losa de 14 pulg
246         ur(i)=-86.63*log(kcorreg(i))+849.75;
247     end
248 end
249 g=ur;
250 % promedio de todos los valores del daño relativo
251 sum=0;
252 ur_prom=0;
253 for i=1:1:12
254     sum=sum+ur(i);
255 end
256 ur_prom=sum/12;
257 % obtencion del k corregido final a partir del daño relativo promedio
    FIGURA 2.15 HASTA 2.21
258 % modelo matematico para un espesor de losa de 6 pulg
259 if D==6
260     if ur_prom<=10
261         kcorrgF=-925.1*log(ur_prom)+2589.2;
262     else
263         kcorrgF=1221.2*2.71828182^(-0.095*ur_prom);
264     end
265 end
266 if D==7
267     % modelo matematico para un espesor de losa de 7 pulg
268     if ur_prom<=10
269         kcorrgF=-1455*log(ur_prom)+4612.5;
270     else
271         kcorrgF=2128.9*2.71828182^(-0.065*ur_prom);
272     end
273 end
274 if D==8
275     % modelo matematico para un espesor de losa de 8 pulg
276     if ur_prom<=30
277         kcorrgF=-1557*log(ur_prom)+6015.2;
278     else
279         kcorrgF=2412.7*2.71828182^(-0.042*ur_prom);
280     end
281 end
282 if D==9
283     % modelo matematico para un espesor de losa de 9 pulg
284     if ur_prom<=45
285         kcorrgF=-1861*log(ur_prom)+7984.4;
286     else
287         kcorrgF=3652.5*2.71828182^(-0.032*ur_prom);
288     end
289 end
290 if D==10
291     % modelo matematico para un espesor de losa de 10 pulg
292     if ur_prom<=70
293         kcorrgF=1000000*ur_prom^(-1.676);
294     elseif ur_prom>70 && ur_prom<=100
295         kcorrgF=4000000*ur_prom^(-2.527);
296     else
297         kcorrgF=3691.9*2.71828182^(-0.023*ur_prom);
298     end
```



```

299 end
300 if D==12
301     % modelo matematico para un espesor de losa de 12 pulg
302     kcorrF=12014*2.71828182^(-0.017*ur_prom);
303 end
304 if D==14
305     % modelo matematico para un espesor de losa de 14 pulg
306     kcorrF=18037*2.71828182^(-0.012*ur_prom);
307 end
308 p=kcorrF;
309 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
310 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
311 % obtencion del modulo de reaccion efectivo de la surasante(k_efectivo)
312 i=1;
313 % modelo matematico para Ls=0
314 Ls_mod(i)=kcorrF;
315 % modelos matematicos para Ls=1 para diferentes rangos para el kcompuesto
316 % final
317 if kcorrF >=1 && kcorrF <=10
318     Ls_mod(i+1)=0.5433*kcorrF+0.5733;
319 elseif kcorrF >10 && kcorrF <=100
320     Ls_mod(i+1)=0.373*kcorrF+3.6333;
321 elseif kcorrF >100 && kcorrF <=1000
322     Ls_mod(i+1)=0.2615*kcorrF+22.667;
323 elseif kcorrF >1000
324     Ls_mod(i+1)= 0.22*kcorrF+60;
325 end
326
327 % modelos matematicos para Ls=2 para diferentes rangos para el kcompuesto
328 % final
329 if kcorrF >=1 && kcorrF <=10
330     Ls_mod(i+2)=0.2833*kcorrF+0.8778;
331 elseif kcorrF >10&kcorrF <=100
332     Ls_mod(i+2)=0.147*kcorrF+2.7733;
333 elseif kcorrF >100&kcorrF <=1000
334     Ls_mod(i+2)=0.0576*kcorrF+14.133;
335 elseif kcorrF >1000
336     Ls_mod(i+2)=0.035*kcorrF+35;
337 end
338
339 % modelos matematicos para Ls=3 para diferentes rangos para el kcompuesto
340 % final
341 if kcorrF >=1 && kcorrF <=10
342     Ls_mod(i+3)=0.1512*kcorrF+0.8798;
343 elseif kcorrF >10 && kcorrF <=100
344     Ls_mod(i+3)=0.0601*kcorrF+2.2133;
345 elseif kcorrF >100 && kcorrF <=1000
346     Ls_mod(i+3)=-0.000009*kcorrF^2+ 0.031*kcorrF+5.7333;
347 elseif kcorrF >1000
348     Ls_mod(i+3)=0.012*kcorrF+16;
349 end
350 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
351 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
352 % obtencion final del valor final del modulo de reaccion efectivo de la
353 % subrasante
354 % valores de Ls para cada modelo matematico respectivamente

```



```
355 vector13=[0 1 2 3];
356 % interpolacion pra la obtencion de kefe
357 for i=1:1:4
358     if Ls>=vector13(i) && Ls<=vector13(i+1)
359         kefe=Ls_mod(i)-(Ls-vector13(i))*(Ls_mod(i)-Ls_mod(i+1))/(vector13(i
360             +1)-vector13(i));
361         break
362     end
363 end
```

I.4. Líneas de código de Matlab del análisis estadístico del método de la PCA

Listing I.14: Función METODOLINEAL_PCA

```
1 clear all
2 close all
3 %f+99 n r MR Mr Ks k N MatfatigaT(f) MaterosionT(f)
4 load('MDATOSGM.mat')
5 load('MDATOSCM.mat')
6
7 load('MDATOS.mat')
8 load('MDATOSC.mat')
9
10 %transformacion de muestra a matriz codificado
11 for i=1:972
12     if MDATOSGM(i,2)==20
13         nG(i,1)=-1;
14     elseif MDATOSGM(i,2)==30
15         nG(i,1)=0;
16     elseif MDATOSGM(i,2)==40
17         nG(i,1)=1;
18     end
19     if MDATOSCM(i,2)==20
20         nC(i,1)=-1;
21     elseif MDATOSCM(i,2)==30
22         nC(i,1)=0;
23     elseif MDATOSCM(i,2)==40
24         nC(i,1)=1;
25     end
26
27
28     if MDATOSGM(i,3)==0.01
29         rG(i,1)=-1;
30     elseif MDATOSGM(i,3)==0.035
31         rG(i,1)=0;
32     elseif MDATOSGM(i,3)==0.06
33         rG(i,1)=1;
34     end
35     if MDATOSCM(i,3)==0.01
```



```
36     rC(i,1)=-1;
37     elseif MDATOSCM(i,3)==0.035
38         rC(i,1)=0;
39     elseif MDATOSCM(i,3)==0.06
40         rC(i,1)=1;
41     end
42
43
44     if MDATOSGM(i,4)==550
45         MRG(i,1)=-1;
46     elseif MDATOSGM(i,4)==600
47         MRG(i,1)=0;
48     elseif MDATOSGM(i,4)==650
49         MRG(i,1)=1;
50     end
51     if MDATOSCM(i,4)==550
52         MRC(i,1)=-1;
53     elseif MDATOSCM(i,4)==600
54         MRC(i,1)=0;
55     elseif MDATOSCM(i,4)==650
56         MRC(i,1)=1;
57     end
58
59
60     if MDATOSGM(i,5)==20
61         MrG(i,1)=-1;
62     elseif MDATOSGM(i,5)==50
63         MrG(i,1)=0;
64     elseif MDATOSGM(i,5)==80
65         MrG(i,1)=1;
66     end
67     if MDATOSCM(i,5)==20
68         MrC(i,1)=-1;
69     elseif MDATOSCM(i,5)==40
70         MrC(i,1)=0;
71     elseif MDATOSCM(i,5)==60
72         MrC(i,1)=1;
73     end
74
75
76     if MDATOSGM(i,6)==100
77         KsG(i,1)=-1;
78     elseif MDATOSGM(i,6)==200
79         KsG(i,1)=0;
80     elseif MDATOSGM(i,6)==300
81         KsG(i,1)=1;
82     end
83     if MDATOSCM(i,6)==100
84         KsC(i,1)=-1;
85     elseif MDATOSCM(i,6)==175
86         KsC(i,1)=0;
87     elseif MDATOSCM(i,6)==250
88         KsC(i,1)=1;
89     end
90 end
91
```



```
92 CODG=[MDATOSGM(1:972,1) nG rG MRG MrG KsG];
93 CODC=[MDATOSCM(1:972,1) nC rC MRC MrC KsC];
94
95 % aplicacion de metodo lineal en matriz codificada GRANULAR
96 codificadoG1=LinearModel. fit (CODG(1:243,2:6),CODG(1:243,1), 'quadratic') %CON
    BERMA CON PASADOR
97 codificadoG2=LinearModel. fit (CODG(244:486,2:6),CODG(244:486,1), 'quadratic')
    %CON BERMA SIN PASADOR
98 codificadoG3=LinearModel. fit (CODG(487:729,2:6),CODG(487:729,1), 'quadratic')
    %SIN BERMA CON PASADOR
99 codificadoG4=LinearModel. fit (CODG(730:972,2:6),CODG(730:972,1), 'quadratic')
    %SIN BERMA SIN PASADOR
100 % aplicacion metodo lineal en matriz codificada CEMENTADO
101 codificadoC1=LinearModel. fit (CODC(1:243,2:6),CODC(1:243,1), 'quadratic') %CON
    BERMA CON PASADOR
102 codificadoC2=LinearModel. fit (CODC(244:486,2:6),CODC(244:486,1), 'quadratic')
    %CON BERMA SIN PASADOR
103 codificadoC3=LinearModel. fit (CODC(487:729,2:6),CODC(487:729,1), 'quadratic')
    %SIN BERMA CON PASADOR
104 codificadoC4=LinearModel. fit (CODC(730:972,2:6),CODC(730:972,1), 'quadratic')
    %SIN BERMA SIN PASADOR
105
106
107
108
109
110 % aplicacion metodo lineal en matriz real GRANULAR
111 %CON BERMA CON PASADOR
112 parametrosG1=LinearModel. fit (MDATOSGM(1:243,2:6),MDATOSGM(1:243,1), 'y~_1+_
    _x1+_x2+_x3+_x4+_x5+_x1*x2+_x1*x3+_x1*x4+_x1*x5+_x2*x3+_x2*x4+_x3*
    x4+_x3*x5+_x4*x5+_x1^2+_x3^2+_x4^2+_x5^2');
113 %CON BERMA SIN PASADOR
114 parametrosG2=LinearModel. fit (MDATOSGM(244:486,2:6),MDATOSGM(244:486,1), 'y~_
    _1+_x1+_x2+_x3+_x4+_x5+_x1*x2+_x1*x3+_x2*x3+_x3*x4+_x3*x5+_x4
    *x5+_x3^2+_x4^2');
115 %SIN BERMA CON PASADOR
116 parametrosG3=LinearModel. fit (MDATOSGM(487:729,2:6),MDATOSGM(487:729,1), 'y~_
    _1+_x1+_x2+_x3+_x4+_x5+_x1*x2+_x1*x3+_x1*x4+_x2*x4+_x3*x4+_x3*x5
    _+_x4*x5+_x1^2+_x2^2+_x3^2+_x4^2+_x5^2');
117 %SIN BERMA SIN PASADOR
118 parametrosG4=LinearModel. fit (MDATOSGM(730:972,2:6),MDATOSGM(730:972,1), 'y~_
    _1+_x1+_x2+_x3+_x4+_x5+_x1*x2+_x1*x3+_x1*x4+_x2*x3+_x3*x4+_x3*x5
    _+_x4*x5+_x1^2+_x2^2+_x3^2+_x4^2');
119
120 % aplicacion metodo lineal en matriz real CEMENTADO
121 %CON BERMA CON PASADOR
122 parametrosC1=LinearModel. fit (MDATOSCM(1:243,2:6),MDATOSCM(1:243,1), 'y~_1+_
    _x1+_x2+_x3+_x4+_x5+_x1*x2+_x3*x4+_x3*x5+_x4*x5+_x1^2+_x2^2+_x3
    ^2+_x4^2+_x5^2');
123 %CON BERMA SIN PASADOR
124 parametrosC2=LinearModel. fit (MDATOSCM(244:486,2:6),MDATOSCM(244:486,1), 'y~_
    _1+_x1+_x2+_x3+_x4+_x5+_x1*x2+_x1*x3+_x2*x3+_x3*x4+_x3*x5+_x1
    ^2+_x3^2+_x4^2+_x5^2');
125 %SIN BERMA CON PASADOR
```



```

126 parametrosC3=LinearModel. fit (MDATOSCM(487:729 ,2:6) ,MDATOSCM(487:729 ,1) , 'y_~
    1_+_x1_+_x2_+_x3_+_x4_+_x5_+_x1*x2_+_x1*x3_+_x1*x4+_x1*x5+_x2*x3+_x2*x4+_x2
    *x5_+_x3*x4_+_x3*x5_+_x4*x5+_x3^2_+_x4^2+_x5^2')
127 % SIN BERMA SIN PASADOR
128 parametrosC4=LinearModel. fit (MDATOSCM(730:972 ,2:6) ,MDATOSCM(730:972 ,1) , 'y_~
    1_+_x1_+_x2_+_x3_+_x4_+_x5_+_x1*x2_+_x1*x3_+_x1*x4+_x1*x5+_x2*x3+_x2*x4+_x2
    *x5_+_x3*x4_+_x3*x5_+_x4*x5+_x2^2_+_x3^2_+_x4^2+_x5^2')
129
130
131
132
133
134
135
136
137
138
139 %%%%%%%%%%      COMPROBACION DEL METODO      %%%%%%%%%%%
140
141 % granular
142 j=0;
143 for i=randi([2 ,5669] ,1 ,10)
144     j=j+1;
145     h=383.384+0.61154*MDATOS(i ,2) +52.09876*MDATOS(i ,3) -0.5258*MDATOS(i ,4)
        -1.06869*MDATOS(i ,5) -0.067099*MDATOS(i ,6)  +3.6296*MDATOS(i ,2) *MDATOS
        (i ,3)  -0.00037*MDATOS(i ,2) *MDATOS(i ,4)  -0.000648 *MDATOS(i ,2) *MDATOS
        (i ,5)  -0.0000926*MDATOS(i ,2) *MDATOS(i ,6) -0.0963*MDATOS(i ,3) *MDATOS(i
        ,4)  -0.2469 *MDATOS(i ,3) *MDATOS(i ,5) +0.00035*MDATOS(i ,4) *MDATOS(i ,5)
        +0.000037*MDATOS(i ,4) *MDATOS(i ,6)+ 0.000426*MDATOS(i ,5) *MDATOS(i ,6)
        -0.00235* MDATOS(i ,2) ^2 +0.000277*MDATOS(i ,4) ^2 + 0.00408*MDATOS(i
        ,5) ^2 -0.000029*MDATOS(i ,6) ^2      ;
146     maG1=[MDATOS(i ,2) MDATOS(i ,3) MDATOS(i ,4) MDATOS(i ,5) MDATOS(i ,6)
        MDATOS(i ,1) h];
147     comprobG1(j ,:)=maG1;
148 end
149 j=0;
150 for w=randi([5671 ,11340] ,1 ,10)
151     j=j+1;
152     h=767.60466 -2.08432*MDATOS(w ,2) -739.753*MDATOS(w ,3) -1.64598*MDATOS(w
        ,4) -1.7674*MDATOS(w ,5) -0.13525*MDATOS(w ,6) +7.62963*MDATOS(w ,2) *
        MDATOS(w ,3) +0.00394*MDATOS(w ,2) *MDATOS(w ,4)  + 1.1111 *MDATOS(w ,3) *
        MDATOS(w ,4)  +0.00143*MDATOS(w ,4) *MDATOS(w ,5)  + 0.00012*MDATOS(w ,4) *
        MDATOS(w ,6)+ 0.00058*MDATOS(w ,5) *MDATOS(w ,6)+ 0.001079*MDATOS(w ,4) ^2
        +0.00456 *MDATOS(w ,5) ^2      ;
153     maG2=[MDATOS(w ,2) MDATOS(w ,3) MDATOS(w ,4) MDATOS(w ,5) MDATOS(w ,6)
        MDATOS(w ,1) h];
154     comprobG2(j ,:)=maG2;
155 end
156 j=0;
157 for x=randi([11341 ,17010] ,1 ,10)
158     j=j+1;
159     h=436.8548 +0.69056*MDATOS(x ,2) -27.9012*MDATOS(x ,3) -0.5799*MDATOS(x ,4)
        -1.2378*MDATOS(x ,5) -0.08556*MDATOS(x ,6)+ 3.9999 *MDATOS(x ,2) *MDATOS(
        x ,3)  -0.0003889*MDATOS(x ,2) *MDATOS(x ,4) -0.00071 *MDATOS(x ,2) *MDATOS(
        x ,5)  -0.14815 *MDATOS(x ,3) *MDATOS(x ,5)+ 0.000457*MDATOS(x ,4) *MDATOS(
        x ,5)+ 0.0000519*MDATOS(x ,4) *MDATOS(x ,6)+ 0.00046*MDATOS(x ,5) *MDATOS(

```



```

    x,6) -0.00346 *MDATOS(x,2)^2 + 246.9136*MDATOS(x,3)^2 +0.000298 *
    MDATOS(x,4)^2 + 0.00453 *MDATOS(x,5)^2 -0.000027 *MDATOS(x,6)^2;
160 maG3=[MDATOS(x,2) MDATOS(x,3) MDATOS(x,4) MDATOS(x,5) MDATOS(x,6)
    MDATOS(x,1) h];
161 comprobG3(j,:) =maG3;
162 end
163 j=0;
164 for y=randi([17011,22680],1,10)
165     j=j+1;
166     h=780.25343-3.4397*MDATOS(y,2) -1276.1728*MDATOS(y,3) -1.4719*MDATOS(y,4)
        -1.7725*MDATOS(y,5) -0.1343*MDATOS(y,6) +13.074*MDATOS(y,2)*MDATOS(y
        ,3) + 0.00537*MDATOS(y,2)*MDATOS(y,4) +0.001481*MDATOS(y,2)*MDATOS(y
        ,5) +1.637*MDATOS(y,3)*MDATOS(y,4) + 0.001179*MDATOS(y,4)*MDATOS(y,5)
        +0.00011*MDATOS(y,4)*MDATOS(y,6) + 0.000574*MDATOS(y,5)*MDATOS(y,6)
        +0.005494* MDATOS(y,2)^2 +1382.716*MDATOS(y,3)^2 +0.00086*MDATOS(y
        ,4)^2 +0.00499*MDATOS(y,5)^2;
167     maG4=[MDATOS(y,2) MDATOS(y,3) MDATOS(y,4) MDATOS(y,5) MDATOS(y,6)
        MDATOS(y,1) h];
168     comprobG4(j,:) =maG4;
169 end
170
171
172 % cementada
173 j=0;
174 for z=randi([2,3150],1,10)
175     j=j+1;
176     h=409.0884 +0.3393*MDATOSC(z,2) -51.9753*MDATOSC(z,3) -0.6167*MDATOSC(z
        ,4) -1.1944*MDATOSC(z,5) -0.262*MDATOSC(z,6) + 3.8148 *MDATOSC(z,2)*
        MDATOSC(z,3) + 0.000417*MDATOSC(z,4)*MDATOSC(z,5) + 0.000116 *
        MDATOSC(z,4)*MDATOSC(z,6) + 0.0007037 *MDATOSC(z,5)*MDATOSC(z,6)
        -0.0028395 *MDATOSC(z,2)^2 +345.6790 *MDATOSC(z,3)^2 + 0.000346*
        MDATOSC(z,4)^2 + 0.00591*MDATOSC(z,5)^2 + 0.0002129*MDATOSC(z,6)^2;
177     maC1=[MDATOSC(z,2) MDATOSC(z,3) MDATOSC(z,4) MDATOSC(z,5) MDATOSC(z,6)
        MDATOSC(z,1) h];
178     comprobC1(j,:) =maC1;
179 end
180 j=0;
181
182 for a=randi([3151,6300],1,10)
183     j=j+1;
184     h=503.03237 -0.97074*MDATOSC(a,2) -449.8765*MDATOSC(a,3) -0.9676*MDATOSC(
        a,4) -1.2367*MDATOSC(a,5) -0.26557*MDATOSC(a,6) +7.6296 *MDATOSC(a,2)*
        MDATOSC(a,3) +0.002426 *MDATOSC(a,2)*MDATOSC(a,4) +0.64444 *MDATOSC(a
        ,3)*MDATOSC(a,4) + 0.001148 *MDATOSC(a,4)*MDATOSC(a,5) + 0.0002815*
        MDATOSC(a,4)*MDATOSC(a,6) -0.003086 *MDATOSC(a,2)^2+ 0.000617 *
        MDATOSC(a,4)^2 + 0.003441 *MDATOSC(a,5)^2 + 0.0000702*MDATOSC(a,6)
        ^2;
185     maC2=[MDATOSC(a,2) MDATOSC(a,3) MDATOSC(a,4) MDATOSC(a,5) MDATOSC(a,6)
        MDATOSC(a,1) h];
186     comprobC2(j,:) =maC2;
187 end
188 j=0;
189 for b=randi([6301,9450],1,10)
190     j=j+1;
191     h=536.0655-0.59753*MDATOSC(b,2) -312.34568*MDATOSC(b,3) -0.834247*
        MDATOSC(b,4) -1.67435*MDATOSC(b,5) -0.3634*MDATOSC(b,6) + 5.3704*
```



```

MDATOSC(b,2)*MDATOSC(b,3) +0.0011*MDATOSC(b,2)*MDATOSC(b,4)
+0.00185*MDATOSC(b,2)*MDATOSC(b,5) +0.0003827*MDATOSC(b,2)*
MDATOSC(b,6) +0.36296*MDATOSC(b,3)*MDATOSC(b,4) +0.5370*MDATOSC(b
,3)*MDATOSC(b,5) +0.12345*MDATOSC(b,3)*MDATOSC(b,6) +0.000879*
MDATOSC(b,4)*MDATOSC(b,5) +0.00022*MDATOSC(b,4)*MDATOSC(b,6)
+0.000667 *MDATOSC(b,5)*MDATOSC(b,6) +0.0004543 *MDATOSC(b,4) ^2
+0.00682*MDATOSC(b,5) ^2 + 0.00023*MDATOSC(b,6) ^2 ;
192 maC3=[MDATOSC(b,2) MDATOSC(b,3) MDATOSC(b,4) MDATOSC(b,5) MDATOSC(b,6)
MDATOSC(b,1) h];
193 comprobC3(j,:) =maC3;
194 end
195 j=0;
196 for c=randi([9451,12600],1,10)
197 j=j+1;
198 h=716.8081 -2.7558*MDATOSC(c,2) -1005.358*MDATOSC(c,3) -1.3678*MDATOSC(c
,4) -1.9288*MDATOSC(c,5) -0.4406*MDATOSC(c,6) +12.7778*MDATOSC(c,2)*
MDATOSC(c,3)+ 0.004667*MDATOSC(c,2)*MDATOSC(c,4) +0.00319*MDATOSC(c
,2)*MDATOSC(c,5) +0.00077*MDATOSC(c,2)*MDATOSC(c,6) +1.18519 *MDATOSC
(c,3)*MDATOSC(c,4) +0.7778*MDATOSC(c,3)*MDATOSC(c,5) +0.19753*MDATOSC(
c,3)*MDATOSC(c,6) +0.00159*MDATOSC(c,4)*MDATOSC(c,5)+ 0.000412*
MDATOSC(c,4)*MDATOSC(c,6) + 0.000574*MDATOSC(c,5)*MDATOSC(c,6) +
928.3951*MDATOSC(c,3)^2 +0.000817*MDATOSC(c,4) ^2 + 0.00529*MDATOSC(
c,5)^2 +0.0001657*MDATOSC(c,6)^2;
199 maC4=[MDATOSC(c,2) MDATOSC(c,3) MDATOSC(c,4) MDATOSC(c,5) MDATOSC(c,6)
MDATOSC(c,1) h];
200 comprobC4(j,:) =maC4;
201 end

```

Listing I.15: Función FIG_COMPROB_PCA

```

1 % crecion de las figuras espesor de metodo vs modelo lineal
2 clear all % limpiar todas las variables
3 close all % limpiar todas las figuras
4 load('comprobG1.mat'); load('comprobG2.mat');; load('comprobG3.mat');load('
comprobG4.mat');
5 load('comprobC1.mat'); load('comprobC2.mat');; load('comprobC3.mat');load('
comprobC4.mat');
6 % caso 1
7 lmG1 = LinearModel.fit(comprobG1(:,6),comprobG1(:,7),'linear') % aplico el
metodo lineal entre espesor de metodo vs modelo lineal
8 a = -4.340629;
9 b = 1.028818;
10 f = @(x) a+b*x;
11 ezplot(f, 120, 165);hold on % grafico la funcion obtenida despues del
metodo lineal
12 plot(comprobG1(:,6),comprobG1(:,7),'bo'); hold on
13 xlabel('Espesor_(h)_obtenido_del_Método_de_PCA','FontName','Arial','
FontSize',13);
14 ylabel('Predicción_de_Espesor_(h)','FontName','Arial','FontSize',13);
15 saveas(gcf,['Fig_G' num2str(1)],'jpeg')
16 close all
17 % caso 2
18 lmG2 = LinearModel.fit(comprobG2(:,6),comprobG2(:,7),'linear')

```



```
19     a = -5.135259;
20     b = 1.036957;
21     f = @(x) a+b*x;
22     ezplot( f, 125, 165);hold on
23     plot(comprobG2(:,6),comprobG2(:,7),'bo'); hold on
24     xlabel('Espesor_(h)_obtenido_del_Método_de_PCA','FontName','Arial','
        FontSize',13);
25     ylabel('Predicción_de_Espesor_(h)','FontName','Arial','FontSize',13);
26     saveas(gcf,['Fig_G' num2str(2)],'jpeg')
27     close all
28     % caso 3
29     lmG3 = LinearModel.fit(comprobG3(:,6),comprobG3(:,7),'linear')
30     a = -0.360399;
31     b = 0.99772;
32     f = @(x) a+b*x;
33     ezplot( f, 145, 205);hold on
34     plot(comprobG3(:,6),comprobG3(:,7),'bo'); hold on
35     xlabel('Espesor_(h)_obtenido_del_Método_de_PCA','FontName','Arial','
        FontSize',13);
36     ylabel('Predicción_de_Espesor_(h)','FontName','Arial','FontSize',13);
37     saveas(gcf,['Fig_G' num2str(3)],'jpeg')
38     close all
39     % caso 4
40     lmG4 = LinearModel.fit(comprobG4(:,6),comprobG4(:,7),'linear')
41     a = -10.16755;
42     b = 1.04787;
43     f = @(x) a+b*x;
44     ezplot( f, 150, 200);hold on
45     plot(comprobG4(:,6),comprobG4(:,7),'bo'); hold on
46     xlabel('Espesor_(h)_obtenido_del_Método_de_PCA','FontName','Arial','
        FontSize',13);
47     ylabel('Predicción_de_Espesor_(h)','FontName','Arial','FontSize',13);
48     saveas(gcf,['Fig_G' num2str(4)],'jpeg')
49     close all
50     % caso 5
51     lmC1 = LinearModel.fit(comprobC1(:,6),comprobC1(:,7),'linear')
52     a = 6.7933830;
53     b = 0.94260;
54     f = @(x) a+b*x;
55     ezplot( f, 100, 140);hold on
56     plot(comprobC1(:,6),comprobC1(:,7),'bo'); hold on
57     xlabel('Espesor_(h)_obtenido_del_Método_de_PCA','FontName','Arial','
        FontSize',13);
58     ylabel('Predicción_de_Espesor_(h)','FontName','Arial','FontSize',13);
59     saveas(gcf,['Fig_C' num2str(1)],'jpeg')
60     close all
61     % caso 6
62     lmC2 = LinearModel.fit(comprobC2(:,6),comprobC2(:,7),'linear')
63     a = 0.598077;
64     b = 0.990512;
65     f = @(x) a+b*x;
66     ezplot( f, 120, 155);hold on
67     plot(comprobC2(:,6),comprobC2(:,7),'bo'); hold on
68     xlabel('Espesor_(h)_obtenido_del_Método_de_PCA','FontName','Arial','
        FontSize',13);
69     ylabel('Predicción_de_Espesor_(h)','FontName','Arial','FontSize',13);
```



```

70 saveas(gcf, ['Fig_C' num2str(2)], 'jpeg')
71 close all
72 % caso 7
73 lmC3 = LinearModel.fit(comprobC3(:,6),comprobC3(:,7), 'linear')
74     a = 2.2219467;
75     b = 0.985118;
76     f = @(x) a+b*x;
77 ezplot(f, 130, 165);hold on
78 plot(comprobC3(:,6),comprobC3(:,7), 'bo'); hold on
79 xlabel('Espesor_(h)_obtenido_del_Método_de_PCA', 'FontName', 'Arial', '
    FontSize', 13);
80 ylabel('Predicción_de_Espesor_(h)', 'FontName', 'Arial', 'FontSize', 13);
81 saveas(gcf, ['Fig_C' num2str(3)], 'jpeg')
82 close all
83 % caso 8
84 lmC4 = LinearModel.fit(comprobC4(:,6),comprobC4(:,7), 'linear')
85     a = -4.92388;
86     b = 1.03283;
87     f = @(x) a+b*x;
88 ezplot(f, 140, 170);hold on
89 plot(comprobC4(:,6),comprobC4(:,7), 'bo'); hold on
90 xlabel('Espesor_(h)_obtenido_del_Método_de_PCA', 'FontName', 'Arial', '
    FontSize', 13);
91 ylabel('Predicción_de_Espesor_(h)', 'FontName', 'Arial', 'FontSize', 13);
92 saveas(gcf, ['Fig_C' num2str(4)], 'jpeg')
93 close all

```

Listing I.16: Función VARIAC_PARAM_PCA

```

1 % generacion de la graficas para la evaluacion del comportamiento de cada
  parametro
2
3 clear all % limpia variables
4 close all % limpia figuras
5
6 % granular con berma con pasador
7 j=0;
8 n=20;
9 r=0.035;
10 MR=555;
11 Mr=55;
12 Ds=203; % Ds=Ks
13 % funcion de n
14 for n=20:40
15     j=j+1;
16     h1=383.384+0.61154*n+52.0987654*r-0.5258273*MR-1.0687*Mr-0.0671*Ds
        +3.62962*n*r -0.0003704*n*MR-0.00065 *n*Mr -0.000093*n*Ds-0.0963*r*
        MR -0.246914*r*Mr+0.000351*MR*Mr+0.000037*MR*Ds+ 0.0004259*Mr*Ds
        -0.002346*n^2 +0.0002765*MR^2 + 0.00408*Mr^2 -0.00003*Ds^2 ;
17     hG1n(j, :) = h1;
18     h2=767.605 -2.08432*n-739.753*r-1.64598*MR-1.7674*Mr-0.135246*Ds
        +7.62963*n*r+0.004*n*MR+ 1.111111 *r*MR +0.00144*MR*Mr+ 0.00012222*
        MR*Ds+ 0.0005803*Mr*Ds+ 0.00107901*MR^2 +0.0045611 *Mr^2 ;

```



```
19 hG2n(j,:) = h2;
20 h3=436.84 +0.6905*n-27.901235*r-0.5799383*MR-1.237785*Mr-0.08556*Ds+
    3.9999 *n*r -0.0003889*n*MR-0.00070988 *n*Mr -0.1482 *r*Mr+
    0.0004567*MR*Mr+ 0.0000519*MR*Ds+ 0.0004566*Mr*Ds -0.00346 *n^2 +
    246.913*r^2 +0.000298 *MR^2 + 0.004533 *Mr^2 -0.0000272 *Ds^2;
21 hG3n(j,:) = h3;
22 h4=780.254-3.4397*n-1276.1728*r-1.471*MR-1.77*Mr-0.134*Ds +13.0741*n*r+
    0.005371*n*MR+0.0015*n*Mr+1.637*r*MR+ 0.00117901*MR*Mr+0.0001111*MR
    *Ds+ 0.0005741*Mr*Ds+0.0055* n^2 +1382.7161*r^2 +0.0008642*MR^2
    +0.0049932*Mr^2;
23 hG4n(j,:) = h4;
24 nG(j,:) =n;
25
26 end
27
28 %se grafica n vs h para los 4 casos
29 plot( nG,[hG1n,hG2n,hG3n,hG4n]); grid on
30 xlabel('Periodo_de_diseño_n_(años)','FontName','Arial','FontSize',12);
31 ylabel('Espesor_h_(mm)','FontName','Arial','FontSize',12);
32 legend('Berma_y_pasador','Berma_sin_pasador','Sin_berma_con_pasador','Sin_
    berma_y_pasador','Location','northeastoutside','Orientation','vertical')
33 saveas(gcf,['Fig_nG' num2str(1)], 'jpeg')
34 close all
35 j=0;
36 n=20;
37 for r=0.01:0.005:0.06
38     j=j+1;
39     h1=383.384+0.61154*n+52.0987654*r-0.5258273*MR-1.0687*Mr-0.0671*Ds
        +3.62962*n*r -0.0003704*n*MR-0.00065 *n*Mr -0.000093*n*Ds-0.0963*r*
        MR -0.246914*r*Mr+0.000351*MR*Mr+0.000037*MR*Ds+ 0.0004259*Mr*Ds
        -0.002346*n^2 +0.0002765*MR^2 + 0.00408*Mr^2 -0.00003*Ds^2 ;
40     hG1r(j,:) = h1;
41     h2=767.605 -2.08432*n-739.753*r-1.64598*MR-1.7674*Mr-0.135246*Ds
        +7.62963*n*r+0.004*n*MR+ 1.111111 *r*MR +0.00144*MR*Mr+ 0.00012222*
        MR*Ds+ 0.0005803*Mr*Ds+ 0.00107901*MR^2 +0.0045611 *Mr^2 ;
42     hG2r(j,:) = h2;
43     h3=436.84 +0.6905*n-27.901235*r-0.5799383*MR-1.237785*Mr-0.08556*Ds+
        3.9999 *n*r -0.0003889*n*MR-0.00070988 *n*Mr -0.1482 *r*Mr+
        0.0004567*MR*Mr+ 0.0000519*MR*Ds+ 0.0004566*Mr*Ds -0.00346 *n^2 +
        246.913*r^2 +0.000298 *MR^2 + 0.004533 *Mr^2 -0.0000272 *Ds^2;
44     hG3r(j,:) = h3;
45     h4=780.2534-3.4397*n-1276.17284*r-1.471925*MR-1.772566*Mr-0.13432*Ds
        +13.0741*n*r+ 0.00537037*n*MR+0.00148*n*Mr+1.637037*r*MR+
        0.00117901*MR*Mr+0.0001111*MR*Ds+ 0.0005741*Mr*Ds+0.00549* n^2
        +1382.716*r^2 +0.0008642*MR^2 +0.0049932*Mr^2;
46     hG4r(j,:) = h4;
47     rG(j,:) =r;
48
49 end
50 %se grafica r vs h para los 4 casos
51 plot( rG,[hG1r,hG2r,hG3r,hG4r]); grid on
52 xlabel('Tasa_de_crecimiento_anual_de_transito_r','FontName','Arial','
    FontSize',12);
53 ylabel('Espesor_h_(mm) ','FontName','Arial','FontSize',12);
54 legend('Berma_y_pasador','Berma_sin_pasador','Sin_berma_con_pasador','Sin_
    berma_y_pasador','Location','northeastoutside','Orientation','vertical')
```



```

55 saveas(gcf,['Fig_rG' num2str(1)], 'jpeg')
56 close all
57 j=0;
58 r=0.035;
59 for MR=550:650
60     j=j+1;
61     h1=383.384+0.61154*n+52.0987654*r-0.5258273*MR-1.0687*Mr-0.0671*D_s
        +3.62962*n*r -0.0003704*n*MR-0.00065 *n*Mr -0.000093*n*D_s-0.0963*r*
        MR -0.246914*r*Mr+0.000351*MR*Mr+0.000037*MR*D_s+ 0.0004259*Mr*D_s
        -0.002346*n^2 +0.0002765*MR^2 + 0.00408*Mr^2 -0.00003*D_s^2 ;
62     hG1MR(j,:)= h1;
63     h2=767.605 -2.08432*n-739.753*r-1.64598*MR-1.7674*Mr-0.135246*D_s
        +7.62963*n*r+0.004*n*MR+ 1.111111 *r*MR +0.00144*MR*Mr+ 0.00012222*
        MR*D_s+ 0.0005803*Mr*D_s+ 0.00107901*MR^2 +0.0045611 *Mr^2 ;
64     hG2MR(j,:)= h2;
65     h3=436.84 +0.6905*n-27.901235*r-0.5799383*MR-1.237785*Mr-0.08556*D_s+
        3.9999 *n*r -0.0003889*n*MR-0.00070988 *n*Mr -0.1482 *r*Mr+
        0.0004567*MR*Mr+ 0.0000519*MR*D_s+ 0.0004566*Mr*D_s -0.00346 *n^2 +
        246.913*r^2 +0.000298 *MR^2 + 0.004533 *Mr^2 -0.0000272 *D_s^2;
66     hG3MR(j,:)= h3;
67     h4=780.254-3.4397*n-1276.1728*r-1.471*MR-1.77*Mr-0.134*D_s +13.0741*n*r+
        0.005371*n*MR+0.0015*n*Mr+1.637*r*MR+ 0.00117901*MR*Mr+0.0001111*MR
        *D_s+ 0.0005741*Mr*D_s+0.0055* n^2 +1382.7161*r^2 +0.0008642*MR^2
        +0.0049932*Mr^2;
68     hG4MR(j,:)= h4;
69     MRG(j,:)=MR;
70
71 end
72 %se grafica MR vs h para los 4 casos
73 plot( MRG,[hG1MR,hG2MR,hG3MR,hG4MR]); grid on
74 xlabel('Resistencia a la flexión del concreto MR (psi)', 'FontName', 'Arial',
        'FontSize',12);
75 ylabel('Espesor h (mm)', 'FontName', 'Arial', 'FontSize',12);
76 legend('Berma y pasador', 'Berma sin pasador', 'Sin berma con pasador', 'Sin
        berma y pasador', 'Location', 'northeastoutside', 'Orientation', 'vertical')
77 saveas(gcf,['Fig_MRG' num2str(1)], 'jpeg')
78 close all
79 j=0;
80 MR=555;
81 for Mr=20:80
82     j=j+1;
83     h1=383.384+0.61154*n+52.0987654*r-0.5258273*MR-1.0687*Mr-0.0671*D_s
        +3.62962*n*r -0.0003704*n*MR-0.00065 *n*Mr -0.000093*n*D_s-0.0963*r*
        MR -0.246914*r*Mr+0.000351*MR*Mr+0.000037*MR*D_s+ 0.0004259*Mr*D_s
        -0.002346*n^2 +0.0002765*MR^2 + 0.00408*Mr^2 -0.00003*D_s^2 ;
84     hG1Mr(j,:)= h1;
85     h2=767.605 -2.08432*n-739.753*r-1.64598*MR-1.7674*Mr-0.135246*D_s
        +7.62963*n*r+0.004*n*MR+ 1.111111 *r*MR +0.00144*MR*Mr+ 0.00012222*
        MR*D_s+ 0.0005803*Mr*D_s+ 0.00107901*MR^2 +0.0045611 *Mr^2 ;
86     hG2Mr(j,:)= h2;
87     h3=436.84 +0.6905*n-27.901235*r-0.5799383*MR-1.237785*Mr-0.08556*D_s+
        3.9999 *n*r -0.0003889*n*MR-0.00070988 *n*Mr -0.1482 *r*Mr+
        0.0004567*MR*Mr+ 0.0000519*MR*D_s+ 0.0004566*Mr*D_s -0.00346 *n^2 +
        246.913*r^2 +0.000298 *MR^2 + 0.004533 *Mr^2 -0.0000272 *D_s^2;
88     hG3Mr(j,:)= h3;

```



```
89     h4=780.254-3.4397*n-1276.1728*r-1.471*MR-1.77*Mr-0.134*Ds +13.0741*n*r+
        0.005371*n*MR+0.0015*n*Mr+1.637*r*MR+ 0.00117901*MR*Mr+0.0001111*MR
        *Ds+ 0.0005741*Mr*Ds+0.0055* n2 +1382.7161*r2 +0.0008642*MR2
        +0.0049932*Mr2;
90     hG4Mr(j,:) = h4;
91     MrG(j,:) = Mr;
92
93 end
94 %se grafica Mr vs h para los 4 casos
95 plot ( MrG, [hG1Mr, hG2Mr, hG3Mr, hG4Mr] ); grid on
96 xlabel ( 'Módulo de reacción de la subrasante Mr (Mpa/m)', 'FontName', 'Arial',
        'FontSize', 12);
97 ylabel ( 'Espesor h (mm)', 'FontName', 'Arial', 'FontSize', 12);
98 legend ( 'Berma y pasador', 'Berma sin pasador', 'Sin berma con pasador', 'Sin
        berma y pasador', 'Location', 'northeastoutside', 'Orientation', 'vertical' )
99 saveas (gcf, ['Fig_Mr_G' num2str(1)], 'jpeg')
100 close all
101 j=0;
102 Mr=55;
103 for Ds=100:300
104     j=j+1;
105     h1=383.384+0.61154*n+52.0987654*r-0.5258273*MR-1.0687*Mr-0.0671*Ds
        +3.62962*n*r -0.0003704*n*MR-0.00065 *n*Mr -0.000093*n*Ds-0.0963*r*
        MR -0.246914*r*Mr+0.000351*MR*Mr+0.000037*MR*Ds+ 0.0004259*Mr*Ds
        -0.002346*n2 +0.0002765*MR2 + 0.00408*Mr2 -0.00003*Ds2 ;
106     hG1Ds(j,:) = h1;
107     h2=767.605 -2.08432*n-739.753*r-1.64598*MR-1.7674*Mr-0.135246*Ds
        +7.62963*n*r+0.004*n*MR+ 1.111111 *r*MR +0.00144*MR*Mr+ 0.00012222*
        MR*Ds+ 0.0005803*Mr*Ds+ 0.00107901*MR2 +0.0045611 *Mr2 ;
108     hG2Ds(j,:) = h2;
109     h3=436.84 +0.6905*n-27.901235*r-0.5799383*MR-1.237785*Mr-0.08556*Ds+
        3.9999 *n*r -0.0003889*n*MR-0.00070988 *n*Mr -0.1482 *r*Mr+
        0.0004567*MR*Mr+ 0.0000519*MR*Ds+ 0.0004566*Mr*Ds -0.00346 *n2 +
        246.913*r2 +0.000298 *MR2 + 0.004533 *Mr2 -0.0000272 *Ds2;
110     hG3Ds(j,:) = h3;
111     h4=780.254-3.4397*n-1276.1728*r-1.471*MR-1.77*Mr-0.134*Ds +13.0741*n*r+
        0.005371*n*MR+0.0015*n*Mr+1.637*r*MR+ 0.00117901*MR*Mr+0.0001111*MR
        *Ds+ 0.0005741*Mr*Ds+0.0055* n2 +1382.7161*r2 +0.0008642*MR2
        +0.0049932*Mr2;
112     hG4Ds(j,:) = h4;
113     DsG(j,:) = Ds;
114
115 end
116 %se grafica Ds vs h para los 4 casos
117 plot ( DsG, [hG1Ds, hG2Ds, hG3Ds, hG4Ds] ); grid on
118 xlabel ( 'Espesor de la Subbase Ds (mm)', 'FontName', 'Arial', 'FontSize', 12);
119 ylabel ( 'Espesor h (mm)', 'FontName', 'Arial', 'FontSize', 12);
120 legend ( 'Berma y pasador', 'Berma sin pasador', 'Sin berma con pasador', 'Sin
        berma y pasador', 'Location', 'northeastoutside', 'Orientation', 'vertical' )
121 saveas (gcf, ['Fig_DsG' num2str(1)], 'jpeg')
122 close all
123
124 Ds=203;
125 j=0
126 for n=20:40
127     j=j+1;
```



```

128     h1=409.0884 +0.3393*n-51.9753*r-0.6167*MR-1.1944*Mr-0.262*Ds+ 3.8148 *n
        *r + 0.000417*MR*Mr + 0.000116 *MR*Ds + 0.0007037 *Mr*Ds -0.0028395
        *n^2 +345.6790 *r^2 + 0.000346*MR^2 + 0.00591*Mr^2 + 0.0002129*Ds^2;
129     hC1n(j,:) = h1;
130     h2=503.03237 -0.97074*n-449.8765*r-0.9676*MR-1.2367*Mr-0.26557*Ds
        +7.6296 *n*r +0.002426 *n*MR+0.64444 *r*MR + 0.001148 *MR*Mr +
        0.0002815*MR*Ds -0.003086 *n^2+ 0.000617 *MR^2 + 0.003441 *Mr^2 +
        0.0000702*Ds^2;
131     hC2n(j,:) = h2;
132     h3=536.0655-0.59753*n-312.34568*r-0.834247*MR-1.67435*Mr-0.3634*Ds +
        5.3704*n*r+0.0011*n*MR+0.00185*n*Mr+0.0003827*n*Ds+0.36296*r*MR
        +0.5370*r*Mr+0.12345*r*Ds+0.000879*MR*Mr +0.00022*MR*Ds+0.000667 *Mr
        *Ds+0.0004543 *MR^2 +0.00682*Mr^2 + 0.00023*Ds^2;
133     hC3n(j,:) = h3;
134     h4=716.8081 -2.7558*n-1005.358*r-1.3678*MR-1.9288*Mr-0.4406*Ds+12.7778*
        n*r+ 0.004667*n*MR+0.00319*n*Mr+0.00077*n*Ds +1.18519 *r*MR+0.7778*r
        *Mr+0.19753*r*Ds+0.00159*MR*Mr+ 0.000412*MR*Ds+ 0.000574*Mr*Ds+
        928.3951*r^2 +0.000817*MR^2 + 0.00529*Mr^2 +0.0001657*Ds^2;
135     hC4n(j,:) = h4;
136     nC(j,:) =n;
137
138 end
139 %se grafica n vs h para los 4 casos
140 plot( nC,[hC1n,hC2n,hC3n,hC4n]); grid on
141 xlabel('Periodo de diseño (años)', 'FontName', 'Arial', 'FontSize',12);
142 ylabel('Espesor h (mm)', 'FontName', 'Arial', 'FontSize',12);
143 legend('Berma y pasador', 'Berma sin pasador', 'Sin berma con pasador', 'Sin
        berma y pasador', 'Location', 'northeastoutside', 'Orientation', 'vertical')
144 saveas(gcf, ['Fig_nC' num2str(1)], 'jpeg')
145 close all
146 j=0;
147 n=20;
148 for r=0.01:0.01:0.06
149     j=j+1;
150     h1=409.0884 +0.3393*n-51.9753*r-0.6167*MR-1.1944*Mr-0.262*Ds+ 3.8148 *n
        *r + 0.000417*MR*Mr + 0.000116 *MR*Ds + 0.0007037 *Mr*Ds -0.0028395
        *n^2 +345.6790 *r^2 + 0.000346*MR^2 + 0.00591*Mr^2 + 0.0002129*Ds^2;
151     hC1r(j,:) = h1;
152     h2=503.03237 -0.97074*n-449.8765*r-0.9676*MR-1.2367*Mr-0.26557*Ds
        +7.6296 *n*r +0.002426 *n*MR+0.64444 *r*MR + 0.001148 *MR*Mr +
        0.0002815*MR*Ds -0.003086 *n^2+ 0.000617 *MR^2 + 0.003441 *Mr^2 +
        0.0000702*Ds^2;
153     hC2r(j,:) = h2;
154     h3=536.0655-0.59753*n-312.34568*r-0.834247*MR-1.67435*Mr-0.3634*Ds +
        5.3704*n*r+0.0011*n*MR+0.00185*n*Mr+0.0003827*n*Ds+0.36296*r*MR
        +0.5370*r*Mr+0.12345*r*Ds+0.000879*MR*Mr +0.00022*MR*Ds+0.000667 *Mr
        *Ds+0.0004543 *MR^2 +0.00682*Mr^2 + 0.00023*Ds^2;
155     hC3r(j,:) = h3;
156     h4=716.8081 -2.7558*n-1005.358*r-1.3678*MR-1.9288*Mr-0.4406*Ds+12.7778*
        n*r+ 0.004667*n*MR+0.00319*n*Mr+0.00077*n*Ds +1.18519 *r*MR+0.7778*r
        *Mr+0.19753*r*Ds+0.00159*MR*Mr+ 0.000412*MR*Ds+ 0.000574*Mr*Ds+
        928.3951*r^2 +0.000817*MR^2 + 0.00529*Mr^2 +0.0001657*Ds^2;
157     hC4r(j,:) = h4;
158     rC(j,:) =r;
159
160 end

```



```
161 %se grafica r vs h para los 4 casos
162 plot( rC,[hC1r,hC2r,hC3r,hC4r]); grid on
163 xlabel('Tasa_de_crecimiento_anual_de_transito_r','FontName','Arial',
    'FontSize',12);
164 ylabel('Espesor_h(mm)','FontName','Arial','FontSize',12);
165 legend('Berma_y_pasador','Berma_sin_pasador','Sin_berma_con_pasador','Sin_
    berma_y_pasador','Location','northeastoutside','Orientation','vertical')
166 saveas(gcf,['Fig_rC' num2str(1)],'jpeg')
167 close all
168 j=0;
169 r=0.035;
170 for MR=550:650
171     j=j+1;
172     h1=409.0884 +0.3393*n-51.9753*r-0.6167*MR-1.1944*Mr-0.262*Ds+ 3.8148 *n
        *r + 0.000417*MR*Mr + 0.000116 *MR*Ds + 0.0007037 *Mr*Ds -0.0028395
        *n^2 +345.6790 *r^2 + 0.000346*MR^2 + 0.00591*Mr^2 + 0.0002129*Ds^2;
173     hC1MR(j,:)= h1;
174     h2=503.03237 -0.97074*n-449.8765*r-0.9676*MR-1.2367*Mr-0.26557*Ds
        +7.6296 *n*r +0.002426 *n*MR+0.64444 *r*MR + 0.001148 *MR*Mr +
        0.0002815*MR*Ds -0.003086 *n^2+ 0.000617 *MR^2 + 0.003441 *Mr^2 +
        0.0000702*Ds^2;
175     hC2MR(j,:)= h2;
176     h3=536.0655-0.59753*n-312.34568*r-0.834247*MR-1.67435*Mr-0.3634*Ds +
        5.3704*n*r+0.0011*n*MR+0.00185*n*Mr+0.0003827*n*Ds+0.36296*r*MR
        +0.5370*r*Mr+0.12345*r*Ds+0.000879*MR*Mr +0.00022*MR*Ds+0.000667 *Mr
        *Ds+0.0004543 *MR^2 +0.00682*Mr^2 + 0.00023*Ds^2;
177     hC3MR(j,:)= h3;
178     h4=716.8081 -2.7558*n-1005.358*r-1.3678*MR-1.9288*Mr-0.4406*Ds+12.7778*
        n*r+ 0.004667*n*MR+0.00319*n*Mr+0.00077*n*Ds +1.18519 *r*MR+0.7778*r
        *Mr+0.19753*r*Ds+0.00159*MR*Mr+ 0.000412*MR*Ds+ 0.000574*Mr*Ds+
        928.3951*r^2 +0.000817*MR^2 + 0.00529*Mr^2 +0.0001657*Ds^2;
179     hC4MR(j,:)= h4;
180     MRC(j,:)=MR;
181
182 end
183 %se grafica MR vs h para los 4 casos
184 plot( MRC,[hC1MR,hC2MR,hC3MR,hC4MR]); grid on
185 xlabel('Resistencia_a_la_flexión_del_concreto_MR(psi)','FontName','Arial',
    'FontSize',12);
186 ylabel('Espesor_h(mm)','FontName','Arial','FontSize',12);
187 legend('Berma_y_pasador','Berma_sin_pasador','Sin_berma_con_pasador','Sin_
    berma_y_pasador','Location','northeastoutside','Orientation','vertical')
188 saveas(gcf,['Fig_MRC' num2str(1)],'jpeg')
189 close all
190 j=0;
191 MR=555;
192 for Mr=20:60
193     j=j+1;
194     h1=409.0884 +0.3393*n-51.9753*r-0.6167*MR-1.1944*Mr-0.262*Ds+ 3.8148 *n
        *r + 0.000417*MR*Mr + 0.000116 *MR*Ds + 0.0007037 *Mr*Ds -0.0028395
        *n^2 +345.6790 *r^2 + 0.000346*MR^2 + 0.00591*Mr^2 + 0.0002129*Ds^2;
195     hC1Mr(j,:)= h1;
196     h2=503.03237 -0.97074*n-449.8765*r-0.9676*MR-1.2367*Mr-0.26557*Ds
        +7.6296 *n*r +0.002426 *n*MR+0.64444 *r*MR + 0.001148 *MR*Mr +
        0.0002815*MR*Ds -0.003086 *n^2+ 0.000617 *MR^2 + 0.003441 *Mr^2 +
        0.0000702*Ds^2;
```



```

197 hC2Mr(j,:) = h2;
198 h3 = 536.0655 - 0.59753*n - 312.34568*r - 0.834247*MR - 1.67435*Mr - 0.3634*Ds +
      5.3704*n*r + 0.0011*n*MR + 0.00185*n*Mr + 0.0003827*n*Ds + 0.36296*r*MR
      + 0.5370*r*Mr + 0.12345*r*Ds + 0.000879*MR*Mr + 0.00022*MR*Ds + 0.000667 *Mr
      *Ds + 0.0004543 *MR2 + 0.00682*Mr2 + 0.00023*Ds2;
199 hC3Mr(j,:) = h3;
200 h4 = 716.8081 - 2.7558*n - 1005.358*r - 1.3678*MR - 1.9288*Mr - 0.4406*Ds + 12.7778*
      n*r + 0.004667*n*MR + 0.00319*n*Mr + 0.00077*n*Ds + 1.18519 *r*MR + 0.7778*r
      *Mr + 0.19753*r*Ds + 0.00159*MR*Mr + 0.000412*MR*Ds + 0.000574*Mr*Ds +
      928.3951*r2 + 0.000817*MR2 + 0.00529*Mr2 + 0.0001657*Ds2;
201 hC4Mr(j,:) = h4;
202 MrC(j,:) = Mr;
203
204 end
205 %se grafica Mr vs h para los 4 casos
206 plot( MrC, [hC1Mr, hC2Mr, hC3Mr, hC4Mr] ); grid on
207 xlabel( 'Módulo de reacción de la subrasante Mr (Mpa/m)', 'FontName', 'Arial',
      'FontSize', 12);
208 ylabel( 'Espesor h (mm)', 'FontName', 'Arial', 'FontSize', 12);
209 legend( 'Berma y pasador', 'Berma sin pasador', 'Sin berma con pasador', 'Sin
      berma y pasador', 'Location', 'northeastoutside', 'Orientation', 'vertical' )
210 saveas(gcf, ['Fig_Mr_C' num2str(1)], 'jpeg')
211 close all
212 j = 0;
213 Mr = 55;
214 for Ds = 100:250
215     j = j + 1;
216     h1 = 409.0884 + 0.3393*n - 51.9753*r - 0.6167*MR - 1.1944*Mr - 0.262*Ds + 3.8148 *n
          *r + 0.000417*MR*Mr + 0.000116 *MR*Ds + 0.0007037 *Mr*Ds - 0.0028395
          *n2 + 345.6790 *r2 + 0.000346*MR2 + 0.00591*Mr2 + 0.0002129*Ds2;
217     hC1Ds(j,:) = h1;
218     h2 = 503.03237 - 0.97074*n - 449.8765*r - 0.9676*MR - 1.2367*Mr - 0.26557*Ds
          + 7.6296 *n*r + 0.002426 *n*MR + 0.64444 *r*MR + 0.001148 *MR*Mr +
          0.0002815*MR*Ds - 0.003086 *n2 + 0.000617 *MR2 + 0.003441 *Mr2 +
          0.0000702*Ds2;
219     hC2Ds(j,:) = h2;
220     h3 = 536.0655 - 0.59753*n - 312.34568*r - 0.834247*MR - 1.67435*Mr - 0.3634*Ds +
          5.3704*n*r + 0.0011*n*MR + 0.00185*n*Mr + 0.0003827*n*Ds + 0.36296*r*MR
          + 0.5370*r*Mr + 0.12345*r*Ds + 0.000879*MR*Mr + 0.00022*MR*Ds + 0.000667 *Mr
          *Ds + 0.0004543 *MR2 + 0.00682*Mr2 + 0.00023*Ds2;
221     hC3Ds(j,:) = h3;
222     h4 = 716.8081 - 2.7558*n - 1005.358*r - 1.3678*MR - 1.9288*Mr - 0.4406*Ds + 12.7778*
          n*r + 0.004667*n*MR + 0.00319*n*Mr + 0.00077*n*Ds + 1.18519 *r*MR + 0.7778*r
          *Mr + 0.19753*r*Ds + 0.00159*MR*Mr + 0.000412*MR*Ds + 0.000574*Mr*Ds +
          928.3951*r2 + 0.000817*MR2 + 0.00529*Mr2 + 0.0001657*Ds2;
223     hC4Ds(j,:) = h4;
224     DsC(j,:) = Ds;
225
226 end
227 %se grafica Ds vs h para los 4 casos
228 plot( DsC, [hC1Ds, hC2Ds, hC3Ds, hC4Ds] ); grid on
229 xlabel( 'Espesor de la Subbase Ds (mm)', 'FontName', 'Arial', 'FontSize', 12);
230 ylabel( 'Espesor h (mm)', 'FontName', 'Arial', 'FontSize', 12);
231 legend( 'Berma y pasador', 'Berma sin pasador', 'Sin berma con pasador', 'Sin
      berma y pasador', 'Location', 'northeastoutside', 'Orientation', 'vertical' )
232 saveas(gcf, ['Fig_DsC' num2str(1)], 'jpeg')

```

233 `close all`

I.5. Líneas de código de Matlab del análisis estadístico del método de la AASHTO

Listing I.17: Función METODOLINEAL_AASHTO

```
1 clear all % copia todas las variables
2 close all % crea todas las figuras
3 % llamado del las matrices con los resultados de las iteraciones completas
4 % y la matriz con los resultados de las iteraciones tomando en cuenta
5 % unicamente el maximo, medio y minimo de los rangos
6 load('matriz_MMM.mat')
7 load('matriz_final.mat')
8 % aplicacion del metodo experimental no lineal para la obtencion de los
9 % parametros reales, con un ajuste cuadratico
10 parametros_real=LinearModel.fit(matriz_MMM(1:6561,1:8),matriz_MMM(1:6561,9)
    , 'quadratic');
11 % codificacion de la matriz de iteracion con los valores maximo, medio y
12 % minimo de los rangos de los parametros, mediante el reemplazo de 1 por
13 % el maximo, 0 por el medio y -1 por el minimo
14 for i=1:1:6561
15     if matriz_MMM(i,1)==0.5
16         matriz_codificada(i,1)=-1;
17     elseif matriz_MMM(i,1)==0.95
18         matriz_codificada(i,1)=1;
19     elseif matriz_MMM(i,1)==0.725
20         matriz_codificada(i,1)=0;
21     end
22     if matriz_MMM(i,2)==4
23         matriz_codificada(i,2)=-1;
24     elseif matriz_MMM(i,2)==12
25         matriz_codificada(i,2)=1;
26     elseif matriz_MMM(i,2)==12
27         matriz_codificada(i,2)=0;
28     end
29     if matriz_MMM(i,3)==2
30         matriz_codificada(i,3)=-1;
31     elseif matriz_MMM(i,3)==12
32         matriz_codificada(i,3)=1;
33     elseif matriz_MMM(i,3)==11
34         matriz_codificada(i,3)=0;
35     end
36     if matriz_MMM(i,4)==20
37         matriz_codificada(i,4)=-1;
38     elseif matriz_MMM(i,4)==40
39         matriz_codificada(i,4)=1;
40     elseif matriz_MMM(i,4)==30
41         matriz_codificada(i,4)=0;
42     end
```



```

43     if matriz_MMM(i ,5)==0.8
44         matriz_codificada ( i ,5)=-1;
45     elseif matriz_MMM(i ,5)==1.0
46         matriz_codificada ( i ,5)=0;
47     else
48         matriz_codificada ( i ,5)=1;
49     end
50     if matriz_MMM(i ,6)==2.4
51         matriz_codificada ( i ,6)=-1;
52     elseif matriz_MMM(i ,6)==4.4
53         matriz_codificada ( i ,6)=1;
54     elseif matriz_MMM(i ,6)==3.4
55         matriz_codificada ( i ,6)=0;
56     end
57     if matriz_MMM(i ,7)==0
58         matriz_codificada ( i ,7)=-1;
59     elseif matriz_MMM(i ,7)==3
60         matriz_codificada ( i ,7)=1;
61     elseif matriz_MMM(i ,7)==1.5
62         matriz_codificada ( i ,7)=0;
63     end
64     if matriz_MMM(i ,8)==0.34
65         matriz_codificada ( i ,8)=-1;
66     elseif matriz_MMM(i ,8)==0.4
67         matriz_codificada ( i ,8)=1;
68     elseif matriz_MMM(i ,8)==0.37
69         matriz_codificada ( i ,8)=0;
70     end
71     matriz_codificada ( i ,9)=matriz_MMM(i ,9) ;
72 end
73 % aplicacion del metodo experimental no lineal a la matriz codificada para
74 % obtener los parametros codificados , con un ajuste cuadratico
75 parametros_codifiada=LinearModel. fit (matriz_codificada (1:6561 ,1:8) ,
76     matriz_codificada (1:6561 ,9) , 'quadratic ' )
77 % aplicacion del metodo experimental no lineal a la matriz de iteracion
78 % con los valores maximo, medio y minimo de los rangos de los parametros ,
79 % pero ajustando al modelo matematico obtenido del resultado del ajuste a
80 % la matriz codificada
81 parametros_corregidos=LinearModel. fit (matriz_MMM(1:6561 ,1:8) ,matriz_MMM
82     (1:6561 ,9) , 'y~_1+_x1+_x2+_x3+_x4+_x5+_x6+_x7+_x8+_x1*_x2+_x1*
83     x3+_x1*_x4+_x1*_x5+_x1*_x6+_x1*_x7+_x1*_x8+_x2*_x3+_x2*_x4+_x2*_x5+_x2*
84     x6+_x2*_x7+_x3*_x4+_x3*_x5+_x3*_x6+_x3*_x7+_x4*_x5+_x4*_x6+_x4*_x7+_x4*
85     x8+_x5*_x6+_x5*_x7+_x5*_x8+_x6*_x7+_x6*_x8+_x1^2+_x2^2+_x3^2+_x4^2+_
86     _x5^2+_x6^2+_x7^2')
87 j=0;
88 % comparacion del calculo mediante el metodo de la AASHTO y los obtenidos
89 % mediante el modelo matematico determinado por el ajuste del metodo
90 % experimental no lineal
91 for i=randi ([2 ,115199] ,1 ,10)
92     x1=matriz_final ( i ,1) ; x2=matriz_final ( i ,2) ; x3=matriz_final ( i ,3) ; x4
93     =matriz_final ( i ,4) ; x5=matriz_final ( i ,5) ; x6=matriz_final ( i ,6) ; x7=
94     matriz_final ( i ,7) ; x8=matriz_final ( i ,8) ;
95     j=j+1;
96     D_comprobacion= 23.8653 -29.254878* x1 - 0.161587* x2 + 0.219126* x3
97         +0.2595480* x4 - 21.65176 *x5 +6.48148 *x6 + 2.66075* x7 - 21.81848
98         *x8+ 0.1582* x1*x2 - 0.03636* x1*x3 + 0.00253475* x2*x3 + 0.085055*

```



```
x1*x4 + 0.0002759* x2*x4 - 0.000644599* x3*x4 - 4.9247* x1*x5 -  
0.0172447* x2*x5 +0.0395* x3*x5 -0.091556* x4*x5 +1.426147* x1*x6 +  
0.005644* x2*x6 - 0.0129* x3*x6 + 0.02628 *x4*x6 -1.52728388* x5*x6  
-0.29586* x1*x7 + 0.025498* x2*x7 - 0.0572889* x3*x7 -0.00564* x4*x7  
+ 0.327241* x5*x7 - 0.1019* x6*x7 + 38.507* x1*x8 +0.05182* x4*x8  
-3.033453* x5*x8 + 0.894865 *x6*x8 + 18.0756* x1^2 + 0.00167 * x2^2  
+ -0.001069*x3^2 + -0.001423* x4^2 +9.77059* x5^2 -0.402257* x6^2  
-0.28387* x7^2;  
89 ma=[matriz_final(i,1) matriz_final(i,2) matriz_final(i,3) matriz_final(  
i,4) matriz_final(i,5) matriz_final(i,6) matriz_final(i,7)  
matriz_final(i,9) D_comprobacion ];  
90 matriz_comprobacion(j,:) =ma;  
91 end
```

Listing I.18: Función FIG_COMPROB_AASHTO

```
1 clear all % copia todas las variables  
2 close all % crea todas las figuras  
3 load('matriz_comprobacion');  
4 % aplicacion del metodo lineal entre espesor del metodo vs modelo lineal  
5 lm = LinearModel.fit(matriz_comprobacion(:,8),matriz_comprobacion(:,9),'  
linear')  
6 a = 2.9009;  
7 b = 0.93107;  
8 f = @(x) a+b*x;  
9 ezplot(f, 15, 40);hold on % graficacion de la funcion obtenida despues  
10 % del metodo lineal  
11 plot(matriz_comprobacion(:,8),matriz_comprobacion(:,9),'bo'); hold on  
12 xlabel('Espesor (h) obtenido del Método de AASHTO','FontName','Arial','  
FontSize',13);  
13 ylabel('Predicción de Espesor (h)','FontName','Arial','FontSize',13);  
14 saveas(gcf,['Fig_' num2str(1)],'jpeg')  
15 close all
```

Listing I.19: Función VARIAC_PARAM_AASHTO

```
1 clear all % copia todas las variables  
2 close all % crea todas las figuras  
3 j=0;  
4 x1=0.63; % confiabilidad  
5 x2=7; % H1  
6 x3=3; % H2  
7 x4=26; % n  
8 x5=1.2; % Cd  
9 x6=2.5; % J  
10 x7=0; % Ls  
11 x8=0.34; % so  
12 % generacion de las graficas para la evaluacion del comportamiento  
13 % individual de cada parametro mediante el modelo matematico obtenido por  
14 % la aplicacion del metodo experimental no lineal, haciendo variar el
```



```

15 % parametro a evaluar dentro de su rango, manteniendo el resto de
16 % parametros constantes
17 for x1=0.5:0.01:0.95
18     j=j+1;
19     D= 23.8653 -29.254878* x1 - 0.161587* x2 + 0.219126* x3+0.2595480* x4 -
        21.65176 *x5 +6.48148 *x6 + 2.66075* x7 - 21.81848 *x8+ 0.1582* x1*
        x2 - 0.03636* x1*x3 + 0.00253475* x2*x3 + 0.085055* x1*x4 +
        0.0002759* x2*x4 - 0.000644599* x3*x4 - 4.9247* x1*x5 - 0.0172447*
        x2*x5 +0.0395* x3*x5 -0.091556* x4*x5 +1.426147* x1*x6 + 0.005644*
        x2*x6 - 0.0129* x3*x6 + 0.02628 *x4*x6 -1.52728388* x5*x6 -0.29586*
        x1*x7 + 0.025498* x2*x7 - 0.0572889* x3*x7 -0.00564* x4*x7 +
        0.327241* x5*x7 - 0.1019* x6*x7 + 38.507* x1*x8 +0.05182* x4*x8
        -3.033453* x5*x8 + 0.894865 *x6*x8 + 18.0756* x1^2 + 0.00167 * x2^2
        + -0.001069*x3^2 + -0.001423* x4^2 +9.77059* x5^2 -0.402257* x6^2
        -0.28387* x7^2;
20     Dc(j,:) = D;
21     confiabilidad(j,:)=x1;
22 end
23 plot( confiabilidad ,Dc); grid on
24 xlabel('Confiabilidad', 'FontName','Arial', 'FontSize',12);
25 ylabel('Espesor_(D)', 'FontName','Arial', 'FontSize',12);
26 saveas(gcf, 'Fig_confiabilidad', 'jpeg')
27 close all
28 j=0;
29 x1=0.225; %confiabilidad
30
31 for x2=4:20
32     j=j+1;
33     D= 23.8653 -29.254878* x1 - 0.161587* x2 + 0.219126* x3+0.2595480* x4 -
        21.65176 *x5 +6.48148 *x6 + 2.66075* x7 - 21.81848 *x8+ 0.1582* x1*
        x2 - 0.03636* x1*x3 + 0.00253475* x2*x3 + 0.085055* x1*x4 +
        0.0002759* x2*x4 - 0.000644599* x3*x4 - 4.9247* x1*x5 - 0.0172447*
        x2*x5 +0.0395* x3*x5 -0.091556* x4*x5 +1.426147* x1*x6 + 0.005644*
        x2*x6 - 0.0129* x3*x6 + 0.02628 *x4*x6 -1.52728388* x5*x6 -0.29586*
        x1*x7 + 0.025498* x2*x7 - 0.0572889* x3*x7 -0.00564* x4*x7 +
        0.327241* x5*x7 - 0.1019* x6*x7 + 38.507* x1*x8 +0.05182* x4*x8
        -3.033453* x5*x8 + 0.894865 *x6*x8 + 18.0756* x1^2 + 0.00167 * x2^2
        + -0.001069*x3^2 + -0.001423* x4^2 +9.77059* x5^2 -0.402257* x6^2
        -0.28387* x7^2;
34     DH1(j,:) = D;
35     H1(j,:) = x2;
36 end
37 plot( H1,DH1); grid on
38 xlabel('Espesor_de_la_sub-base_H1_(pulg)', 'FontName','Arial', 'FontSize',
        ,12);
39 ylabel('Espesor_(D)', 'FontName','Arial', 'FontSize',12);
40 saveas(gcf, 'Fig_H1', 'jpeg')
41 close all
42 j=0;
43 x2=7; %H1
44 for x3=1:0.2:3
45     j=j+1;
46     D= 23.8653 -29.254878* x1 - 0.161587* x2 + 0.219126* x3+0.2595480* x4 -
        21.65176 *x5 +6.48148 *x6 + 2.66075* x7 - 21.81848 *x8+ 0.1582* x1*
        x2 - 0.03636* x1*x3 + 0.00253475* x2*x3 + 0.085055* x1*x4 +
        0.0002759* x2*x4 - 0.000644599* x3*x4 - 4.9247* x1*x5 - 0.0172447*

```



```
x2*x5 +0.0395* x3*x5 -0.091556* x4*x5 +1.426147* x1*x6 + 0.005644*
x2*x6 - 0.0129* x3*x6 + 0.02628 *x4*x6 -1.52728388* x5*x6 -0.29586*
x1*x7 + 0.025498* x2*x7 - 0.0572889* x3*x7 -0.00564* x4*x7 +
0.327241* x5*x7 - 0.1019* x6*x7 + 38.507* x1*x8 +0.05182* x4*x8
-3.033453* x5*x8 + 0.894865 *x6*x8 + 18.0756* x1^2 + 0.00167 * x2^2
+ -0.001069*x3^2 + -0.001423* x4^2 +9.77059* x5^2 -0.402257* x6^2
-0.28387* x7^2;
47 DH2(j,:) = D;
48 H2(j,:) = x3;
49 end
50 plot( H2,DH2); grid on
51 xlabel('Profundidad del estrato firme H2 (pies)', 'FontName', 'Arial', '
FontSize', 12);
52 ylabel('Espesor (D)', 'FontName', 'Arial', 'FontSize', 12);
53 saveas(gcf, 'Fig_H2', 'jpeg')
54 close all
55 j=0;
56 x3=1; %H2
57 for x4=20:40
58     j=j+1;
59     D= 23.8653 -29.254878* x1 - 0.161587* x2 + 0.219126* x3+0.2595480* x4 -
        21.65176 *x5 +6.48148 *x6 + 2.66075* x7 - 21.81848 *x8+ 0.1582* x1*
        x2 - 0.03636* x1*x3 + 0.00253475* x2*x3 + 0.085055* x1*x4 +
        0.0002759* x2*x4 - 0.000644599* x3*x4 - 4.9247* x1*x5 - 0.0172447*
        x2*x5 +0.0395* x3*x5 -0.091556* x4*x5 +1.426147* x1*x6 + 0.005644*
        x2*x6 - 0.0129* x3*x6 + 0.02628 *x4*x6 -1.52728388* x5*x6 -0.29586*
        x1*x7 + 0.025498* x2*x7 - 0.0572889* x3*x7 -0.00564* x4*x7 +
        0.327241* x5*x7 - 0.1019* x6*x7 + 38.507* x1*x8 +0.05182* x4*x8
        -3.033453* x5*x8 + 0.894865 *x6*x8 + 18.0756* x1^2 + 0.00167 * x2^2
        + -0.001069*x3^2 + -0.001423* x4^2 +9.77059* x5^2 -0.402257* x6^2
        -0.28387* x7^2;
60     Dn(j,:) = D;
61     n(j,:) = x4;
62 end
63 plot( n,Dn); grid on
64 xlabel('Periodo de diseño n (años)', 'FontName', 'Arial', 'FontSize', 12);
65 ylabel('Espesor (D)', 'FontName', 'Arial', 'FontSize', 12);
66 saveas(gcf, 'Fig_n', 'jpeg')
67 close all
68 j=0;
69 x4=26; %a
70 for x5=0.8:0.1:1.2
71     j=j+1;
72     D= 23.8653 -29.254878* x1 - 0.161587* x2 + 0.219126* x3+0.2595480* x4 -
        21.65176 *x5 +6.48148 *x6 + 2.66075* x7 - 21.81848 *x8+ 0.1582* x1*
        x2 - 0.03636* x1*x3 + 0.00253475* x2*x3 + 0.085055* x1*x4 +
        0.0002759* x2*x4 - 0.000644599* x3*x4 - 4.9247* x1*x5 - 0.0172447*
        x2*x5 +0.0395* x3*x5 -0.091556* x4*x5 +1.426147* x1*x6 + 0.005644*
        x2*x6 - 0.0129* x3*x6 + 0.02628 *x4*x6 -1.52728388* x5*x6 -0.29586*
        x1*x7 + 0.025498* x2*x7 - 0.0572889* x3*x7 -0.00564* x4*x7 +
        0.327241* x5*x7 - 0.1019* x6*x7 + 38.507* x1*x8 +0.05182* x4*x8
        -3.033453* x5*x8 + 0.894865 *x6*x8 + 18.0756* x1^2 + 0.00167 * x2^2
        + -0.001069*x3^2 + -0.001423* x4^2 +9.77059* x5^2 -0.402257* x6^2
        -0.28387* x7^2;
73     DCd(j,:) = D;
74     Cd(j,:) = x5;
```



```

75 end
76 plot( Cd,DCd); xlim([0.8 1.2])
77 grid on
78 xlabel('Coeficiente de drenaje Cd', 'FontName', 'Arial', 'FontSize', 12);
79 ylabel('Espesor(D)', 'FontName', 'Arial', 'FontSize', 12);
80 saveas(gcf, 'Fig_Cd', 'jpeg')
81 close all
82 j=0
83 x5=1.2; %Cd
84 for x6=2.4:0.2:4.4
85     j=j+1;
86     D= 23.8653 -29.254878* x1 - 0.161587* x2 + 0.219126* x3+0.2595480* x4 -
        21.65176 *x5 +6.48148 *x6 + 2.66075* x7 - 21.81848 *x8+ 0.1582* x1*
        x2 - 0.03636* x1*x3 + 0.00253475* x2*x3 + 0.085055* x1*x4 +
        0.0002759* x2*x4 - 0.000644599* x3*x4 - 4.9247* x1*x5 - 0.0172447*
        x2*x5 +0.0395* x3*x5 -0.091556* x4*x5 +1.426147* x1*x6 + 0.005644*
        x2*x6 - 0.0129* x3*x6 + 0.02628 *x4*x6 -1.52728388* x5*x6 -0.29586*
        x1*x7 + 0.025498* x2*x7 - 0.0572889* x3*x7 -0.00564* x4*x7 +
        0.327241* x5*x7 - 0.1019* x6*x7 + 38.507* x1*x8 +0.05182* x4*x8
        -3.033453* x5*x8 + 0.894865 *x6*x8 + 18.0756* x1^2 + 0.00167 * x2^2
        + -0.001069*x3^2 + -0.001423* x4^2 +9.77059* x5^2 -0.402257* x6^2
        -0.28387* x7^2;
87     DJ(j,:) = D;
88     J(j,:) = x6;
89 end
90 plot(J,DJ); xlim([2.4 4.4])
91 grid on
92
93 xlabel('Coeficiente de transferencia de carga JL', 'FontName', 'Arial', '
    FontSize', 12);
94 ylabel('Espesor(D)', 'FontName', 'Arial', 'FontSize', 12);
95 saveas(gcf, 'Fig_J', 'jpeg')
96 close all
97 j=0
98 x6=2.5; %J
99 for x7=0:0.2:3
100     j=j+1;
101     D= 23.8653 -29.254878* x1 - 0.161587* x2 + 0.219126* x3+0.2595480* x4 -
        21.65176 *x5 +6.48148 *x6 + 2.66075* x7 - 21.81848 *x8+ 0.1582* x1*
        x2 - 0.03636* x1*x3 + 0.00253475* x2*x3 + 0.085055* x1*x4 +
        0.0002759* x2*x4 - 0.000644599* x3*x4 - 4.9247* x1*x5 - 0.0172447*
        x2*x5 +0.0395* x3*x5 -0.091556* x4*x5 +1.426147* x1*x6 + 0.005644*
        x2*x6 - 0.0129* x3*x6 + 0.02628 *x4*x6 -1.52728388* x5*x6 -0.29586*
        x1*x7 + 0.025498* x2*x7 - 0.0572889* x3*x7 -0.00564* x4*x7 +
        0.327241* x5*x7 - 0.1019* x6*x7 + 38.507* x1*x8 +0.05182* x4*x8
        -3.033453* x5*x8 + 0.894865 *x6*x8 + 18.0756* x1^2 + 0.00167 * x2^2
        + -0.001069*x3^2 + -0.001423* x4^2 +9.77059* x5^2 -0.402257* x6^2
        -0.28387* x7^2;
102     DLs(j,:) = D;
103     Ls(j,:) = x7;
104 end
105 plot( Ls,DLs); grid on
106 xlabel('Pérdida por soporte Ls', 'FontName', 'Arial', 'FontSize', 12);
107 ylabel('Espesor(D)', 'FontName', 'Arial', 'FontSize', 12);
108 saveas(gcf, 'Fig_Ls', 'jpeg')
109 close all

```



```
110 j=0
111 x7=0; %Ls
112 for x8=0.34:0.005:0.40
113     j=j+1;
114     D= 23.8653 -29.254878* x1 - 0.161587* x2 + 0.219126* x3+0.2595480* x4 -
        21.65176 *x5 +6.48148 *x6 + 2.66075* x7 - 21.81848 *x8+ 0.1582* x1*
        x2 - 0.03636* x1*x3 + 0.00253475* x2*x3 + 0.085055* x1*x4 +
        0.0002759* x2*x4 - 0.000644599* x3*x4 - 4.9247* x1*x5 - 0.0172447*
        x2*x5 +0.0395* x3*x5 -0.091556* x4*x5 +1.426147* x1*x6 + 0.005644*
        x2*x6 - 0.0129* x3*x6 + 0.02628 *x4*x6 -1.52728388* x5*x6 -0.29586*
        x1*x7 + 0.025498* x2*x7 - 0.0572889* x3*x7 -0.00564* x4*x7 +
        0.327241* x5*x7 - 0.1019* x6*x7 + 38.507* x1*x8 +0.05182* x4*x8
        -3.033453* x5*x8 + 0.894865 *x6*x8 + 18.0756* x1^2 + 0.00167 * x2^2
        + -0.001069*x3^2 + -0.001423* x4^2 +9.77059* x5^2 -0.402257* x6^2
        -0.28387* x7^2;
115     DSo(j,:) = D;
116     So(j,:) = x8;
117 end
118 plot( So,DSo); grid on
119 xlabel('Desviación_estandar_So','FontName','Arial','FontSize',12);
120 ylabel('Espesor_(D)','FontName','Arial','FontSize',12);
121 saveas(gcf,'Fig_So','jpeg')
122 close all
```

I.6. Resultado de la función RESULT_PCA en formato texto

```
ID 1
DATOS DE ENTRADA
VEHÍCULOS COMERCIALES
1.900000e-01
TPD
2900
PERIODO DE DISEÑO (n)
20
TASA DE CRECIMIENTO DE TRÁNSITO (r)
1.000000e-02
NÚMERO DE CARRILES
4
SENTIDO DE VÍA
2
MATERIAL DE SUBBASE GRANULAR O CEMENTADA
CEMENTADA
ESPESOR DE SUBBASE
100
MÓDULO DE REACCIÓN DE SUBRASANTE (Mr) (MPa/m)
20
```



RESISTENCIA A LA SUBRASANTE Mpa/m
60
CON O SIN BERMA
CON BERMA
CON O SIN PASADOR
CON PASADOR
MODULO DE ROTURA DE CONCRETO (MR)(psi)
550
FACTOR DE SEGURIDAD SIMPLE
1
FACTOR DE SEGURIDAD TÁNDEM
1
NÚMERO DE EJES EQUIVALENTES
1.941104e+06
ESPESOR
146
CARGAS POR EJE
SIMPLE
22
20
18
16
14
12
10
8
6
4
TÁNDEM
36
32
28
24
20
16
12
8
4
REPETICIONES ESPERADAS
SIMPLE
1.863460e+03
8.210871e+03
3.068886e+04
7.380078e+04
1.089154e+05
2.406969e+05
3.978487e+05



9.377474e+05

1.421432e+06

3.286891e+06

TÁNDEM

8.133227e+03

1.350814e+05

1.329268e+05

7.605246e+04

1.108370e+05

1.456216e+05

2.703958e+05

1.661391e+05

6.192122e+04

FATIGA

ESFUERZO EQUIVALENTE

SIMPLE

3.632477e+02

3.321190e+02

3.008027e+02

2.692764e+02

2.375122e+02

2.054736e+02

1.731114e+02

1.403557e+02

1.070996e+02

7.315802e+01

TÁNDEM

2.509200e+02

2.246218e+02

1.981251e+02

1.713995e+02

1.444040e+02

1.170803e+02

8.933906e+01

6.102610e+01

3.180881e+01

ESFUERZO EQUIVALENTE

SIMPLE

2.202156e+02

TÁNDEM

1.431916e+02

ESF EQUIV/MR

SIMPLE

6.604504e-01

6.038528e-01

5.469140e-01

4.895935e-01



4.318404e-01

3.735883e-01

3.147479e-01

2.551922e-01

1.947265e-01

1.330146e-01

TÁNDEM

4.562183e-01

4.084033e-01

3.602275e-01

3.116355e-01

2.625527e-01

2.128732e-01

1.624346e-01

1.109565e-01

5.783420e-02

REPETICIONES ADMISIBLES

SIMPLE

5.764219e+03

2.781440e+04

1.358420e+05

1.317098e+06

0

0

0

0

0

0

TÁNDEM

2.324737e+07

0

0

0

0

0

0

0

0

PORCENTAJE DE FATIGA

SIMPLE

3.232806e+01

2.952022e+01

2.259158e+01

5.603288e+00

0

0

0



0

0

0

TÁNDEM

3.498557e-02

0

0

0

0

0

0

0

0

SUMATORIA FATIGA

9.007813e+01

EROSIÓN

FACTOR DE EROSIÓN

SIMPLE

4.097684e+00

3.932114e+00

3.749084e+00

3.544474e+00

3.312506e+00

3.044719e+00

2.727994e+00

2.340354e+00

1.840599e+00

1.136234e+00

TÁNDEM

3.715743e+00

3.511132e+00

3.279165e+00

3.011378e+00

2.694653e+00

2.307012e+00

1.807258e+00

1.102893e+00

-1.012275e-01

FACTOR DE EROSIÓN

SIMPLE

2.972576e+00

TÁNDEM

2.369778e+00

POTENCIA

SIMPLE

2.043786e+01



1.689079e+01

1.368154e+01

1.081011e+01

8.276488e+00

6.080685e+00

4.222698e+00

2.702527e+00

1.520171e+00

6.756316e-01

TÁNDEM

1.316632e+01

1.040302e+01

7.964813e+00

5.851699e+00

4.063680e+00

2.600755e+00

1.462925e+00

6.501888e-01

1.625472e-01

REPETICIONES ADMISIBLES

SIMPLE

7.076554e+05

1.506845e+06

4.171050e+06

2.362588e+07

0

0

0

0

0

0

TÁNDEM

5.200814e+06

3.678509e+07

0

0

0

0

0

0

0

PORCENTAJE DE EROSIÓN

SIMPLE

2.633287e-01

5.449049e-01

7.357586e-01



3.123727e-01

0

0

0

0

0

0

TÁNDEM

1.563837e-01

3.672179e-01

0

0

0

0

0

0

0

SUMATORIA EROSIÓN

2.379967e+00

FACTOR DE RELACIÓN DE ESFUERZOS

SIMPLE

4.003921e-01

TÁNDEM

2.603484e-01

I.7. Resultado de la función RESULT_AASHTO en formato texto

DATOS DE ENTRADA

PERIODO DE DISEÑO (n)

20

CONFIABILIDAD

7.000000e-01

ESPESOR DE SUBBASE (pulg)

6

PROFUNDIDAD DE SUPERFICIE A ESTRATO FIRME (pies)

5

APROXIMACIÓN INICIAL DEL ESPESOR DE LA LOSA (pulg)

9

DESVIACIÓN ESTÁNDAR (S_o)

3.400000e-01

COEFICIENTE DE DRENAJE (C_d)

8.000000e-01

COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE CARGA (J)

2.400000e+00



PERDIDA POR SOPORTE (Ls)

1

DATOS DE SALIDA

NÚMERO DE EJES EQUIVALENTES (N)

7.959330e+06

MÓDULO DE REACCIÓN EFECTIVO DE LA SUBRASANTE

1.632275e+02

ESPELOR FINAL DE LA LOSA (cm)

2.132838e+01

ESPELOR FINAL DE LA LOSA (pulg)

8.397000e+00