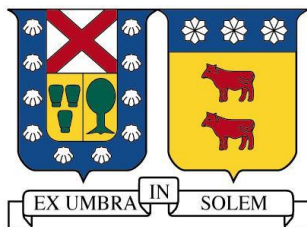


**UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE OBRAS CIVILES
VALPARAÍSO – CHILE**



ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DEL ESCALONAMIENTO Y CÁLCULO DE LA DEFLEXIÓN POR ALABEO TÉRMICO EN EL DISEÑO DE PAVIMENTO DE HORMIGÓN

**MEMORIA DE TITULACIÓN PRESENTADA POR
ALEJANDRA FRANCISCA ARANCIBIA MUÑOZ**

**COMO REQUISITO PARCIAL PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL**

**PROFESOR GUÍA
CARLOS WAHR DANIEL**

DICIEMBRE DE 2016

Dedicado a mis papás y tatas.

AGRADECIMIENTOS

A mis padres, por su sabiduría en la vida, por haberme proporcionado una buena educación y mucho amor. También por mostrarme que con sacrificio y perseverancia todo se puede lograr.

A José, por su apoyo y compañía constante en la realización de esta memoria, dándome fortaleza especialmente en los momentos más difíciles.

A las Chicas Old School, a las Civilas y a los Memoriarele, con quienes he compartido algunos de los mejores momentos de mi vida, incluso haciendo gratos aquellos periodos más complicados de la universidad.

A Catherine Riquelme y a la rama de Aeróbica, por darme las herramientas para trabajar en equipo y por enseñarme que la práctica y el ritmo hace a las maestras.

A AMIN, a sus integrantes y al profesor Leonhard Bernold, por hacer realidad mi creencia por la igualdad de género en el ambiente ingenieril y por ser parte de un gran equipo de trabajo.

Al profesor Carlos Wahr, por apoyarme continuamente durante la realización de esta memoria y por brindarme consejos académicos y de la vida.

A los integrantes del comité evaluador, Macarena Bravo y Rodrigo Delgadillo, por su tiempo, buena disposición y paciencia en la revisión de esta memoria.

A Javier Casanova, a Ignacio Elzo, a Angelo Filonzi y a Gabriel Pinilla por responder todas mis inquietudes y compartir desinteresadamente su experiencia.

RESUMEN EJECUTIVO

El modelo de escalonamiento de la GEMDP fue calibrado en Chile utilizando losas con juntas transversales esviadas en pavimentos de hormigón, para lo cual se emplea un factor de conversión para convertir el efecto del escalonamiento en las losas con Juntas Transversales Esviadas (JTE) a losas con Juntas Transversales Rectas (JTR). El primer objetivo de este trabajo es la verificación del factor de conversión al considerar el efecto de las JTE en las losas de pavimento. El análisis del escalonamiento en losas con JTE se realiza mediante el programa de elementos finitos EverFE, tomando como variable el ángulo de las juntas transversales para conseguir la deflexión deseada. Con el modelo de escalonamiento de la GEMDP, se calcula el escalonamiento resultante al aplicar un eje simple como carga en un sistema de 6 losas cuadradas de dimensión 3,5 [m], con una distribución de 2 x 3. Con lo anterior, se calcula el factor que relaciona los escalonamientos de losas con JTR y con JTE, teniéndose una tendencia polinomial cuadrática de este factor al ir variando el ángulo de la junta transversal. Además, se obtiene una relación lineal entre los escalonamientos de losas con JTR y con JTE, que va variando con respecto al sentido del giro y al valor de la inclinación, considerando la posición de la carga en la configuración del sistema de losas.

El segundo objetivo es el cálculo de las deflexiones originado por el alabeo térmico mediante la utilización de Redes Neuronales Artificiales (RNA). Estas deflexiones que se localizan en el borde y esquina de las losas son producto de los gradientes de temperatura y de humedad. Para obtener el alabeo térmico de las losas se escoge la configuración de RNA más óptima para correlacionar el comportamiento de los datos. Los datos necesarios para alimentar la RNA se obtienen en las ciudades de Arica, Valparaíso, Santiago, Concepción, Puerto Montt y Punta Arenas. El uso de RNA para el cálculo de las deflexiones es parte de la metodología del modelo de escalonamiento de la GEMDP, destacándose que los resultados se obtienen a partir de datos generados en ciudades de Chile. El cálculo de las deflexiones por el alabeo térmico se lleva a cabo con las RNA, donde se ingresa el espaciamiento entre juntas transversales, el radio de rigidez relativa y el gradiente de temperatura adimensional de Korenev, entregando como dato de salida la deflexión producida en la losa. Para alimentar la RNA, se genera una base de datos usando los datos climáticos y del suelo de las ciudades, ingresándose al programa de elementos finitos ISLAB2000 para conseguir la deflexión en cada caso. El programa que se utiliza para las RNA es el software matemático MATLAB, creándose un código para reagrupar los errores y los coeficientes de correlación que se generan en cada configuración. De esta forma, se escoge la configuración consistente a tres capas ocultas con 10, 6 y 4 neuronas por capa, lográndose modelar las deformaciones de la base de datos de manera óptima.

Palabras claves: Juntas transversales esviadas, deflexión por alabeo térmico, redes neuronales artificiales, escalonamiento, EverFE, ISLAB2000, GEMDP.

ABSTRACT

MEPDG's faulting model was calibrated in Chile using slab with skewed transverse joint in concrete pavement, for which a conversion factor is used to transform the faulting effect in slabs with skewed transverse joint to a slabs with straight transverse joint. The first objective in this work is to verify the conversion factor to consider the skewed transverse joint effect on pavement slabs. The faulting analysis on slabs with skewed transverse joint is done by the finite element program EverFE, the angle of the joint is taking as a variable to get the required deflection. Using the MEPDG's faulting model, the resulting faulting of applying a single axle load in a set of six square-slabs of dimension 3.5 [m], with a 2x3 distribution, is calculated. Considering this, the factor that relates the faulting of slabs with straight transverse joint and skewed transverse joint is calculated, obtaining a quadratic polynomial behavior considering transverse joint angle variable. Also, a linear relationship between faulting of slabs with straight transverse joint and skewed transverse joint is obtained by varying the direction and value of rotation, considering the position of the load on the system configuration slab.

The second objective is to calculate curling deflections using Artificial Neural Networks (ANN). These deflections caused by temperature and moisture are located at the edge and corner slabs. An optimal setting ANN is chosen to obtain curling deflection slab to correlate the behavior of the data. The data needed to feed the ANN are obtained in cities like Arica, Valparaíso, Santiago, Concepción, Puerto Montt and Punta Arenas. The application of ANN to calculate curling deflections is part of MEPDG's faulting model, but applied in Chilean conditions. The input data to calculate curling deflection using ANN are transverse joint spacing, radius of relative stiffness and Korenev's nondimensional temperature gradient, it gives as an output data slab deflection. To feed the ANN, a database is generated using the climatic and soil data of cities, thus entering the finite element program ISLAB2000 for deflection in each case. The program used for ANN is the mathematical software MATLAB, creating a code to regroup errors and correlation coefficients generated in each configuration. Thus, the configuration that achieves optimally model the behavior of the database consist of three hidden layers with 10, 6 and 4 neurons in each layer.

Keywords: *Skewed transverse joint, curling deflection, artificial neural networks, faulting, EverFE, ISLAB2000, MEPDG.*

GLOSARIO

- **AASHTO** : American Association of State Highway and Transportation Officials.
- **ACI** : American Concrete Institute.
- **ACPA** : American Concrete Pavement Association.
- **E_{PCC}** : Módulo de elasticidad del hormigón.
- **EICM** : Enhanced Integrated Climate Model (Modelo Climático Integrado Mejorado).
- **f'_c** : Resistencia a la compresión del hormigón.
- **FHWA** : Federal Highway Administration.
- **GEMDP** : Guía Empírico Mecanicista de Diseño de Pavimentos, (MEPDG - Mechanistic Empirical Pavement Design Guide).
- **JPCP** : Jointed Plain Concrete Pavement (Pavimento de hormigón simple con juntas).
- **JTE** : Juntas Transversales Esviadas.
- **JTR** : Juntas Transversales Rectas.
- **LTE** : Load Transfer Efficiency (Eficiencia de Transferencia de Carga).
- **MR** : Módulo de Ruptura del hormigón.
- **MOP** : Ministerio de Obras Públicas.
- **PCA** : Portland Cement Association.
- **RNA** : Redes Neuronales Artificiales.

ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DEL ESCALONAMIENTO Y CÁLCULO DE LA DEFLEXIÓN POR ALABEO TÉRMICO EN EL DISEÑO DE PAVIMENTO DE HORMIGÓN

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN EJECUTIVO	I
ABSTRACT.....	II
GLOSARIO	III
ÍNDICE GENERAL	IV
ÍNDICE DE FIGURAS	IX
ÍNDICE DE TABLAS	XI
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. OBJETIVOS Y ALCANCES DE LA MEMORIA	2
1.2. METODOLOGÍA DE LA MEMORIA	3
1.3. ESTRUCTURA DE LA MEMORIA.....	4
2. MODELO DE ESCALONAMIENTO DE LA GEMDP.....	5
2.1. ESCALONAMIENTO Y MECANISMO DEL BOMBEO.....	5
2.2. PROCESAMIENTO DE DATOS.....	7
2.2.1. Datos de temperatura para la losa de hormigón	8
2.2.1.1. Determinación de los perfiles de temperatura por hora	8
2.2.1.2. Consideración de la distribución de temperatura no lineal.....	12
2.2.1.3. Datos de temperatura para el escalonamiento	14
2.2.1.4. Caso desfavorable para el escalonamiento	14
2.2.2. Datos de humedad relativa	15
2.2.3. Datos de eficiencia de transferencia de carga de la berma	16
2.2.4. Datos del módulo de elasticidad del hormigón	16
2.2.4.1. Módulo de elasticidad como dato de entrada Nivel 1.....	17
2.2.4.2. Módulo de elasticidad como dato de entrada Nivel 2.....	18

2.2.4.3.	Módulo de elasticidad como dato de entrada Nivel 3.....	19
2.2.5.	Datos del módulo resiliente de la base y su variación estacional	21
2.2.5.1.	Cálculo del módulo resiliente para materiales sin consolidar.....	22
2.2.5.2.	Valor del módulo resiliente en las condiciones óptimas.....	24
2.2.5.3.	Efectos ambientales sobre el módulo resiliente.....	25
2.2.5.4.	Cálculo del factor de ajuste ambiental, F_{env}	29
2.3.	DETERMINACIÓN DEL GRADIENTE DE TEMPERATURA EFECTIVO	30
2.3.1.	Gradiente de temperatura producto del alabeo permanente.....	32
2.3.2.	Gradiente de temperatura a través del espesor de la losa de hormigón.....	33
2.3.3.	Gradiente de temperatura debido a la retracción reversible del alabeo.....	34
2.3.3.1.	Determinación de la deformación de la retracción diferencial para la humedad.....	37
2.3.3.2.	Determinación de la deformación de la retracción diferencial mensual	37
2.3.3.3.	Estimación de la deformación de retracción última.....	38
2.3.4.	Determinación el espesor efectivo de la losa	39
2.4.	DETERMINACIÓN DEL ESCALONAMIENTO MÁXIMO INICIAL	40
2.4.1.	Valores de los coeficientes de calibración	40
2.4.2.	Determinación de la máxima deflexión de alabeo	41
2.4.2.1.	Determinación del peso unitario efectivo de la losa equivalente.....	42
2.4.2.2.	Determinación del radio de rigidez relativa	42
2.4.2.3.	Determinación de gradiente de temperatura adimensional de Korenev	42
2.4.3.	Determinación de la erosionabilidad de la base	43
2.4.3.1.	Erosionabilidad como dato de entrada Nivel 1.....	43
2.4.3.2.	Erosionabilidad como dato de entrada Nivel 2.....	44
2.4.3.3.	Erosionabilidad como dato de entrada Nivel 3.....	44
2.5.	DETERMINACIÓN DE LA EFICIENCIA DE TRANSFERENCIA DE CARGA	45
2.5.1.	Determinación de la LTE del agregado de la losa.....	45
2.5.1.1.	Determinación de la deformación de retracción sobre y bajo la losa de hormigón	46
2.5.1.2.	Determinación de la deformación promedio de retracción para la losa de hormigón.....	48
2.5.1.3.	Determinación de la apertura total de la junta	48
2.5.1.4.	Determinación de la capacidad de corte de la junta	49
2.5.2.	Determinación de la LTE de la base.....	49
2.5.3.	Determinación de la LTE de las pasajuntas	49
2.6.	DETERMINACIÓN DE LAS DEFLEXIONES CRÍTICAS.....	51
2.6.1.	Determinación de la deflexión en la losa cargada.....	51
2.6.2.	Determinación de la deflexión en la losa no cargada	52
2.6.3.	Determinación de los parámetros de la losa equivalente	53
2.6.3.1.	Determinación del espesor efectivo de la losa.....	53

2.6.3.2.	Determinación del peso unitario efectivo de la losa	53
2.6.3.3.	Determinar el radio de rigidez relativa de la losa	54
2.6.4.	Determinación del gradiente de temperatura efectiva	54
2.6.5.	Determinación de la carga normalizada	55
2.7.	DETERMINACIÓN DEL ESCALONAMIENTO FINAL.....	56
2.7.1.	Determinación de la energía de deformación	56
2.7.2.	Determinación del incremento de escalonamiento	57
2.7.3.	Determinación del escalonamiento máximo	57
2.8.	DETERMINACIÓN DE LA PÉRDIDA DE CAPACIDAD DE CORTE	58
2.8.1.	Determinación del esfuerzo de corte de referencia	59
2.8.2.	Determinación del esfuerzo de corte inducido por cada eje.....	59
2.9.	DETERMINACIÓN DEL DAÑO EN LAS PASAJUNTAS.....	60
2.9.1.	Determinación de la fuerza de corte de la pasajunta	60
2.9.2.	Determinación del incremento de daño en la pasajunta.....	61
3.	ESCALONAMIENTO EN LOSAS CON JUNTAS TRANSVERSALES ESVIADAS	62
3.1.	INTRODUCCIÓN AL FACTOR DE CONVERSIÓN	62
3.1.1.	Concepto de las juntas transversales esviadas.....	62
3.1.1.1.	Definición de juntas de contracción	63
3.1.1.2.	Definición de las juntas transversales esviadas.....	64
3.1.1.3.	Aplicación de las juntas transversales esviadas	65
3.1.2.	Cálculo del factor de conversión.....	66
3.1.3.	Antecedentes de investigación de las juntas transversales esviadas	66
3.2.	METODOLOGÍA DE TRABAJO DEL FACTOR DE CONVERSIÓN	68
3.2.1.	Datos de entrada necesarios	70
3.2.2.	Programa de elementos finitos EverFE	71
3.2.3.	Medición de la deflexión de la losa en el programa EverFE	73
3.2.3.1.	Medición de la deflexión por el alabeo térmico	73
3.2.3.2.	Medición de la deflexión por los ejes de carga	74
3.2.4.	Consideraciones en el cálculo del factor de conversión.....	75
3.2.4.1.	Datos entregados por el programa AASHTOWare Pavement ME Design.....	75
3.2.4.2.	Gradiente de temperatura utilizado.....	76
3.2.4.3.	Espectro de ángulos de las juntas transversales	76
3.2.4.4.	Estructura de pavimento	77
3.2.4.5.	Sistema de ejes de carga	78

3.3.	COMPORTAMIENTO DEL FACTOR DE CONVERSIÓN	80
3.3.1.	Tendencia de Resultados	83
3.3.2.	Comparación de los resultados con investigaciones de la calibración.....	84
3.3.3.	Análisis final del factor de conversión.....	85
4.	RED NEURONAL ARTIFICIAL DE LA DEFLEXIÓN POR ALABEO TÉRMICO	86
4.1.	INTRODUCCIÓN A LA DEFLEXIÓN POR ALABEO TÉRMICO.....	86
4.1.1.	Concepto del alabeo térmico	86
4.1.1.1.	Definición de alabeo térmico.....	87
4.1.1.2.	Esfuerzos debido al alabeo térmico	87
4.1.1.3.	Determinación de esfuerzos debido al alabeo térmico	89
4.1.2.	Implementación de las redes neuronales artificiales	96
4.1.3.	Concepto de losa equivalente de Korenev y Khazanovich.....	98
4.1.4.	Concepto de las redes neuronales artificiales	100
4.1.4.1.	Arquitectura de la red neuronal artificial.....	101
4.1.4.2.	Entrenamiento de la red neuronal artificial.....	106
4.1.4.3.	Sobreaprendizaje de la red neuronal artificial.....	107
4.2.	METODOLOGÍA DE TRABAJO DE LAS REDES NEURONALES ARTIFICIALES.....	108
4.2.1.	Datos de entrada para las redes neuronales artificiales.....	109
4.2.2.	Programa de elementos finitos ISLAB2000	110
4.2.3.	Medición de la deflexión de la losa en el programa ISLAB2000	111
4.2.4.	Consideraciones para las redes neuronales artificiales	111
4.2.4.1.	Estructuras de pavimento	111
4.2.4.2.	Programa matemático MATLAB	113
4.2.4.3.	Elementos de la red neuronal artificial	115
4.2.4.4.	Procesamiento de datos	116
4.3.	CONFIGURACIÓN DE LA RED NEURONAL ARTIFICIAL.....	117
4.3.1.	Categorización de los Resultados	119
4.3.2.	Criterios de selección y análisis.....	120
4.3.3.	Resultados por configuración de capas ocultas	121
4.3.3.1.	Resultados con una capa oculta	122
4.3.3.2.	Resultados con dos capas ocultas.....	124
4.3.3.3.	Resultados con tres capas ocultas	126
4.3.4.	Análisis final de las redes neuronales artificiales	130

5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	131
5.1.	CONCLUSIONES	131
5.2.	RECOMENDACIONES	133
6.	REFERENCIAS	134
7.	ANEXOS	137
ANEXO A.	TABLAS DE RESULTADOS DEL FACTOR DE CONVERSIÓN	137
ANEXO B.	ESTRUCTURAS DE PAVIMENTO PARA LAS REDES NEURONALES	140
ANEXO C.	DATOS MENSUALES DE PAVIMENTO PARA LAS REDES NEURONALES ...	144
ANEXO D.	GRÁFICOS DE RESULTADOS DE LA REDES NEURONALES	161
	Resultados con una capa oculta	161
	Resultados con dos capas ocultas	165
	Resultados con tres capas ocultas	169

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1 Llegada del eje de carga a la junta por la losa de aproximación.	6
Figura 2-2 Traspaso del eje de carga a la losa saliente.	6
Figura 2-3 Generación del escalonamiento debido al bombeo.	6
Figura 2-4 Perfil de temperatura de una losa de hormigón de 10 [in] (Yu et al., 2004)	8
Figura 2-5 Diagrama de radiación considerada por EICM, (ARA, 2004)	11
Figura 2-6 Tensiones generadas por la distribución de temperatura no lineal (Tomlinson, 1940).....	13
Figura 2-7 Alabeo de la losa de hormigón debido al gradiente de temperatura negativo más la posición crítica de la carga de tráfico (ARA, 2004)	15
Figura 2-8 Gráfico del E_{PCC} requerido para el diseño empírico mecanicista.	17
Figura 2-9 Ilustración del alabeo de la losa de hormigón (a) Alabeo hacia arriba; (b) Alabeo hacia abajo (Yu, 2004)	30
Figura 2-10 Comportamiento típico del hormigón tras el secado y rehumectación (Yu, 2004)	31
Figura 2-11 Ilustración del gradiente de temperatura de construcción efectivo (Vandenbossche, 2011)	33
Figura 2-12 Diagrama de infiltración considerada por EICM (ARA, 2004)	34
Figura 2-13 Modelo de viga ante la tensión generada por la humedad (Eisenmann et al., 1990)	36
Figura 2-14 Ubicación de la carga y posición crítica para el análisis del escalonamiento (ARA, 2004)	51
Figura 3-1 Juntas de contracciones típicas (a) Ranura ficticia; (b) Banda premoldeada (Huang, 2003)	63
Figura 3-2 Ejemplo de una JTE	64
Figura 3-3 Escalonamiento Promedio Medido versus Predicho considerando JTE y JTR (Vásquez, 2014)	67
Figura 3-4 Configuración de sistema de losas (a) JTR (b) JTE	69
Figura 3-5 Sistema de referencia del programa EverFE	73
Figura 3-6 Esquema de las JTE	77
Figura 3-7 Posición de la carga en Losa con JTR.....	79
Figura 3-8 Posición de la carga en Losa con JTE	79
Figura 3-9 Gráfico del Factor de conversión con la Carga Losa Central en el sentido anti horario.	80
Figura 3-10 Gráfico del Factor de conversión con la Carga Losa Central en el sentido horario.....	81
Figura 3-11 Gráfico del Factor de conversión con la Carga Losa Borde izquierdo en el sentido anti horario.	81
Figura 3-12 Gráfico del Factor de conversión con la Carga Losa Borde izquierdo en el sentido horario.	82
Figura 3-13 Gráfico de la tendencia del factor de conversión.....	83
Figura 3-14 Posición de la carga con respecto a la JTE con inclinación (a) -5° (b) -10° (c) -15°	83
Figura 4-1 Condición de día, alabeo convexo.	88
Figura 4-2 Condición nocturna, alabeo cóncavo.	88
Figura 4-3 Alabeo de las losas y el efecto de la subrasante (Huang, 2003)	88
Figura 4-4 Superficie curva producto de la diferencia de temperatura en la losa.	90
Figura 4-5 Gradiente lineal de temperatura en una losa de hormigón (Huang, 2003)	91
Figura 4-6 Losa finita de longitud L_x y L_y (Huang, 2003)	95
Figura 4-7 Factor de Corrección de Esfuerzos para Losas Finitas (Bradbury, 1938).....	96
Figura 4-8 Esquema general de la RNA.	97
Figura 4-9 Neurona del cerebro.	101
Figura 4-10 Neurona de una RNA.	101
Figura 4-11 Sistemas de capas ocultas en RNA	102
Figura 4-12 Gráfico de la Función Sigmoidal.	104
Figura 4-13 Gráfico de la Función Lineal.	104
Figura 4-14 Gráfico de la Función Tangente Hiperbólica.	105
Figura 4-15 Gráfico de la Función Gaussiana.	105
Figura 4-16 Gráfico de la Función Complemento de Gaussiana.	106

Figura 4-17 Ejemplo de Overfitting	107
Figura 4-18 Sistema de Losa a ocupar con largo L.....	108
Figura 4-19 Ejemplo de RNA usando programa MATLAB.	113
Figura 4-20 Interface de la herramienta nntool de MATLAB.....	114
Figura 4-21 Tendencia del error con respecto a la cantidad de iteraciones.....	114
Figura 4-22 Error v/s 1 capa oculta: Error Mínimo de Datos de Aprendizaje.	122
Figura 4-23 Error v/s 1 capa oculta: Error Prueba de Datos de Simulación.....	122
Figura 4-24 Error v/s 1 capa oculta: Error Mínimo de Datos de Simulación.....	123
Figura 4-25 Error v/s 1 capa oculta: Error Prueba de Datos de Aprendizaje.	123
Figura 4-26 Error v/s 2 capas ocultas: Error Mínimo de Datos de Aprendizaje.....	124
Figura 4-27 Error v/s 2 capas ocultas: Error Prueba de Datos de Simulación.	124
Figura 4-28 Error v/s 2 capas ocultas: Error Mínimo de Datos de Simulación.	125
Figura 4-29 Error v/s 2 capas ocultas: Error Prueba de Datos de Aprendizaje.....	125
Figura 4-30 Error v/s 3 capas ocultas: Error Mínimo de Datos de Aprendizaje fijando valor de neuronas en 3° capa.	126
Figura 4-31 Error v/s 3 capas ocultas: Error Prueba de Datos de Simulación fijando valor de neuronas en 3° capa.	126
Figura 4-32 Error v/s 3 capas ocultas: Error Mínimo de Datos de Simulación fijando valor de neuronas en 3° capa.	127
Figura 4-33 Error v/s 3 capas ocultas: Error Prueba de Datos de Aprendizaje fijando valor de neuronas en 3° capa.....	127
Figura 4-34 Error v/s 3 capas ocultas: Error Mínimo de Datos de Aprendizaje para 1° capa con 10 neuronas.....	128
Figura 4-35 Error v/s 3 capas ocultas: Error Prueba de Datos de Simulación para 1° capa con 10 neuronas.	128
Figura 4-36 Error v/s 3 capas ocultas: Error Mínimo de Datos de Simulación para 1° capa con 10 neuronas.	129
Figura 4-37 Error v/s 3 capas ocultas: Error Prueba de Datos de Aprendizaje para 1° capa con 10 neuronas.....	129
Figura 7-1 Ubicación geográfica de las plazas de pesaje fijo pertenecientes a la red nacional de pesaje (MOP, 2001)	140
Figura 7-2 Gráfico de Error en Datos de Aprendizaje.	161
Figura 7-3 Gráfico de Correlación en Datos de Aprendizaje.	161
Figura 7-4 Gráfico de Error de Datos de Simulación.....	162
Figura 7-5 Gráfico de Correlación de Datos de Simulación.....	162
Figura 7-6 Error v/s 1 capa oculta: Error Mínimo de Datos de Aprendizaje.	163
Figura 7-7 Error v/s 1 capa oculta: Error Prueba de Datos de Simulación.....	163
Figura 7-8 Error v/s 1 capa oculta: Error Mínimo de Datos de Simulación.	164
Figura 7-9 Error v/s 1 capa oculta: Error Prueba de Datos de Aprendizaje.	164
Figura 7-10 Error v/s 2 capas ocultas: Error Mínimo de Datos de Aprendizaje.....	165
Figura 7-11 Error v/s 2 capas ocultas: Error Prueba de Datos de Simulación.	166
Figura 7-12 Error v/s 2 capas ocultas: Error Mínimo de Datos de Simulación.	167
Figura 7-13 Error v/s 2 capas ocultas: Error Prueba de Datos de Aprendizaje.....	168
Figura 7-14 Error v/s 3 capas ocultas: Error Mínimo de Datos de Aprendizaje para 1° capa con 2 neuronas.....	169
Figura 7-15 Error v/s 3 capas ocultas: Error Prueba de Datos de Simulación para 1° capa con 2 neuronas.	170
Figura 7-16 Error v/s 3 capas ocultas: Error Mínimo de Datos de Simulación para 1° capa con 2 neuronas.	171
Figura 7-17 Error v/s 3 capas ocultas: Error Prueba de Datos de Aprendizaje para 1° capa con 2 neuronas.....	172
Figura 7-18 Error v/s 3 capas ocultas: Error Mínimo de Datos de Aprendizaje para 1° capa con 4 neuronas.....	173
Figura 7-19 Error v/s 3 capas ocultas: Error Prueba de Datos de Simulación para 1° capa con 4 neuronas.	174
Figura 7-20 Error v/s 3 capas ocultas: Error Mínimo de Datos de Simulación para 1° capa con 4 neuronas.	175
Figura 7-21 Error v/s 3 capas ocultas: Error Prueba de Datos de Aprendizaje para 1° capa con 4 neuronas.....	176
Figura 7-22 Error v/s 3 capas ocultas: Error Mínimo de Datos de Aprendizaje para 1° capa con 6 neuronas.....	177
Figura 7-23 Error v/s 3 capas ocultas: Error Prueba de Datos de Simulación para 1° capa con 6 neuronas.	178
Figura 7-24 Error v/s 3 capas ocultas: Error Mínimo de Datos de Simulación para 1° capa con 6 neuronas.	179
Figura 7-25 Error v/s 3 capas ocultas: Error Prueba de Datos de Aprendizaje para 1° capa con 6 neuronas.....	180
Figura 7-26 Error v/s 3 capas ocultas: Error Mínimo de Datos de Aprendizaje para 1° capa con 8 neuronas.....	181

Figura 7-27 Error v/s 3 capas ocultas: Error Prueba de Datos de Simulación para 1° capa con 8 neuronas.	182
Figura 7-28 Error v/s 3 capas ocultas: Error Mínimo de Datos de Simulación para 1° capa con 8 neuronas.	183
Figura 7-29 Error v/s 3 capas ocultas: Error Prueba de Datos de Aprendizaje para 1° capa con 8 neuronas.	184
Figura 7-30 Error v/s 3 capas ocultas: Error Mínimo de Datos de Aprendizaje para 1° capa con 10 neuronas.	185
Figura 7-31 Error v/s 3 capas ocultas: Error Prueba de Datos de Simulación para 1° capa con 10 neuronas.	186
Figura 7-32 Error v/s 3 capas ocultas: Error Mínimo de Datos de Simulación para 1° capa con 10 neuronas.	187
Figura 7-33 Error v/s 3 capas ocultas: Error Prueba de Datos de Aprendizaje para 1° capa con 10 neuronas.	188
Figura 7-34 Error v/s 3 capas ocultas: Error Mínimo de Datos de Aprendizaje para 1° capa con 12 neuronas.	189
Figura 7-35 Error v/s 3 capas ocultas: Error Prueba de Datos de Simulación para 1° capa con 12 neuronas.	190
Figura 7-36 Error v/s 3 capas ocultas: Error Mínimo de Datos de Simulación para 1° capa con 12 neuronas.	191
Figura 7-37 Error v/s 3 capas ocultas: Error Prueba de Datos de Aprendizaje para 1° capa con 12 neuronas.	192

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1 Eficiencia de transferencia de carga usada en el análisis de escalonamiento	16
Tabla 2-2 Modelos que relacionan las propiedades del material con el módulo resiliente (ARA 2004)	22
Tabla 2-3 Valores típicos del módulo resiliente para materiales granulares no ligados y subrasantes (ARA, 2004)	23
Tabla 2-4 Valores de los parámetros a, b y c para cada tipo de material (ARA, 2004)	26
Tabla 2-5 Valores recomendados de RF para materiales de grado grueso ($P_{200} < 50\%$)	28
Tabla 2-6 Valores recomendados de RF para materiales de grado fino ($P_{200} > 50\%$)	28
Tabla 2-7 Coeficientes de calibración para pavimentos chilenos.	41
Tabla 2-8 Clases de erosión de acuerdo a solo la descripción del tipo de material.	44
Tabla 2-9 Valores de LTE para cada tipo de base	49
Tabla 3-1 Listado de datos de entrada para el escalonamiento.	70
Tabla 3-2 Datos con variación mensual para el cálculo del escalonamiento.	75
Tabla 3-3 Gradientes de temperatura [°C/cm] medidos por el IDIEM.	76
Tabla 3-4 Ángulos a utilizar para las JTE.....	77
Tabla 3-5 Estructura de pavimento a utilizar	78
Tabla 3-6 Información del eje de carga.....	78
Tabla 4-1 Rango de datos de entrada para la RNA	110
Tabla 4-2 Listado de suelos ensayados (Delgadillo et al., 2013).....	112
Tabla 4-3 Módulos resilientes medidos para suelos chilenos (Delgadillo et al., 2013).....	112
Tabla 4-4 Elementos de la RNA con una capa oculta.	115
Tabla 4-5 Elementos de la RNA con dos capas ocultas.....	115
Tabla 4-6 Elementos de la RNA con tres capas ocultas.....	116
Tabla 4-7 Porcentaje de datos para aprendizaje y simulación	116
Tabla 4-8 Configuraciones escogidas para una capa oculta.	117
Tabla 4-9 Configuraciones escogidas para dos capas ocultas	118
Tabla 4-10 Configuraciones escogidas para tres capas ocultas.....	119
Tabla 7-1 Tabla de escalonamientos con JTE con sentido de giro horario.....	137
Tabla 7-2 Tabla de escalonamientos con JTE con sentido de giro anti horario	138
Tabla 7-3 Valores del factor de conversión considerando carga y ángulo.....	139
Tabla 7-4 Datos generales de las estructuras de pavimento.....	140
Tabla 7-5 Estructura de pavimento para la ciudad de Arica	141
Tabla 7-6 Estructura de pavimento para la ciudad de Valparaíso	141
Tabla 7-7 Estructura de pavimento para la ciudad de Santiago	142

Tabla 7-8 Estructura de pavimento para la ciudad de Concepción.....	142
Tabla 7-9 Estructura de pavimento para la ciudad de Puerto Montt	143
Tabla 7-10 Estructura de pavimento para la ciudad de Punta Arenas	143
Tabla 7-11 Ciudad Arica Suelo 12 Chacalluta.....	144
Tabla 7-12 Ciudad Arica Suelo 12 Chungara.....	144
Tabla 7-13 Ciudad Valparaíso Suelo 1 Curacaví	145
Tabla 7-14 Ciudad Valparaíso Suelo 1 El Monte	145
Tabla 7-15 Ciudad Valparaíso Suelo 2 Curacaví	146
Tabla 7-16 Ciudad Valparaíso Suelo 2 El Monte	146
Tabla 7-17 Ciudad de Valparaíso Suelo 3 Curacaví	147
Tabla 7-18 Ciudad Valparaíso Suelo 3 El Monte	147
Tabla 7-19 Ciudad Valparaíso Suelo 7 Curacaví	148
Tabla 7-20 Ciudad Santiago Suelo 3 El Monte	148
Tabla 7-21 Ciudad Santiago Suelo 3 SH3 Der	149
Tabla 7-22 Ciudad Santiago Suelo 4 Curacaví	149
Tabla 7-23 Ciudad Santiago Suelo 4 El Monte	150
Tabla 7-24 Ciudad Santiago Suelo 4 SH3 Der	150
Tabla 7-25 Ciudad Santiago Suelo 7 El Monte	151
Tabla 7-26 Ciudad Santiago Suelo 7 SH3 Der	151
Tabla 7-27 Ciudad Santiago Suelo 10 Curacaví	152
Tabla 7-28 Ciudad Santiago Suelo 10 El Monte	152
Tabla 7-29 Ciudad Santiago Suelo 10 SH3 Der.....	153
Tabla 7-30 Ciudad Concepción Suelo 1 Concepción.....	153
Tabla 7-31 Ciudad Concepción Suelo 1 Los Horcones.....	154
Tabla 7-32 Ciudad Concepción Suelo 5 Concepción.....	154
Tabla 7-33 Ciudad Concepción Suelo 5 Los Horcones.....	155
Tabla 7-34 Ciudad Concepción Suelo 7 Concepción.....	155
Tabla 7-35 Ciudad Concepción Suelo 7 Los Horcones.....	156
Tabla 7-36 Ciudad Puerto Montt Suelo 5 Tijeral	156
Tabla 7-37 Ciudad Puerto Montt Suelo 7 Tijeral	157
Tabla 7-38 Ciudad Puerto Montt Suelo 11 Tijeral	157
Tabla 7-39 Ciudad Punta Arenas Suelo 1 Monte Aymond	158
Tabla 7-40 Ciudad Punta Arenas Suelo 1 Kon Aiken.....	158
Tabla 7-41 Ciudad Punta Arenas Suelo 5 Monte Aymond	159
Tabla 7-42 Ciudad Punta Arenas Suelo 5 Kon Aiken.....	159
Tabla 7-43 Ciudad Punta Arenas Suelo 13 Monte Aymond	160
Tabla 7-44 Ciudad Punta Arenas Suelo 13 Kon Aiken.....	160

1. INTRODUCCIÓN

El escalonamiento es un deterioro clave en el diseño de pavimento rígidos. Corresponde al resultado de una deflexión excesiva del borde y de la esquina de la losa producto de la erosión y el bombeo de agregados finos bajo la losa. La velocidad de progresión del escalonamiento aumenta cuando la estructura de pavimento se ve afectada con la presencia de agua libre, la utilización de materiales erosionables y una diferencia significativa de deflexión entre las losas. Un excesivo escalonamiento reduce la serviciabilidad, la comodidad en la conducción y la vida de diseño de la estructura de pavimento.

En Chile, el diseño de pavimento de hormigón se rige por el Manual de Carreteras Vol.3, donde se utiliza el método AASHTO con las modificaciones introducidas en el Supplement to the AASHTO Guide for Design of Pavement Structure Part II – Rigid Pavement Design & Rigid Pavement Joint Design, publicado en 1998. Este procedimiento es un método teórico empírico mecanicista, que, si bien mantiene el concepto básico del método AASHTO de 1993, donde se relacionan las cargas de tráfico, la estructura del pavimento y pérdida de serviciabilidad, se añaden nuevos términos que modifican la ecuación de diseño. Además, el método incluye la verificación para las condiciones del escalonamiento de las juntas transversales, con y sin barras de traspaso de cargas.

El método actual de diseño de pavimento rígido es la GEMDP AASHTO 2008. Esta Guía se basa en la predicción de las respuestas críticas del pavimento, siendo los esfuerzos, deformaciones y deflexiones, calculándose el daño acumulado a lo largo del tiempo. Éstas se asocian a las cargas de tráfico, las condiciones climáticas y a las propiedades del pavimento. Conociendo los esfuerzos y deformaciones que resultan en el pavimento mediante este método, existe una mayor precisión al momento de predecir el comportamiento de la estructura al estar sometida a cargas externas. Como consecuencia, se necesitan mayores datos de cada zona de nuestro país para obtener un resultado acorde a la situación de Chile.

El escalonamiento es un deterioro que depende de las solicitaciones por efecto de las cargas, de las condiciones climáticas y de las propiedades del suelo, teniendo un gran impacto en los criterios de desempeño y en la calidad del camino. Por lo tanto, es importante conocer cómo el deterioro del escalonamiento se presenta en las circunstancias chilenas. Uno de los datos importantes al momento de obtener el escalonamiento son las deflexiones por alabeo térmico, debido a que los gradientes de temperatura afectan los estados de deformación y esfuerzo de la losa, por lo tanto, sería significativo utilizar herramientas que agilicen el cálculo a partir de datos provenientes de las ciudades de Chile.

En el diseño de pavimento de hormigón, existen medidas que se emplean para aminorar el escalonamiento, como por ejemplo las barras de traspaso de carga o pasajuntas, y la variación

aleatoria del espaciamiento de las juntas transversales. Otra medida interesante es la variación del ángulo entre la junta transversal y el eje central del pavimento, denominada junta transversal esviada. Para implementar las juntas transversales esviadas se requiere de un método en el cuál se pueda utilizar el modelo de escalonamiento de manera regular y a partir de esto modificar las juntas colocando un ángulo de inclinación.

1.1. OBJETIVOS Y ALCANCES DE LA MEMORIA

Los objetivos generales de la memoria son:

- La verificación del factor de conversión al considerar el efecto de las juntas transversales esviadas en las losas de pavimento.
- El cálculo de las deflexiones por el alabeo térmico mediante la utilización de redes neuronales artificiales.

De acuerdo a estos objetivos generales, se debe realizar lo siguiente:

- Explicar el modelo de escalonamiento utilizado en la GEMDP, destacando los pasos generales y especificando cada proceso en el cálculo de este deterioro.
- Explicar el efecto de la temperatura en la estructura de pavimento, para un mayor entendimiento de cómo obtener la deflexión producto del alabeo térmico.
- Explicar el concepto de las juntas transversales esviadas y cuáles son sus propiedades para disminuir el escalonamiento.
- Describir la metodología de cálculo del escalonamiento para juntas transversales esviadas, teniéndose como resultado final el factor de conversión.
- Describir la metodología de cálculo de la deflexión de las losas por el alabeo térmico, mediante la configuración óptima de la red neuronal artificial.
- Analizar los resultados obtenidos en ambos casos y sacar conclusiones con respecto al comportamiento del escalonamiento con datos chilenos.

Para la verificación del factor de conversión, que considera el efecto de las juntas transversales esviadas, se utilizan los datos climáticos y las propiedades del suelo de la ciudad de Valparaíso. Se consideran dos casos: el primer caso corresponde a las juntas transversales rectas, y el segundo caso se toma como variable el ángulo entre la junta transversal y el eje central del pavimento. Para cada caso se calculan los escalonamientos y se relacionan ambos obteniéndose el factor de conversión. Además, en base a los resultados del factor de conversión, se compara con los resultados de la investigación de la calibración local del modelo de escalonamiento de la GEMDP. Estas investigaciones se presentan en la memoria de título de ingeniero civil y grado de magister en ciencias de la ingeniería civil de la UTFSM de Josell

Vásquez (Vásquez, 2014) y en la memoria de título de ingeniero civil de la UTFSM de Pedro Moraga (Moraga, 2015).

Para el cálculo de las deflexiones por el alabeo térmico se utilizan las redes neuronales artificiales ocupando como datos de entrada el espaciamiento entre juntas transversales, el radio de rigidez relativa y el gradiente de temperatura adimensional de Korenev, entregando como dato de salida la deflexión producida en la losa. Las deflexiones por el alabeo térmico se obtienen de las ciudades de Arica, Valparaíso, Santiago, Concepción, Puerto Montt y Punta Arenas. La idea principal es establecer la configuración de neuronas que correlacione de manera óptima los datos previamente descritos. El cálculo realizado con redes neuronales es parte de un proyecto consistente en desarrollar un programa para diseñar pavimentos de hormigón en Chile.

1.2. METODOLOGÍA DE LA MEMORIA

La metodología de trabajo que se implementa en el desarrollo de esta memoria, para el cumplimiento de los objetivos es la siguiente:

- Revisión bibliográfica con respecto al modelo de escalonamiento de la GEMDP.
- Revisión bibliográfica en la literatura relacionada con los conceptos de junta transversal esviada y deflexión por alabeo térmico.
- Utilizar programas de elementos finitos para el cálculo de las deflexiones en las losas.
- Procesamiento de los datos para la verificación del factor de conversión.
- Programación de las redes neuronales utilizando los datos de entrada previamente obtenidos.
- Análisis de los resultados de las juntas transversales esviadas y de la deflexión por alabeo térmico.
- Conclusiones y recomendaciones.

1.3. ESTRUCTURA DE LA MEMORIA

La memoria se estructura de la siguiente forma:

- Capítulo 1 : Corresponde a la introducción de la memoria, donde se fijar los objetivos y los alcances del trabajo.
- Capítulo 2 : Se explica en detalle el modelo de escalonamiento de la GEMDP, donde se reúne la información de cada parámetro y se explica el paso a paso para calcular el escalonamiento.
- Capítulo 3 : Se trata del escalonamiento en las losas con juntas transversales esviadas y del factor de conversión para transformar el escalonamiento de losas con juntas transversales rectas a juntas transversales esviadas. Dentro de este capítulo se explican los conceptos relacionados con el tema, se explica la metodología de trabajo para obtener el factor de conversión y se analizan los resultados obtenidos en este estudio.
- Capítulo 4 : Se trata de la deflexión por alabeo térmico usando redes neuronales artificiales, obteniéndose la configuración de neuronas que permiten el cálculo de la deflexión en una estructura de pavimento. En este capítulo se explican los conceptos relacionados con este cálculo, se explica la metodología de trabajo para las redes neuronales artificiales y se analizan los resultados obtenidos en este trabajo.
- Capítulo 5 : Conclusiones y recomendaciones del trabajo realizado en la memoria.
- Capítulo 6 : Referencias.
- Capítulo 7 : Anexos.

2. MODELO DE ESCALONAMIENTO DE LA GEMDP

En este capítulo se describe el modelo de escalonamiento de la GEMDP, detallándose los pasos para su cálculo y su justificación. Para calcular el escalonamiento se requiere de un procesamiento de datos, correspondientes a los datos climáticos y a las propiedades de los materiales del pavimento. Posteriormente, se calculan las deflexiones críticas de la losa para obtener el escalonamiento final, requiriéndose el gradiente de temperatura efectivo, el escalonamiento máximo inicial y la eficiencia de transferencia de carga en la junta. Teniéndose el escalonamiento final, se deben calcular los daños generados en el pavimento, como la pérdida de capacidad de corte y el daño de pasajuntas si es que están presentes en la estructura de pavimento.

2.1. ESCALONAMIENTO Y MECANISMO DEL BOMBEO

El escalonamiento es el resultado de una deflexión excesiva del borde y de la esquina de la losa que es causado por la erosión y el bombeo de agregados finos bajo la losa. Se deben presentar las siguientes condiciones para que ocurra este deterioro:

- Debe existir una diferencia significativa de deflexión entre las losas continuas, impactando en los materiales subyacentes al pavimento. Estas deflexiones generan el movimiento del material saturado ubicado en la parte inferior del pavimento, modificando el equilibrio al presentarse erosión y bombeo. El diferencial de energía a través de la junta se amplifica por diversos factores, incluyendo ejes de cargas pesados y una inadecuada transferencia de carga.
- La utilización de materiales erosionables en la estructura del pavimento favorece la aparición del escalonamiento. Un material estabilizado que es débil o inestable con un alto porcentaje de finos es el principal candidato para erosionarse.
- La presencia de agua libre en la estructura del pavimento, que conduce a la saturación de los materiales en la base, subbase y subrasante, proporcionando un transporte para el bombeo y a la erosión de finos.

La velocidad de progresión del escalonamiento aumenta significativamente cuando el pavimento se ve afectado por las tres condiciones anteriores en conjunto, en donde se manifiesta la erosión y el bombeo. Debido a que la erosión del material bajo la losa es una consecuencia del bombeo, es importante explicar el bombeo en orden para entender el mecanismo que conduce al escalonamiento.

El mecanismo del bombeo se define como la expulsión de material granular fino bajo la losa saliente del pavimento, depositándose en varios sectores, como a lo largo del borde del

pavimento, bajo la losa de aproximación o sobre la superficie del pavimento a través de la junta. El paso a paso del mecanismo del bombeo se ilustra en las Figura 2-1, Figura 2-2 y Figura 2-3.

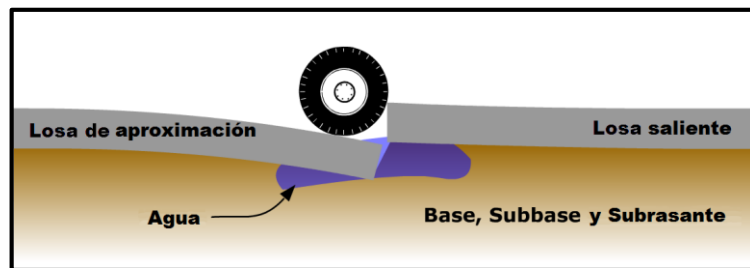


Figura 2-1 Llegada del eje de carga a la junta por la losa de aproximación.

En la Figura 2-1, se aprecia que la losa de aproximación se deflexa al momento que el eje de carga llega a la junta. El agua bajo la losa de aproximación es expulsada, acarreado con ella material granular fino, acumulándose bajo la losa saliente. Este movimiento de material producto de la presión de agua da comienzo al bombeo.

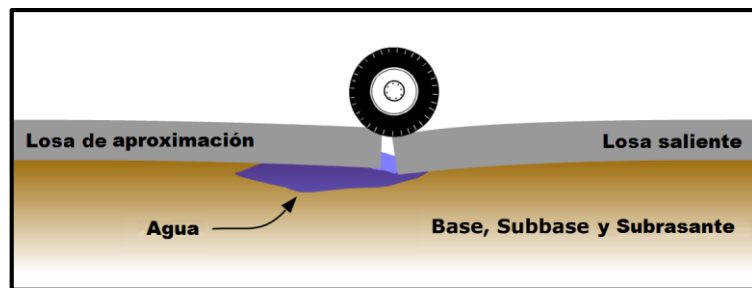


Figura 2-2 Traspaso del eje de carga a la losa saliente.

En la Figura 2-2 se ve el traspaso del eje de carga hacia la losa saliente. Con este movimiento el agua y el material granular fino, que estaban bajo la losa saliente, se trasladan nuevamente a la losa de aproximación. Esto quiere decir que retorna el material original que estaba depositado bajo la losa de aproximación más un porcentaje de material extra proveniente de la losa saliente.

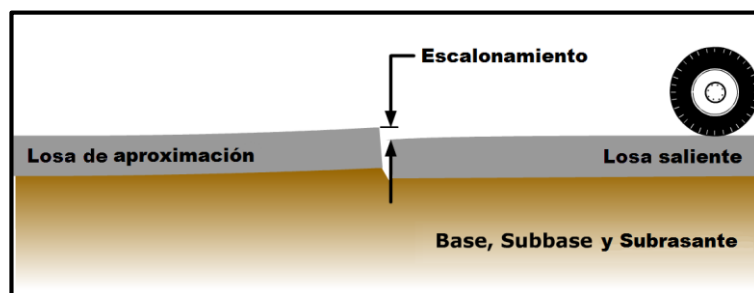


Figura 2-3 Generación del escalonamiento debido al bombeo.

Este proceso conduce a la acumulación de material bajo la losa de aproximación y la pérdida de finos bajo la losa saliente. Esto genera que la losa de aproximación se eleve para acomodar el material extra y la losa saliente se hunda para compensar el vacío obtenido. Producto de lo anterior, se aprecia una diferencia de elevación entre las losas, generándose el escalonamiento como lo indica la Figura 2-3. Además de generarse el traslado de material bajo las losas, existe una expulsión de material y agua en la superficie y en el borde de la losa, perjudicando el tránsito de vehículos.

A modo de resumen, el escalonamiento es una falla que se compone de múltiples factores, y al momento de cuantificarse, el modelo debe abarcar todas estas aristas para que sea representativo. En las siguientes secciones se explicará el modelo del escalonamiento paso a paso, comenzando con el procesamiento de datos, consistente en los datos de temperatura, humedad, eficiencia de transferencia de carga, propiedades del hormigón y de la base.

2.2. PROCESAMIENTO DE DATOS

Para determinar los datos de entrada en la GEMDP, se utiliza un sistema de jerarquía para clasificar los datos. El enfoque de la jerarquía se basa en la filosofía en que el nivel de esfuerzo que se ejerce en el proceso de diseño debe ser consistente con la importancia, el tamaño y el costo del proyecto. Los niveles son los siguientes:

- Nivel 1 : Es el procedimiento más reciente que está disponible, normalmente involucra ensayos de laboratorio y pruebas en terreno. Este método de obtención de datos es más exacto y, por lo mismo, consume más recursos monetarios y tiempo.
- Nivel 2 : Los datos de entrada son estimados a través de correlaciones con otras propiedades que han sido medidos en laboratorio o en terreno. Su exactitud está en un término medio y requiere tiempo para realizar los ensayos.
- Nivel 3 : Se requiere de la experiencia del proyectista para estimar el valor del dato de entrada de manera apropiada. No se requiere de datos de laboratorio o de medidas en terreno, como mínimo se utilizan correlaciones que dependen del criterio del proyectista.

De acuerdo a estos niveles de jerarquía, se procesan los datos de entrada necesarios para trabajar en el modelo de escalonamiento. A continuación, se explicarán estos datos y sus respectivas consideraciones de acuerdo a la GEMDP.

2.2.1. Datos de temperatura para la losa de hormigón

La diferencia de temperatura a través del espesor de la losa de hormigón tiene un efecto importante en las deflexiones y esfuerzos. Por lo tanto, es una variable importante al momento de evaluar el comportamiento de la estructura de pavimento.

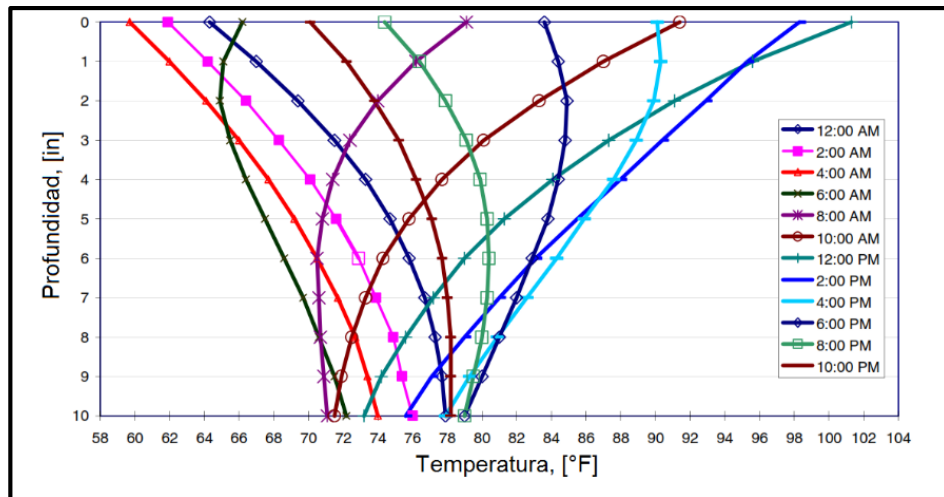


Figura 2-4 Perfil de temperatura de una losa de hormigón de 10 [in] (Yu et al., 2004)

Los datos de temperatura se presentan mediante perfiles de temperatura con respecto al espesor de la losa de hormigón que se genera por hora para cada año de la vida de diseño, como se ve en la Figura 2-4. De acuerdo a los perfiles, éste se puede descomponer en las componentes uniforme, lineal y no lineal, en el que a cada componente se le otorga un efecto importante sobre la losa de hormigón. Teniendo en cuenta lo anterior, la GEMDP realiza ciertas suposiciones para manejar el error en el comportamiento del pavimento.

Con los datos de temperatura procesados, se emplea el caso más desfavorable para ajustar el diseño de la estructura de pavimento. En las siguientes subsecciones, se explicará en detalle lo dicho anteriormente.

2.2.1.1. Determinación de los perfiles de temperatura por hora

Debido a la sensibilidad en el valor de las deflexiones y de los esfuerzos ante los gradientes de temperatura en la losa de hormigón, es necesario considerar la variación por hora de la temperatura. Esto se realiza de forma automática en el software de la GEMDP utilizando el EICM (Enhanced Integrated Climate Model). El modelo genera perfiles de temperatura por hora de acuerdo al espesor de la losa utilizando una base de datos climáticos históricos de la zona, la estructura de pavimento y las propiedades de los

materiales. Estos perfiles se generan para cada año de la vida de diseño, teniendo un total de 8.760 perfiles anuales. En la Figura 2-4 se muestra un ejemplo de perfil de temperatura dentro de un periodo de 24 horas.

- *Modelo Integrado Climático Mejorado (EICM)*

Los perfiles de temperatura y humedad, en la estructura de pavimento y de la subrasante durante toda la vida de diseño, son considerados en la GEMDP mediante el uso de una herramienta de modelamiento climático llamada EICM.

El modelo EICM es un programa unidimensional que, junto el flujo de calor y humedad, simula los cambios en el comportamiento y características del pavimento y la subrasante, en relación a las condiciones climáticas durante los años de operación. El EICM es constituido por tres componentes:

- El Modelo de Clima, Materiales y Estructura (CMS Model) desarrollado por la Universidad de Illinois.
- El Modelo CRREL, capaz entre otras cosas de prever el levantamiento por congelamiento y asentamiento por deshielo, desarrollado por la Ejército de los Estados Unidos, sección de Investigación en Regiones Frías y Laboratorio de Ingeniería.
- El Modelo de Infiltración y Drenaje, (ID Model), desarrollado por la Universidad de Texas A&M.

El EICM, calcula y predice la siguiente información a través de todo el perfil pavimento/subrasante: temperatura, factores de ajuste del módulo resiliente, presión de poros de agua, contenido de agua, profundidad del congelamiento o deshielo, levantamiento por helada, y desempeño del drenaje. El modelo es aplicable en pavimentos de hormigón y asfalto.

- *Modelo CMS*

El Modelo CMS es unidimensional que considera la transferencia de calor, por medio de diferencias finitas, para determinar la penetración de la helada y la distribución de temperatura en el sistema del pavimento. El modelo considera la radiación, convección, conducción y los efectos del calor latente. No considera la transpiración, condensación, evaporación o sublimación, debido a que existe incertidumbre en su cálculo y omitirlos no provoca errores significativos en el balance de calor sobre la superficie del pavimento. Los flujos de calor causados por precipitación e infiltración de humedad tampoco se consideran.

Los datos de entrada necesarios para el modelo, incluyen:

- Capacidad calórica de los materiales del pavimento.
- Conductividad térmica de los materiales del pavimento.
- Emisividad y absorción en la superficie del pavimento.
- Temperatura del aire.
- Velocidad del viento.
- Radiación solar incidente.

Es importante mencionar que, para las capas del pavimento, el EICM asume que el parámetro de capacidad calórica y conductividad térmica se mantienen constantes en el tiempo. Sin embargo, para las capas no ligadas, es decir para la base y subrasante, la humedad y heladas cambian estas propiedades.

El cálculo unidimensional por diferencias finitas posee 2 límites, uno superior que corresponde a la superficie del pavimento y otro inferior correspondiente al punto en la profundidad del suelo en que la temperatura del mismo es constante. En el límite superior, los parámetros como la temperatura del aire, la velocidad del viento, la cantidad de radiación solar, la absorción y emisividad del pavimento, determinan la cantidad de calor que fluye hacia adentro o fuera del pavimento. El límite inferior es aquel nodo en que se supone que existe una cantidad infinita de calor, capaz de mantener la temperatura del suelo constante. Mediante el modelamiento del flujo de calor a través del pavimento, es fácil calcular la temperatura en varios puntos del espesor de la estructura del pavimento.

Una vez establecidas las propiedades térmicas que definen el flujo de calor a través de la estructura del pavimento, y se han identificado las condiciones límites, es necesario determinar la cantidad del flujo de calor que entra y/o sale de la superficie del pavimento. Para estimar la temperatura del pavimento, el modelo CMS emplea un balance de energía en la superficie del pavimento como se describe en la Ec. 2-1.

$$Q_i - Q_r + Q_a - Q_e \pm Q_c \pm Q_h \pm Q_g = 0 \quad \text{Ec. 2-1}$$

Donde: Q_i : Radiación de onda corta entrante.
 Q_r : Radiación de onda corta reflejada.
 Q_a : Radiación de onda larga entrante.
 Q_e : Radiación de onda larga saliente.
 Q_c : Transferencia de calor por convección.
 Q_h : Efectos de transpiración, condensación, evaporación y sublimación.
 Q_g : Energía absorbida por el suelo.

En la Figura 2-5 se ilustra el diagrama de radiación, traduciendo lo explicado en la Ec. 2-1. En esta figura se muestra la dirección de cada radiación considerada en el modelo, para cumplir con el balance de energía en la superficie del pavimento.

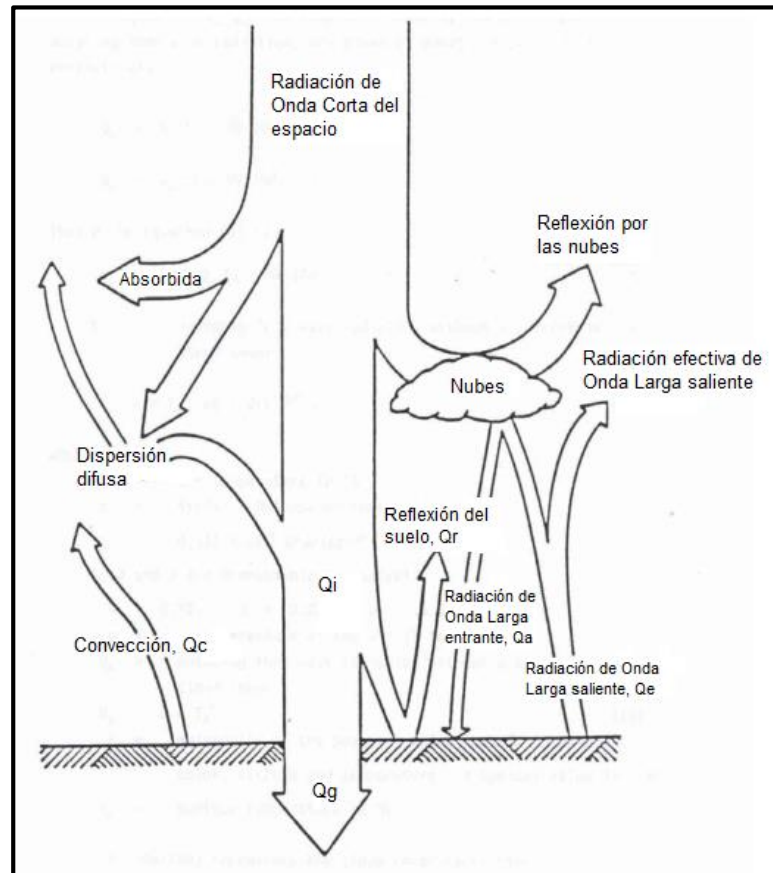


Figura 2-5 Diagrama de radiación considerada por EICM, (ARA, 2004)

- *Modelo CRREL*

Corresponde a un modelo unidimensional que relaciona el flujo de calor y el flujo de humedad en el suelo de la subrasante a temperaturas que están por encima, debajo y equivalentes a la temperatura de congelamiento del agua. Además, el modelo predice la profundidad de penetración de las heladas y del deshielo, y estima el levantamiento debido a las heladas y el asentamiento del suelo por deshielo. Este modelo usa los perfiles de temperatura a través de las capas del pavimento según lo establecido por el modelo CMS para calcular los cambios en el perfil de temperatura del suelo, y así determinar la penetración de la helada y el asentamiento por deshielo.

▪ *Modelo ID*

La cantidad de infiltración en el pavimento debido a un cierto evento de lluvia es función de la condición del pavimento, del tipo de berma y del drenaje ofrecido para interceptar la humedad. Por simplicidad, las pautas generales para estimar la infiltración sólo se basan en el tipo de berma y si es que están presentes los drenes de borde. El tipo de berma es relevante porque la junta entre la vía y la berma representa la fuente de entrada de humedad más importante en la estructura del pavimento.

Para cuantificar la infiltración de humedad producto de las precipitaciones, se define el potencial neto de infiltración en la vida de diseño del pavimento. Basada en esta entrada, el ID determina la cantidad de agua disponible encima de la primera capa no ligada. En la GEMDP, la infiltración puede asumir tres valores:

- Menor (menor o igual al 10% de la precipitación infiltra en el pavimento).
- Moderado (menor o igual al 50% de la precipitación infiltra en el pavimento).
- Extremo (menor o igual al 100% de la precipitación infiltra en el pavimento).

La longitud de la trayectoria de drenaje se utiliza en el modelo ID, para calcular el tiempo requerido para drenar una base no ligada o capa subbase de una condición inicialmente húmeda. Este parámetro es la longitud resultante de la vía de drenaje, es decir, la distancia medida a lo largo del ancho de la calzada y del largo longitudinal del pavimento. Se mide desde el punto más alto de la sección transversal del pavimento hasta el punto donde se produce el drenaje. Para determinar esta longitud se utiliza el programa DRIP, basándose en los datos anteriormente mencionados.

2.2.1.2. Consideración de la distribución de temperatura no lineal

Como se muestra en la Figura 2-4, los perfiles de temperatura en las losas de hormigón pueden ser no lineales. En general, las distribuciones de temperatura no lineales en pavimento de hormigón tienden a reducir los esfuerzos críticos bajo condiciones diurnas, pero aumentan los esfuerzos en condiciones nocturnas. Cualquier distribución general de temperatura se puede descomponer en tres componentes:

- Componente uniforme : Corresponde al cambio de temperatura uniforme que causa alargamiento o acortamiento de la losa.
- Componente lineal : Corresponde al cambio de temperatura lineal que causa flexión en la losa, generando alabeo.

- Componente no lineal : Corresponde al cambio de temperatura no lineal que causa esfuerzos auto-equilibrados, donde no se genera momento, pero aumenta o disminuye los esfuerzos en las fibras exteriores de la losa.

En la Figura 2-6 se ilustra la descomposición de la distribución de la temperatura y los esfuerzos que genera cada una en condiciones diurnas.

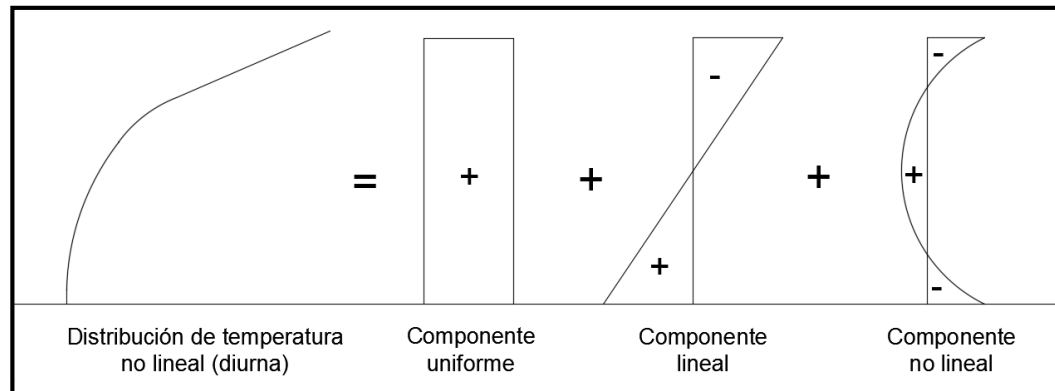


Figura 2-6 Tensiones generadas por la distribución de temperatura no lineal (Tomlinson, 1940)

Las losas de pavimento se asumen normalmente libres para expandirse o contraerse. Por lo tanto, se supone que la componente uniforme de la temperatura no produce esfuerzos significativos y son ignorados.

Dependiendo de la forma de la distribución de la temperatura, la componente no lineal puede causar esfuerzos de compresión durante el día y esfuerzos de tracción durante la noche en las fibras exteriores de la losa. Un caso típico de la distribución de temperatura que se produce durante el día se muestra en la Figura 2-6. Los esfuerzos que genera la componente no lineal durante el día reduce el efecto provocado por la componente lineal. En el caso contrario, durante la noche, los esfuerzos de tracción se intensifican en las fibras exteriores.

Si se desprecian los esfuerzos debido a la componente no lineal puede resultar en errores significativos en los esfuerzos calculados, especialmente en los perfiles de temperatura no lineales que tienen una diferencia de temperatura relativamente pequeña entre las partes superior e inferior de la losa. Se pueden llegar a despreciar en el caso diurno, teniendo un diseño más conservador.

Para favorecer el cálculo, cada perfil de temperatura se convierte en un gradiente de temperatura equivalente. Este gradiente equivalente produce el mismo esfuerzo que el original, considerando que el perfil de temperatura fuera analizado mediante la teoría de

placas. Este proceso no reduce la cantidad real de los perfiles de temperatura que tienen que ser analizados, pero proporciona una mayor eficiencia en el cálculo de daños.

2.2.1.3. Datos de temperatura para el escalonamiento

En el diseño de pavimento rígido, la temperatura se trata mediante perfiles de temperatura con respecto al espesor de la losa de hormigón. Como se explicó en el punto 2.2.1.1, el EICM está programado para obtener perfiles de temperatura de acuerdo a los datos históricos climáticos, entre otros. Para las ciudades de Chile que poseen una estadística completa, la base de datos climáticos ofrece alrededor de 5 a 8 años de registros.

El análisis que realiza el EICM corresponde a 11 puntos de temperatura a través del espesor de la losa para cada hora en la vida del pavimento después de su construcción, como se ve en la Figura 2-4. Para el análisis del escalonamiento, estos datos se reducen en los siguientes parámetros:

- Temperatura promedio nocturna en la profundidad media de la losa de hormigón para cada mes del año: se calcula como la temperatura promedio en la profundidad media de la losa que ocurre en un determinado mes desde las 8 pm hasta las 8 am durante la vida de diseño del pavimento.
- Diferencia de temperatura promedio nocturna entre la temperatura que se produce sobre y bajo la losa de hormigón para cada mes del año: se calcula como la diferencia de temperatura promedio que ocurre en un determinado mes desde las 8 pm hasta las 8 am durante la vida de diseño del pavimento.
- Índice de congelamiento de la base: corresponde a un porcentaje del tiempo en que la temperatura bajo la losa de hormigón está bajo los 32 [°F] (0 [°C]).

2.2.1.4. Caso desfavorable para el escalonamiento

Se aprecia que las temperaturas que se ocupan en la GEMDP son las nocturnas, debido a que, durante el horario nocturno, aumenta el tráfico de vehículos pesados. Producto de esto, se obtiene la máxima energía de deformación, por lo tanto, es importante considerarlo en el modelo del escalonamiento. Como se discutió en el punto 2.2.1.2, la componente no lineal de la temperatura genera mayores esfuerzos de tracción en las fibras externas de la losa en el horario nocturno, por lo que, al sumar el efecto del tráfico, el pavimento es más propenso a fallar.

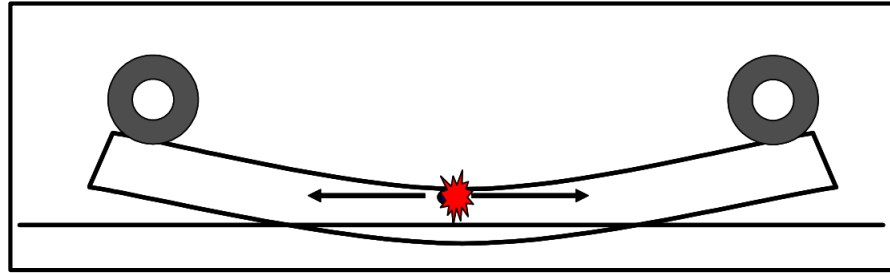


Figura 2-7 Alabeo de la losa de hormigón debido al gradiente de temperatura negativo más la posición crítica de la carga de tráfico (ARA, 2004)

Otro punto importante a considerar es la forma en cómo se alabea la losa ante un gradiente de temperatura negativo. Como se ve en la Figura 2-7, al levantarse los bordes de la losa aumenta el espaciamiento de las juntas, disminuyendo la eficiencia de transferencia de carga. Esta situación genera un escalonamiento mayor, por ende, una razón más para considerarlo en el modelo de escalonamiento.

Otro caso desfavorable a considerar en el diseño de pavimento de hormigón es el gradiente de temperatura de construcción. En el proceso de construcción del pavimento, la losa de hormigón, en el proceso de fraguado y endurecimiento, comienza a alabearse hacia arriba como si estuviera sometida a un gradiente de temperatura. Generalmente, la colocación de hormigón ocurre de día, por lo tanto, es posible que la losa se alabee tal como aparece en la Figura 2-7, ante un gradiente de temperatura positivo. En el punto 2.3.1 se explica en detalle este gradiente.

2.2.2. Datos de humedad relativa

Tal como la temperatura, la presencia de humedad afecta el comportamiento de la losa de hormigón, produciéndose un alabeo por humedad. La diferencia de humedad entre las fibras extremas de la losa es la responsable que la losa se curve, siendo más evidente en climas secos que en climas húmedos.

Con el EICM, se tiene los datos de humedad relativa mes a mes para toda la vida de diseño del pavimento, con estos datos se obtienen el máximo, mínimo y el promedio de la humedad relativa anual.

2.2.3. Datos de eficiencia de transferencia de carga de la berma

La eficiencia de transferencia de carga (LTE) de la berma para el análisis de escalonamiento se define como la proporción entre la deflexión en el lado no cargado y en el lado cargado de la junta multiplicado por 100. La LTE se determina, de acuerdo a la GEMDP, mediante el tipo de berma a considerar en la estructura de pavimento. Dependiendo del tipo de berma, se mejora la transferencia de carga, permitiendo la reducción de las deflexiones y esfuerzos en las losas de hormigón. Los valores de la LTE, que se obtuvieron para la GEMDP, se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 2-1 Eficiencia de transferencia de carga usada en el análisis de escalonamiento

Tipo de berma	Rango de valores de LTE [%]	Valor utilizado de LTE [%] ⁽¹⁾
Hormigón colocado monolíticamente y con barras	50 - 70	70
Hormigón colocado separadamente y con barras	30 - 50	40
Hormigón sin barras o de cualquier otro tipo	0	0

(1) De acuerdo a la calibración del modelo de la GEMDP.

2.2.4. Datos del módulo de elasticidad del hormigón

La relación entre el esfuerzo y la deformación en el rango elástico para una mezcla de hormigón dada corresponde al módulo de elasticidad. El módulo de elasticidad es un dato complejo que se ve influido significativamente por los parámetros de diseño de la mezcla y su valor se obtiene a partir de ensayos o correlaciones con otras propiedades. Los parámetros que intervienen significativamente en el módulo son la razón de agua/cemento, la proporción relativa de pasta y agregado, y el tipo de agregado.

En el análisis mecanicista de la respuesta del pavimento, el módulo de elasticidad del hormigón (E_{PCC}) tiene un fuerte efecto en la deflexión y en los esfuerzos que se generan a lo largo de la estructura del pavimento, debido a esto el módulo debe ser bien representado. La caracterización del módulo de elasticidad varía en función del tipo de diseño. Para este caso, se trata de un diseño de pavimento nuevo y para cada nivel se explicará el procedimiento de cálculo del módulo de elasticidad a través del tiempo para la vida de diseño.

2.2.4.1. Módulo de elasticidad como dato de entrada Nivel 1

Como un dato de entrada de Nivel 1, se recomienda que el E_{PCC} sea estimado por medio de ensayos de laboratorio. La idea principal es la obtención de la curva de ganancia de módulo, es decir, la curva que grafica el aumento progresivo del E_{PCC} a lo largo del tiempo, como se ve en la Figura 2-8. Esta curva es útil para el análisis del daño incrementado en el pavimento y depende de los siguientes datos:

- El módulo de elasticidad de la mezcla a los 7, 14, 28 y 90 días.
- La relación estimada entre el módulo de elasticidad a los 20 años y el módulo de elasticidad a los 28 días. El valor máximo recomendado es de 1,2 para este parámetro.

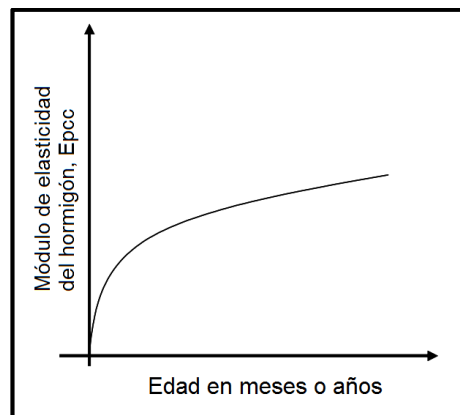


Figura 2-8 Gráfico del E_{PCC} requerido para el diseño empírico mecanicista.

El ensaye recomendado para conseguir el E_{PCC} es el ASTM C 469, "Módulo de elasticidad estático y Módulo de Poisson para el hormigón en compresión". Este ensayo proporciona una relación esfuerzo – deformación y una proporción entre la deformación lateral y longitudinal para un hormigón reforzado de todas las edades y condiciones de curado.

A continuación, se explicará el paso a paso de la elaboración de la curva de ganancia del módulo de elasticidad.

▪ *Paso N°1: Recolección de datos.*

Consiste en la obtención del E_{PCC} por medio de los ensayos de laboratorio y estimar la proporción entre el módulo de elasticidad a los 20 años y el módulo de elasticidad a los 28 días. Este puede ser determinado por medio de los datos de empresas especializadas en mezclas, si es que los datos al respecto están disponibles.

- *Paso N°2: Desarrollo de la curva de ganancia del módulo.*

La curva de ganancia de módulo se basa en los datos de ensayos desarrollados en el laboratorio usando el siguiente modelo de regresión (Ec. 2-2):

$$E_{PCC}(Edad) = E_{pcc}(28días) [\alpha_1 + \alpha_2 \log(Edad) + \alpha_3 [\log(Edad)]^2] \quad \text{Ec. 2-2}$$

Donde: $E_{PCC}(Edad)$: Módulo de elasticidad del hormigón para una edad de pavimento determinada, [MPa].
 $E_{PCC}(28días)$: Módulo de elasticidad del hormigón a los 28 días, [MPa].
 $Edad$: Edad del espécimen, [año].
 $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$: Constantes de regresión.

Se debe destacar que los valores de E_{PCC} obtenidos por métodos de ensayo distintos a los recomendados deben ser convertidos en valores equivalentes usando las correlaciones apropiadas basadas en los ensayos de laboratorio.

2.2.4.2. Módulo de elasticidad como dato de entrada Nivel 2

Para este tipo de dato de entrada, el módulo de elasticidad se puede estimar por medio de la resistencia a compresión (f'_c) medida en ensayos, usando una correlación estándar explicado en el siguiente paso a paso:

- *Paso N°1: Recolección de datos.*

Se usan los valores de resistencia a compresión a los 7, 14, 28 y 90 días y la relación estimada entre la resistencia a compresión a los 20 años y la resistencia a compresión a los 28 días. Los ensayos deben ser acorde a lo estipulado en el AASHTO T22, "Resistencia a compresión de especímenes cilíndricos de hormigón".

Con respecto a la relación solicitada, el máximo valor recomendado para este parámetro es de 1,35. En ambientes con humedad relativa baja, la resistencia a compresión no se incrementa de manera notable después de 28 días. En esos casos, se recomienda un valor de 1,2. Sin embargo, si alguna empresa especializada posee datos de resistencias, este parámetro puede determinarse usando tal información.

- *Paso N°2: Transformación de la resistencia a compresión al módulo de elasticidad.*

El módulo de elasticidad estático del hormigón puede ser estimado a partir de la resistencia a compresión del hormigón usando la ecuación entregada por el ACI (American Concrete Institute) que se muestran en las Ec. 2-3 y Ec. 2-4, donde la primera ecuación el módulo se obtiene en [MPa] y en la segunda en [kgf/cm²]. Esta relación es válida solo para mezclas de hormigón normales y es posible que sea inapropiado para mezclas de alta resistencia o con otras especificaciones.

$$E_{PCC} = 0.04274 \rho^{3/2} f'_c{}^{1/2} \quad \text{Ec. 2-3}$$

Donde: E_{PCC} : Módulo de elasticidad del hormigón, [MPa].
 ρ : Densidad del hormigón, [kg/m³].
 f'_c : Resistencia a compresión del hormigón, [MPa].

$$E_{PCC} = 0.14 \rho^{3/2} f'_c{}^{1/2} \quad \text{Ec. 2-4}$$

Donde: E_{PCC} : Módulo de elasticidad del hormigón, [kgf/cm²].
 ρ : Densidad del hormigón, [kg/m³].
 f'_c : Resistencia a compresión del hormigón, [kgf/cm²].

- *Paso N°3: Desarrollo de la curva de ganancia del módulo.*

Una vez que se define la serie de tiempo de los valores del módulo de elasticidad y la relación de los módulos a largo plazo, el procedimiento para desarrollar la curva de ganancia del módulo para propósitos de diseño es el mismo que se utiliza para el Nivel 1.

2.2.4.3. Módulo de elasticidad como dato de entrada Nivel 3

Para los datos de Nivel 3, el incremento del módulo a través de la vida de diseño puede ser estimado desde un punto de estimación de la resistencia del hormigón, ya sea la resistencia a flexión, módulo de ruptura (MR), o f'_c a los 28 días, usando las ecuaciones de resistencia desarrolladas por medio de datos disponibles en la literatura.

Adicionalmente, si el módulo de elasticidad a los 28 días es conocido, este puede ser también un dato de entrada para determinar de mejor manera la correlación módulo – resistencia.

A continuación, se muestra el paso a paso para estimar la resistencia del hormigón y su módulo:

▪ *Paso N°1: Recolección de datos*

Se necesitan los datos de resistencia a flexión o compresión a los 28 días, estos datos pueden ser encontrados desde los registros de algún laboratorio o empresa. Opcionalmente, también puede ser dato de entrada el valor del módulo de elasticidad a los 28 días, si es que se conoce, junto a cualquiera de las resistencias estimadas.

▪ *Paso N°2.A: Elaboración de la curva de ganancia del módulo de elasticidad utilizando el valor del MR a los 28 días como dato de entrada.*

La Ec. 2-5 puede ser usada para obtener la relación de resistencias basado en un único dato estimado de MR.

$$MR(Edad) = MR(28días) \left[1.0 + 0.12 \log \left(\frac{Edad}{0.0767} \right) - 0.01566 \left(\log \left(\frac{Edad}{0.0767} \right) \right)^2 \right] \quad \text{Ec. 2-5}$$

Donde: MR(Edad) : Módulo de ruptura para una edad determinada, [MPa].

MR(28días) : Módulo de ruptura a los 28 días, [MPa].

Edad : Edad del espécimen, [año].

Si el módulo de elasticidad a los 28 días no es un dato de entrada, el módulo de elasticidad para una edad determinada se puede obtener por el módulo de ruptura estimado, transformando éste a una resistencia a compresión (f'_c) usando la Ec. 2-6. Posteriormente, usando la Ec. 2-3 o la Ec. 2-4, se calcula el módulo de elasticidad.

$$MR = 2.7169 \sqrt{f'_c} \quad (MR \text{ y } f'_c \text{ en } [kgf/cm^2]) \quad \text{Ec. 2-6}$$

Si el módulo de elasticidad a los 28 días es un dato de entrada, entonces como primer paso es calcular la relación entre el módulo de ruptura y el módulo de elasticidad, ambos a los 28 días. Con esta relación se puede estimar el módulo de elasticidad para una edad determinada teniendo conocido el módulo de ruptura para esa misma edad, obteniéndose con la Ec. 2-5.

- *Paso N°2.B: Elaboración de la curva de ganancia del módulo de elasticidad utilizando el valor de la resistencia a compresión a los 28 días como dato de entrada.*

En este enfoque, la resistencia a compresión a los 28 días se convierte primero en el módulo de ruptura a los 28 días ocupando la Ec. 2-6. Posteriormente, se continúa con el paso N°2.A para obtener la curva de ganancia del módulo de elasticidad.

2.2.5. Datos del módulo resiliente de la base y su variación estacional

Para evaluar el módulo resiliente de un material sin consolidar en la GEMDP, se deben considerar varios factores que lo influyen, como el estado de esfuerzos que se somete a la base, la variación de densidad y humedad, y los efectos de hielo y deshielo.

El valor del módulo resiliente para cualquier localidad y tiempo dentro de una estructura de pavimento dada es calculado en función de los factores señalados anteriormente. Independiente del nivel de manejo de la información de datos, el módulo resiliente final se obtiene de la siguiente forma:

$$M_R = F_{env} M_{Ropt} \quad \text{Ec. 2-7}$$

Donde: M_R : Módulo resiliente para un tiempo y lugar determinado.
 M_{Ropt} : Módulo resiliente en condiciones óptimas.
 F_{env} : Factor de ajuste que considera los efectos ambientales.

Se puede ver en la Ec. 2-7 que la variación del módulo producto de la tensión y de las condiciones ambientales es independiente entre la variación de ambos factores. Aunque esto no es necesariamente el caso, estudios recientes apoyan el uso de esta suposición para predecir el módulo resiliente sin pérdida significativa de precisión. El factor de ajuste F_{env} , siendo solo una función de factores ambientales, puede ser calculado dentro del EICM, sin realmente saber M_{Ropt} .

En los siguientes puntos, se explicará el proceso de cálculo del valor del módulo resiliente y cuáles son las condiciones óptimas del módulo resiliente de acuerdo a la GEMDP. Además, se hablará sobre los efectos ambientales sobre el módulo resiliente, sobre el factor de ajuste ambiental y qué consideraciones posee.

2.2.5.1. Cálculo del módulo resiliente para materiales sin consolidar

El módulo resiliente es un dato de entrada requerido para el modelo computacional de la respuesta del pavimento. Tiene un efecto importante en éste y en el módulo dinámico de reacción de la subrasante, calculado internamente en el software de la GEMDP. El módulo resiliente puede suponerse de acuerdo a la clasificación del material o se puede obtener a través del uso de correlaciones con otras propiedades de resistencias de materiales tal como el CBR. Los distintos niveles de datos de entradas para el módulo resiliente se presentan en los siguientes puntos, donde pueden ser aplicados en diseños de pavimentos nuevos, reconstruidos y para rehabilitación.

▪ Módulo resiliente como dato de entrada Nivel 1

El valor del módulo resiliente para materiales granulares sin consolidar y la subrasante se determina con ensayos triaxiales cíclicos sobre muestras representativas preparadas. La norma AASHTO T307-99 (2007), "Determinación del Módulo resiliente para suelos y materiales de agregado", es la norma recomendada por la GEMDP para el dato de entrada Nivel 1.

▪ Módulo resiliente como dato de entrada Nivel 2

En la estimación del módulo resiliente, se puede utilizar las correlaciones generales que relacionan el módulo con otras propiedades del mismo material, siendo directas o indirectas. Para las relaciones indirectas, las propiedades del material primero se relacionan con el CBR y después el CBR se relaciona con el módulo resiliente. En la Tabla 2-2 se muestran los modelos que se ocupan en la GEMDP.

Tabla 2-2 Modelos que relacionan las propiedades del material con el módulo resiliente (ARA 2004)

Tipo de relación	Propiedad	Modelo	Comentarios	Norma
Directa	CBR	$M_R = 2555(CBR)^{0,64}$ MR, [psi]	CBR = California Bearing Ratio, [%]	AASHTO T193
	Valor R	$M_R = 1155 + 555 R$ MR, [psi]	R = Valor R	AASHTO T190
	Coefficiente de capa AASHTO	$M_R = 30000 \left(\frac{a_i}{0,14} \right)$ MR, [psi]	ai = Coeficiente de capa AASHTO	Guía de Diseño de Estructuras de Pavimento AASHTO
Indirecta	IP y graduación	$CBR = \frac{75}{1 + 0,728 (wIP)}$	$wIP = P_{200} IP$ P200 = % que pasa por el tamaño N°200; IP = Índice de Plasticidad, [%]	AASHTO T27 Y AASHTO T90
	DCP	$CBR = \frac{292}{DCP^{1,12}}$	CBR = California Bearing Ratio, [%]; DCP = Dynamic Cone Penetrometer, [mm/golpe]	ASTM D 6951

Para el nivel 2, el software de la GEMDP permite al proyectista las siguientes dos opciones:

- Ingresar como dato de entrada un valor representativo del módulo resiliente y se usa el EICM para ajustar el valor de acuerdo al efecto del clima estacional.
- Ingresar el valor del módulo resiliente para cada mes del año. Correspondería a un valor estacional entregando 12 valores por año.

Se debe tener en cuenta que el uso principal de EICM en este procedimiento de diseño es estimar los perfiles de temperatura y humedad en el sistema de pavimento a lo largo de la vida de diseño. Los perfiles estimados de temperatura y humedad dentro de las capas granulares no consolidadas y subrasante pueden ocuparse también para modificar el módulo resiliente, considerando de esa forma el efecto climático sobre las propiedades del módulo resiliente. El proyectista también tiene la opción de introducir directamente los valores del módulo resiliente.

▪ *Módulo resiliente como dato de entrada Nivel 3*

En la Tabla 2-3 se presenta los valores típicos que recomienda la GEMDP. Hay que notar que solo para el Nivel 3 el valor típico que representa el módulo resiliente requiere que contenga el óptimo de humedad. Usando el EICM, se puede modificar el valor del módulo resiliente para considerar el efecto estacional del clima, pero el proyectista tiene la opción de no ocupar la modificación del EICM.

De acuerdo a la clasificación del material, ya sea por AASHTO (para bases granulares y subrasante) y USC (subrasante), se establece el rango de valores y el valor típico. Dependiendo de la calidad del material o del espesor de la capa se puede escoger valores mayores o menores al típico recomendado por la GEMDP.

Tabla 2-3 Valores típicos del módulo resiliente para materiales granulares no ligados y subrasantes (ARA, 2004)

Clasificación del Material	Rango del M_R	Valor Típico del M_R
A-1-a	38500 - 42000	40000
A-1-b	35500 - 40000	38000
A-2-4	28000 - 37500	32000
A-2-5	24000 - 33000	28000
A-2-6	21500 - 31000	26000
A-2-7	21500 - 28000	24000
A-3	24500 - 35500	29000

Clasificación del Material	Rango del M_R	Valor Típico del M_R
A-4	21500 - 29000	24000
A-5	17000 - 25500	20000
A-6	13500 - 24000	17000
A-7-5	8000 - 17500	12000
A-7-6	5000 - 13500	8000
CH	5000 - 13500	8000
MH	8000 - 17500	11500
CL	13500 - 24000	17000
ML	17000 - 25500	20000
SW	28000 - 37500	32000
SP	24000 - 33000	28000
SW-SC	21500 - 31000	25500
SW-SM	24000 - 33000	28000
SP-SC	21500 - 31000	25500
SP-SM	24000 - 33000	28000
SC	21500 - 28000	24000
SM	28000 - 37500	32000
GW	39500 - 42000	41000
GP	35500 - 40000	38000
GW-GC	28000 - 40000	34500
GW-GM	35500 - 40500	38500
GP-GC	28000 - 39000	34000
GP-GM	31000 - 40000	36000
GC	24000 - 37500	31000
GM	33000 - 42000	38500

2.2.5.2. Valor del módulo resiliente en las condiciones óptimas

El propósito de esta sección es presentar la justificación de la elección de la condición óptima como la condición de referencia para la evaluación del módulo resiliente y como la condición inicial para las capas compactadas no consolidadas para la entrada al software de la GEMDP.

La mayoría de los ensayos del módulo resiliente se han realizado sobre muestras en condiciones óptimas ($\gamma_d = \gamma_{dmax}$, $\omega = \omega_{opt}$ y $S = S_{opt}$) que cualquier otra condición. Por lo tanto, si se hace óptima la condición de referencia, la base de datos para el valor M_{Ropt}

crecerá rápidamente y la capacidad de hacer estimaciones razonables de M_{Ropt} sin ensayos de módulo resiliente también aumentará.

Es una práctica común que los contratistas compacten las bases por lo menos al 95% de γ_{dmax} por AASTHO T180 (Proctor Modificado). Dado que los contratistas suelen fijar la compactación algo por encima del mínimo requerido, el campo de compactación de $\gamma_d = \gamma_{dmax}$ es una aproximación razonable utilizado en la GEMDP como la condición de referencia. El contenido de humedad es raramente controlado por la especificación, siendo que, para facilitar la compactación, el contratista humedece la base cerca del óptimo. Así $\omega = \omega_{opt}$ y $S = S_{opt}$ también son supuestos razonables para las condiciones de referencia, aunque el contenido de humedad real para el campo de compactación puede variar de manera considerable.

2.2.5.3. Efectos ambientales sobre el módulo resiliente

En la estructura del pavimento, la humedad y la temperatura son las dos variables accionados con el medio ambiente que pueden afectar significativamente el módulo resiliente.

Todas las demás condiciones son iguales, cuanto mayor sea el contenido de humedad menor es el módulo resiliente. Sin embargo, la humedad tiene dos efectos distintos:

- Afecta el estado de esfuerzos, a través de la succión o por la presión de agua intersticial.
- Afecta a la estructura del suelo, a través de la destrucción de la cementación entre las partículas del suelo.

En el caso de la temperatura, el efecto que genera es el proceso de hielo/deshielo sobre la base. En el momento de bajas temperaturas, el agua en el suelo se congela y el módulo resiliente se eleva a valores de 20 a 120 veces mayor que el valor del módulo antes de la congelación; el proceso puede ir acompañado de la formación de lentes de hielo que crean zonas de resistencia muy reducidas en el pavimento cuando se produce la descongelación.

El desarrollo de las ecuaciones predictivas y las técnicas que dirigen la influencia de los cambios en los ciclos de humedad y la congelación/descongelación en el módulo resiliente se describen en las siguientes dos subsecciones.

▪ *El módulo resiliente como función de la humedad del suelo*

Se tiene el siguiente modelo que analíticamente puede predecir las variaciones en el módulo resiliente debido a cambios en la humedad. Este modelo se presenta en la Ec. 2-8.

$$\log \left(\frac{M_R}{M_{Ropt}} \right) = a + \frac{b - a}{1 + \exp \left(\ln \left(\frac{-b}{a} \right) + c(S - S_{opt}) \right)} \quad \text{Ec. 2-8}$$

Donde: M_R/M_{Ropt} : Razón entre el módulo resiliente para un tiempo determinado y el módulo resiliente en las condiciones de referencia.

a : el valor mínimo de $\log(M_R/M_{Ropt})$.

b : el valor máximo de $\log(M_R/M_{Ropt})$.

c : Parámetro de regresión.

$(S - S_{opt})$: Variación del grado de saturación expresado en decimales.

La Ec. 2-8 se aproxima a una forma lineal para grados de saturación, S, dentro de +/- 30% de S_{opt} pero se aplana para grados de saturación inferior al 30% por debajo del óptimo. Esta extrapolación es en general de acuerdo con el comportamiento conocido de los materiales insaturados en que, cuando un material está lo suficientemente seco, incrementos adicionales de secado producen menos aumento de la rigidez y resistencia.

Considerando una razón del módulo máximo de 2,5 para materiales de grano fino y 2 para materiales de grano grueso, los valores de a, b y c para cada tipo de material se muestran en la Tabla 2-4. Este modelo se implementa dentro de la versión EICM vinculados al software de la GEMDP.

Tabla 2-4 Valores de los parámetros a, b y c para cada tipo de material (ARA, 2004)

Parámetros	Material de grano grueso	Material de grano fino
a	-0,3123	-0,5934
b	0,3	0,4
c	68,157	61,324

▪ *Módulo resiliente en etapa de congelamiento/descongelamiento*

Para un mejor entendimiento el proceso que sufre el módulo resiliente en la etapa de congelamiento/descongelamiento, se definen las siguientes variables:

- M_{Rfrz} : Módulo resiliente del material congelado (o M_{Rmax}).
- M_{Runfrz} : Módulo resiliente normal, es decir, de un material sin congelar.
- M_{Rmin} : Módulo resiliente justo después de descongelarse.

Se tiene que la razón de módulos es usada como un factor de reducción, denominado RF. Debido a que en algunas partes considera los valores de RF basado en M_{Runfrz} como referencia y algunos se basaron en M_{Ropt} como referencia, se decidió adoptar la interpretación conservadora de la utilización de la más pequeña de M_{Runfrz} y M_{Ropt} como referencia. La razón de módulos queda de la siguiente forma:

$$RF = \frac{M_{Rmin}}{\min(M_{Runfrz}, M_{Ropt})} \quad \text{Ec. 2-9}$$

Los valores promedios conocidos para M_{Rfrz} son los siguientes:

- Materiales de grano grande : $M_{Rfrz} \cong 3 \times 10^6 [psi]$
- Limo y arenas limosas de grano fino : $M_{Rfrz} \cong 2 \times 10^6 [psi]$
- Arcillas : $M_{Rfrz} \cong 1 \times 10^6 [psi]$

Si se selecciona un solo valor para todos los suelos congelados, $2 \times 10^6 [psi]$ sería una estimación razonablemente imparcial y $1 \times 10^6 [psi]$ sería una estimación conservadora.

Para materiales descongelados, se encontró que el grado de degradación del módulo resiliente después de la descongelación se correlaciona con la susceptibilidad a las heladas, o la capacidad del suelo para sostener la formación de lentes de hielo bajo condiciones favorables. La susceptibilidad a las heladas a su vez puede estimarse a partir del porcentaje de material que pasa por la malla No. 200, P_{200} , y el índice de plasticidad, IP. En las Tabla 2-5 y Tabla 2-6, se muestran los valores de RF utilizados en el enfoque de la GEMDP para los materiales de grano grueso y de grano fino en función del P_{200} e IP.

Tabla 2-5 Valores recomendados de RF para materiales de grado grueso ($P_{200} < 50\%$)

Distribución de fracción gruesa	P_{200} (%)	IP < 12%	IP = 12% - 35%	IP > 35%
Grava $P_4 < 50\%$	< 6	0,85	-	-
	6 - 12	0,65	0,70	0,75
	>12	0,60	0,65	0,70
Arena $P_4 > 50\%$	< 6	0,75	-	-
	6 - 12	0,6	0,65	0,7
	>12	0,5	0,55	0,6

Tabla 2-6 Valores recomendados de RF para materiales de grado fino ($P_{200} > 50\%$)

P_{200} (%)	IP < 12%	IP = 12% - 35%	IP > 35%
50 - 85	0,45	0,55	0,60
> 85	0,40	0,50	0,55

Los materiales en proceso de recuperación experimentan un aumento en el módulo con el tiempo, desde M_{Rmin} a M_{Runfrz} , que se puede controlar utilizando una relación de recuperación (RR), que va de 0 a 1:

- RR = 0 para la condición "inmediatamente después de la descongelación", cuando el exceso de agua hace que la succión sea igual a cero, $M_{Recov} = M_{Rmin}$.
- RR = 1 cuando la aspiración es igual a la succión dictada por la profundidad a la que se consigue el equilibrio del agua subterránea, $M_{Recov} = M_{Runfrz}$.

$$RR = \frac{\Delta t}{T_R} \quad \text{Ec. 2-10}$$

Donde: RR : Relación de recuperación.

Δt : Número de horas transcurridas desde el comienzo del deshielo.

T_R : Período de recuperación: Número de horas requeridas para que el material pueda recuperarse de la condición descongelada a la condición no congelada o normal.

Para la GEMDP, el período de recuperación, T_R , se observa como una función del tipo / propiedades de los materiales, como se muestra a continuación:

- Para gravas / arenas con $P_{200} * IP < 0,1$: 90 días.
- Para limos / arcillas con $0,1 < P_{200} * IP < 10$: 120 días.
- Para arcillas con $P_{200} * IP > 10$: 150 días.

2.2.5.4. Cálculo del factor de ajuste ambiental, F_{env}

El factor de ajuste ambiental, F_{env} es un factor compuesto, que podría representar en general un promedio ponderado de los factores apropiados para varias condiciones posibles, tales como:

- Congelación: material congelado - F_F (factor para materiales congelados).
- Recuperación: material descongelado que se está recuperando de su estado antes de que ocurriera la congelación - F_R (factor de recuperación de materiales).
- Descongelación / totalmente recuperado / normales: para los materiales que nunca fueron congelados o están totalmente recuperados - F_U (factor para el material no congelado).

La metodología para estimar F_{env} consiste en dos, uno por medio del análisis nodal y el otro por medio del análisis por capas. En ambos casos se abarcan los factores de ajuste explicados previamente. Cada metodología consiste en:

- Nodal : En el EICM la estructura del pavimento se caracteriza por una matriz de nodos en la que los valores de la humedad, de succión, y la temperatura se calculan en cualquier momento t . Es importante señalar que estos nodos pueden no coincidir con los nodos de la malla de elementos finitos utilizados en el cálculo estructural.
- Capas : Se tiene en cuenta que los materiales congelados, descongelados, y sin congelar pueden coexistir dentro de una sola capa. Es un método de cálculo de un factor de ajuste de material compuesto que puede manejar todos los casos posibles. El cálculo de este factor es útil incluso cuando el material en una capa está en el mismo estado (no congelada o recuperada). Esto es debido a los factores de ajuste varían de nodo a nodo y un factor equivalente para toda la capa puede ser requerido para los cálculos posteriores.

Ya con los datos obtenidos y ordenados, se continúa con el siguiente paso, correspondiente al cálculo del gradiente de temperatura efectivo, que considera tanto los factores

ambientales, como la temperatura y la humedad, y el comportamiento del hormigón al estar expuesto a la intemperie.

2.3. DETERMINACIÓN DEL GRADIENTE DE TEMPERATURA EFECTIVO

El alabeo de las losas de hormigón se refiere a la distorsión de éstas causado por gradientes de temperatura y humedad. Las diferencias de los gradientes de temperatura y humedad a través del espesor pueden hacer que las losas del pavimento se alabeen ya sea hacia arriba o hacia abajo, como se puede apreciar en la Figura 2-9. Las distorsiones pueden causar pérdida de apoyo en los bordes de la losa y esquinas, dando como resultado un aumento significativo de esfuerzos críticos de flexión. Debido a que el peso propio de la losa resiste el alabeo, los vacíos no pueden desarrollarse excepto bajo condiciones de temperatura o humedad extremas, sobre todo cuando se aplican cargas de tráfico. Sin embargo, ninguna fuerza, incluyendo peso propio, que restringe el movimiento libre de losa introduce esfuerzos adicionales en la losa.

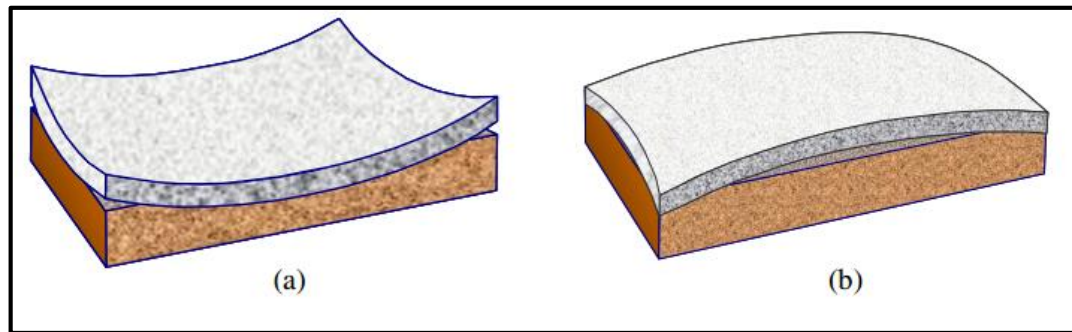


Figura 2-9 Ilustración del alabeo de la losa de hormigón (a) Alabeo hacia arriba; (b) Alabeo hacia abajo (Yu, 2004)

■ Componentes del gradiente de temperatura

Los efectos de la temperatura y humedad son considerados en el diseño de JPCP en la GEMDP de la siguiente manera:

$$\Delta T = \Delta T_{Perm} + \Delta T_{Hourly} + \Delta T_{Shrink}$$

Ec. 2-11

Donde: ΔT : Gradiente de temperatura efectiva.

ΔT_{Perm} : El alabeo permanente incorporado que se produce durante la construcción se combinan con la deformación permanente debido a la retracción diferencial, así como los efectos de la fluencia y asentamientos. Es expresado en términos de gradiente de temperatura efectiva entre la parte superior e inferior de la losa.

ΔT_{Hourly} : Gradientes de temperatura por hora transitoria causada por la radiación solar y otros factores. Se calculan utilizando el EICM.

ΔT_{Shrink} : Retracción transitoria o reversible en la parte superior de las losas del pavimento causadas por cambios en la humedad relativa atmosférica durante cada mes del año. Se convierte en una diferencia de temperatura equivalente para cada mes.

Como se puede apreciar en la Ec. 2-11, el gradiente de temperatura no solo depende de las condiciones ambientales que se somete la estructura del pavimento, sino también del proceso de fraguado del hormigón y cómo el hormigón se comporta ante la variación de humedad. Lo anterior se engloba en lo denominado retracción del hormigón, correspondiente a la deformación de la losa ante el comportamiento del hormigón cuando se cambia el contenido de agua en la losa.

La retracción del hormigón se produce cuando se elimina el agua de la pasta de cemento endurecida. Por lo tanto, se aumenta la capacidad de retracción con el aumento de contenido de pasta de cemento en el hormigón, con el aumento de la relación agua/cemento para la producción de la pasta de cemento y disminuye con el aumento de contenido de agregado volumétrico de hormigón. La retracción por secado extrema en la superficie se puede producir en los pisos industriales de hormigón o sobre losas de hormigón en túneles, donde la baja humedad relativa del aire y el viento están disponibles (Eisenmann et al., 1990).

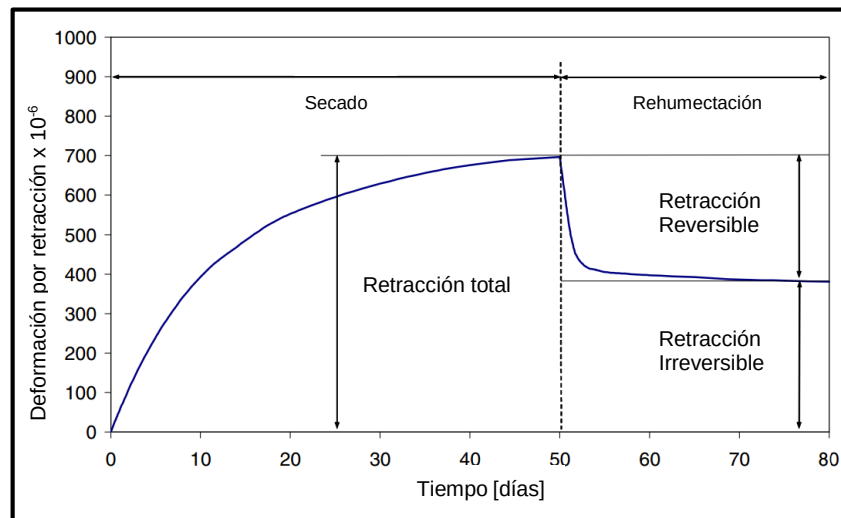


Figura 2-10 Comportamiento típico del hormigón tras el secado y rehumectación (Yu, 2004)

La retracción por secado se desarrolla con el tiempo cuando el hormigón se somete a secado. Al volver a humedecer, el hormigón se expande para revertir una parte de la retracción por secado, pero una parte de ésta, que se produce en el secado inicial, es irreversible. La Figura 2-10 ilustra el comportamiento típico del hormigón tras el secado y rehumectación. El principal

factor que determina la cantidad de retracción reversible presente en el hormigón endurecido en cualquier momento dado es la humedad relativa del ambiente.

▪ *Gradiente de temperatura de la losa equivalente*

En el análisis del escalonamiento, la estructura de pavimento se trabaja con una losa equivalente combinando las propiedades de la losa de hormigón y la base granular, por lo tanto, el gradiente de temperatura debe traspasarse a la losa equivalente, determinándose con la siguiente expresión:

$$\Delta T_{eff,m} = \frac{h_{PCC}^2}{H_{eff,m}^2} (T_{top,m} - T_{bot,m} + \Delta T_{BI} + \Delta T_{SH,m}) \quad \text{Ec. 2-12}$$

Donde: $\Delta T_{eff,m}$: Gradiente de temperatura efectiva entre las superficies superior e inferior de la losa equivalente del mes "m", [°C].
 $H_{eff,m}$: Espesor efectivo de la losa equivalente del mes "m", [mm].
 h_{PCC} : Espesor de la losa de hormigón, [mm].
 $T_{top,m}$: Temperatura nocturna sobre la losa del mes "m", [°C].
 $T_{bot,m}$: Temperatura nocturna bajo la losa del mes "m", [°C].
 ΔT_{BI} : Gradiente de temperatura de construcción o de alabeo permanente, [°C].
 $\Delta T_{SH,m}$: Gradiente de temperatura equivalente debido a la retracción reversible del mes "m", [°C].

En las siguientes subsecciones, se explicará en detalle en qué consiste cada gradiente de temperatura y otras variables de la Ec. 2-11 y de la Ec. 2-12, además de especificar cualquier dato requerido en el cálculo de cada gradiente.

2.3.1. Gradiente de temperatura producto del alabeo permanente

El alabeo permanente se refiere al gradiente de temperatura que se produce dentro de las losas de hormigón en el momento de endurecimiento del hormigón que es causada por la parte permanente de la retracción diferencial. La curvatura de la losa real debido al alabeo permanente puede ser muy variable, incluso a lo largo de un determinado proyecto, y una combinación de factores adversos, por ejemplo, una mezcla de hormigón con alta retracción y gradiente de temperatura excesiva en el momento de colocación de la mezcla, puede dar lugar a un alabeo permanente extremadamente alto, que puede causar un agrietamiento prematuro. Sin embargo, los resultados de la calibración indican que los valores promedios a largo plazo del alabeo permanente efectivo son bastante uniformes, sin sesgo evidente

basado en el clima o en los factores de diseño, incluyendo espesor de la losa y el tipo de base. La temperatura utilizada corresponde a $-5,6$ [°C].

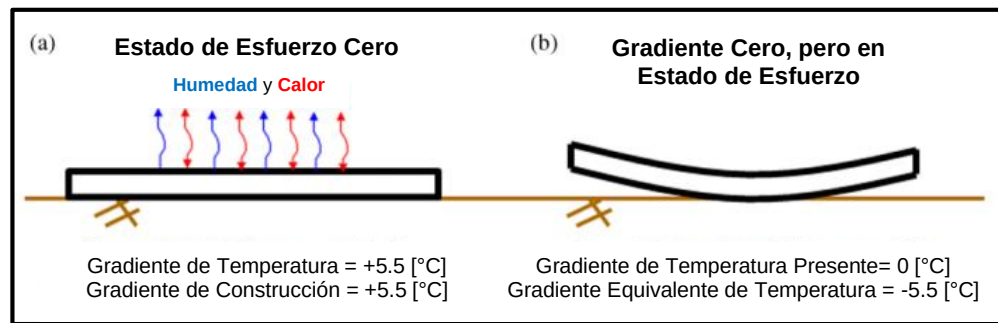


Figura 2-11 Ilustración del gradiente de temperatura de construcción efectivo (Vandenbossche, 2011)

Para un mejor entendimiento del alabeo permanente, éste comienza en el momento que se coloca la mezcla de hormigón, teniendo un pleno contacto con la base y en la condición de cero esfuerzo debido a que el hormigón está en un estado plástico, independiente de la presencia de gradientes de temperatura y humedad. En la Figura 2-11 (a) se muestra cómo un gradiente de temperatura positivo se puede desarrollar en la losa, si la pavimentación se lleva a cabo durante las horas de la mañana y el fraguado con el endurecimiento tienen lugar en una tarde soleada. Esto hace que la temperatura en la parte superior de la losa sea mayor que en la parte inferior de la losa, perdiendo humedad en la superficie de la losa. Cuando la losa de hormigón fragua bajo estas condiciones, se incorpora en la losa un gradiente de temperatura negativo y la losa se alabea hacia arriba a pesar que la diferencia de temperatura real entre la parte superior y la parte inferior de la losa es cero. En la Figura 2-11 (b) se ilustra este punto, mostrando como un gradiente de temperatura transitoria de 0 [°C] hace que la losa se alabe hacia arriba, como si se aplicara un gradiente de temperatura equivalente de $-5,5$ [°C].

2.3.2. Gradiente de temperatura a través del espesor de la losa de hormigón

En la sección 2.2.1 se describe en detalle cómo se trabaja los datos de la temperatura de la losa, consistiendo principalmente en 11 temperaturas a través del espesor de la losa de hormigón para cada hora utilizando los datos de clima disponibles. El EICM genera estas temperaturas de acuerdo a las necesidades del escalonamiento, siendo la diferencia lineal equivalente de temperatura nocturna de cada mes entre las 8 p.m. y las 8 a.m.

2.3.3. Gradiente de temperatura debido a la retracción reversible del alabeo

La humedad en la subrasante y en la estructura del pavimento puede provenir de distintas fuentes como se muestra en la Figura 2-12. El agua puede filtrarse desde la napa freática hacia arriba mediante succión por capilaridad o movimientos de vapor, o esta puede fluir lateralmente desde los bordes del pavimento, cunetas y zanjas laterales. Otra fuente de agua en el pavimento es la infiltración superficial de precipitación y agua de deshielo a través de las juntas, grietas, bermas, y varios otros efectos especialmente en los pavimentos más deteriorados.

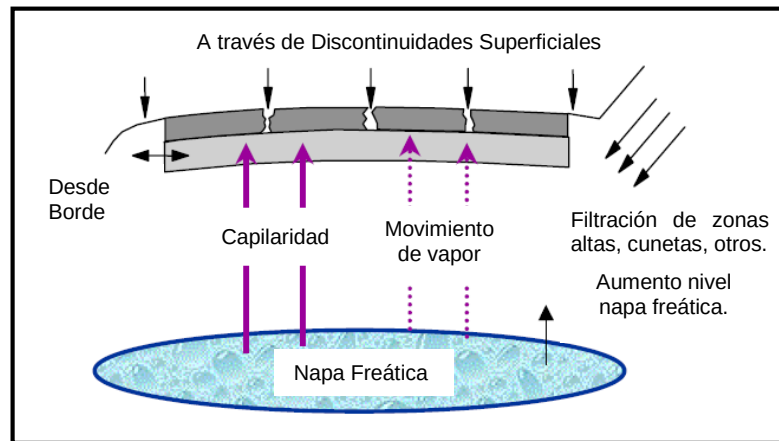


Figura 2-12 Diagrama de infiltración considerada por EICM (ARA, 2004)

Entre los problemas causados por la prolongada exposición excesos de humedad se encuentran:

- Reblandecimiento de las capas de pavimento y subrasante a medida que se satura y permanece saturado por largos periodos de tiempo.
- Degradación de la calidad de los materiales producto de la interacción con la humedad.
- Pérdida de firmeza y unión entre las capas de pavimento.

La variación estacional en la humedad relativa genera un importante alabeo en la losa de hormigón. Esto puede describirse a través de un gradiente de temperatura equivalente que causaría la misma cuenca de deflexión. El cálculo del gradiente de temperatura se basa en la deformación de retracción última; esta deformación se explicará en detalle en el punto 2.3.3.3.

La variación de humedad genera un cambio en el volumen de la losa de hormigón, donde la losa está sometida a condiciones extremas de saturación y secado presentándose en la parte inferior y superior de ésta, considerándose igual de importante y con el mismo orden de magnitud como el efecto de la variación de temperatura presente en el ambiente.

La humedad incorporada al pavimento de hormigón, por las lluvias de invierno, desarrolla un hinchamiento en las losas. Esto provoca una disminución en la apertura de las juntas transversales, aumentando la transferencia de carga, contrarrestando de esa forma el efecto de las bajas temperaturas en el ambiente.

En el caso opuesto, durante los periodos de poca lluvia o ausencia de lluvia, el pavimento sufre un proceso de secado, desde la superficie penetrando la profundidad del espesor de la losa, produciendo un gradiente de humedad. Debido a este gradiente, la losa se alabea hacia arriba, como se puede ver en la Figura 2-9 (a), manifestándose un incremento significativo de las deflexiones en las losas producto de las cargas.

Tal alabeo se manifiesta de manera cíclica anualmente, siendo una componente significativa y aditiva con la concavidad que se genera por la componente térmica producto de las nocturnas. En consecuencia, el alabeo hacia arriba es la condición estructural más desfavorable al considerarse la superposición de las cargas de tráfico en los bordes y esquinas sin soporte. Por lo tanto, para el caso del escalonamiento, es una componente importante a considerar en el diseño, ya que se trabaja con gradientes de temperaturas negativos (Poblete et al, 1990).

Como se dijo anteriormente, el efecto de la humedad relativa en la atmósfera se transforma a un gradiente de temperatura equivalente, calculándose con la Ec. 2-13:

$$\Delta T_{SH,m} = \frac{3 \varphi (\varepsilon_{sh,m} - \varepsilon_{sh,prom}) h_s \left(\frac{h_{PCC}}{2} - \frac{h_s}{3} \right)}{\alpha h_{PCC}^2 100} \quad \text{Ec. 2-13}$$

Donde:	$\Delta T_{SH,m}$	: Gradiente de temperatura equivalente debido a la retracción reversible del mes "m", [°F].
	$\varepsilon_{sh,prom}$	: Deformación de retracción para la humedad relativa promedio, [strain].
	$\varepsilon_{sh,m}$	: Deformación de retracción del mes "m", [strain].
	φ	: Factor de deformación de retracción. La porción de deformación de retracción corresponde sólo a un 50% de la retracción última.
	h_s	: Profundidad de la zona de retracción, se usa 2 [in].
	h_{PCC}	: Espesor de la losa de hormigón, [in].
	α	: Coeficiente de expansión térmica del hormigón, [in/in/°F].

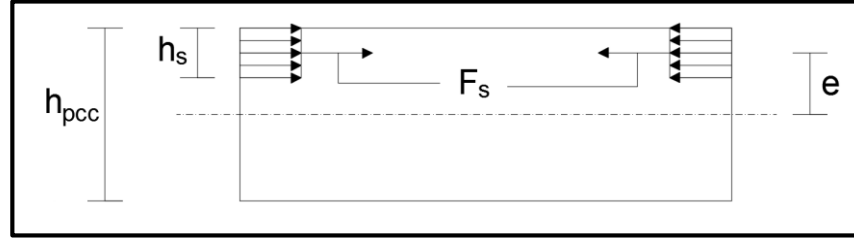


Figura 2-13 Modelo de viga ante la tensión generada por la humedad (Eisenmann et al., 1990)

Para obtener el gradiente de temperatura equivalente a la deformación por humedad se tiene que suponer que la losa de hormigón se comporta como una viga sin restricciones de movimiento, como se muestra en la Figura 2-13. La viga tiene una sección transversal de ancho unitario, por lo tanto, el momento que se genera por la contracción de la superficie debido a la presencia de humedad es el siguiente:

$$M = F_s e \quad \text{Ec. 2-14}$$

$$F_s = h_s \varepsilon_{sh} E_{PCC} \quad \text{Ec. 2-15}$$

$$e = \frac{h_{PCC} - h_s}{2} \quad \text{Ec. 2-16}$$

Donde: h_s : Profundidad de la zona de retracción.
 h_{PCC} : Espesor de la losa de hormigón.
 $\varepsilon_{sh, prom}$: Deformación de retracción para la humedad.
 E_{PCC} : Módulo de elasticidad del hormigón.

Por otro lado, también está presente el momento generado por los esfuerzos producto de la temperatura equivalente, siendo el siguiente:

$$M = \frac{\sigma_w h_{PCC}}{6} \quad \text{Ec. 2-17}$$

$$\sigma_w = \frac{h_{PCC} \Delta t \alpha_{PCC} E_{PCC}}{2} \quad \text{Ec. 2-18}$$

Donde: σ_w : Esfuerzos de alabeo producto del gradiente de temperatura.
 Δt : Gradiente de temperatura por unidad del espesor de la losa.

Igualando la Ec. 2-14 con la Ec. 2-17, se tiene que el gradiente de temperatura equivalente es el siguiente:

$$\Delta T = \frac{6 h_s \varepsilon_{sh} (h_{PCC} - h_s)}{\alpha h_{PCC}^2} \quad \text{Ec. 2-19}$$

Se puede apreciar que la Ec. 2-19 posee la misma forma que la Ec. 2-13, salvo por los factores que acompañan a cada variable. Implementar una viga como modelo para graficar el comportamiento de una losa no sería lo más correcto, pues ambos elementos poseen consideraciones distintas. Las losas de hormigón se modelan de mejor manera por medio de placas, debido a que éstas se deforman en dos direcciones, mientras que las vigas solo lo hacen en una dirección. A pesar de lo anterior, esta expresión se utiliza por la simplicidad y eficiencia del cálculo, además el error que implica no afectaría en gran medida al resultado final.

Para calcular las deformaciones por retracción necesarias para calcular el gradiente de temperatura equivalente, se debe considerar los siguientes pasos explicados a continuación.

2.3.3.1. Determinación de la deformación de la retracción diferencial para la humedad

Se calcula con la siguiente expresión:

$$\varepsilon_{sh,prom} = \begin{cases} \varepsilon_{su} (1.4 - 0.01 RH_{prom}) & \text{si } RH_{prom} < 80 \\ \varepsilon_{su} (3 - 0.03 RH_{prom}) & \text{si } RH_{prom} \geq 80 \end{cases} \quad \text{Ec. 2-20}$$

Donde: $\varepsilon_{sh,prom}$: Deformación de retracción para la humedad relativa promedio anual, [microstrain].

ε_{su} : Deformación de retracción última, [microstrain].

RH_{prom} : Promedio anual de la humedad relativa en el ambiente, [%].

2.3.3.2. Determinación de la deformación de la retracción diferencial mensual

Se calcula usando la siguiente ecuación:

$$\varepsilon_{sh,m} = \begin{cases} \varepsilon_{su} (1.4 - 0.01 RH_m) & \text{si } RH_m < 80 \\ \varepsilon_{su} (3 - 0.03 RH_m) & \text{si } RH_m \geq 80 \end{cases} \quad m = 1, \dots, 12 \quad \text{Ec. 2-21}$$

Donde: $\varepsilon_{sh,m}$: Deformación de retracción del mes "m", [microstrain].

ε_{su} : Deformación de retracción última, [microstrain].

RH_m : Humedad relativa promedio del mes "m", [%].

2.3.3.3. Estimación de la deformación de retracción última.

La deformación última de retracción es la deformación de retracción del hormigón que se desarrollará después de una exposición prolongada a condiciones de secado, que por definición es una humedad relativa del 40 %. Dado que la humedad relativa ambiente es un factor importante que afecta la retracción, la condición de humedad debe especificarse para la retracción última. En la GEMDP, una humedad relativa de 40 % se especifica como la condición estándar. A continuación, se explica cómo calcular la retracción última de acuerdo a los niveles de dato de entrada.

- *Estimación de la deformación de retracción última como dato de entrada Nivel 1*

Idealmente, para un dato de entrada Nivel 1, el valor de la retracción última para una mezcla de hormigón en particular debe ser establecido en el laboratorio. Sin embargo, esto no es un enfoque práctico, ya que podría tomar varios años obtener la deformación de retracción última de manera estable en el tiempo. Los estudios en terreno han demostrado que podría tomar al menos 5 años para llegar a un valor de retracción de secado máximo estable.

Sin embargo, se recomienda utilizar el protocolo AASHTO T160 para medir la deformación de retracción a corto plazo para una humedad relativa de 40 % en el laboratorio, para desarrollar una cierta confianza en la estimación de la deformación de retracción última en los enfoques de los datos de entrada Nivel 2 y 3. Este protocolo puede tomar alrededor de 180 días o más.

- *Estimación de la deformación de retracción última como dato de entrada Nivel 2*

En el caso de dato de entrada Nivel 2, la retracción última se estima mediante una correlación estándar basada en los parámetros de la mezcla, es decir por el tipo de cemento, contenido de cemento y la relación de agua/cemento, en la resistencia de compresión del hormigón a los 28 días y en las condiciones de curado. La correlación es la siguiente:

$$\varepsilon_{su} = C_1 C_2 (26 w^{2.1} f'_c{}^{-0.28} + 270) \quad \text{Ec. 2-22}$$

Donde: ε_{su} : Deformación de retracción última, [microstrain].

C_1 : Factor de tipo de cemento, correspondiente a cemento Portland (1; tipo I – 0.85, tipo II – 1.1, tipo III).

C_2 : Factor de tipo de curado (0.75, curado de vapor – 1; curado en agua o 100 % de humedad relativa – 1.2, sellado durante el curado).

w : Contenido de agua, [lb/ft³].

f_c : Resistencia a compresión del hormigón a los 28 días, [psi].

▪ *Estimación de la deformación de retracción última como dato de entrada Nivel 3*

Para el dato de entrada Nivel 3, la Ec. 2-22 se puede utilizar con la única diferencia de que ocupan los valores típicos de w y f_c a partir de registros históricos en lugar de los valores específicos de la mezcla como es requerido para el Nivel 2.

2.3.4. Determinación el espesor efectivo de la losa

Utilizando el valor representativo del módulo de elasticidad del hormigón, se calcula el espesor efectivo mes a mes, considerando la variación estacional del módulo de la base.

El valor representativo del módulo de elasticidad del hormigón corresponde al módulo obtenido al final del primer año después de la apertura del tráfico. La variación del módulo de elasticidad con respecto a la edad del pavimento se vio en detalle en el punto 2.2.4.

Con respecto a la variación estacional del módulo resiliente de la base, se considera los factores de temperatura y humedad que varían acorde el paso de las estaciones del año, y esto tiene una influencia en el valor del módulo de la base con el pasar del tiempo. Se revisó en detalle este comportamiento en el punto 2.2.5.

Con la Ec. 2-23 que se muestra a continuación, se obtiene el espesor efectivo por mes.

$$H_{eff,m} = \sqrt{h_{PCC}^2 + \frac{M_{R,BASE,m}}{E_{PCC}} H_{BASE}^2} \quad m = 1, \dots, 12 \quad \text{Ec. 2-23}$$

Donde: $H_{eff,m}$: Espesor efectivo de la losa del mes “m”, [mm].
 h_{PCC} : Espesor de la losa PCC, [mm].
 H_{BASE} : Espesor de la base, [mm].
 E_{PCC} : Módulo de elasticidad representativo del hormigón, [MPa].
 $M_{R,BASE,m}$: Módulo resiliente de la base del mes “m”, [MPa].

Teniendo el gradiente de temperatura efectivo, se procede a calcular el escalonamiento máximo inicial. Solo se considera los efectos de la temperatura y humedad para este escalonamiento, es decir, solo el alabeo térmico. Igualmente, se considera las propiedades de la base y subrasante, para la erosionabilidad y la granulometría.

2.4. DETERMINACIÓN DEL ESCALONAMIENTO MÁXIMO INICIAL

Para calcular el escalonamiento máximo inicial, se trabaja con los datos del primer año de funcionamiento del pavimento después de la apertura del tráfico. Se analiza cada mes del primer año y se escoge el peor caso para fijar el escalonamiento máximo al principio del mes 1. Para los meses posteriores hasta el penúltimo mes de la vida de diseño, se procede a ocupar el punto 2.7.3, que considera la energía de deformación que genera la carga de tráfico.

Según la GEMDP, se tiene lo siguiente para calcular el escalonamiento máximo inicial:

$$FMAX_0 = C_{12} \delta_{eff,max} \left[\log \left(\frac{P200 \times WetDays}{P_s} \right) \log(1 + C_5 \times 5^{EROD}) \right]^{C_6} \quad \text{Ec. 2-24}$$

- Donde:
- FMAX₀ : Escalonamiento máximo inicial, [mm].
 - P200 : Porcentaje de material de subrasante pasando por la malla de tamaño 0.075 [mm].
 - EROD : Erosionabilidad de la base.
 - WetDays : Número de días húmedos por año, [días].
 - δ_{eff,max} : Máxima deflexión en la esquina debido al alabeo, [mm].
 - P_s : Sobrecarga sobre la subrasante, [lb/in²]

$$P_s = h_{PCC} \gamma_{PCC} + h_{Base} \gamma_{Base} \quad \text{Ec. 2-25}$$

- C₁₂ : $C_{12} = C_1 + C_2 FR^{0.25}$
- FR : Índice de congelamiento de la base, definido como el porcentaje de tiempo en que la superficie de la base tiene una temperatura bajo los 32 [°F] (0 [°C]).
- C₁, C₂, C₅ y C₆ son coeficientes de calibración.

Considerando la Ec. 2-24, se procede a calcular cada variable para obtener el escalonamiento. En las siguientes subsecciones, se establece el procedimiento para llegar al resultado requerido.

2.4.1. Valores de los coeficientes de calibración

De acuerdo con la base de datos desarrollada en Chile para pavimentos nuevos de hormigón, se considera los datos del pavimento, clima, suelos y materiales chilenos para la calibración del modelo de escalonamiento de la GEMDP. Esta primera calibración consistió en obtener los valores de los coeficientes de calibración para el caso chileno, teniéndose los valores mostrados en la Tabla 2-7.

Tabla 2-7 Coeficientes de calibración para pavimentos chilenos.

Coeficiente de calibración	
C ₁	1,165
C ₂	1,1273688
C ₃	0,0015
C ₄	0,001086951
C ₅	200
C ₆	0,54
C ₇	4,5
C ₈	400

2.4.2. Determinación de la máxima deflexión de alabeo

Usando redes neuronales, se obtiene las deflexiones en el sistema de losa equivalente debido a la temperatura de alabeo y por el peso propio. La deflexión por alabeo se define como la diferencia entre el desplazamiento debido al alabeo térmico más el peso propio y el desplazamiento debido solo al peso propio con respecto a los ejes de referencia. En la Ec. 2-26 se muestra la deflexión por alabeo.

$$\delta_{curl,m} = \frac{34100596.7 H_{eff,m}}{l_m^4 k_m} [NN_c(JTSpace, l_m, \phi_m) - NN_c(JTSpace, l_m, 0)] \quad m = 1, \dots, 12 \quad \text{Ec. 2-26}$$

Donde:

- $\delta_{curl,m}$: Deflexión en la esquina de la losa debido solo al alabeo del mes “m”, [mm].
- $JTSpace$: Largo de la losa de hormigón, [m].
- $H_{eff,m}$: Espesor efectivo de la losa del mes “m”, [mm].
- k_m : Módulo de reacción de la subrasante del mes “m”, [MPa/mm].
- l_m : Radio de rigidez relativa del mes “m”, [mm].
- ϕ_m : Gradiente de temperatura adimensional del mes “m”.
- $NN_c()$: Red neuronal entrenada para determinar el desplazamiento en la esquina. No se aplica ejes de carga.

Al tener las deflexiones de los 12 meses, se tiene que escoger el mayor para ocuparlo en la Ec. 2-24. Para calcular estas deflexiones se tiene que obtener los parámetros de la losa equivalente y el gradiente de temperatura adimensional de Korenev, que se explican en las siguientes subsecciones.

2.4.2.1. Determinación del peso unitario efectivo de la losa equivalente

El peso de un área unitaria de la losa efectiva debe ser igual al peso de un área unitaria de la estructura original de dos capas, correspondientes a la losa de hormigón y la base. Dado que la capa de la base se supone que es sin peso, el peso unitario de la losa efectiva debe ser igual al peso unitario de la losa de hormigón. Sin embargo, ya que el espesor de la losa efectiva es diferente para cada mes, entonces el peso unitario debe ajustarse con la siguiente expresión:

$$\gamma_{eff,m} = \frac{\gamma_{PCC} h_{PCC}}{H_{eff,m}} \quad m = 1, \dots, 12 \quad \text{Ec. 2-27}$$

Donde: $\gamma_{eff,m}$: Peso unitario efectivo del mes “m”, [kgf/mm³].
 h_{PCC} : Espesor de la losa de hormigón, [mm].
 γ_{PCC} : Peso unitario de la mezcla de hormigón, [kgf/mm³].
 $H_{eff,m}$: Espesor efectivo del mes “m”, [mm].

2.4.2.2. Determinación del radio de rigidez relativa

Considerando los datos anteriores, se calcula el radio de rigidez relativa con la siguiente expresión:

$$l_m = \sqrt[4]{\frac{E_{PCC,m} H_{eff,m}^3}{12 (1 - \mu_{PCC}^2) k_m}} \quad m = 1, \dots, 12 \quad \text{Ec. 2-28}$$

Donde: l_m : Radio de rigidez relativa del mes “m”, [mm].
 $H_{eff,m}$: Espesor efectivo de la losa del mes “m”, [mm].
 $E_{PCC,m}$: Módulo de elasticidad del hormigón del mes “m”, [MPa].
 μ_{PCC} : Módulo de Poisson del hormigón.
 k_m : Módulo de reacción de la subrasante del mes “m”, [MPa/mm].

2.4.2.3. Determinación de gradiente de temperatura adimensional de Korenev

Para implementar el concepto de la losa equivalente en el modelo de la GEMDP, el gradiente de temperatura efectivo debe ser transformado al gradiente de temperatura adimensional de Korenev. Igualmente, este gradiente combina un gran número de parámetros individuales, mejorando la velocidad de cálculo para las RNA. En la Ec. 2-29 se muestra la expresión para este gradiente:

$$\phi_m = \frac{2 \alpha_{PCC} (1 + \mu_{PCC}) l_m^2}{H_{eff,m}^2} \frac{k_m}{\gamma_{eff,m}} \Delta T_{eff,m} \quad m = 1, \dots, 12 \quad \text{Ec. 2-29}$$

- Donde:
- ϕ_m : Gradiente de temperatura adimensional del mes “m”.
 - $H_{eff,m}$: Espesor efectivo de la losa del mes “m”, [mm].
 - α_{PCC} : Coeficiente de expansión térmica del hormigón, [mm/mm/°C].
 - μ_{PCC} : Módulo de Poisson del hormigón.
 - $\gamma_{eff,m}$: Peso unitario efectivo del mes “m”, [N/mm³].
 - k_m : Módulo de reacción de la subrasante del mes “m”, [MPa/mm].
 - l_m : Radio de rigidez relativa del mes “m”, [mm].
 - $\Delta T_{eff,m}$: Diferencia de temperatura entre las superficies superior e inferior de la losa efectiva del mes “m”, [°C].

2.4.3. Determinación de la erosionabilidad de la base

La erosionabilidad de la base tiene un impacto significativo en la iniciación y propagación de la falla del escalonamiento en el pavimento. Los diferentes tipos de bases se clasifican de acuerdo a su comportamiento erosionable a largo plazo. Conforme al nivel jerárquico de los datos se determina la erosionabilidad.

2.4.3.1. Erosionabilidad como dato de entrada Nivel 1

La clasificación se basa en el tipo de material y en los resultados que arrojen los ensayos realizados en un laboratorio apropiado. Tal laboratorio debe ser capaz de simular, de manera realista, la acción de la erosión bajo la losa de hormigón. A pesar que existen ensayos que simulan de manera apropiada la erosión, no han sido desarrollados de manera plena para implementarse. Por lo tanto, el Nivel 1 no puede ser realizado hasta el momento. Se requiere de más trabajos de investigación para desarrollar normas de ensayos de erosión. Los ensayos que existen para medir la erosionabilidad son:

- Dispositivo de corte rotacional para materiales cohesivos o estabilizados.
- Prueba de chorro.
- Ensayo de cepillo en dirección lineal y rotacional.
- Ensayo de erosión sudafricano.

2.4.3.2. Erosionabilidad como dato de entrada Nivel 2

En el caso de la erosionabilidad como dato de entrada Nivel 2 se clasifica de manera similar a lo mostrado en la Tabla 2-8, donde se fija la erosionabilidad por clase mediante la descripción del tipo de material. Se le agrega a esa descripción el porcentaje de contenido de cemento o asfalto, los valores de la resistencia a compresión para el hormigón y el potencial de extracción para el asfalto (Stripping potential) en cada caso mostrado en la tabla. Se debe considerar que no existe relación entre la clasificación de la erosionabilidad en el Nivel 2 con los ensayos establecidos en el Nivel 1.

2.4.3.3. Erosionabilidad como dato de entrada Nivel 3

Para el Nivel 3 la clasificación solo se guía por la descripción de cada tipo de material. Este método de estimación para fijar la clase de erosión no es la más precisa, pero es la más adecuada cuando no se tiene información adicional del material. En la Tabla 2-8 se muestra la descripción de cada clase, que puede ser modificado por el proyectista basado en su experiencia con la performance de la base que desea utilizar.

Tabla 2-8 Clases de erosión de acuerdo a solo la descripción del tipo de material.

Clase de erosión	Descripción del material
1	Hormigón pobre con buen comportamiento previo y una capa granular como subbase, una capa de suelo estabilizado o una capa de geotextil colocado entre la base tratada y la subrasante. Caso contrario es clase 2.
	Mezcla de asfalto con buen comportamiento previo y una capa granular como subbase o una capa de suelo estabilizado colocado entre la base tratada y la subrasante. Caso contrario es clase 2.
	Capa de material drenable y permeable (agregado tratado con asfalto o cemento) y una capa granular o geotextil colocado entre la base permeable y la subrasante.
2	Material granular tratado con cemento con buen comportamiento y una capa granular como subbase, una capa de suelo estabilizado o una capa de geotextil colocado entre la base tratada y la subrasante. Caso contrario es clase 3.
	Material granular tratado con asfalto con buen comportamiento y una capa granular como subbase, una capa de suelo estabilizado o una capa de geotextil colocado entre la base tratada y la subrasante. Caso contrario es clase 3.
3	Material granular tratado con cemento que se ha presentado bombeo y un poco de erosión previamente.
	Material granular tratado con asfalto que se ha presentado bombeo y un poco de erosión previamente.

Clase de erosión	Descripción del material
4	Material granular triturado sin consolidar que tiene densos agregados de gradación y de alta calidad.
5	Suelo de subrasante sin tratamiento (compactado)

Con el escalonamiento máximo inicial, el siguiente paso es encontrar la eficiencia de transferencia de carga que se genera en las juntas transversales, producto de la trabazón del agregado en la losa de hormigón, el tipo de base y del tipo de pasajunta, si es que están presentes en la estructura del pavimento.

2.5. DETERMINACIÓN DE LA EFICIENCIA DE TRANSFERENCIA DE CARGA

La eficiencia de transferencia de carga en la junta transversal se calcula con la Ec. 2-30, que se muestra a continuación:

$$LTE_{jt,m} = 100 \left(1 - \left(1 - \frac{LTE_{dowel,m}}{100} \right) \left(1 - \frac{LTE_{AGG,m}}{100} \right) \left(1 - \frac{LTE_{base}}{100} \right) \right) \quad \text{Ec. 2-30}$$

Donde: $LTE_{jt,m}$: Eficiencia de transferencia de carga de la junta transversal del mes "m", [%].
 $LTE_{dowel,m}$: Eficiencia de transferencia de carga de las pasajuntas del mes "m", [%].
 $LTE_{AGG,m}$: Eficiencia de transferencia de carga del agregado de la losa del mes "m", [%].
 LTE_{base} : Eficiencia de transferencia de carga de la base, [%].

A continuación, se presentan los siguientes pasos para calcular cada eficiencia de transferencia presentes en la Ec. 2-30.

2.5.1. Determinación de la LTE del agregado de la losa

Para obtener la LTE del agregado se debe conocer la rigidez que posee la trabazón del agregado, y ésta depende netamente de la capacidad de corte de la junta. La capacidad de corte, al principio de la vida de diseño, muestra su mayor desempeño y va decayendo con el pasar el tiempo, debido principalmente por las cargas que se somete el pavimento de manera acumulativa. La rigidez del agregado se determina con la siguiente expresión:

$$\text{Log}(J_{AGG,m}) = -28.4 e^{-e^{-\left(\frac{S_m - e}{f}\right)}} \quad \text{Ec. 2-31}$$

Donde: $J_{AGG,m}$: Rigidez de la junta producto del agregado de la losa del mes "m". Es un valor adimensional.

e : 0.35.

f : 0.38.

S_m : Capacidad de corte de la junta del mes "m".

Con la rigidez calculada, la LTE del agregado de la losa se determina usando la Ec. 2-32:

$$LTE_{AGG,m} = \frac{1}{0.01 + 0.012 J_{AGG,m}^{-0.849}} \quad \text{Ec. 2-32}$$

Donde: $LTE_{AGG,m}$: Eficiencia de transferencia de carga del agregado de la losa del mes "m", [%].

$J_{AGG,m}$: Rigidez de la junta producto del agregado de la losa del mes "m".

En las siguientes subsecciones, se explica con detalle el cálculo de la capacidad de corte, que depende de la deformación de retracción de la losa, de la temperatura y de las propiedades de la estructura de pavimento. Es decir, depende de la apertura total de la junta transversal.

2.5.1.1. Determinación de la deformación de retracción sobre y bajo la losa de hormigón

La humedad afecta de distinta forma en la superficie y en la base de la losa. Igualmente, se debe agregar el efecto tiempo, por lo tanto, debe calcularse un factor de tiempo con respecto al alabeo de la losa. Se obtiene con la Ec. 2-33 y la Ec. 2-34.

$$S_t = \frac{t}{n + t} \quad \text{Ec. 2-33}$$

Donde: S_t : Factor de tiempo para la relación de la humedad con el alabeo de la losa.

n : Tiempo en que se desarrolla el 50 % de la deformación última de retracción, medido en días. Se recomienda ocupar 35, a menos que exista información exacta al respecto.

t : Edad del pavimento promedio para el mes.

$$t = 30.4 (MES + MAPER)$$

Ec. 2-34

MES : Edad del pavimento desde la apertura de tráfico.

MAPER : Edad del pavimento al momento de la apertura.

Para considerar el efecto de la humedad, se tiene el factor de humedad relativa, que se calcula con la Ec. 2-35:

$$S_{hm} = \begin{cases} 1.1 RH_a & RH_a < 30 \% \\ 1.4 - 0.01 RH_a & 30 \% < RH_a < 80 \% \\ 3.0 - 0.03 RH_a & RH_a \geq 80 \% \end{cases} \quad a = 1, \dots, 12 \quad \text{Ec. 2-35}$$

Donde: S_{hm} : Factor de humedad relativa del mes "m".

RH_a : Humedad relativa promedio en el ambiente, [%]

En el caso de la superficie de la losa de hormigón, ésta se ve afectada por la humedad ambiental. Por lo tanto, la deformación se calcula con la siguiente ecuación:

$$\varepsilon_{sh,tm} = \varepsilon_{su} S_t (S_{hmax} - \varphi S_{hm}) \quad \text{Ec. 2-36}$$

Donde: $\varepsilon_{sh,tm}$: Deformación de retracción sobre la losa del mes "m", [microstrain].

ε_{su} : Deformación última de retracción, [microstrain].

S_{hm} : Factor de humedad relativa del mes "m".

S_{hmax} : Factor de humedad relativa promedio máximo. Es el máximo S_{hm} .

S_t : Factor de tiempo para la relación de la humedad con el alabeo de la losa.

φ : Factor de deformación de retracción. Se usa 0,5.

En el caso de la base de la losa de hormigón, se considera una humedad constante, por lo tanto, el factor de humedad corresponde a un 90 %, según la GEMDP. De acuerdo a la Ec. 2-37, se obtiene la deformación en la base.

$$\varepsilon_{sh,bm} = \varepsilon_{su} S_t S_{hbot} \quad \text{Ec. 2-37}$$

Donde: $\varepsilon_{sh,bm}$: Deformación de retracción bajo la losa del mes "m", [microstrain].

ε_{su} : Deformación última de retracción, [microstrain].

S_{hbot} : Factor de humedad relativa bajo la losa de hormigón. Se asume igual a 90 %.

2.5.1.2. Determinación de la deformación promedio de retracción para la losa de hormigón

La deformación promedio se obtiene con la deformación generada en la superficie y en la base de la losa, además de la relación entre la profundidad más seca de la losa y el espesor de la losa de hormigón. La expresión es la siguiente:

$$\varepsilon_{sh,mm} = \varepsilon_{sh,bm} + (\varepsilon_{sh,tm} - \varepsilon_{sh,bm}) \frac{h_d}{h_{PCC}} \quad \text{Ec. 2-38}$$

Donde:

- $\varepsilon_{sh,mm}$: Deformación de retracción promedio del mes “m”, [microstrain].
- $\varepsilon_{sh,tm}$: Deformación de retracción sobre la losa del mes “m”, [microstrain].
- $\varepsilon_{sh,bm}$: Deformación de retracción bajo la losa del mes “m”, [microstrain].
- h_d : Profundidad de la porción más seca de la losa de hormigón. Corresponde a 50 [mm] desde la superficie de la losa.
- h_{PCC} : Espesor de la losa de hormigón, [mm].

2.5.1.3. Determinación de la apertura total de la junta

La apertura depende principalmente de la temperatura, de la deformación generada por la humedad, del comportamiento del hormigón, del largo de la losa y del tipo de base. La ecuación que se utiliza es la siguiente:

$$jw_m = \text{Máx}(12000 JTSpace \beta (\alpha_{PCC} (T_{constr} - T_{mean}) + \varepsilon_{sh,mm}), 0) \quad \text{Ec. 2-39}$$

Donde:

- jw_m : Apertura de la junta del mes “m”, [0.001 in].
- $\varepsilon_{sh,mm}$: Deformación de retracción promedio del mes “m”, [strain].
- α_{PCC} : Coeficiente de expansión térmica del hormigón, [in/in/°F].
- $JTSpace$: Largo de la losa de hormigón, [ft].
- β : Coeficiente de apertura de la junta. Se asume 0.85 para una base estabilizada y 0.65 para una base granular sin consolidar.
- T_{mean} : Temperatura promedio mensual en la profundidad media de la losa durante la noche, [°F].
- T_{constr} : Temperatura del hormigón al momento de colocación, [°F].

2.5.1.4. Determinación de la capacidad de corte de la junta

La capacidad de corte depende de la apertura de la junta y también de la pérdida acumulativa de capacidad de corte, producto de la carga a lo largo del tiempo de diseño. Ésta pérdida se considera al principio del mes de estudio como valor cero, al momento de pasar los meses aumenta su valor. La expresión para la capacidad de corte es la siguiente:

$$S_m = 0.05 h_{PCC} e^{-0.032 jw_m} - \Delta S_{tot,m} \quad \text{Ec. 2-40}$$

Donde: S_m : Capacidad de corte del agregado de la junta adimensional del mes “m”.
 jw_m : Apertura de la junta del mes “m”, [0.001 in].
 h_{PCC} : Espesor de la losa de hormigón, [in].
 $\Delta S_{tot,m}$: Pérdida acumulada de capacidad de corte al principio del mes “m”. Si es mes 1 tiene valor 0.

2.5.2. Determinación de la LTE de la base

La eficiencia de transferencia de carga de la base se determina con la Tabla 2-9, estos valores de asumen en el Software de la GEMDP. Sin embargo, si la temperatura en la profundidad media de la losa de hormigón para un determinado mes es menor a 32 [°F] (0 [°C]), entonces el LTE_{base} es igual a 90 %.

Tabla 2-9 Valores de LTE para cada tipo de base

Tipo de Base	LTE_{base}
Agregado	20 %
Base tratada con cemento o asfalto	30 %
Hormigón pobre	40 %

2.5.3. Determinación de la LTE de las pasajuntas

Tal como en el caso de la LTE del agregado, para la LTE de las pasajuntas se debe considerar la rigidez que aporta las pasajuntas, y ésta se calcula con la Ec. 2-41:

$$J_{d,m} = J_d^* + (J_0 - J_d^*) e^{-DAM_{dowels,m}} \quad \text{Ec. 2-41}$$

Donde: $J_{d,m}$: Rigidez de la pasajunta adimensional del mes “m”.
 J_0 : Rigidez inicial de la pasajunta.

$$J_0 = 120 \frac{d^2}{h_{PCC}} \quad \text{Ec. 2-42}$$

J_d^* : Rigidez crítica de la pasajunta.

$$J_d^* = \text{Min} \left(118, \text{Máx} \left(165 \frac{d^2}{h_{PPC}} - 19.812, 0.4 \right) \right) \quad \text{Ec. 2-43}$$

d : Diámetro de la pasajunta, [in] (d tiene que ser mayor que 0.75 [in]).

h_{PCC} : Espesor de la losa de hormigón, [in].

$DAM_{dowels,m}$: Daño acumulado de la pasajunta que depende del esfuerzo sometido de la pasajunta y de las cargas repetitivas del mes "m". Inicialmente es igual a 0.

Ocupando la misma expresión que en la Ec. 2-32, se obtiene la eficiencia de transferencia de carga que aporta la pasajunta, como se muestra en la siguiente ecuación:

$$LTE_{dowel,m} = \frac{1}{0.01 + 0.012 J_{d,m}^{-0.849}} \quad \text{Ec. 2-44}$$

Donde: $LTE_{dowe,ml}$: Eficiencia de transferencia de carga debido a la presencia de pasajuntas del mes "m", [%]

$J_{d,m}$: Rigidez de la pasajunta adimensional del mes "m".

El paso siguiente corresponde a uno de los más importantes, la determinación de las deflexiones críticas. Estas deflexiones se ven afectadas principalmente por la carga de tráfico, en consecuencia, también por la eficiencia de transferencia de carga en la berma y en la junta transversal. En las siguientes secciones se explica el procedimiento y las variables necesarias para obtener las deflexiones.

2.6. DETERMINACIÓN DE LAS DEFLEXIONES CRÍTICAS

Las deflexiones críticas se obtienen en la losa cargada y en la losa no cargada, como se muestra en la Figura 2-14. Estas deflexiones se obtienen en la esquina de cada losa.

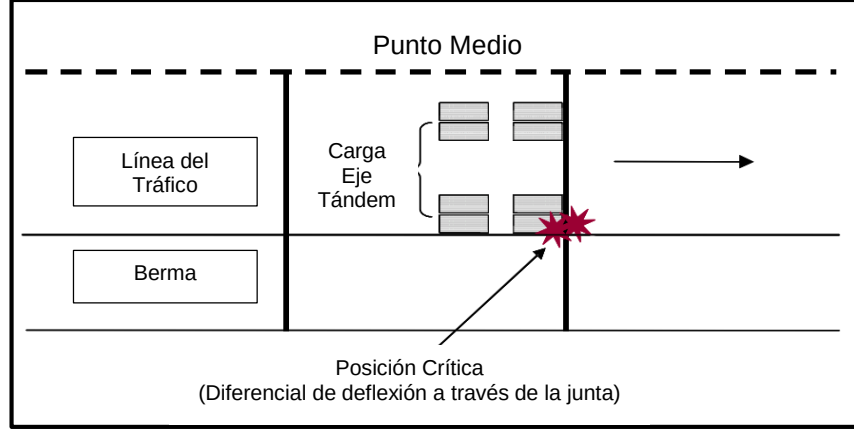


Figura 2-14 Ubicación de la carga y posición crítica para el análisis del escalonamiento (ARA, 2004)

Esta configuración consiste en las losas continuas al pasar el eje de carga, mientras este eje pasa sobre una losa, ésta se convierte en una losa cargada y en la losa siguiente corresponde a la losa no cargada. En los siguientes puntos se ve cómo se calculan.

2.6.1. Determinación de la deflexión en la losa cargada

Usando las redes neuronales, se obtiene las deflexiones de la losa cargada en el sistema de losa equivalente debido a la temperatura de alabeo y a la carga del eje. La deflexión crítica en la losa cargada se define como la diferencia entre el desplazamiento debido al alabeo térmico más la carga y el desplazamiento debido solo al alabeo térmico con respecto a los ejes de referencia. En la Ec. 2-45 se muestra la deflexión crítica.

$$\delta_{L,i,A,m} = \frac{34100596.7 H'_{eff,m}}{l'_m{}^4 k_m} [NN_{L,A}(JTSpace, l'_m, LTE_{ber}, LTE_{jt}, \phi'_m, q_i^*, s) - NN_{L,A}(JTSpace, l'_m, LTE_{ber}, LTE_{jt}, \phi'_m, 0, s)] \quad \text{Ec. 2-45}$$

- Donde: $\delta_{L,i,A,m}$: Deflexión en la esquina de la losa debido a la carga del eje de tipo A y categoría de peso i considerando la losa cargada del mes "m", [mm].
- $NN_{L,A}()$: Red neuronal entrenada para determinar el desplazamiento en la esquina de la losa cargada debido al alabeo térmico y por la carga del eje de tipo A.
- A : Índice del tipo de eje. Para eje simple tiene valor 1, para eje tandem tiene valor 2 y para eje tridem tiene valor 3.
- i : Parámetro definido como el peso del eje.

JTSpace	: Largo de la losa de hormigón, [m].
H'eff,m	: Espesor efectivo de la losa del mes "m", [mm].
km	: Módulo de reacción de la subrasante del mes "m", [MPa/mm].
qi*	: Carga normalizada.
l'm	: Radio de rigidez relativa del mes "m", [mm].
φ'm	: Gradiente de temperatura adimensional de Korenev del mes "m".
LTEber	: Eficiencia de transferencia de carga de la berma en condiciones de losa plana, [%].
LTEjt	: Eficiencia de transferencia de carga de la junta transversal en condiciones de losa plana, [%].
s	: Desviación lateral del tráfico.

2.6.2. Determinación de la deflexión en la losa no cargada

Ocupando la misma lógica que en el caso anterior, se aplica para calcular la deflexión en la esquina en la losa no cargada. En la Ec. 2-46 se muestra la deflexión crítica.

$$\delta_{U,i,A,m} = \frac{34100596.7 H'_{eff,m}}{l_m^4 k_m} [NN_{U,A}(JTSpace, l'_m, LTE_{ber}, LTE_{jt}, \phi'_m, q_i^*, s) - NN_{U,A}(JTSpace, l'_m, LTE_{ber}, LTE_{jt}, \phi'_m, 0, s)] \quad \text{Ec. 2-46}$$

Donde:	δ _{U,i,A,m}	: Deflexión en la esquina de la losa debido a la carga del eje de tipo A y categoría de peso i considerando la losa no cargada del mes "m", [mm].
	NN _{U,A} ()	: Red neuronal entrenada para determinar el desplazamiento en la esquina de la losa no cargada debido al alabeo térmico y por la carga del eje de tipo A.
	A	: Índice del tipo de eje. Para eje simple tiene valor 1, para eje tándem tiene valor 2 y para eje tridem tiene valor 3.
	i	: Parámetro definido como el peso del eje.
	JTSpace	: Largo de la losa de hormigón, [m].
	H'eff,m	: Espesor efectivo de la losa del mes "m", [mm].
	km	: Módulo de reacción de la subrasante del mes "m", [MPa/mm].
	qi*	: Carga normalizada.
	l'm	: Radio de rigidez relativa del mes "m", [mm].
	φ'm	: Gradiente de temperatura adimensional de Korenev del mes "m".
	LTEber	: Eficiencia de transferencia de carga de la berma en condiciones de losa plana, [%].
	LTEjt	: Eficiencia de transferencia de carga de la junta transversal en condiciones de losa plana, [%].
	s	: Desviación lateral del tráfico.

2.6.3. Determinación de los parámetros de la losa equivalente

Para calcular las deflexiones de las losas cargadas y no cargadas, es necesario conocer los parámetros de la losa, consistentes en el espesor efectivo, el peso unitario efectivo y el radio de rigidez relativa.

2.6.3.1. Determinación del espesor efectivo de la losa

A diferencia del espesor efectivo calculado en el punto 2.3.4, este espesor se obtiene con el módulo de elasticidad del hormigón por mes, donde éste valor va cambiando al pasar el tiempo de diseño. La variación del módulo de elasticidad con respecto a la edad del pavimento se vio en detalle en el punto 2.2.4.

No existe variación en el caso del módulo resiliente de la base, por lo tanto, se respeta lo estipulado en el punto 2.2.5.

Con la Ec. 2-47, se obtiene el espesor efectivo de la losa.

$$H'_{eff,m} = \sqrt{h_{PCC}^2 + \frac{M_{R,BASE,m}}{E_{PCC,m}} H_{BASE}^2} \quad \text{Ec. 2-47}$$

Donde: $H'_{eff,m}$: Espesor efectivo de la losa del mes “m”, [mm].
 h_{PCC} : Espesor de la losa de hormigón, [mm].
 H_{BASE} : Espesor de la base, [mm].
 $E_{PCC,m}$: Módulo de elasticidad del hormigón del mes “m”, [MPa].
 $M_{R,BASE,m}$: Módulo resiliente de la base del mes “m”, [MPa].

2.6.3.2. Determinación del peso unitario efectivo de la losa

Como se modificó el espesor efectivo, es lógico que también varié el peso unitario de la losa equivalente de cada mes en la edad del pavimento. Con la Ec. 2-48 se obtiene el peso unitario.

$$\gamma'_{eff,m} = \frac{\gamma_{PCC} h_{PCC}}{H'_{eff,m}} \quad \text{Ec. 2-48}$$

Donde: $\gamma'_{eff,m}$: Peso unitario efectivo, [kgf/mm³].
 h_{PCC} : Espesor de la losa de hormigón, [mm].
 γ_{PCC} : Peso unitario del hormigón, [kgf/mm³].

$H'_{eff,m}$: Espesor efectivo del mes “m”, [mm].

2.6.3.3. Determinar el radio de rigidez relativa de la losa

Considerando el cambio anterior, el radio de rigidez relativa se obtiene con la siguiente ecuación.

$$l'_m = \sqrt[4]{\frac{E_{PCC,m} H'^3_{eff,m}}{12 (1 - \mu_{PCC}^2) k_m}} \quad \text{Ec. 2-49}$$

Donde: l'_m : Radio de rigidez relativa del mes “m”, [mm].

$H'_{eff,m}$: Espesor efectivo de la losa del mes “m”, [mm].

$E_{PCC,m}$: Módulo de elasticidad del hormigón del mes “m”, [MPa].

μ_{PCC} : Módulo de Poisson del hormigón.

k_m : Módulo de reacción de la subrasante del mes “m”, [MPa/mm].

2.6.4. Determinación del gradiente de temperatura efectiva

El gradiente de temperatura efectiva ($\Delta T'_{eff,m}$) se obtiene con la Ec. 2-12 y a partir de este gradiente se calcula el gradiente de temperatura adimensional de Korenev (ϕ'_m) con la Ec. 2-29, tal como se muestra en los puntos 2.3 y 2.4.2.3. La única modificación en esta parte es el gradiente de temperatura debido a la retracción reversible del alabeo. Este gradiente, explicado en el punto 2.3.3, se obtiene de acuerdo al completo desarrollo de la deformación de retracción última, pues se considera el peor de los casos para el cálculo del escalonamiento máximo inicial.

En el caso del cálculo de las deflexiones críticas a lo largo de la edad del pavimento, el desarrollo de la deformación de retracción última no alcanza a contemplarse cada mes, pues como mínimo se requiere 4 meses o 5 años para obtener la deformación completa, como se explica en el punto 2.3.3.3. Por lo tanto, el gradiente de temperatura debido a la retracción reversible se obtiene mediante el factor de tiempo con respecto al alabeo de la losa, para reducir el gradiente de temperatura calculado en el punto 2.3.3, como se muestra en la Ec. 2-50.

$$\Delta T'_{SH,m} = S_t \Delta T_{SH,m} \quad \text{Ec. 2-50}$$

- Donde: $\Delta T'_{SH,m}$: Gradiente de temperatura equivalente debido a la retracción reversible del mes "m", [°C].
- $\Delta T_{SH,m}$: Gradiente de temperatura equivalente debido a la retracción reversible del mes "m" calculado en el punto 2.3.3, [°C].
- S_t : Factor de tiempo para la relación de la humedad con el alabeo de la losa.

2.6.5. Determinación de la carga normalizada

Para cada categoría de ejes, se calcula la carga normalizada con la Ec. 2-51:

$$q_i^* = \frac{P_i}{A L W \gamma'_{eff,m} H'_{eff,m}} \quad \text{Ec. 2-51}$$

- Donde: q_i^* : Relación de peso entre carga y pavimento o carga normalizada.
- P_i : Carga del eje, [kgf].
- $H'_{eff,m}$: Espesor efectivo de la losa del mes "m", [mm].
- $\gamma'_{eff,m}$: Peso unitario efectivo, [kgf/mm³].
- A : Índice del tipo de eje. Para eje simple tiene valor 1, para eje tándem tiene valor 2 y para eje tridem tiene valor 3.
- L : Largo de la losa de hormigón, [mm].
- W : Ancho de la losa de hormigón, [mm].

Teniendo las deflexiones críticas calculadas, se procede a obtener el escalonamiento final, que depende de la energía de deformación generada por las deflexiones críticas y del escalonamiento máximo inicial de cada mes. El valor del escalonamiento es acumulativo mes a mes, por lo que el daño va degradando el pavimento a lo largo de la vida de diseño.

2.7. DETERMINACIÓN DEL ESCALONAMIENTO FINAL

Como se dijo previamente, el escalonamiento es una falla que se acumula mes a mes, este comportamiento se ve reflejado en la Ec. 2-52. Finalmente, el escalonamiento corresponde a lo siguiente:

$$FAULT_m = \sum_{i=1}^m \Delta Fault_i \quad \text{Ec. 2-52}$$

Donde: $FAULT_m$: Magnitud del escalonamiento al final del mes "m", [mm].
 $\Delta Fault_i$: Incremento de escalonamiento del mes "i", [mm].

Para obtener el incremento del escalonamiento mes a mes, es necesario conocer la energía de deformación y el escalonamiento máximo al principio de cada mes. Además, con la energía de deformación también se calcula el escalonamiento máximo al final de cada mes.

2.7.1. Determinación de la energía de deformación

De acuerdo al GEMDP, se usa la siguiente expresión para calcular la energía de deformación:

$$DE_m = \sum_{A=1}^3 \sum_{i=1}^{N_A} n_{i,A} k_m \frac{(\delta_{L,i,A,m}^2 - \delta_{U,i,A,m}^2)}{2} \quad \text{Ec. 2-53}$$

Donde: DE_m : Energía de deformación del mes "m", [MPa*mm].
 k_m : Módulo de reacción de la subrasante del mes "m", [MPa/mm].
 $\delta_{L,i,A,m}$: Deflexión en la esquina de la losa debido a la carga del eje de tipo A y categoría de peso i considerando la losa cargada del mes "m", [mm].
 $\delta_{U,i,A,m}$: Deflexión en la esquina de la losa debido a la carga del eje de tipo A y categoría de peso i considerando la losa no cargada del mes "m", [mm].
 $n_{i,A}$: Número de aplicaciones de ejes de carga de la categoría de peso i del eje de tipo A.
 N_A : Número de categorías de carga para el eje de tipo A.
 A : Índice del tipo de eje. Para eje simple tiene valor 1, para eje tandem tiene valor 2 y para eje tridem tiene valor 3.
 i : Parámetro definido como el peso del eje.

2.7.2. Determinación del incremento de escalonamiento

Según el GEMDP, se tiene lo siguiente para calcular el incremento de escalonamiento producido mes a mes:

$$\Delta Fault_m = C_{34} (FMAX_{m-1} - FAULT_{m-1})^2 DE_m \quad \text{Ec. 2-54}$$

- Donde:
- $\Delta Fault_m$: Incremento de escalonamiento del mes "m", [mm]
 - $FAULT_{m-1}$: Magnitud del escalonamiento al principio del mes "m". Si m=1 entonces es 0, [mm].
 - $FMAX_{m-1}$: Magnitud del escalonamiento máximo al principio del mes "m". Si m=1 entonces es $FMAX_0$, [mm].
 - DE_m : Energía de deformación del mes "m", [MPa*mm].
 - C_{34} : $C_{34} = C_3 + C_4 FR^{0.25}$
 - FR : Índice de congelamiento de la base, definido como el porcentaje de tiempo en que la superficie de la base tiene una temperatura bajo los 32 [°F] (0 [°C]).
- C_3 y C_4 son parámetros de calibración.

2.7.3. Determinación del escalonamiento máximo

Como se dijo en el punto 2.4, el escalonamiento máximo para el resto del tiempo de vida del pavimento se calcula mediante la Ec. 2-55:

$$FMAX_m = FMAX_0 + C_7 DE_m [\log(1 + C_5 * 5^{EROD})]^{C_6} \quad \text{Ec. 2-55}$$

- Donde:
- $FMAX_m$: Magnitud del escalonamiento máximo al final del mes "m", [mm].
 - $FMAX_0$: Escalonamiento máximo inicial, [mm].
 - DE_m : Energía de deformación del mes "m", [MPa*mm].
 - $EROD$: Erosionabilidad de la base.
- C_5 , C_6 y C_7 son constantes de calibración.

Las consecuencias de la falla del escalonamiento son la pérdida de capacidad de corte del pavimento y el daño acumulativo en las pasajuntas. Estas consecuencias son consideradas en el cálculo del escalonamiento del siguiente mes, afectando el desempeño de la transferencia de carga del agregado de la losa y de las pasajuntas. Estos pasos se realizan hasta el penúltimo mes de la vida del pavimento.

2.8. DETERMINACIÓN DE LA PÉRDIDA DE CAPACIDAD DE CORTE

La pérdida de capacidad de corte, debido a la aplicación repetitiva de ejes de carga, se caracteriza en términos de la apertura de las juntas transversales basada en una función derivada del análisis de los datos de prueba de transferencia de carga desarrollados por la PCA (Portland Cement Association). Esta pérdida de capacidad de corte se produce mes a mes calculándose con la Ec. 2-56, especificándose el tipo de eje y el peso de la carga que produce tal pérdida.

$$\Delta s_{i,A,m} = \begin{cases} 0 & jw_m < 0.001 h_{PCC} \\ \frac{0.005}{1.0 + \left(\frac{jw_m}{h_{PCC}}\right)^{-5.7}} \left(\frac{\tau_{i,A,m}}{\tau_{ref,m}}\right) \left(\frac{1}{10^6}\right) & 0.001 h_{PCC} \leq jw_m \leq 3.8 h_{PCC} \\ \frac{0.068}{1.0 + 6.0 \left(\frac{jw_m}{h_{PCC}} - 3\right)^{-1.98}} \left(\frac{\tau_{i,A,m}}{\tau_{ref,m}}\right) \left(\frac{1}{10^6}\right) & jw_m > 3.8 h_{PCC} \end{cases} \quad \text{Ec. 2-56}$$

- Donde: $\Delta s_{i,A,m}$: Pérdida de capacidad de corte con una repetición de eje de carga de tipo A y categoría de peso i del mes "m".
- h_{PCC} : Espesor de la losa de hormigón, [in].
- jw_m : Apertura de la junta del mes "m", [0,001 in].
- $\tau_{i,A,m}$: Máximo esfuerzo de corte en la superficie de la junta de la losa de hormigón causado por el eje de carga de tipo A y categoría de peso i del mes "m", [psi].
- $\tau_{ref,m}$: Esfuerzo de corte de referencia del mes "m", [psi].
- A : Índice del tipo de eje. Para eje simple tiene valor 1, para eje tándem tiene valor 2 y para eje tridem tiene valor 3.
- i : Parámetro definido como el peso del eje.

Teniendo la pérdida de capacidad de corte para cada eje, se procede a multiplicarlo por la cantidad de ejes de cada categoría y sumarlos para obtener el total de pérdida que se genera mes a mes.

$$\Delta s_{tot,m} = \sum_{A=1}^3 \sum_{i=1}^{N_A} \Delta s_{i,A,m} n_{i,A} \quad \text{Ec. 2-57}$$

- Donde: $\Delta s_{tot,m}$: Pérdida total de capacidad de corte durante el mes "m".
- $\Delta s_{i,A,m}$: Pérdida de corte con una repetición de eje de carga de tipo A y categoría de peso i del mes "m".
- $n_{i,A}$: Número de aplicaciones de ejes de carga de la categoría de peso i del eje de tipo A.
- N_A : Número de categorías de carga para el eje de tipo A.
- A : Índice del tipo de eje. Para eje simple tiene valor 1, para eje tándem tiene valor 2 y para eje tridem tiene valor 3.

i : Parámetro definido como el peso del eje.

En las secciones siguientes se explican los esfuerzos de corte generados por el agregado del pavimento y por el paso de los ejes de carga.

2.8.1. Determinación del esfuerzo de corte de referencia

Como se puede ver en la Ec. 2-58, el esfuerzo de corte de referencia se obtiene a partir de la rigidez del agregado trabado en la junta transversal.

$$\tau_{ref,m} = 111.1 \exp \left(- \exp \left(0.9988 \exp \left(-0.1089 \log(J_{AGG,m}) \right) \right) \right) \quad \text{Ec. 2-58}$$

Donde: $\tau_{ref,m}$: Esfuerzo de corte de referencia del mes "m", [psi].
 $J_{AGG,m}$: Rigidez del agregado en la junta transversal del mes "m".

2.8.2. Determinación del esfuerzo de corte inducido por cada eje

El esfuerzo de corte inducido por cada eje de carga se calcula con las deflexiones generadas por las redes neuronales de acuerdo a los puntos 2.6.1 y 2.6.2. Usando la Ec. 2-59 se tiene el esfuerzo de corte.

$$\tau_{i,A,m} = \frac{AGG}{h_{PCC}} (\delta_{L,i,A,m} - \delta_{U,i,A,m}) \quad \text{Ec. 2-59}$$

Donde: $\tau_{i,A,m}$: Máximo esfuerzo de corte en la superficie de la junta de la losa de hormigón causado por el eje de carga de tipo A y categoría de peso i del mes "m", [psi].
 h_{PCC} : Espesor de la losa de hormigón, [mm].
 AGG_m : Factor de rigidez del agregado trabado del mes "m", [psi].

$$AGG_m = l'_m k_m \left(\frac{\frac{1}{LTE_{AGG,m}} - 0.01}{0.012} \right)^{-1/0.849} \quad \text{Ec. 2-60}$$

l'_m : Radio de rigidez relativa del mes "m", [in].
 k_m : Módulo de reacción de la subrasante del mes "m", [psi/in].
 $LTE_{AGG,m}$: Eficiencia de transferencia de carga del agregado de la losa del mes "m", [%].
 $\delta_{L,i,A,m}$: Deflexión en la esquina de la losa debido a la carga del eje de tipo A y categoría de peso i considerando la losa cargada del mes "m", [mm].

- $\delta_{U,i,A,m}$: Deflexión en la esquina de la losa debido a la carga del eje de tipo A y categoría de peso i considerando la losa no cargada del mes "m", [mm].
- A : Índice del tipo de eje. Para eje simple tiene valor 1, para eje tándem tiene valor 2 y para eje tridem tiene valor 3.
- i : Parámetro definido como el peso del eje.

2.9. DETERMINACIÓN DEL DAÑO EN LAS PASAJUNTAS

Si las pasajuntas están presentes en la estructura de pavimento, estas también sufren daños en el momento que los ejes de cargas pasan por el pavimento. Los daños en las pasajuntas se obtienen mediante la fuerza de corte que generan las deflexiones de las losas. La Ec. 2-61 refleja el comportamiento acumulativo del daño que se produce en las pasajuntas.

$$DAM_{Dowels,m} = DAM_{Dowels,m-1} + \Delta DAM_{Dowel,tot,m} \quad \text{Ec. 2-61}$$

- Donde: $DAM_{dowels,m}$: Daño acumulado de la pasajunta que depende del esfuerzo sometido de la pasajunta y de las cargas repetitivas al final del mes "m".
- $DAM_{dowels,m-1}$: Daño acumulado de la pasajunta que depende del esfuerzo sometido de la pasajunta y de las cargas repetitivas al principio del mes "m". Si m=1 el valor es 0.
- $\Delta DAM_{Dowel,tot,m}$: Daño acumulado de la pasajunta del mes "m".

A continuación, se explica cómo se calcula la fuerza de corte y el daño producido por mes en las pasajuntas.

2.9.1. Determinación de la fuerza de corte de la pasajunta

La fuerza de corte que se origina en las pasajuntas depende de la rigidez y del desplazamiento que se generan en las pasajuntas. Este desplazamiento se traduce en la diferencia entre las deflexiones de las losas producto de los ejes de carga. La fuerza de corte también se obtiene de acuerdo al tipo y peso de los ejes de carga.

$$F_{i,A,m} = J_{d,m} DSpace (\delta_{L,i,a,m} - \delta_{U,i,A,m}) \quad \text{Ec. 2-62}$$

- Donde: $F_{i,A,m}$: Fuerza de corte de la pasajunta inducido por el eje de carga de tipo A y categoría de peso i del mes "m".
- $J_{d,m}$: Rigidez de la pasajunta adimensional del mes "m".
- $DSpace$: Espacio entre las pasajuntas adyacentes, [in].

- $\delta_{L,i,A,m}$: Deflexión en la esquina de la losa debido a la carga del eje de tipo A y categoría de peso i considerando la losa cargada del mes "m", [in].
- $\delta_{U,i,A,m}$: Deflexión en la esquina de la losa debido a la carga del eje de tipo A y categoría de peso i considerando la losa no cargada del mes "m", [in].
- A : Índice del tipo de eje. Para eje simple tiene valor 1, para eje tandem tiene valor 2 y para eje tridem tiene valor 3.
- i : Parámetro definido como el peso del eje.

2.9.2. Determinación del incremento de daño en la pasajunta

Teniendo la fuerza de corte en las pasajuntas, se obtiene el daño en las pasajuntas del mes producto de todos los ejes de carga.

$$\Delta DAM_{Dowel,tot,m} = \sum_{A=1}^3 \sum_{i=1}^{N_A} C_8 F_{i,A,m} \frac{n_{i,A}}{d f_c^*} \quad \text{Ec. 2-63}$$

- Donde: $\Delta DAM_{Dowel,tot,m}$: Daño acumulado de la pasajunta del mes "m".
- $F_{i,A,m}$: Fuerza de corte de la pasajunta inducido por el eje de carga de tipo A y categoría de peso i del mes "m".
- $n_{i,A}$: Número de aplicaciones de ejes de carga de la categoría de peso i del eje de tipo A.
- N_A : Número de categorías de carga para el eje de tipo A.
- C_8 : Constante de calibración.
- f_c^* : Esfuerzo de compresión del hormigón mediante el módulo de ruptura (MR).

Teniendo explicado el modelo del escalonamiento de la GEMDP, en los siguientes capítulos se explican los procedimientos para cumplir con los objetivos generales de esta memoria, siendo la verificación del factor de conversión para las losas con juntas transversales esviadas y el cálculo de la deflexión por alabeo térmico mediante las redes neuronales artificiales. En estos capítulos se entregan los conceptos, la metodología de trabajo y los resultados de cada procedimiento.

3. ESCALONAMIENTO EN LOSAS CON JUNTAS TRANSVERSALES ESVIADAS

En este capítulo se expondrá el trabajo realizado para uno de los objetivos principales de esta memoria, la verificación del factor de conversión al considerar el efecto de las juntas transversales esviadas en las losas de pavimento. Dentro de este capítulo se explica el concepto de las juntas transversales esviadas, sus propiedades y aplicaciones en el sistema de pavimento. De acuerdo con lo dicho en el capítulo introductorio, también se presentan y explican las investigaciones previas realizadas sobre las juntas transversales esviadas.

Además, se explicará la metodología del trabajo realizado para cumplir con el objetivo antes planteado, especificándose los datos de entrada ocupados, las herramientas empleadas y en las consideraciones al momento de calcular el factor de conversión.

Por último, se presentan los resultados obtenidos, mostrándose los factores dependiendo de la inclinación y la posición del eje de carga, conociéndose así la tendencia del factor. Estos resultados se comparan con los estudios anteriores, corroborando así los resultados existentes con respecto al tema de interés.

3.1. INTRODUCCIÓN AL FACTOR DE CONVERSIÓN

Para entender el factor de conversión se debe dejar en claro el concepto de las juntas transversales esviadas. En base a eso, se establece el factor de conversión para poder incluir las juntas transversales esviadas en el diseño de pavimento de hormigón.

La verificación del factor de conversión consiste en obtener los valores del factor a partir de la variación del ángulo de inclinación de las juntas transversales esviadas, para así conocer el efecto de estas juntas en la generación del escalonamiento a lo largo de la vida de diseño.

3.1.1. Concepto de las juntas transversales esviadas

Las Juntas Transversales Esviadas (JTE) corresponden a un tipo de juntas que poseen una inclinación con respecto al eje central del pavimento distinto a 90° . En las siguientes subsecciones se explica qué tipo de juntas se pueden inclinar, en qué consisten las JTE con sus propiedades respectivas y cómo se aplican estas juntas. Aparte de explicar las características de las JTE, se revelan los aspectos prácticos de las juntas, pues son características significativas al considerar cuando se planea implementar las JTE.

3.1.1.1. Definición de juntas de contracción

Las juntas son utilizadas en un pavimento de hormigón para que las grietas, producto de los cambios de temperatura o de humedad, no ocurran de manera prematura. Hay cuatro tipos de juntas que se utilizan actualmente: juntas de contracción, expansión, construcción y longitudinal. Las juntas que se usan en la dirección transversal al tráfico son las juntas de contracción, éstas sirven para aliviar los esfuerzos de tracción generados en las losas del pavimento. El espaciamiento de las juntas debe basarse en la experiencia local, ya que un cambio en los tipos de agregado grueso puede tener un efecto significativo en el coeficiente térmico del hormigón, y por consiguiente el espaciamiento aceptable. Las juntas de contracción se colocan generalmente a intervalos regulares perpendiculares a la línea central del pavimento.

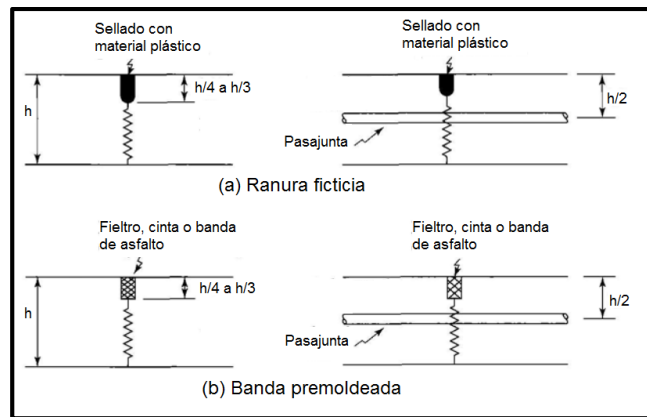


Figura 3-1 Juntas de contracciones típicas (a) Ranura ficticia; (b) Banda premoldeada (Huang, 2003)

Como se puede ver en la Figura 3-1, éstas son las juntas de contracción típicas que se usan en el pavimento. De acuerdo a la Figura 3-1 (a), una ranura ficticia se forma mediante la colocación de una tira de metal en el hormigón fresco, que se retira posteriormente, o por aserrado después de que el hormigón se coloca. La ranura se sella entonces con un material plástico. Si el espaciamiento de las juntas es menor, la transferencia de carga se puede lograr mediante el agregado de la losa y no se requeriría la presencia de pasajuntas. Sin embargo, las pasajuntas son necesarias si el espaciamiento de las juntas es mayor o si las losas están situadas cerca del final del pavimento. En tales casos, la junta puede abrirse y la transferencia de carga puede perderse a través del agregado de la losa. En lugar de una ranura ficticia, las juntas se pueden formar mediante la colocación de un fieltro, cinta o banda de asfalto en el hormigón fresco y dejándola allí de forma permanente, como se muestra en la Figura 3-1 (b).

3.1.1.2. Definición de las juntas transversales esviadas

La orientación de la junta es el ángulo en que la junta transversal es colocada con respecto a la línea central del pavimento. Históricamente, las juntas transversales se sitúan perpendiculares al eje central, pero en los recientes años las juntas se han colocado con una inclinación en el sentido anti horario con respecto al eje central, correspondiendo a una JTE. El ángulo obtuso en el borde del pavimento exterior debe estar por delante de la junta en la dirección del tráfico, tal como se muestra en la Figura 3-2. Lo anterior se debe a que esa esquina recibe el mayor impacto al presentarse el eje de carga. La idea detrás de esta disposición es que la esquina interior es menos susceptible a las roturas de las esquinas, ya que está ligada a la losa adyacente en el otro lado de la junta longitudinal (Riad et al., 2009).

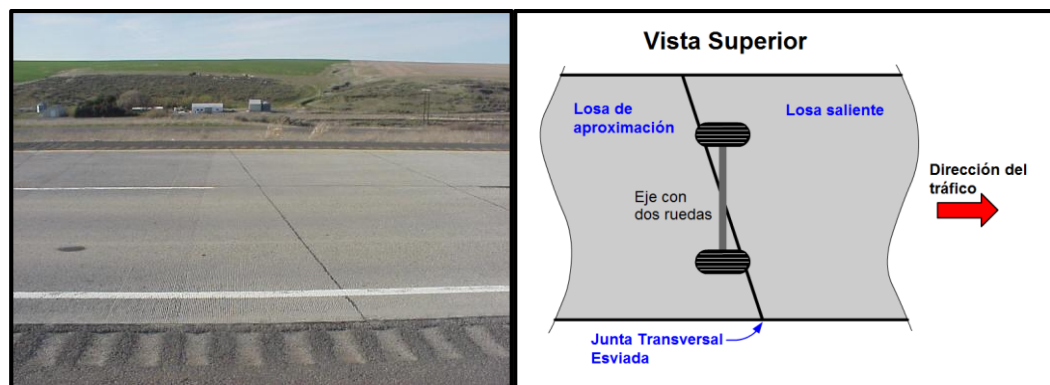


Figura 3-2 Ejemplo de una JTE

Según la Guía de Diseño AASHTO 1993, la ventaja de la JTE es el mejoramiento del rendimiento de la junta y extiende la vida útil de los pavimentos de hormigón, ya sean reforzados, con pasajuntas o simples. La junta se esvía lo suficiente para que las ruedas derecha e izquierda no lleguen de forma simultánea a la junta, reduciéndose el escalonamiento. Otras ventajas que presentan las JTE son:

- La reducción de la deflexión y el esfuerzo en las juntas, lo que aumenta la capacidad de carga de la losa y prolonga la vida útil del pavimento.
- La disminución de la reacción debido al impacto de los vehículos a medida que cruzan las juntas, implicando un recorrido más suave por las juntas que presentan cierta rugosidad.

Desde el punto de vista de la práctica, las JTE tienen numerosos problemas tales como: son mucho más difíciles de construir, pueden ser más susceptibles a errores en términos de ángulos y en el cómo los cortes de la sierra se alinean. Además, se presenta un problema para alinear la armadura que posiciona las pasajuntas, pues tendrían que

rediseñar sus componentes para que sean esviados. Por otra parte, parchar una JTE es uno de los procedimientos más difíciles, y lo más importante, las JTE son notablemente más costosas debido a la limitante competitividad en precios (Riad et al., 2009).

3.1.1.3. Aplicación de las juntas transversales esviadas

A pesar que se reducen las deflexiones en la losa, las JTE no son un sustituto para el uso de dispositivos de transferencia de carga (ACPA, 1991). Aunque existen evidencias de que los pavimentos con JTE tienen menor escalonamiento que aquellos con Juntas Transversales Rectas (JTR) (Smith et al., 1998), en general, se recomienda que su uso se limite a pavimentos sin pasajuntas en las rutas de bajo volumen de tráfico (ACPA, 1991). En casos especiales, como por ejemplo tráfico pesado, se permite el uso de pasajuntas en JTE (McGhee, 1995). En tal situación, se recomienda que las pasajuntas no se coloquen perpendicular a la junta, sino en el mismo sentido del tráfico (FHWA, 1990a).

Por otra parte, la ACPA (American Concrete Pavement Association) sugiere que cuando se usan pasajuntas, la decisión de utilizar las JTE debe ser tomada por el contratista en base a su experiencia de construcción. Además, algunos ingenieros sugieren que la junta transversal colocada perpendicularmente a la línea central es más fácil de construir correctamente y su rendimiento puede ser igual a la de JTE. De acuerdo a la FHWA (Federal Highway Administration), adopta la postura de que los datos de rendimiento no dan soporte a la necesidad de usar las JTE en un pavimento de hormigón que posea pasajuntas adecuadamente (McGhee, 1995).

En el caso de que presenten las JTE, el ángulo de las juntas no debe ser mayor de 0,6 [m] por 3,7 [m] del ancho del carril, como máximo se puede aceptar de 0,3 [m] por 3 [m] del ancho del carril (Aytton, 1993) (McGhee, 1995). Independiente del valor del ángulo, si el pavimento posee una base rígida, es decir, base tratada con cemento u hormigón pobre, es propenso a las roturas de las esquinas (ACI, 2006).

A continuación, se explica en la siguiente sección en qué consiste el factor de conversión aplicando los conceptos de JTE previamente revisados, y las investigaciones anteriores que se han realizado sobre las JTE.

3.1.2. Cálculo del factor de conversión

La implementación de JTE no está considerada en la GEMDP, es más, se tiene por supuesto que las juntas transversales son perpendiculares al eje central del pavimento. A pesar que existen algunas consideraciones al momento de utilizar las JTE, no se sabe con certeza en qué porcentaje el escalonamiento disminuye. Esa propiedad es importante cuando se decide diseñar con JTE.

Bajo la premisa anterior, se propone cuantificar la disminución del escalonamiento generado por las JTE mediante la aplicación de un factor de conversión. El factor de conversión consiste en la relación de los escalonamientos generados en una JTR y en una JTE. En la Ec. 3-1 se expresa la relación previamente dicha.

$$F_c(\theta) = \frac{Esc(JTR)}{Esc(JTE)} \quad \text{Ec. 3-1}$$

Donde: F_c : Factor de conversión.
 θ : Ángulo entre la JTE y la línea central del pavimento.
 $Esc(JTR)$: Escalonamiento de la junta transversal recta, [mm].
 $Esc(JTE)$: Escalonamiento de la junta transversal esviada, [mm].

Dependiendo del ángulo entre la JTE y el eje central del pavimento, se obtiene el valor del factor de conversión. De acuerdo al objetivo estipulado anteriormente, se pretende conocer la proporción en que se reduce el escalonamiento, de manera tal de comprobar la eficiencia de la medida de esviar las juntas transversales.

3.1.3. Antecedentes de investigación de las juntas transversales esviadas

Las investigaciones previas sobre las JTE corresponden a la calibración local del modelo de escalonamiento realizados por Vásquez (2014) y Moraga (2015). Para ambos trabajos, se consideran proyectos que poseen JTE que tienen una inclinación promedio de 10° tanto para el sentido de giro horario como anti horario, en donde se conocen los escalonamientos medidos en terreno y los escalonamientos predichos por el programa de diseño de la GEMDP Darwin ME. En el siguiente gráfico se muestra la comparación entre los dos tipos de escalonamientos, considerando proyectos que poseen esviaje y proyectos con JTR.

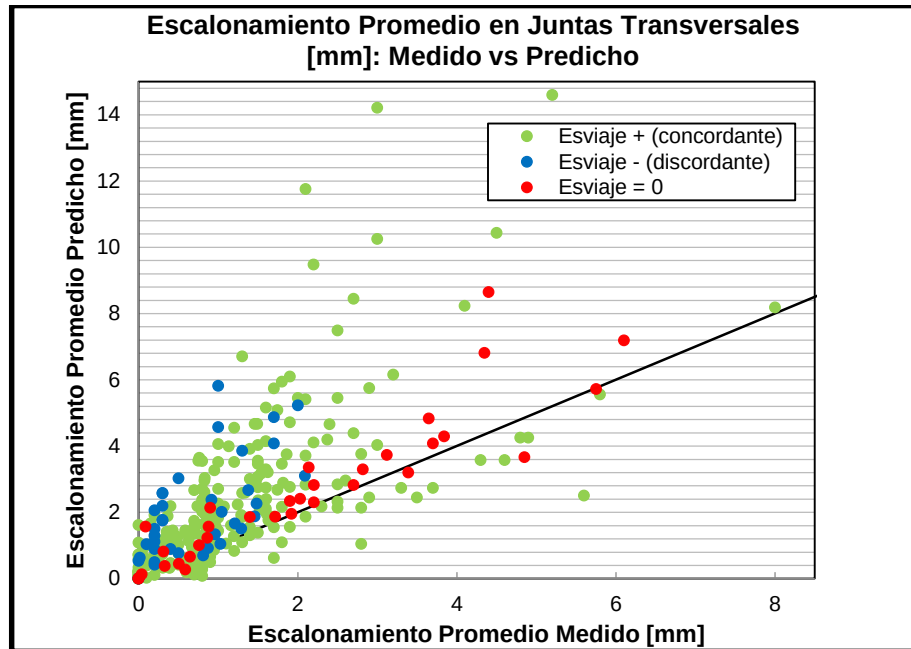


Figura 3-3 Escalonamiento Promedio Medido versus Predicho considerando JTE y JTR (Vásquez, 2014)

En la Figura 3-3 se puede observar que los resultados entregados por el programa, para los proyectos que poseen esviaje, existe una sobre estimación del deterioro en la mayoría de los casos, es decir, el escalonamiento predicho es superior al medido. No así para el caso de aquellos proyectos que poseen juntas ortogonales, cuyos resultados se encuentran prácticamente en su mayoría cercanos a la línea de igualdad.

En las Ec. 3-2 y Ec. 3-3 se muestran las relaciones existentes entre los deterioros predichos por el programa y los medidos en terreno, punto a punto, de tal forma determinar los errores generados por el programa mediante los siguientes factores.

$$Proyectos_{Esviaje \neq 0} \rightarrow Promedio \frac{Escalonamiento_{predicho}}{Escalonamiento_{medido}} = 1,95 \quad \text{Ec. 3-2}$$

$$Proyectos_{Esviaje = 0} \rightarrow Promedio \frac{Escalonamiento_{predicho}}{Escalonamiento_{medido}} = 1,21 \quad \text{Ec. 3-3}$$

Luego, considerando los factores anteriores, se obtiene el factor para relacionar los errores generados de los proyectos con esviaje con los errores de los proyectos con esviaje cero o con juntas ortogonales.

$$\frac{Proyectos_{Esviaje \neq 0}}{Proyectos_{Esviaje = 0}} = 1,60 \quad \text{Ec. 3-4}$$

El factor mostrado en la Ec. 3-4 indica que los escalonamientos producidos en los proyectos con esviajes distintos de cero, tienen un mayor error entre el escalonamiento predicho y medido, en comparación con los proyectos con esviaje igual a cero. De esta forma, es posible transformar los datos de los proyectos con esviaje a una sobrestimación comparable con los proyectos sin esviaje, siendo usado en la calibración local del modelo de escalonamiento. Este factor fue aplicado, en la calibración realizada por Vásquez (2014), a todas las mediciones de los proyectos con esviaje y todo el procedimiento de calibración fue realizado usando este factor fijo.

Con respecto a la calibración local realizada por Moraga (2015), este factor fue calculado, no como un valor fijo, sino que para cada iteración de la calibración se obtiene un valor del factor asociado a esa iteración. Como resultado de esto, se tiene un factor muy cercano a 1,6, confirmándose que independientemente que el software esté calibrado o no, siempre produce la misma sobre estimación del escalonamiento en pavimentos con esviaje, y adicionalmente se confirmó que el factor, encontrado en la calibración realizada por Vásquez (2014), es correcto.

En la siguiente sección se indica la metodología de trabajo para obtener los valores del factor de conversión considerando la inclinación de las JTE y la posición del sistema de ejes de carga.

3.2. METODOLOGÍA DE TRABAJO DEL FACTOR DE CONVERSIÓN

Como se vio en el punto 3.1.2, el factor de conversión es la proporción entre los escalonamientos utilizando las JTR y las JTE. Para obtener los valores de este deterioro se aplican las ecuaciones del modelo de escalonamiento de la GEMDP, visto en el capítulo 2, utilizando como datos de entrada la estructura del pavimento, condiciones climáticas, propiedades del suelo y el sistema de carga.

De acuerdo a la GEMDP, es necesario calcular las deflexiones generadas en las esquinas de las losas, por lo tanto, se debe emplear un programa de elementos finitos que permita obtener estas deflexiones y que tenga la capacidad de cambiar la configuración de las juntas transversales para completar el estudio. El programa a utilizar se denomina EverFE, mediante el cual se calculan las deflexiones de manera mensual para el primer año de funcionamiento del pavimento.

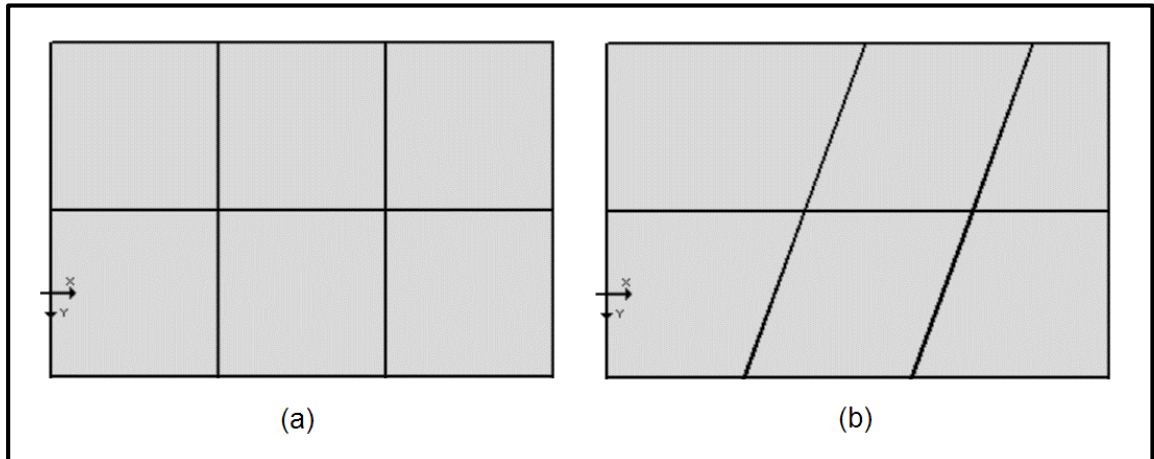


Figura 3-4 Configuración de sistema de losas (a) JTR (b) JTE

En la Figura 3-4 se muestra el sistema de losas que se ocupa en este análisis, correspondiendo a un sistema de 6 losas cuadradas de dimensión 3,5 [m], con una distribución de 2 x 3. Primero se ocupa el sistema de la Figura 3-4(a) para calcular las deflexiones y posteriormente el escalonamiento. Como se explicó en el capítulo 2, primero se calcula la deflexión generada por el gradiente de temperatura y después la deflexión generada por el sistema de carga que transita por el pavimento. Teniendo esos datos, se puede tener el escalonamiento producido en el pavimento de manera mensual. El escalonamiento para la estructura de pavimento con JTR es el patrón a comparar para obtener el factor de conversión, por lo tanto, éste se mantiene constante en el análisis.

El siguiente paso corresponde a calcular el escalonamiento para la estructura de pavimento con JTE. Utilizando el sistema de la Figura 3-4(b), se configura el programa colocando la inclinación deseada para esviar la junta transversal. Se realiza el mismo procedimiento ocupado para el sistema patrón, teniéndose el escalonamiento mes a mes para el caso de JTE.

A partir de los datos obtenidos, se correlacionan ambos para ver la tendencia de los escalonamientos en el primer año de funcionamiento. El resultado deberá reflejar la linealidad de la tendencia, de esa forma, se obtiene el factor de conversión esperado para una inclinación determinada, tal como se muestra en la Ec. 3-1. Para conocer la tendencia del factor de conversión, se elabora un espectro de ángulos para variar la inclinación de las juntas y conocer el factor para cada caso. Posterior a esto, se compara la variable del ángulo con el factor de conversión y se correlacionan. Se espera ver un comportamiento lógico del factor al modificar la inclinación de las juntas, conociendo así el sistema más acorde para disminuir el deterioro de interés en un pavimento de hormigón.

En las siguientes secciones se tratan los elementos claves que se ocupan para desarrollar este análisis, para así dejar en claro la metodología de la verificación del factor de conversión.

3.2.1. Datos de entrada necesarios

En la Tabla 3-1 se muestra el listado de datos de entrada necesarios para obtener el escalonamiento para los dos casos en estudio. Además, se describe la unidad de cada dato, su variación con respecto el tiempo de diseño y su fuente. Para el caso de la variación de los datos de entrada, la gran mayoría es fija para toda la duración del pavimento. Pero, en los casos donde la variación indica *Mes diseño*, corresponde al hecho que el dato varía mensualmente con respecto al desgaste del pavimento. De forma análoga, la variación *Mes calendario* indica que el dato varía acorde a las estaciones del año de manera mensual.

Tabla 3-1 Listado de datos de entrada para el escalonamiento.

Dato de entrada	Unidad	Variación	Fuente
Edad del pavimento en apertura de tráfico	[mes]	Fijo	Ingresar
Módulo de Elasticidad del hormigón	[MPa]	Mes diseño	Programa
Largo de la losa	[mm]	Fija	Ingresar
Ancho de la losa	[mm]	Fija	Ingresar
Módulo de Poisson	Adimensional	Fijo	Ingresar
Peso unitario del hormigón	[kgf/m³]	Fijo	Ingresar
Coefficiente de expansión térmica	[mm/mm/°C]	Fijo	Ingresar
Deformación de retracción última	[microstrain]	Fijo	Programa
Tiempo al 50 % ult. retracción.	[días]	Fijo	Ingresar
Espesor de la losa de hormigón	[mm]	Fijo	Ingresar
Espesor de la base	[mm]	Fijo	Ingresar
Peso unitario de la base	[kgf/m³]	Fijo	Ingresar
Módulo resiliente de la base	[MPa]	Mes calendario	Programa
Erosionabilidad de la base	Adimensional	Fijo	Ingresar
Módulo de reacción de la subrasante	[MPa/mm]	Mes calendario	Programa
Gradiente de construcción	[°C]	Fijo	Ingresar
Porcentaje de humedad	[%]	Mes calendario	Programa
Apertura de juntas	[mm]	Mes diseño	Programa
Inclinación de la junta transversal	[°]	Fijo	Ingresar
LTE	[%]	Mes diseño	Programa
Gradiente térmico	[°C]	Mes calendario	Ingresar
Sistema de eje de carga	[kN]	Fijo	Ingresar

De acuerdo a la Tabla 3-1, se tiene dos tipos de fuentes u orígenes para los datos de entrada. La denominada *Programa* corresponde a los datos obtenidos por medio del programa AASHTOWare Pavement ME Design versión 2.0, programa utilizado para la GEMDP. Estos datos de entrada consisten en datos generados por el programa, que tienen variación *Mes calendario* y *Mes diseño*, viéndose en el punto 3.2.4.1. Para el caso del deterioro del escalonamiento, el programa utiliza el procedimiento explicado en el capítulo 2. En el caso de los datos de entrada con fuente *Ingresar*, son los obtenidos manualmente.

Se utiliza la ciudad de Valparaíso para obtener los datos de entrada relacionados con las propiedades de la subrasante y las condiciones climáticas. Para los datos de temperatura se utiliza los gradientes obtenidos por el IDIEM mostrado en el punto 3.2.4.2. La estructura de pavimento se fija de manera arbitraria, utilizando solo un sistema de pavimento para que los resultados sean similares, usándose los datos mostrados en los puntos 3.2.4.3 y 3.2.4.4. Análogo al sistema de pavimento, el sistema de carga será el mismo para ambos casos a analizar, tal como se ve en el punto 3.2.4.5.

Las unidades con que se trabaja corresponde a las usadas por el programa de elementos finitos a emplear, que es este caso es el programa EverFE. En el punto 3.2.2 se explica el programa en detalle.

3.2.2. Programa de elementos finitos EverFE

De acuerdo a la GEMDP, el programa de elementos finitos para calcular las deflexiones corresponde a ISLAB2000 (Khazanovich et al., 2000). Debido a que no es posible ingresar una inclinación distinta a una JTR en este programa, es necesario utilizar el programa EverFE para ingresar las JTE.

El programa EverFE es una herramienta, de análisis de elementos finitos 3D, para simular la respuesta de un sistema de pavimento de hormigón simple con juntas ante los efectos ambientales y los ejes de carga. El programa emplea una interfaz gráfica de usuario intuitiva que simplifica en gran medida la generación de modelos, y la interpretación de los resultados se demuestra a través de un problema de muestra.

Algunas de las características significativas del EverFE incluyen:

- La habilidad de modelar 1, 2 o 3 losas y/o bermas en el sentido longitudinal y/o transversal (hasta 9 unidades en total de losas-bermas en una configuración de 3x3). Las pasajuntas transversales entre las losas-bermas adyacentes pueden modelarse explícitamente.

- Se permite inclinar las juntas transversales acomodando las pasajuntas con la misma inclinación. La posición de las pasajuntas permanece en el mismo sentido al tráfico.
- Se pueden especificar hasta tres capas elásticas con una base ligada o no ligada. La transferencia de corte entre la losa y la base puede ser capturada a través de la rigidez elasto-plástica distribuida horizontalmente. Una fundación líquida sin o con tensión de soporte se toma como modelo para la capa inferior del pavimento.
- Para las juntas transversales se puede simular la transferencia de corte mediante la trabazón de agregado de manera lineal o no lineal.
- Las pasajuntas pueden ser colocadas de manera precisa en las juntas transversales, además se puede fijar el módulo de soporte para modelar la interacción entre la pasajunta y la losa.
- Se puede modelar la desalineación y la ubicación incorrecta de las pasajuntas.
- Se puede definir fácilmente una variedad de configuraciones para diferentes ejes de carga con la mínima cantidad de datos.
- Se puede capturar gradientes de temperaturas lineales, bilineales y trilineales a través del espesor de la losa. Esto permite la simulación de los efectos térmicos, así como la retracción de la losa.
- Las amplias capacidades del post-procesamiento del EverFE permiten la visualización de los esfuerzos, desplazamientos, fuerzas y momentos internos de las pasajuntas. Se pueden recuperar fácilmente los valores de las respuestas críticas en cualquier punto del modelo.

Sin embargo, EverFE tiene las siguientes limitaciones importantes:

- El tiempo de cálculo del programa sigue siendo considerable - alrededor de una hora para una sola corrida con una malla fina - en un PC con un procesador de bajo rendimiento. Además, el programa no funciona con sistemas operativos modernos, por lo que es necesario virtualizar un sistema más antiguo y compatible.
- Si una base estabilizada está presente en el pavimento, se modela como una capa continua bajo las juntas transversales de hormigón. Esto puede significar una sobreestimación de la eficiencia de transferencia de carga en las juntas, si una grieta se desarrolla a lo largo de la base.

3.2.3. Medición de la deflexión de la losa en el programa EverFE

Las deflexiones de las losas se miden en las esquinas, tal como lo indica la GEMDP. El programa EverFE muestra los resultados de acuerdo al sistema de referencia mostrando en la Figura 3-5, este sistema se localiza en el borde del pavimento, entre la losa de hormigón y la subrasante.



Figura 3-5 Sistema de referencia del programa EverFE

De acuerdo a las deflexiones necesarias para calcular el escalonamiento, se consideran distintas posiciones de medición con respecto al eje de referencia descrito anteriormente. A continuación, se explica las consideraciones realizadas para las deflexiones por el alabeo térmico y por los ejes de carga.

3.2.3.1. Medición de la deflexión por el alabeo térmico

Para el caso de la deflexión por el alabeo térmico, se obtiene mediante la Ec. 2-26, aplicándose la diferencia entre el desplazamiento debido al alabeo térmico más el peso propio y el desplazamiento debido solo al peso propio con respecto a los ejes de referencia. Implementando el programa EverFE, esta diferencia se traduce en la posición en donde se mide la deflexión en la losa. Para el primer término de la Ec. 2-26, la medición se realiza en la esquina de la losa, pues en esa posición se refleja el alabeo generado por la temperatura, además del hundimiento de la losa por el peso propio. Y para el segundo término, la medición se realiza en el centro de la losa, debido a que en ese punto la losa solamente se traslada hacia abajo, correspondiendo al desplazamiento por peso propio. Por lo tanto, para obtener la deflexión neta de la losa se utiliza la siguiente expresión:

$$\delta'_{curl} = \delta_{Esquina} - \delta_{Centro} \quad \text{Ec. 3-5}$$

- Donde:
- δ'_{curl} : Deflexión neta en la esquina de la losa debido al alabeo térmico, [mm].
 - $\delta_{Esquina}$: Desplazamiento medido en la esquina de la losa, siempre tiene valor negativo para gradientes de temperatura negativos, [mm].
 - δ_{Centro} : Desplazamiento medido en el centro de la losa, siempre tiene valor positivo para gradientes de temperatura negativos, [mm].

Mediante la Ec. 3-5, la deflexión en la esquina de la losa se mide a partir del centro de la losa, abarcando de esa forma la concavidad completa cuando la losa se somete a un gradiente de temperatura negativo. Este criterio se aplica tanto para el caso con JTR y JTE para la deflexión por alabeo térmico.

3.2.3.2. Medición de la deflexión por los ejes de carga

Para el caso de las deflexiones por los ejes de carga, se obtienen mediante las Ec. 2-45 y Ec. 2-46, siendo las deflexiones en las losas cargada y no cargada. De acuerdo a estas ecuaciones, la deflexión corresponde a la diferencia entre el desplazamiento debido al alabeo térmico más la carga y el desplazamiento debido solo al alabeo térmico con respecto a los ejes de referencia. Realizando la misma metodología del caso anterior, para el primer término de ambas ecuaciones, el desplazamiento se mide en la esquina en una losa sometida a cargas, temperatura y peso propio. Para el segundo término, la medición se realiza en la esquina de una losa sometida a temperatura y peso propio. En las Ec. 3-6 y Ec. 3-7 se muestra lo explicado anteriormente.

$$\delta'_{L,i,A} = \delta_{Esquina,L}(T, PP, q) - \delta_{Esquina,L}(T, PP, 0) \quad \text{Ec. 3-6}$$

$$\delta'_{U,i,A} = \delta_{Esquina,U}(T, PP, q) - \delta_{Esquina,U}(T, PP, 0) \quad \text{Ec. 3-7}$$

Donde:	$\delta'_{L,i,A}$	: Deflexión neta en la esquina de la losa cargada debido a los ejes de carga, [mm].
	$\delta'_{U,i,A}$	: Deflexión neta en la esquina de la losa no cargada debido a los ejes de carga, [mm].
	$\delta_{Esquina}$	: Desplazamiento medido en la esquina de la losa, siempre tiene valor negativo para gradientes de temperatura negativos, [mm].
	q	: Eje de carga sobre la losa, [kN]
	T	: Temperatura en el pavimento, [°].
	PP	: Peso propio.

Otro factor importante en la medición de la deflexión es el mallado sobre las losas que se ingresa en el programa. Para obtener buenos resultados en las deflexiones, es necesario utilizar un mallado fino. Debido a lo anterior, el mallado usado corresponde a un mallado de 20 x 20 por losa, con dimensiones de 17,5 x 17,5 [cm] por cuadro aproximadamente.

3.2.4. Consideraciones en el cálculo del factor de conversión

Las consideraciones que se tienen presentes para obtener el escalonamiento son los datos entregados por el programa de la GEMDP, el gradiente de temperatura, el espectro de los ángulos de las juntas transversales, la estructura de pavimento y el sistema de ejes de carga. En las siguientes subsecciones se explica cada tópico, basándose en lo explicado en los capítulos anteriores y estableciéndose un criterio para obtener resultados lógicos.

3.2.4.1. Datos entregados por el programa AASHTOWare Pavement ME Design

Tal como se indicó en el punto 3.2.1, los datos que se extraen del programa utilizado por la GEMDP son el módulo de elasticidad del hormigón, el módulo resiliente de la base, el módulo de reacción de la subrasante, el porcentaje de humedad, la apertura de juntas y la eficiencia de transferencia de carga, de acuerdo a la ciudad de Valparaíso. En la Tabla 3-2 se muestra los valores de los datos anteriores de forma mensual.

Tabla 3-2 Datos con variación mensual para el cálculo del escalonamiento.

Edad [Mes]	E_{pcc} [MPa]	$M_{r_{base}}$ [MPa]	k [kPa/mm]	R.H [%]	jw [mm]	LTE [%]
1	14685,83	336,4	72	65,7	0,9	45,9
2	29923,25	338,19	72	67,5	1,09	35,5
3	30750,62	338,12	73	68,7	1,25	30,5
4	31233,25	338,19	73	69,5	1,42	27,5
5	31577,99	338,19	73	75,6	1,54	26,1
6	31784,83	338,12	73	74,9	1,62	25,4
7	32060,62	338,19	73	73,3	1,64	25,3
8	32198,52	338,12	73	70,2	1,63	25,3
9	32336,41	337,98	73	69,5	1,58	25,7
10	32474,31	337,98	73	66,9	1,52	26,3
11	32612,2	337,98	73	65,9	1,43	27,3
12	32681,15	337,98	73	63,5	1,36	28,5

3.2.4.2. Gradiente de temperatura utilizado

De acuerdo a los estudios realizados en IDIEM (Poblete, 1991), en la Tabla 3-3 se muestran los valores de los gradientes de temperatura de las losas de hormigón medidos en la zona central de Chile. Estos gradientes dependen del espesor de la losa de hormigón, horario, tipo de día y estación. Se puede ver que los gradientes con mayores absolutos se presentan en verano y primavera, en los horarios de 11:00 – 17:00 y 21:00 – 9:00.

La temperatura a considerar, para obtener el escalonamiento, corresponde al horario de 21:00 – 9:00, pues en ese horario presenta los gradientes de temperatura negativos que se consideran en el modelo. Para el estudio del factor de conversión, los gradientes que se utilizan corresponden a un tipo de día parcial, en el horario antes señalado, para todo el año.

Tabla 3-3 Gradientes de temperatura [°C/cm] medidos por el IDIEM.

Estación: Verano (enero - abril)				
Tipo Día	9:00 - 11:00	11:00 - 17:00	17:00 - 21:00	21:00 - 9:00
Despejado	0,00	0,75	0,00	-0,55
Parcial	0,00	0,55	0,00	-0,42
Nublado	0,00	0,40	0,00	-0,30
Estación: Invierno (mayo - agosto)				
Tipo Día	9:00 - 11:00	11:00 - 17:00	17:00 - 21:00	21:00 - 9:00
Despejado	0,00	0,50	0,00	-0,30
Parcial	0,00	0,25	0,00	-0,25
Nublado	0,00	0,10	0,00	-0,05
Estación: Primavera (septiembre - diciembre)				
Tipo Día	9:00 - 11:00	11:00 - 17:00	17:00 - 21:00	21:00 - 9:00
Despejado	0,00	0,75	0,00	-0,55
Parcial	0,00	0,55	0,00	-0,42
Nublado	0,00	0,40	0,00	-0,30

3.2.4.3. Espectro de ángulos de las juntas transversales

Para conocer el comportamiento del factor de conversión, es importante variar el ángulo de inclinación de las juntas transversales. Además de comprobar que las JTE provocan una disminución del escalonamiento, se pretende saber en qué porcentaje disminuye a medida que el ángulo va cambiando. Para la implementación de las JTE, se

especificaron las inclinaciones permitidas en el punto 3.1.1, teniéndose un rango de trabajo entre 5° y 10° en el sentido anti horario con respecto al eje central del pavimento.

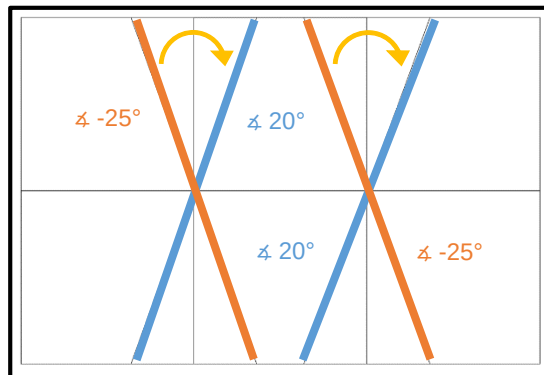


Figura 3-6 Esquema de las JTE

En la Figura 3-6 se muestra el espectro de ángulos que se utiliza para obtener los factores de conversión. Se puede apreciar que el rango va desde el -25 [°] a 20 [°] de giro, comprendiendo no solo los rangos sugeridos, sino que también el sentido de giro horario y anti horario. También, de esa forma, se trabajan los resultados para un mejor entendimiento del comportamiento del factor.

Tabla 3-4 Ángulos a utilizar para las JTE

Sentido anti horario [°]	Sentido horario [°]
-25	5
-20	10
-15	15
-10	20
-5	--

En la Tabla 3-4 se muestra las inclinaciones usadas para las juntas transversales. En total, se tendrán 9 factores de conversión por eje de carga, siendo una cantidad adecuada para conocer la tendencia de la disminución del escalonamiento al variar el ángulo de las JTE.

3.2.4.4. Estructura de pavimento

Como se dijo en el punto 3.2.1, la estructura de pavimento debe ser la misma para todos los casos, debido a que los resultados deben ser comparables para obtener conclusiones lógicas. En la Tabla 3-5 se muestra la estructura a utilizar en el programa

EverFE. Además, se detallan los valores de los datos relacionados con el pavimento, es decir, erosionabilidad de la base, módulo de Poisson, coeficiente de expansión térmica y deformación de retracción última del hormigón. Con respecto al espesor de la losa de hormigón, se escoge un valor promedio del espesor de los proyectos considerados en las investigaciones de calibración de Vásquez (2014) y Moraga (2015), escogiéndose, para esta investigación, los proyectos cercanos a la ciudad de Valparaíso. Se supone un espesor igual a 250 [mm], tal como se indica en la Tabla 3-5.

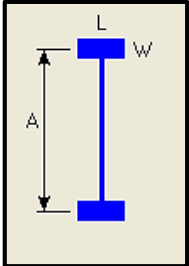
Tabla 3-5 Estructura de pavimento a utilizar

Tipo de capa	Tipo de Material	Espesor [mm]	Densidad [kgf/m ³]	μ	α [1/°C]	ξ_{su} [microstrain]	Erosión
JPCP	Hormigón	250	2400	0.2	0.000011	798.4	--
Base no estabilizada	A-1-a	150	2200	0.3	--	--	4
Subbase	A-3	300	1750	--	--	--	4
Subrasante	A-3	--	1750	--	--	--	--

3.2.4.5. Sistema de ejes de carga

El sistema de cargas a ocupar corresponde a un eje simple con ruedas simples, tal como se ve en la Tabla 3-6. Se ocupa este tipo de eje para facilitar el proceso de cálculo y se utiliza el mismo en todos los casos de estudio. La ubicación de la carga se muestra en la Figura 3-8, posicionándose en dos lugares para cada caso de estudio. Se debe a la diferencia de transferencia de carga entre la *Losa Central* y la *Losa Borde izquierdo*, ya que la *Losa Central* tiene mayor transferencia, por ende, se generan escalonamientos menores.

Tabla 3-6 Información del eje de carga

Información del eje de carga		
Tipo de eje	Eje simple con ruedas simples	
Valor de la carga	128 [kN] = 29 [Kips]	
Dimensión de la rueda	L = 381 [mm] = 15 [in] W = 204 [mm] = 8 [in]	
Presión de rueda	120 [psi]	
Dimensión del eje	A = 2600 [mm] = 102 [in]	

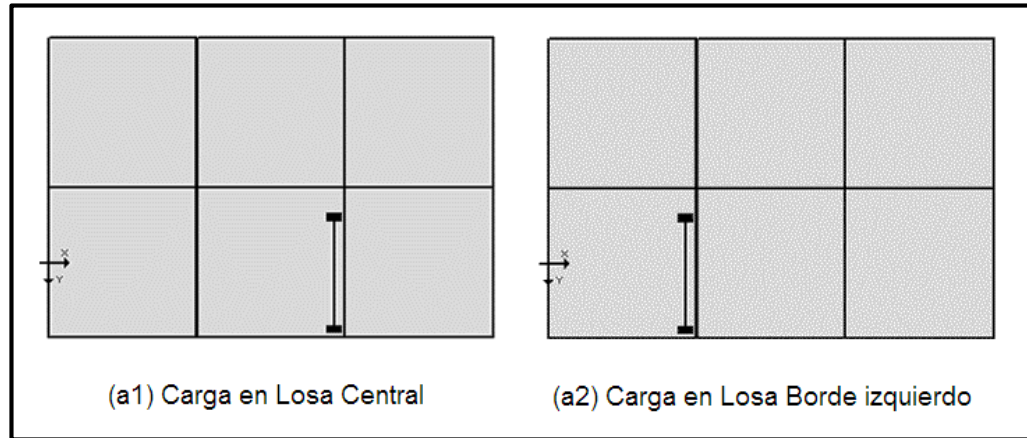


Figura 3-7 Posición de la carga en Losa con JTR

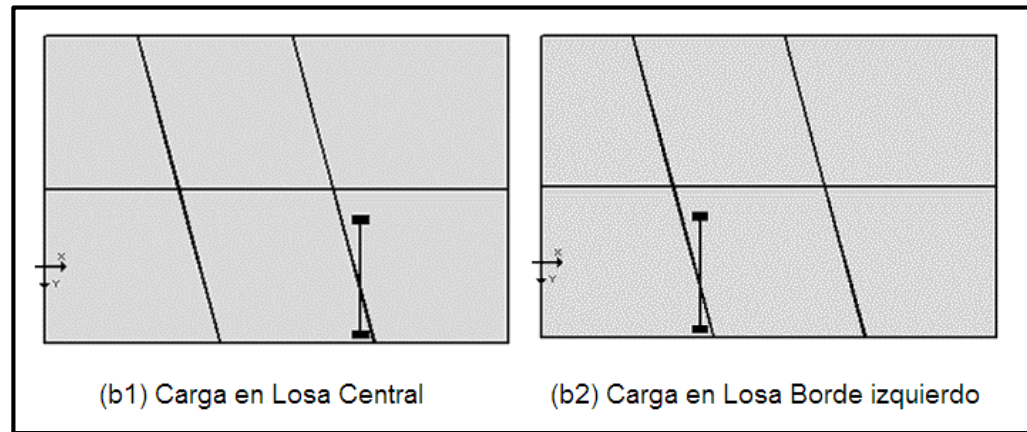


Figura 3-8 Posición de la carga en Losa con JTE

Se destaca que la carga, en todos los casos, se posiciona en la esquina de la losa, siendo el caso crítico donde se genera las deflexiones máximas tal como se mostró en la Figura 2-14.

En la siguiente sección, se presentan los resultados obtenidos y se relacionan estos con los resultados de los estudios realizados previamente.

3.3. COMPORTAMIENTO DEL FACTOR DE CONVERSIÓN

El comportamiento del factor de conversión se revisa gráficamente para observar la relación lineal entre el escalonamiento en una losa con JTR y en una losa con JTE. En las Figura 3-9, Figura 3-10, Figura 3-11 y Figura 3-12 se muestran los gráficos para las dos posiciones de la carga, explicado en el punto 3.2.4.5, de acuerdo al sentido de giro de la junta, descrito en el punto 3.2.4.3. A modo general, se puede apreciar que el comportamiento del factor de conversión es dependiente del sentido de giro y del valor de la inclinación de la junta. Como se ve en los siguientes gráficos, en algunos casos la medida de esviar las juntas no disminuyen de forma significativa el escalonamiento, teniéndose valores muy cercanos a 1 en los factores de conversión.

En el caso de la carga colocada en la Losa Central, correspondientes a las Figura 3-9 y Figura 3-10, se puede ver que los valores del factor de conversión presentan una tendencia en aumento para ambos sentidos de giro de la JTE. De acuerdo al gráfico de la Figura 3-9, existe un estancamiento en el valor del factor de conversión entre los ángulos -10° y -15° , teniéndose un valor de 1,05 para ambos ángulos, aun así, existe una disminución del escalonamiento para todas esas configuraciones de JTE. Por otro lado, en el gráfico de la Figura 3-10 el valor del factor de conversión se acrecienta notoriamente al aumentar la inclinación de la JTE, viéndose que las JTE, con un esviaje en el sentido horario, baja más el nivel de escalonamiento en comparación con un esviaje en el sentido anti horario.

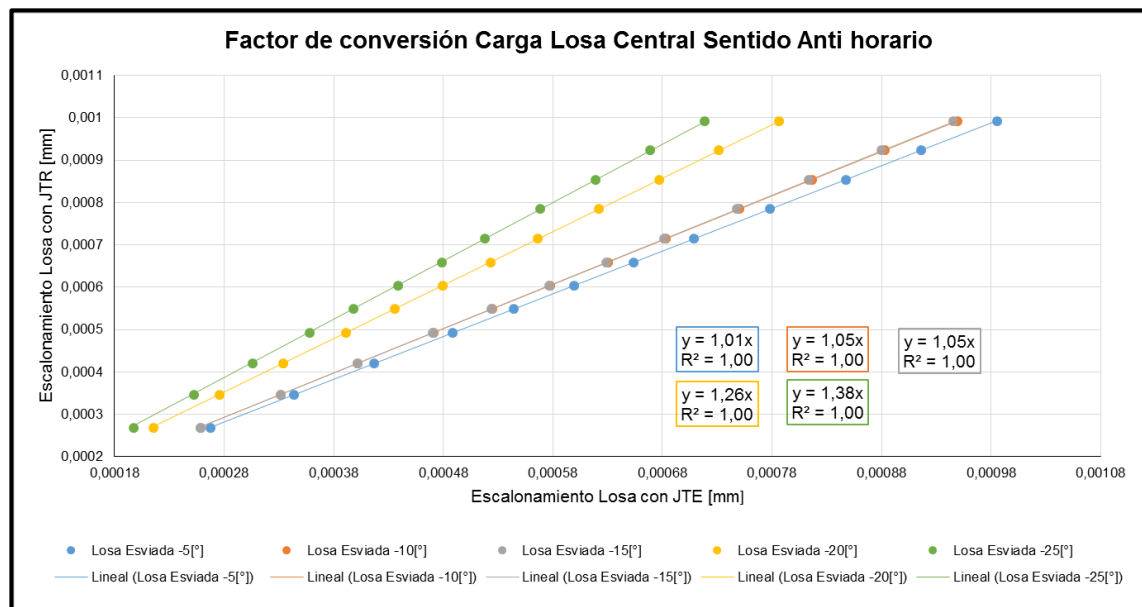


Figura 3-9 Gráfico del Factor de conversión con la Carga Losa Central en el sentido anti horario.

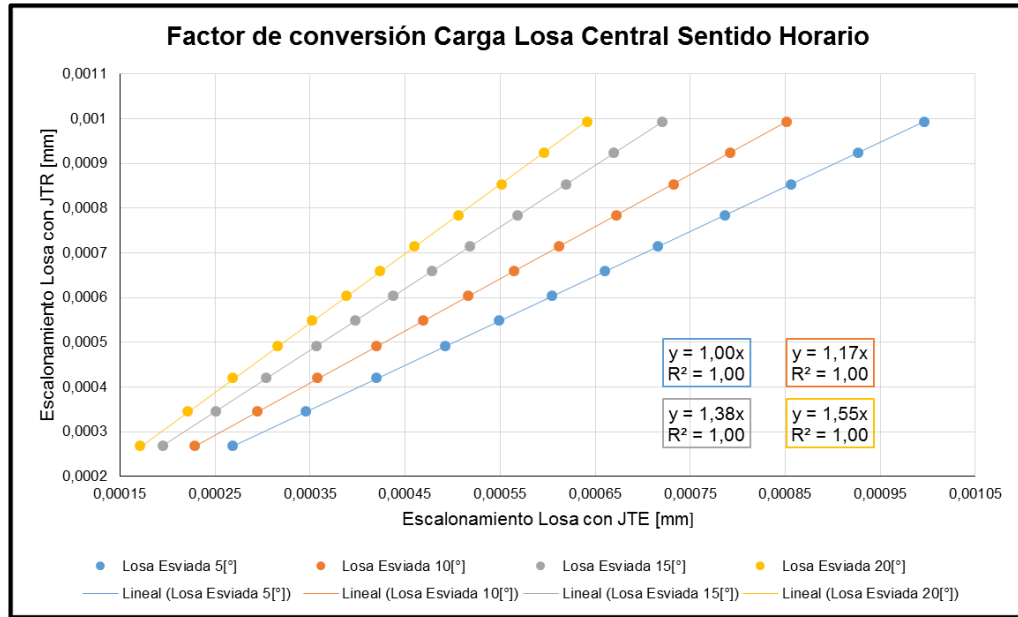


Figura 3-10 Gráfico del Factor de conversión con la Carga Losa Central en el sentido horario.

Considerando la posición de eje de carga en la Losa Borde izquierdo, los factores obtenidos se muestran en las Figura 3-11 y Figura 3-12. Se puede apreciar que los factores de conversión, obtenidos con estas configuraciones, tienen el mismo comportamiento que los factores con la carga ubicada en la Losa Central. Se destaca que, para el ángulo -10° , posee un factor menor que 1, siendo un dato aislado considerando la tendencia de los datos.

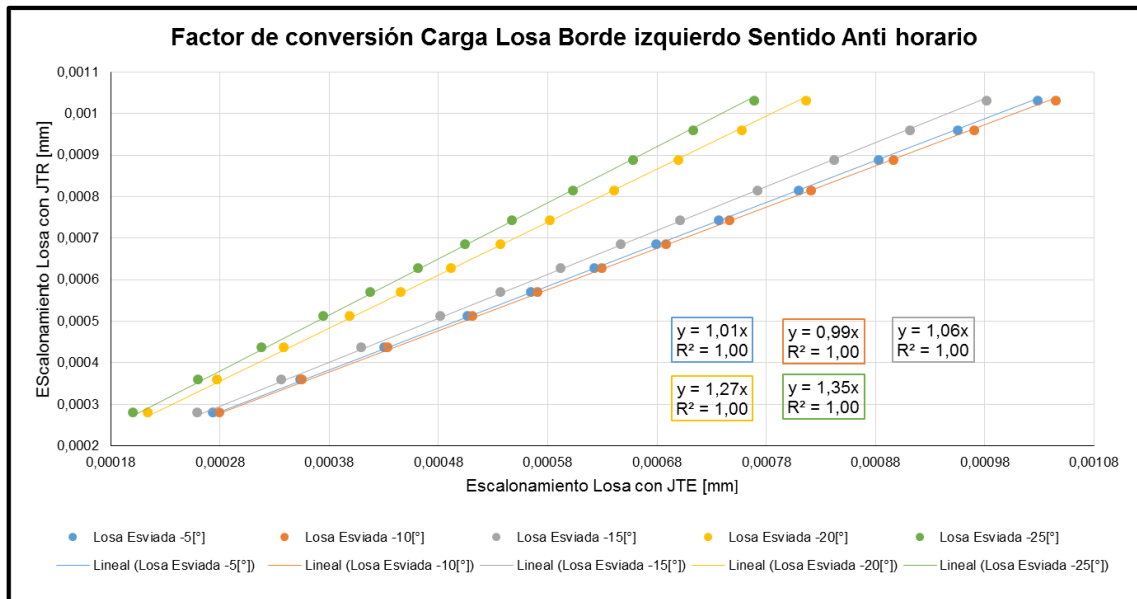


Figura 3-11 Gráfico del Factor de conversión con la Carga Losa Borde izquierdo en el sentido anti horario.

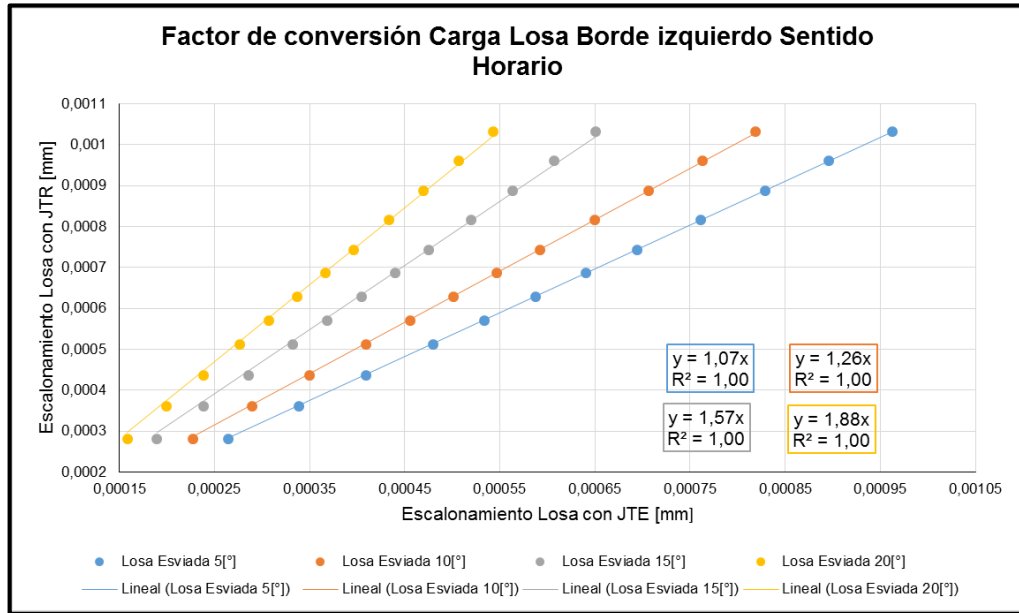


Figura 3-12 Gráfico del Factor de conversión con la Carga Losa Borde izquierdo en el sentido horario.

A modo de resumen, existe un comportamiento similar para ambos casos de posicionamiento de carga, presentando un aumento del factor de conversión en la mayoría de los casos y teniendo un punto de inflexión entre los ángulos -5° y -15° , en donde se presentan los valores más bajo del factor. Esto se debe a la proximidad que tiene la carga sobre la JTE cuando se tiene tales inclinaciones, teniéndose parte de las ruedas del eje en las dos losas analizadas en el momento que el tráfico atraviesa la JTE.

En el ANEXO A se muestran con mayor detalle los valores de los escalonamientos mostrados en los gráficos anteriores.

En las siguientes secciones se tratará de la tendencia del factor de conversión de acuerdo al valor del ángulo de la JTE y cómo esta tendencia se enmarca en las recomendaciones estipuladas en la sección 3.1.1.3.

3.3.1. Tendencia de Resultados

En la Figura 3-13 se muestra el gráfico con la tendencia del factor de conversión, con respecto al ángulo y la posición de la carga. Se aprecia que, en ambas posiciones de carga, la tendencia del factor es cuadrática, teniendo un punto mínimo desplazado con respecto al eje del factor de conversión correspondiente al eje y.

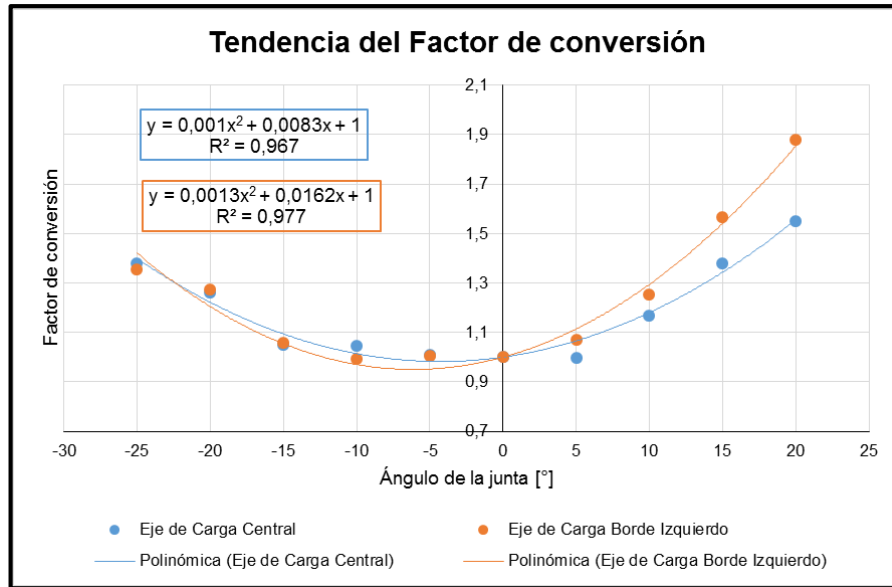


Figura 3-13 Gráfico de la tendencia del factor de conversión.

A partir del gráfico anterior, se muestra que el comportamiento del factor de conversión es independiente de la posición del eje de carga. Esto implica que el escalonamiento se presenta de igual forma a lo largo de todas las losas de pavimento. Otro punto importante a destacar es el desplazamiento de las curvas con respecto al ángulo de inclinación de la JTE. Como se dijo previamente, esto se debe al contacto que tiene la carga en la junta transversal, tal como se ilustra en la Figura 3-14.

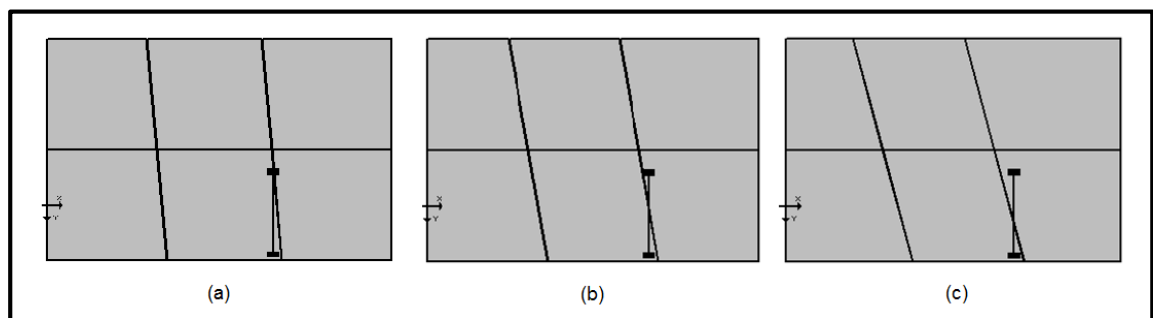


Figura 3-14 Posición de la carga con respecto a la JTE con inclinación (a) -5° (b) -10° (c) -15°.

Se ve que, a medida que el ángulo aumenta, la rueda interior se posiciona sobre ambas losas y sobre la JTE, hasta que atraviesa por completo la junta y se posiciona solo sobre la losa no cargada. Posterior a esta transición, la JTE afecta el valor del escalonamiento disminuyendo su efecto en la estructura de pavimento como se muestra en el gráfico de la Figura 3-13. La transición descrita previamente depende de las dimensiones del eje de carga, pues de acuerdo a esto, se determina el rango de los ángulos en que se genera esta transición.

En el ANEXO A se muestran detalladamente los valores de los factores de conversión mostrados en el gráfico anterior.

3.3.2. Comparación de los resultados con investigaciones de la calibración

Las investigaciones realizadas por Vásquez (2014) y Moraga (2015) consisten en la calibración del modelo de escalonamiento utilizando los datos medidos y predichos de pavimentos de hormigón nacionales, en donde varios proyectos presentaban JTE. Para corregir los datos y adaptarlos a pavimentos con JTR se calculó el factor de la Ec. 3-4, debido a que existía una gran sobre estimación de los datos predichos en el caso de los proyectos con JTE, además que la GEMDP no considera JTE en el modelo de escalonamiento.

Al realizar una comparación de este trabajo con las investigaciones previas, se ve que no existe una relación del factor de la Ec. 3-4 con el factor de conversión propuesto en este trabajo, pues el factor de conversión trabaja directamente con los escalonamientos calculados para los pavimentos con JTR y JTE. Estas tres investigaciones, en vez de compararlas, sirven de complemento para tener un mayor conocimiento con respecto a las JTE.

Mediante esta investigación se comprueba que, para ciertos ángulos de inclinación, las JTE generan una disminución del escalonamiento en el pavimento de hormigón. Para ampliar más esta investigación, se requiere de datos en terreno de tal forma de aplicar la misma metodología de trabajo de esta memoria, para conocer los factores de conversión de cada ciudad de Chile, considerando datos climatológicos, mecánica de suelos y espesores promedio utilizados en cada ciudad. Con esta información, es posible ajustar más la calibración del modelo de escalonamiento, aplicando los mismos procedimientos de las investigaciones previas.

3.3.3. Análisis final del factor de conversión

De acuerdo a lo establecido en el punto 3.1.1.3, el rango recomendado para el valor del ángulo de las JTE a implementar está entre 5,7 [°] y 9,2 [°] en el sentido anti horario. En base a los criterios de diseño y en el gráfico de la Figura 3-13, se puede ver que el sentido anti horario no cumple con las recomendaciones establecidas. Para los ángulos recomendados, se presenta un escenario en que el escalonamiento es levemente acentuado o que las JTE no producen efecto sobre el escalonamiento.

Para que esta medida pueda implementarse se deben ocupar JTE con las siguientes inclinaciones: en el sentido horario con ángulos mayores a 5 [°] o en el sentido anti horario con ángulos mayores a 15 [°]. También se tiene que considerar si el factor de conversión es suficiente para disminuir el escalonamiento en contraparte de las dificultades de construir las JTE. Con lo dicho anteriormente, se tiene que realizar un estudio de factibilidad en los recursos para revisar que el costo asociado a la construcción de JTE se vean compensados con la funcionalidad del pavimento en una obra en específico.

Otro punto importante a considerar es el aumento del rango del ángulo de inclinación. Considerando el gráfico de tendencia de la Figura 3-13, el factor de conversión va aumentando al ampliar el rango de ángulos, asegurando que el escalonamiento no superará los límites establecidos de diseño según la GEMDP. En esos casos, sería necesario probar en terreno la efectividad constructiva y funcional de estas JTE, pues con un ángulo tan pronunciado se presentarían problemas de agrietamiento en las esquinas, generando concentraciones de esfuerzos, afectando el desempeño de las losas de pavimento de hormigón.

4. RED NEURONAL ARTIFICIAL DE LA DEFLEXIÓN POR ALABEO TÉRMICO

En este capítulo se presentará el trabajo realizado para el segundo objetivo principal de esta memoria, el cálculo de las deflexiones por el alabeo térmico mediante la utilización de redes neuronales artificiales. Dentro de este capítulo se definirán los siguientes tópicos que se involucran con este objetivo, siendo el concepto del alabeo térmico, la relación entre la deflexión con las redes neuronales, en qué consisten las redes neuronales artificiales y el concepto de las losas equivalentes de Korenev y Khazanovich.

Además, se explicará la metodología del trabajo realizado para cumplir con el objetivo antes planteado, especificándose los datos de entrada ocupados, las herramientas empleadas y en las consideraciones al momento de calcular la deflexión por alabeo térmico y cómo implementar las redes neuronales artificiales para tal tarea.

Por último, se presentan los resultados obtenidos, explicándose el ordenamiento de los resultados y cuáles son los criterios para escoger la configuración de RNA, con el cual reduce el error de cálculo y que permite predecir de manera eficiente las deflexiones deseadas.

4.1. INTRODUCCIÓN A LA DEFLEXIÓN POR ALABEO TÉRMICO

La temperatura es una magnitud que modifica el estado de la estructura de un pavimento de hormigón, pues genera esfuerzos y deformaciones en la losa que alteran la funcionalidad del pavimento. El alabeo térmico es el resultado debido a la presencia de un gradiente de temperatura a lo largo del espesor de la losa. Ese resultado se traduce en deflexiones en los bordes y en las esquinas de las losas, factor importante en el cálculo del escalonamiento. Para calcular las deflexiones, según la GEMDP, se utilizan las Redes Neuronales Artificiales (RNA) a partir de datos generados en el programa de elementos finitos ISLAB2000 (Khazanovich et al., 2000).

4.1.1. Concepto del alabeo térmico

El alabeo y la retracción de las losas de hormigón son fenómenos inevitables e inherentes a la naturaleza debido a las características de la mezcla, la geometría de la losa y las condiciones de contorno (Riad et al., 2008). Conforme a las siguientes subsecciones, se explica el fenómeno del alabeo térmico, de la generación de esfuerzos en la losa de hormigón y de la determinación del esfuerzo mediante las ecuaciones de Westergaard.

4.1.1.1. Definición de alabeo térmico

El alabeo se produce cuando la losa experimenta cambios de volumen debido a las variaciones en la temperatura, contenido de humedad, o potencial de retracción. Con el fin de permanecer como una unidad, los bordes discontinuos de la losa se someten a un desplazamiento vertical hacia arriba o hacia abajo.

El alabeo alivia los esfuerzos generados al momento de la colocación del hormigón, siempre y cuando la losa sea libre de moverse. Por otra parte, existen varias restricciones que limitan el movimiento de la losa. Estos incluyen la fricción con la capa de base, la interacción pasajunta/hormigón y la trabazón del agregado en las juntas. Como las esquinas y los bordes son las partes menos restringidas de las losas, tienden a experimentar el mayor movimiento relativo.

El alabeo de losas aumenta el potencial de agrietamiento si la cantidad de curvatura hacia arriba de los bordes de la losa supera un cierto valor. Bajo el efecto de la gravedad, la fluencia, la retracción, y las cargas de tráfico, los esfuerzos de tracción se acumulan en la superficie de las juntas flexionadas. Debido a esto, se podría superar el módulo de rotura del hormigón, creándose grietas que conducen a otros tipos de deterioros. Bajo el efecto del tráfico, estas grietas tienen el potencial de desprender parte del hormigón en zonas de esfuerzos altos, crear fallas en los sellados de las juntas, y causar problemas de bombeo (Riad et al., 2008).

4.1.1.2. Esfuerzos debido al alabeo térmico

Durante el día, cuando las temperaturas sobre la losa son mayores, la parte superior de la losa tiende a expandirse con respecto a la dirección neutral, mientras que la parte inferior tiende a contraerse, como se muestra en la Figura 4-1. Sin embargo, el peso de la losa restringe la expansión y la contracción; así, los esfuerzos de compresión son inducidos sobre la losa y los esfuerzos de tracción bajo esta.

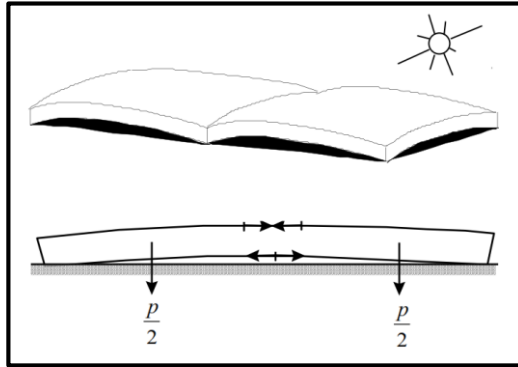


Figura 4-1 Condición de día, alabeo convexo.

En la noche, cuando la temperatura sobre la losa es menor, la parte superior se contrae respecto a la parte inferior, como se muestra en la Figura 4-2. Así, los esfuerzos de tracción son inducidos sobre la losa y los esfuerzos de compresión bajo esta.

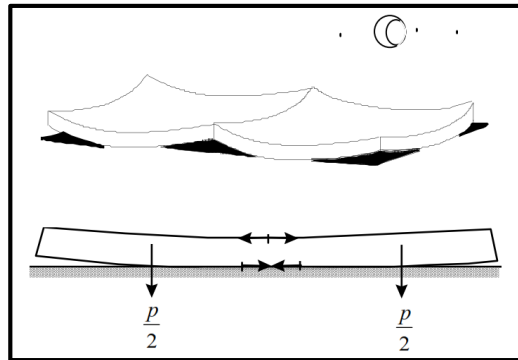


Figura 4-2 Condición nocturna, alabeo cóncavo.

Otra explicación sobre el esfuerzo de alabeo puede ser visto en términos de la teoría de placas sobre una fundación Winkler, o en una fundación líquida. Una fundación Winkler se caracteriza por una serie de resortes adheridos en la placa, tal como se muestra en la Figura 4-3.

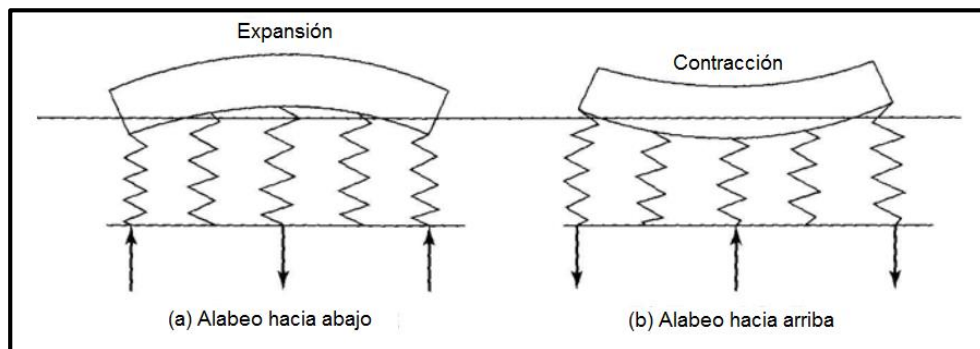


Figura 4-3 Alabeo de las losas y el efecto de la subrasante (Huang, 2003)

Cuando la temperatura sobre la losa es mayor, la parte superior es más larga que la parte inferior y la losa se alabea hacia abajo. Los resortes en el borde exterior están en compresión y empujan la losa hacia arriba, mientras que los resortes en el interior están en tracción y empujan la losa hacia abajo. Como resultado, la parte superior de la losa está en compresión y la parte de abajo en tracción. Cuando la temperatura sobre la losa es menor, la losa se alabea hacia arriba. Los resortes exteriores empujan la losa hacia abajo mientras los resortes interiores empujan la losa hacia arriba, así resultando en tracción la parte superior y en compresión la parte inferior.

4.1.1.3. Determinación de esfuerzos debido al alabeo térmico

▪ Caso de Losa Infinita

Para modelar una losa de hormigón, se utiliza la teoría de placas, pues a diferencia de las vigas, las placas se deforman en dos direcciones. Westergaard (1926), basándose en la teoría de placas, desarrolló las ecuaciones para determinar los esfuerzos producidos por el alabeo térmico en un pavimento de hormigón. De acuerdo a la Figura 4-4, las ecuaciones que describen una superficie curva son las siguientes:

$$-\frac{\partial^2 z}{\partial x^2} = \frac{12}{E_{PCC} h_{PCC}^3} (M_x - \mu_{PCC} M_y) + \frac{\alpha_{PCC} \Delta T}{h_{PCC}} \quad \text{Ec. 4-1}$$

$$-\frac{\partial^2 z}{\partial y^2} = \frac{12}{E_{PCC} h_{PCC}^3} (M_y - \mu_{PCC} M_x) + \frac{\alpha_{PCC} \Delta T}{h_{PCC}} \quad \text{Ec. 4-2}$$

$$-\frac{\partial^2 z}{\partial x \partial y} = \frac{12}{E_{PCC} h_{PCC}^3} (1 + \mu_{PCC}) M_z \quad \text{Ec. 4-3}$$

Donde: ΔT : Gradiente de temperatura a través del espesor de la losa de hormigón.

α_{PCC} : Coeficiente de expansión térmica del hormigón.

μ_{PCC} : Módulo de Poisson del hormigón.

E_{PCC} : Módulo de elasticidad del hormigón.

h_{PCC} : Espesor de la losa de hormigón.

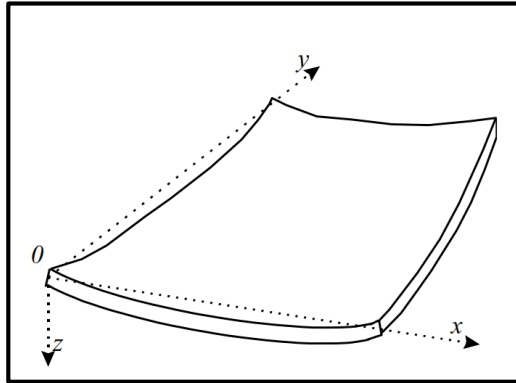


Figura 4-4 Superficie curva producto de la diferencia de temperatura en la losa.

Al considerar una placa infinita, se desprecian las rotaciones que se producen en el centro de ella, donde las deflexiones son nulas y además se cumple que $M_x = M_y$. Al aplicar lo anterior en la Ec. 4-1 o en la Ec. 4-2, se tiene la siguiente expresión:

$$M_y = M_x = -\frac{E_{PCC} h_{PCC}^2 \alpha_{PCC} \Delta T}{12 (1 - \mu_{PCC})} \quad \text{Ec. 4-4}$$

Por otro lado, para definir los esfuerzos en dos direcciones, la deformación en cada dirección puede ser determinada mediante la ley de Hooke generalizada. En la Ec. 4-5 se muestra la deformación en la dirección x:

$$\varepsilon_x = \frac{\sigma_x}{E_{PCC}} - \mu_{PCC} \frac{\sigma_y}{E_{PCC}} \quad \text{Ec. 4-5}$$

Donde: ε_x : Deformación de la losa en la dirección x.

σ_x : Esfuerzo de la losa en la dirección x.

σ_y : Esfuerzo de la losa en la dirección y.

En la Ec. 4-5, el primer término corresponde a la deformación en la dirección x causada por el esfuerzo en la dirección x, el segundo término corresponde a la deformación en dirección x causada por el esfuerzo en dirección y. De la misma manera en la dirección perpendicular:

$$\varepsilon_y = \frac{\sigma_y}{E_{PCC}} - \mu_{PCC} \frac{\sigma_x}{E_{PCC}} \quad \text{Ec. 4-6}$$

Donde: ε_y : Deformación de la losa en la dirección y.

σ_x : Esfuerzo de la losa en la dirección x.

σ_y : Esfuerzo de la losa en la dirección y.

Cuando la placa se flecta en la dirección x , ε_y debe ser igual a cero porque la placa es tan amplia y restringida que ningún esfuerzo debiera ocurrir. Luego, el esfuerzo en la dirección perpendicular a la flexión es:

$$\sigma_y = \mu_{PCC} \sigma_x \quad \text{Ec. 4-7}$$

Sustituyendo la Ec. 4-7 en la Ec. 4-5, se tiene lo siguiente:

$$\sigma_x = \frac{E_{PCC} \varepsilon_x}{1 - \mu_{PCC}^2} \quad \text{Ec. 4-8}$$

La flexión debido al alabeo térmico se produce tanto en la dirección x como en la dirección y , los esfuerzos en ambas direcciones deben ser superpuestos para obtener el esfuerzo total. El esfuerzo máximo en la placa infinita debido al alabeo térmico se puede obtener suponiendo que la losa es restringida por completo en ambas direcciones.

Considerando una distribución lineal de la temperatura, si la placa tiene libertad de movimiento y la temperatura en la parte superior es mayor que en la inferior, la parte superior se expandirá y la parte inferior se contraerá con una tasa de deformación igual a la mostrada en la Figura 4-5.

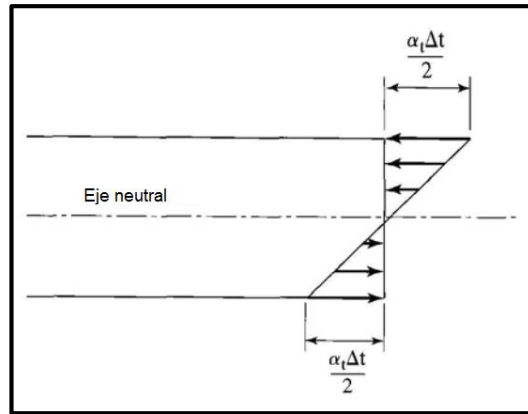


Figura 4-5 Gradiente lineal de temperatura en una losa de hormigón (Huang, 2003)

Pero, como la placa se encuentra restringida por completo, se induce un esfuerzo de compresión en la parte superior y uno de tracción en la inferior, bajo este supuesto se genera un esfuerzo máximo en la placa infinita debido al alabeo térmico y, por tanto, la deformación máxima será de:

$$\varepsilon_x = \varepsilon_y = \alpha_{PCC} \frac{\Delta t}{2} \quad \text{Ec. 4-9}$$

Combinando la Ec. 4-8 con la Ec. 4-9 se obtiene el esfuerzo en la dirección x debido a la flexión en la dirección x, además, considerando la Ec. 4-7 es posible también obtener el esfuerzo en la dirección x debido a la flexión en la dirección y, por tanto la tensión máxima total es:

$$\sigma_o = \frac{E_{PCC} \alpha_{PCC} \Delta t}{2(1 - \mu_{PCC}^2)} + \frac{\mu_{PCC} E_{PCC} \alpha_{PCC} \Delta t}{2(1 - \mu_{PCC}^2)} = \frac{E_{PCC} \alpha_{PCC} \Delta t}{2(1 - \mu_{PCC})} \quad \text{Ec. 4-10}$$

Si un borde de la placa de la Figura 4-4 corresponde al eje x y la losa se extiende infinitamente en ambos sentidos del eje x e infinitamente en el sentido positivo del eje y, la deflexión no cambia debido al diferencial de temperatura a lo largo del eje x. Por lo tanto, se tiene lo siguiente:

$$\frac{\partial^2 z}{\partial x^2} = 0 \quad \text{Ec. 4-11}$$

Ahora, despejando M_x de la Ec. 4-1 y reemplazando en la Ec. 4-2, se obtiene:

$$M_y = \frac{E_{PCC} h_{PCC}^3}{12(1 - \mu_{PCC}^2)} \left(-\frac{\partial^2 z}{\partial y^2} - \frac{(1 + \mu_{PCC}) \alpha_{PCC} \Delta T}{h_{PCC}} \right) \quad \text{Ec. 4-12}$$

Si se asume que existe contacto entre la losa y la subrasante debido al peso de la losa, a pesar de la forma en que esta se alabee, la reacción de la subrasante es kz . Luego, por equilibrio:

$$\frac{\partial^2 M_y}{\partial y^2} = -kz \quad \text{Ec. 4-13}$$

Y reemplazando la Ec. 4-12 en la Ec. 4-13, se tiene lo siguiente:

$$\left(\frac{E_{PCC} h_{PCC}^3}{12(1 - \mu_{PCC}^2)} \right) \frac{\partial^4 z}{\partial y^4} + kz = 0 \quad \text{Ec. 4-14}$$

Considerando esta ecuación diferencial de cuarto orden, Westergaard define el radio de rigidez relativa, debido a que los puntos de momento máximo debajo de las cargas se dan en un punto teórico. Estas se integran en un ancho efectivo como el radio de rigidez relativa, el cual, es una función de la rigidez de la losa de hormigón y de la subrasante. Se define:

$$l = \sqrt[4]{\frac{E_{PCC} h_{PCC}^3}{12 (1 - \mu_{PCC}^2) k}} \quad \text{Ec. 4-15}$$

Donde: l : Radio de rigidez relativa.
 h_{PCC} : Espesor efectivo de la losa.
 E_{PCC} : Módulo de elasticidad del hormigón.
 μ_{PCC} : Módulo de Poisson del hormigón.
 k : Módulo de reacción de la subrasante.

Sustituyendo el radio de rigidez relativa en la Ec. 4-14 se tiene:

$$l^4 \frac{\partial^4 z}{\partial y^4} + z = 0 \quad \text{Ec. 4-16}$$

Se destaca que el problema se reduce a integrar la ecuación diferencial de cuarto orden (Ec. 4-16), imponiendo las respectivas condiciones de borde y sustituir el resultado z como función de y en la Ec. 4-12 para M_y .

Finalmente, dividiendo M_y por el módulo de la sección $h^2/6$ por unidad de espesor de la losa, según la fórmula de Navier, es posible obtener el esfuerzo de tracción perpendicular al borde:

$$\sigma_y = \sigma_o \left[1 - \sqrt{2} \operatorname{sen} \left(\frac{y}{l\sqrt{2}} + \frac{\pi}{4} \right) e^{-y/(l\sqrt{2})} \right] \quad \text{Ec. 4-17}$$

El esfuerzo en la fibra σ_y se expresa como un múltiplo del esfuerzo en el centro de la losa infinita σ_o . La tensión σ_x en la dirección x se puede determinar a partir de la Ec. 4-1 despejando el momento M_x e imponiendo la Ec. 4-11. Luego, dividiéndolo por el módulo de la sección por unidad de ancho se tiene:

$$\sigma_x = \sigma_o \left[1 - \mu\sqrt{2} \operatorname{sen} \left(\frac{y}{l\sqrt{2}} + \frac{\pi}{4} \right) e^{-y/(l\sqrt{2})} \right] \quad \text{Ec. 4-18}$$

Para el caso práctico de una losa con espesor finito b , el eje x es desplazado al centro de lo mostrado en la Figura 4-4, y las condiciones de borde son:

$$(1) M_y = 0$$

$$(2) \frac{\partial M_y}{\partial x} = 0$$

$$(3) y = \pm b/2$$

El esfuerzo en la losa para la dirección y está dada por:

$$\sigma_y = \sigma_o \left[1 - \left((tg(\lambda) + tgh(\lambda)) \cdot \cos\left(\frac{y}{l\sqrt{2}}\right) \cosh\left(\frac{y}{l\sqrt{2}}\right) + (tg(\lambda) + tgh(\lambda)) \operatorname{sen}\left(\frac{y}{l\sqrt{2}}\right) \operatorname{senh}\left(\frac{y}{l\sqrt{2}}\right) \right) \right] \quad \text{Ec. 4-19}$$

$$\lambda = \frac{b}{l\sqrt{8}} \quad \text{Ec. 4-20}$$

Donde: b : Longitud o ancho de la losa.

l : Radio de rigidez relativa.

Luego, la tensión correspondiente a la dirección x es:

$$\sigma_x = \sigma_o + \mu(\sigma_y - \sigma_o) \quad \text{Ec. 4-21}$$

▪ Caso de Losa Finita

Bradbury (1938) expandió la solución para esfuerzos de alabeo de Westergaard a losa de dimensiones finitas, tanto en dirección transversal como en la longitudinal.

Considerando las ecuaciones obtenidas anteriormente para los esfuerzos producidos por flexión, éstas se aplican a una losa con dimensiones finitas. Se supone una losa de longitudes L_x en la dirección x y L_y en la dirección y, como se muestra en la Figura 4-6. De acuerdo a lo anterior, se definen los factores de corrección C_x y C_y .

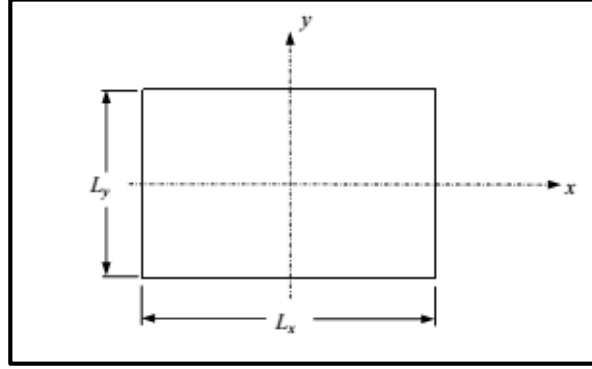


Figura 4-6 Losa finita de longitud L_x y L_y (Huang, 2003)

Se tiene el esfuerzo total máximo en el interior de la losa debido a un diferencial de temperatura en dirección x como:

$$\sigma_x = \frac{C_x E_{PCC} \alpha_{PCC} \Delta t}{2 (1 - \mu_{PCC}^2)} + \frac{C_y \mu_{PCC} E_{PCC} \alpha_{PCC} \Delta t}{2 (1 - \mu_{PCC}^2)} \quad \text{Ec. 4-22}$$

$$= \frac{E_{PCC} \alpha_{PCC} \Delta t}{2 (1 - \mu_{PCC}^2)} (C_x + C_y \mu_{PCC})$$

El primer término de la Ec. 4-22 se debe a la flexión en la dirección x , y el segundo término se debe al esfuerzo por flexión en la dirección y . De igual forma, el esfuerzo en la dirección y es igual a:

$$\sigma_y = \frac{C_y E_{PCC} \alpha_{PCC} \Delta t}{2 (1 - \mu_{PCC}^2)} + \frac{C_x \mu_{PCC} E_{PCC} \alpha_{PCC} \Delta t}{2 (1 - \mu_{PCC}^2)} \quad \text{Ec. 4-23}$$

$$= \frac{E_{PCC} \alpha_{PCC} \Delta t}{2 (1 - \mu_{PCC}^2)} (C_y + C_x \mu_{PCC})$$

El factor de corrección C_x depende solamente de L_x/l y el factor de corrección C_y depende solo de L_y/l por medio del gráfico mostrado en la Figura 4-7. El factor de corrección se logra determinar con la siguiente expresión:

$$C = 1 - \frac{2 \cos(\lambda) \cosh(\lambda)}{\sin(2\lambda) + \sinh(2\lambda)} (tg(\lambda) + tgh(\lambda)) \quad \text{Ec. 4-24}$$

$$\lambda = \frac{b}{l \sqrt{8}} \quad \text{Ec. 4-25}$$

Donde: b : Longitud o ancho de la losa.

l : Radio de rigidez relativa.

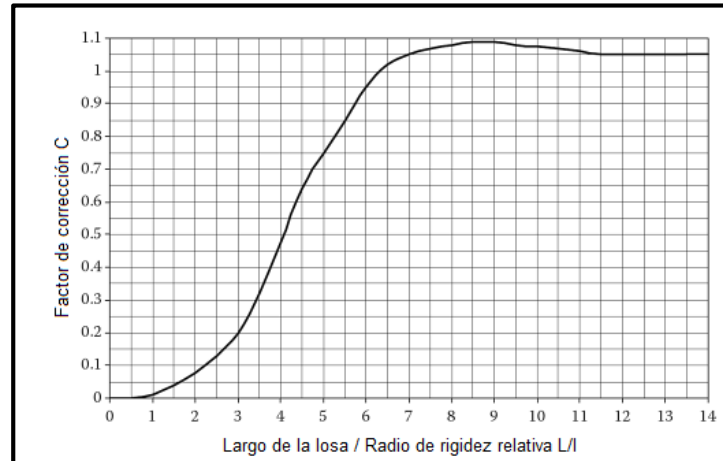


Figura 4-7 Factor de Corrección de Esfuerzos para Losas Finitas (Bradbury, 1938)

El esfuerzo en el borde de la losa finita se obtiene cuando $\mu_{PCC} = 0$ en la Ec. 4-22 o en la Ec. 4-23, teniéndose lo siguiente:

$$\sigma = \frac{C E_{PCC} \alpha_{PCC} \Delta T}{2} \quad \text{Ec. 4-26}$$

Donde σ puede ser σ_x o σ_y , dependiendo de la dirección del borde de la losa en estudio. El esfuerzo en la esquina de la losa se define como:

$$\sigma = \frac{E_{PCC} \alpha_{PCC} \Delta t}{3(1 - \mu_{PCC})} \cdot \sqrt{\frac{a}{l}} \quad \text{Ec. 4-27}$$

Donde: a : Radio del área cargada en el borde de la losa.

l : Radio de rigidez relativa.

A continuación, se explica la razón de la utilización de redes neuronales artificiales en el cálculo de las deflexiones por alabeo térmico.

4.1.2. Implementación de las redes neuronales artificiales

Para obtener las deflexiones producto del alabeo térmico se debe ocupar un programa de elementos finitos. Esto se debe a que la losa, al modelarse como una placa, toda carga o elemento externo que afecte a la losa, éste se propaga en toda el área. Por lo tanto, al ocupar un programa de elementos finitos en placas, éste refleja mejor el comportamiento de la losa al obtener la deflexión.

Las deflexiones por el alabeo térmico se calculan mensualmente en el primer año de vida de pavimento. Considerando el hecho de que en Chile existen variados climas y tipos de suelo, se presenta un inconveniente cuando se trata de calcular las deflexiones mes a mes por medio de programas. No se trata de la complejidad, sino de la cantidad de recursos matemáticos y de tiempo a emplear en el cálculo. Entonces, es necesario utilizar otras herramientas matemáticas para optimizar este paso en el cálculo de las deflexiones.

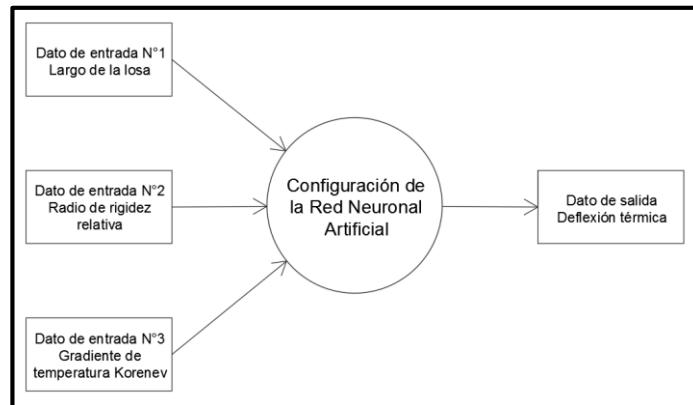


Figura 4-8 Esquema general de la RNA.

La GEMDP sugiere la utilización de RNA, usando los datos obtenidos mediante el programa de elementos finitos ISLAB2000 (Khazanovich et al., 2000), para correlacionar los datos de entrada con los datos de salida. Como se muestra en la Figura 4-8, se ingresa con tres datos de entrada; el largo de la losa, el radio de rigidez relativa y el gradiente de temperatura adimensional de Korenev. Estos tres datos de entrada engloban las propiedades de la estructura del pavimento, las dimensiones de la losa y el gradiente de temperatura en que está sometida la estructura. Ingresando los datos de entrada en la configuración de la RNA, la red procesa los datos de tal forma que, como dato de salida, arroja la deflexión térmica de la losa.

Como se indicó en el punto 4.1, el valor de la deflexión térmica es necesario para el cálculo del escalonamiento, pues establece el escalonamiento máximo inicial. Esta variable es parte de la expresión que calcula el escalonamiento producido mensualmente, fijando el peor escenario en que la losa sufre una mayor deformación como consecuencia del gradiente de temperatura.

4.1.3. Concepto de losa equivalente de Korenev y Khazanovich

Una de las variables de interés al momento de tratar la deflexión por el alabeo térmico es el gradiente de temperatura adimensional de Korenev. Al implementar este gradiente, se facilita el proceso de cálculo, pues en una misma variable se contiene múltiples datos de entradas del pavimento. Por lo tanto, para un mejor entendimiento del gradiente, se describe el concepto de losa circular equivalente de Korenev y el papel que desempeña esta variable.

Korenev y Chernigovskaya (1962) lograron el concepto de equivalencia analizando los esfuerzos de alabeo producto de la temperatura y el eje de carga en una losa circular con una fundación Winkler. Encontraron que, para una cierta geometría de la carga aplicada, el esfuerzo combinado por el alabeo y la carga en cualquier punto de la losa circular puede calcularse mediante la siguiente ecuación:

$$\sigma_{comb}(\xi) = \frac{6 \gamma_{PCC} l^2}{h_{PCC}} M^* \left(\frac{P}{Q}, \frac{R}{l}, \phi^*, \xi \right) \quad \text{Ec. 4-28}$$

- Donde:
- σ_{comb} : Esfuerzo combinado por el alabeo y el eje de carga.
 - ξ : Distancia radial normalizada (r/R).
 - r : Distancia radial medida desde el centro de la losa.
 - R : Radio de la losa.
 - h_{PCC} : Espesor de la losa de hormigón.
 - γ_{PCC} : Peso unitario del hormigón.
 - l : Radio de rigidez relativa.
 - M^* : Distribución de momento adimensional.
 - P : Carga total aplicada.
 - Q : Peso total de la losa.
 - ϕ^* : Gradiente de temperatura adimensional de Korenev.

$$\phi^* = \frac{2 \alpha_{PCC} (1 + \mu_{PCC}) l^2}{h_{PCC}^2} \frac{k}{\gamma_{PCC}} \Delta T \quad \text{Ec. 4-29}$$

- α_{PCC} : Coeficiente de expansión térmica del hormigón.
- μ_{PCC} : Módulo de Poisson del hormigón.
- ΔT : Diferencia de temperatura entre las superficies superior e inferior de la losa.

Un importante punto a notar es que el gradiente de temperatura de Korenev combina muchos factores que afectan los esfuerzos debido al alabeo térmico en un solo parámetro.

Además, el análisis de la solución de Korenev y Chernigovakaya indica que la distribución del momento por flexión depende de los siguientes parámetros adimensionales:

- La relación entre la carga total aplicada y el peso propio de la losa, P/Q .
- La relación entre la dimensión característica de la losa con el radio de rigidez relativa, R/l .
- Gradiente de temperatura adimensional de Korenev, ϕ^* .

Esto conduce a lo siguiente, si dos losas circulares, que poseen la misma proporción R/l y P/Q , son sometidas al mismo gradiente de temperatura adimensional de Korenev, entonces las distribuciones de esfuerzos de estas losas se relacionan usando la siguiente expresión:

$$\sigma_{comb,2}(\xi) = \frac{h_1 \gamma_2 l_2^2}{h_2 \gamma_1 l_1^2} \sigma_{comb,1}(\xi) \quad \text{Ec. 4-30}$$

Los subíndices 1 y 2 denotan los parámetros de primera y segunda losa respectivamente. Este concepto implica que, los esfuerzos debido al alabeo térmico en una losa de hormigón donde se conoce sus dimensiones, propiedades y gradiente de temperatura, se le puede relacionar con otra losa totalmente distinta.

Para la GEMDP, el concepto de losa circular equivalente de Korenev fue modificado para las losas rectangulares por Khazanovich en 1994. Se encontró que los esfuerzos producidos en la parte inferior de dos sistemas de losas pueden estar directamente relacionadas si se cumplen las siguientes condiciones:

$$l_1 = l_2 \quad \text{Ec. 4-31}$$

$$L_1 = L_2 \quad \text{Ec. 4-32}$$

$$\phi_1 = \phi_2 \quad \text{Ec. 4-33}$$

$$\frac{AGG_1}{k_1 l_1} = \frac{AGG_2}{k_2 l_2} \quad \text{Ec. 4-34}$$

$$\frac{P_1}{h_1 \gamma_1} = \frac{P_2}{h_2 \gamma_2} \quad \text{Ec. 4-35}$$

$$s_1 = s_2 \quad \text{Ec. 4-36}$$

Donde: L : Largo de la losa de hormigón.
AGG : Trabazón de agregado entre el pavimento y la berma.
s : Distancia entre el borde de la losa y el punto medio de la rueda del eje de carga.

Si las condiciones anteriores se satisfacen y la configuración de ejes de cargas es la misma para ambas losas, entonces los esfuerzos, para una losa con dos capas de pavimento, pueden ser encontrados a partir de los esfuerzos presentes en una losa con una capa de pavimento usando la Ec. 4-30.

4.1.4. Concepto de las redes neuronales artificiales

Las RNA son una herramienta de cálculo que simula el comportamiento de una red neuronal biológica. Como el cerebro humano, las RNA son capaces de adquirir el conocimiento por medio del estudio, ejercicio o experiencia entregando salidas consistentes a un conjunto de datos de entrada, de generalizar para entregar respuestas correctas a entradas que presentan pequeñas variaciones debido al ruido, y de abstraer la esencia de un conjunto de entradas que aparentemente no presentan aspectos comunes o relativos entre otras cualidades.

Las tres características claves de las RNA son las siguientes:

- Procesos Paralelos : Al igual que las neuronas del cerebro, las RNA están formadas por una gran cantidad de procesadores sencillos. De esta manera cada neurona realiza un procesamiento separado de las otras neuronas, trabajándose una gran cantidad de datos al mismo tiempo y de manera más rápida que en un sistema de procesador único.
- Memoria Amplia : En una RNA la información queda almacenada en los pesos de cada conexión. Esto tiene la ventaja de que si una conexión se daña se pierde solo una pequeña parte de toda la memoria almacenada en la red. Es un sistema tolerable a fallos, tal como el cerebro del ser humano, en donde muere una gran cantidad de neuronas al día, pero pasan varios años antes de que sus capacidades se vean resentidas.
- Adaptabilidad : Una RNA es capaz de adaptarse a su entorno, ya que, en la etapa de entrenamiento, va modificando sus pesos a medida que acumula más información procedente del exterior. Así, en una etapa posterior, tiene la capacidad de generalizar para un nuevo conjunto de datos.

4.1.4.1. Arquitectura de la red neuronal artificial

La arquitectura de la RNA está conformada por las neuronas y las capas donde se ubican estas neuronas. La configuración de estas capas es el objetivo principal al momento de programar una RNA, pues dependiendo de la configuración se conoce la eficiencia de la red al momento de predecir resultados.

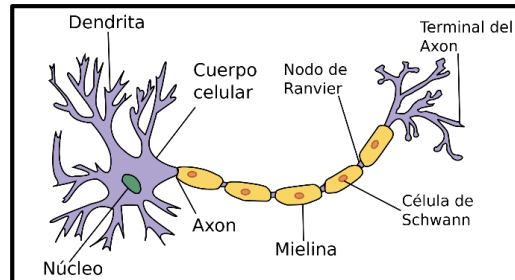


Figura 4-9 Neurona del cerebro.

El elemento principal de la RNA es la neurona, que posee el mismo comportamiento que una neurona del cerebro, como se muestra en la Figura 4-9. La neurona es la unidad fundamental del sistema nervioso y en particular del cerebro. Cada neurona es una simple unidad procesadora que recibe y combina señales desde y hacia otras neuronas. Si la combinación de entradas es suficientemente fuerte la salida de la neurona se activa.

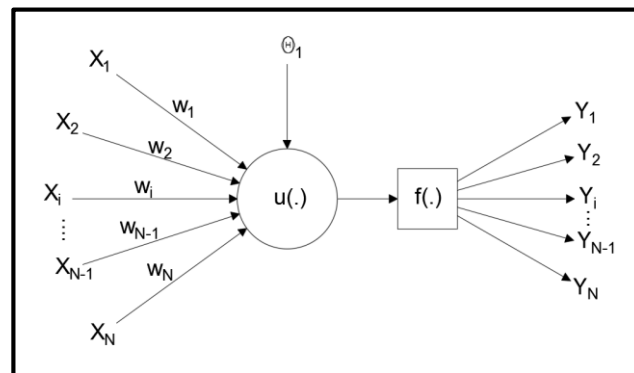


Figura 4-10 Neurona de una RNA.

La neurona de la RNA simula el mismo comportamiento de una neurona cerebral, y se modela tal como se ve en la Figura 4-10, donde cada neurona tiene múltiples entradas (X_i) con sus respectivos pesos (w_i) que le entregan importancia a cada entrada. Además, cada neurona tiene dos posibles estados, activa o inactiva, de acuerdo al estado la neurona arroja una respuesta y se denomina valor umbral (Θ_1). Posteriormente, las entradas ingresan a la función de propagación ($u(\cdot)$) y el resultado ingresa a una función de

transferencia ($f(.)$) para acotar la respuesta de la neurona (Y_i). Esta respuesta puede ser la entrada de la siguiente neurona o el resultado esperado de la RNA.

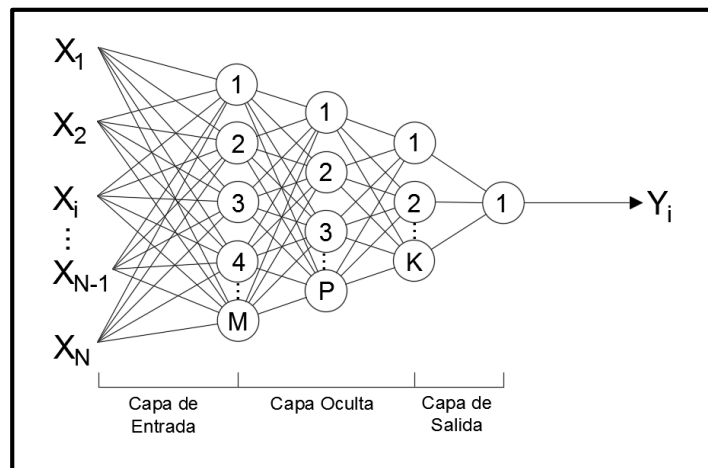


Figura 4-11 Sistemas de capas ocultas en RNA.

La arquitectura de una red es la topología, estructura o patrón de conexiones de una red neuronal. En una red neuronal los nodos o neuronas se conectan a través de conexiones sinápticas, las cuales se pueden propagar en un solo sentido. En general, las neuronas se suelen agrupar en capas y el conjunto de más de una de ellas constituye una red neuronal.

En la Figura 4-11 se muestra un ejemplo de una red neuronal, donde entran N entradas a la capa de entrada con M neuronas y en cada neurona llegan todas las entradas. Esta capa no realiza ningún proceso, salvo la aplicación de una función escalar antes de pasar la información a la siguiente capa. Puede recibir variables de entradas binarias o continuas, dependiendo de la aplicación. A continuación, las salidas de la capa de entrada entran a las capas ocultas, donde se posicionan las neuronas procesadoras de la información entrante, donde se trabajan y se memorizan los datos. La cantidad de capas ocultas y su número de neuronas lo decide quien arma la red y al pasar por ella los datos se propagan a la capa siguiente, después de pasar por las funciones de propagación y de transferencia. Para finalizar, las salidas de las capas ocultas llegan a la capa de salida, donde se da la respuesta de la red. En esta capa los datos también pasan por una función de transferencia antes de dar el producto final de la red que puede ser binario, para el caso de problemas de clasificación o continuo en el caso de predicciones.

Otras partes importantes de la RNA son las funciones de propagación y de transferencia, que son las encargadas de manipular y transformar los datos de entradas a las salidas de cada neurona.

La función de propagación consiste en el sumatorio de cada entrada multiplicada por el peso de su interconexión, además del valor umbral correspondiente a la neurona. Los pesos sinápticos w_{ij} determinan la intensidad de la interacción entre la neurona presináptica i con la postsináptica j . Los pesos sinápticos toman valores entre -1 y 1. Si el peso es positivo se habla de una sinapsis excitadora, en cambio si es negativo, se tiene una sinapsis inhibidora. En la Ec. 4-37 se muestra la función de propagación de manera genérica.

$$u_j(.)^{(k)} = \sum_{i=1}^N (X_i^{(k-1)} w_{ij}^{(k-1)}) + \theta_j^{(k)} \quad \text{Ec. 4-37}$$

Donde: $u_j(.)^{(k)}$: Función de propagación de la RNA.
 $X_i^{(k-1)}$: Datos de entrada.
 $w_{ij}^{(k-1)}$: Peso sináptico asociado al dato de entrada.
 θ_j : Valor umbral de la neurona.
 i : Contador de neuronas de la capa de entrada de datos.
 j : Contador de neuronas de la capa de salida de datos.
 k : Contador de la conexión de la RNA.
 N : Cantidad total de neuronas en la capa de entrada.

La función de transferencia es la que determina la manera en que se manipulan los datos y como se genera la información que se envía a las siguientes capas o hacia el exterior, en caso de que sea de la capa de salida. Para encontrar la configuración óptima de la RNA se debe encontrar el error mínimo y para facilitar esa tarea las funciones de transferencia deben ser derivables. A continuación, se muestran las funciones más utilizadas.

- Función Sigmoidal : Es la función más usada, con rango de salida desde 0 a 1. Permite concentrar el aprendizaje en valores no extremos ya que acomoda señales muy intensas sin producir saturación y admite señales débiles sin una excesiva atenuación. Se ocupa comúnmente cuando la respuesta esperada tiene solo valores positivos. La expresión matemática es la siguiente:

$$F(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}} \quad \text{Ec. 4-38}$$

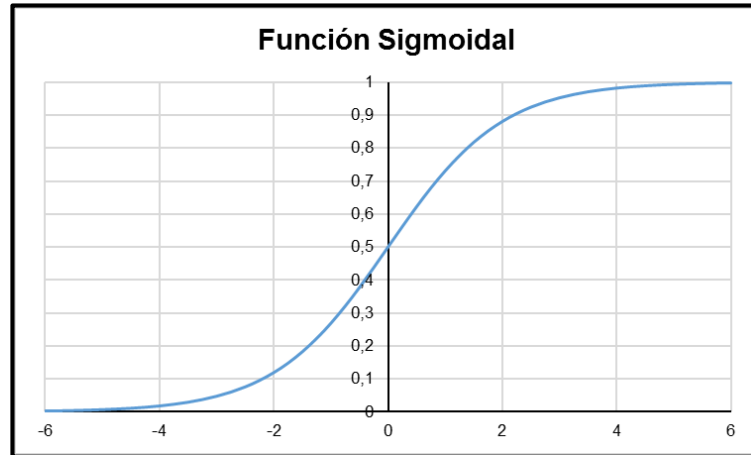


Figura 4-12 Gráfico de la Función Sigmoidal.

- **Función Lineal** : Esta función se utiliza cuando se quiere que todos los datos tengan la misma importancia, esto ya que esta función no se hace menos sensible al alejarse de cero. La función se ocupa generalmente para la capa de salida. La expresión matemática es la siguiente:

$$F(x) = x$$

Ec. 4-39

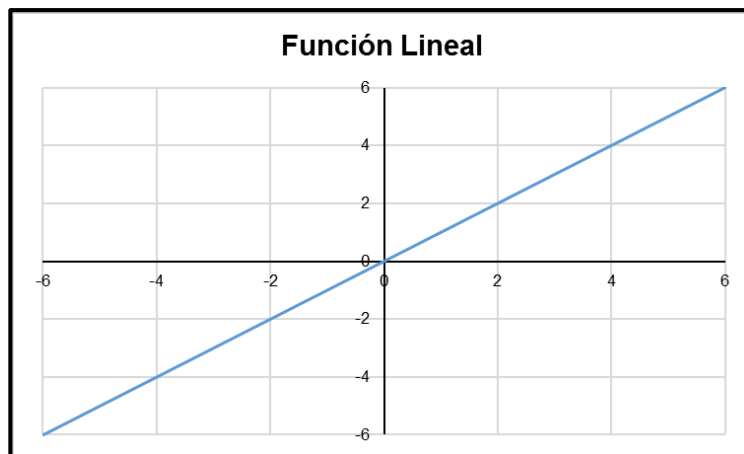


Figura 4-13 Gráfico de la Función Lineal.

- **Función Tangente Hiperbólica** : Esta función tiene las mismas propiedades que la sigmoidal pero permite un rango de salida que va desde -1 a 1. Se utiliza cuando la respuesta esperada es positiva o negativa. La expresión matemática es la siguiente:

$$F(x) = \frac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}} = \tanh x$$

Ec. 4-40

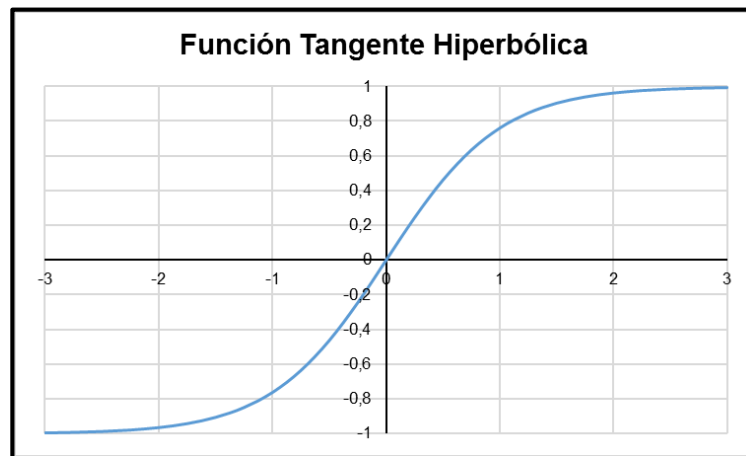


Figura 4-14 Gráfico de la Función Tangente Hiperbólica.

- Función Gaussiana : La función gaussiana se usa cuando la información del centro es la más relevante. La expresión matemática es la siguiente:

$$F(x) = e^{-x^2}$$

Ec. 4-41

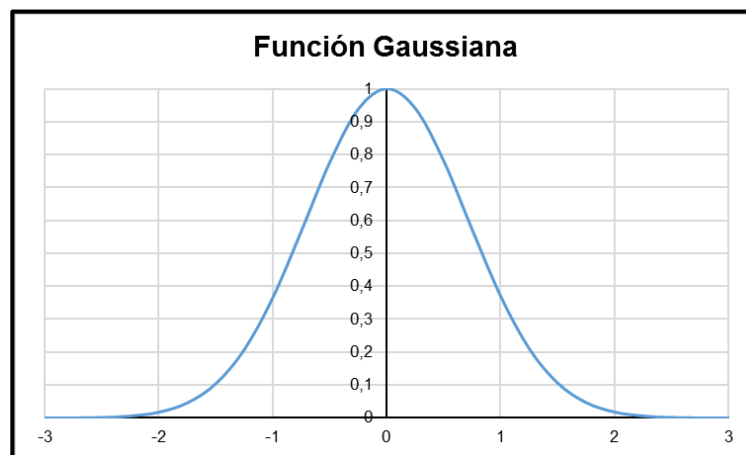


Figura 4-15 Gráfico de la Función Gaussiana.

- Función Complemento de Gaussiana : El complemento de Gaussiana se usa para que los valores extremos tengan más importancia. La expresión matemática es la siguiente:

$$F(x) = 1 - e^{-x^2}$$

Ec. 4-42

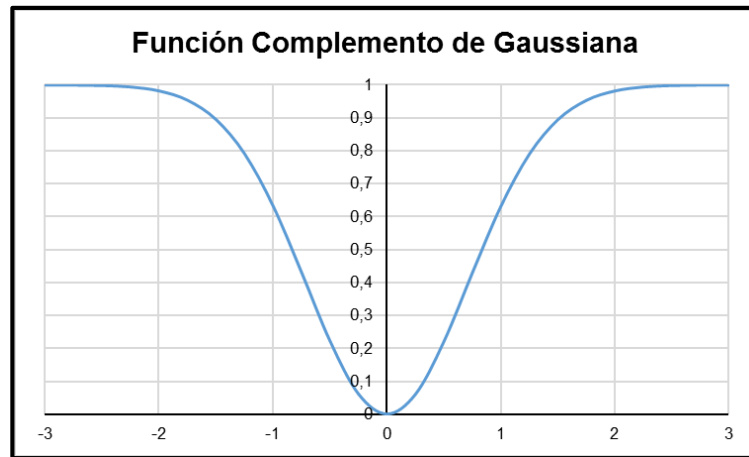


Figura 4-16 Gráfico de la Función Complemento de Gaussiana.

4.1.4.2. Entrenamiento de la red neuronal artificial

Una de las principales características de las RNA es su capacidad de aprendizaje. El entrenamiento de las RNA muestra algunos paralelismos con el desarrollo intelectual de los seres humanos. No obstante, aun cuando parece que se ha conseguido entender el proceso de aprendizaje, conviene ser moderado porque el aprendizaje de las RNA está limitado. El objetivo del entrenamiento de una RNA es conseguir que una aplicación determinada, para un conjunto de entradas produzca el conjunto de salidas deseadas o mínimamente consistentes.

En las RNA se distinguen dos fases de entrenamiento, la primera es la etapa de aprendizaje en donde se entrena a la red a partir de un grupo de datos para que luego en la fase de simulación se compruebe el comportamiento de la red ante otro conjunto de datos. La base de datos se divide en datos de aprendizaje y en datos de simulación, estos datos deben repartirse de manera aleatoria para que abarquen todos los casos posibles en cada grupo. El tamaño de cada grupo debe ser fijado por el usuario, pero el grupo de datos de aprendizaje debe ser más grande que el grupo de datos de simulación.

En la fase de aprendizaje se produce el ajuste de los parámetros libres de la red a partir de un proceso de estimulación. La mayoría de estos procesos consideran solo el cambio en los pesos sinápticos y el tipo de aprendizaje viene dado por la manera en que se cambien dichos parámetros. El aprendizaje parte con un cierto modelo de neurona,

arquitectura de red y con los pesos sinápticos iniciales como nulos o aleatorios. La red va alterando sus pesos conforme se le entregan nuevos conjuntos de datos.

El método más sencillo es el aprendizaje supervisado en donde a la red se le presentan los inputs y outputs de un conjunto de datos, de manera iterativa la red ajusta sus pesos sinápticos (w_{ij}) para que el output tienda a ser el deseado, minimizando el error o el gradiente de error generado. La dirección del gradiente hace incrementar el error, por ende, se varían los pesos en la dirección opuesta del gradiente. Uno de los métodos más usados de aprendizaje supervisado es el algoritmo de Retropropagación o Back-propagation.

4.1.4.3. Sobreaprendizaje de la red neuronal artificial

Como se dijo anteriormente, para una cierta base de datos compuesta por inputs y outputs, se debe configurar la RNA para que pueda predecir con un error mínimo. Esta configuración consiste en fijar la cantidad de neuronas, la cantidad de capas ocultas y el número de iteraciones. La configuración debe establecerse de tal forma que la RNA sea capaz de aprender lo suficiente, es decir, que no esté falta de aprendizaje como también que no sobre aprenda la base de datos. Este fenómeno se denomina Overtraining y se produce cuando existe una cantidad excesiva de neuronas, capas ocultas o iteraciones.

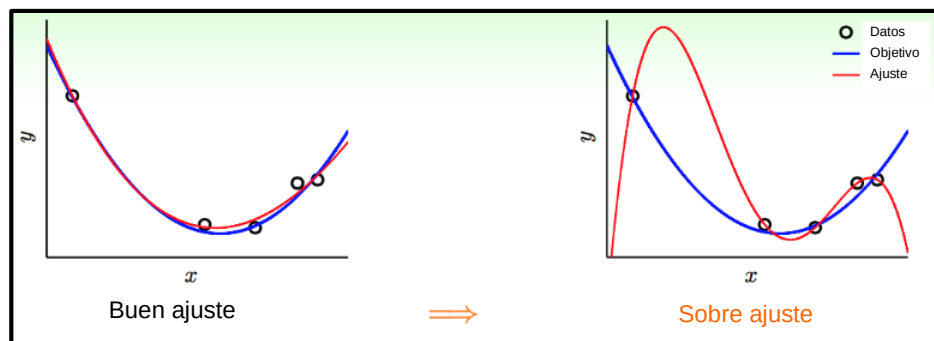


Figura 4-17 Ejemplo de Overfitting

Para explicar el Overtraining, existe un fenómeno similar denominado Overfitting en el caso de ajuste de polinomios, como se ilustra en la Figura 4-17. Se puede ver que al aumentar el orden del polinomio se ajusta más a los puntos del gráfico, pero no se cumple la forma esperada. Caso contrario con un polinomio de orden más bajo, donde no se ajusta totalmente a los puntos, pero concuerda con la forma o tendencia de los datos.

En el caso de la RNA, si el error producido en la fase de aprendizaje va disminuyendo con el aumento de iteraciones, pero el error en la etapa de simulación va en

aumento, quiere decir que la RNA está en el proceso de Overtraining. Existen muchas formas de controlar el Overtraining, la mejor manera es utilizar una gran cantidad de datos de aprendizaje. Si existe una gran cantidad de datos en comparación de la cantidad de pesos sinápticos, la probabilidad de sobre aprendizaje disminuye. Otra forma de controlarlo es revisando que el error generado en la etapa de simulación sea parecido al error generado en la fase de aprendizaje. En conclusión, para escoger la mejor configuración de RNA sería escoger el mínimo error posible donde el error en la fase de aprendizaje sea parecido al error en la fase de simulación con la cantidad de neuronas, capas ocultas e iteraciones suficientes.

Como se pudo apreciar en esta sección, dependiendo de la configuración de la RNA, se consigue la deflexión por el alabeo térmico y se fija el escalonamiento para una estructura de pavimento determinada. A continuación, en la siguiente sección se indica la metodología de trabajo para obtener la configuración de la RNA.

4.2. METODOLOGÍA DE TRABAJO DE LAS REDES NEURONALES ARTIFICIALES

El cálculo de la deflexión por alabeo térmico debe ser realizado mediante el análisis de elementos finitos, ya que las deflexiones dependen de muchas variables, como las propiedades de la estructura del pavimento, el gradiente de temperatura y humedad, y las dimensiones de la losa de pavimento. Además, al trabajar con losas, cada punto se comporta de manera distinta al estar sometida ante variadas condiciones climáticas. De acuerdo al punto 2.4, las deflexiones por alabeo térmico se calculan para el primer año de funcionamiento, siendo 12 corridas para un sistema determinado de losas. Para agilizar ese cálculo se utilizan las RNA, tal como se explicó en el punto 4.1.2.

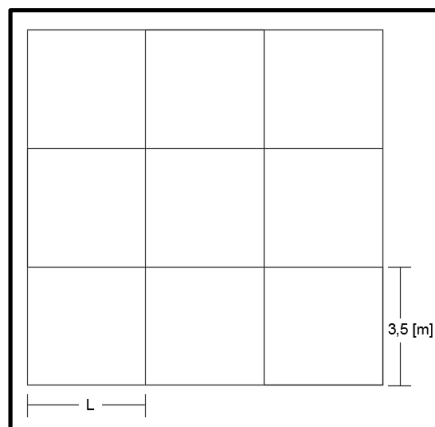


Figura 4-18 Sistema de Losa a ocupar con largo L.

Para obtener las deflexiones por alabeo térmico, se utiliza el sistema de losas con largo L variable y con un ancho de 3,5 [m], tal como se muestra en la Figura 4-18, pues para este caso, se trabaja con JTR de acuerdo a las suposiciones de la GEMDP. Teniendo los datos de entrada especificados en la Tabla 3-1 para las ciudades de Arica, Valparaíso, Santiago, Concepción, Puerto Montt y Punta Arenas, se ingresan al programa ISLAB2000 (Khazanovich et al., 2000), obteniéndose las deflexiones por el alabeo térmico en las losas aplicando la Ec. 3-5. Se recalca el hecho que, a diferencia del cálculo del factor de conversión, solo se trabaja con los gradientes de temperatura, puesto que, para incluir las cargas de tráfico, se requiere de más información y de otra configuración de RNA. Los gradientes de temperatura que se utilizan corresponden a cada ciudad, y se obtienen mediante el programa AASHTOWare Pavement ME Design versión 2.0.

Previo a utilizar MATLAB para programar las RNA, se ordenan los datos de entrada, separándolos en dos grupos, datos de aprendizaje y datos de simulación. Los datos se reparten de manera aleatoria, para que en ambos grupos tengan la misma variabilidad de datos. Ya con los datos repartidos, se ingresan al programa MATLAB para establecer la configuración de la RNA.

Para establecer la configuración de RNA óptima se programan múltiples casos, variando la cantidad de neuronas y capas ocultas. Para cada configuración se obtiene el error y el coeficiente de correlación de Pearson (R^2) de los datos de aprendizaje y simulación. Ocupando un criterio de selección, se eligen los casos en donde la RNA predice las deflexiones calculadas en ambos grupos de datos. Dependiendo de la cantidad de capas ocultas, se elige cada caso óptimo.

4.2.1. Datos de entrada para las redes neuronales artificiales

Como se ha dicho reiteradamente, los datos de entrada para alimentar la RNA son el largo de la losa, el radio de rigidez relativa y el gradiente de temperatura adimensional de Korenev. Otro dato importante a ingresar es la deflexión por el alabeo térmico en las losas, calculado mediante el programa ISLAB2000 (Khazanovich et al., 2000). A pesar que la deflexión no es un dato de entrada, se integra en las RNA para tener el error de cada configuración. Estos datos de entrada se obtienen a partir de las ciudades dichas anteriormente. Al ser ciudades con condiciones climáticas y suelos variables, los rangos de los datos de entrada también son amplios. En la Tabla 4-1, se muestran los rangos de los datos de entrada.

Tabla 4-1 Rango de datos de entrada para la RNA

Datos de entrada	Valor Mínimo	Valor Máximo
Largo de la Losa, [m]	3,5	5,0
Radio de rigidez relativa, [mm]	527,856	885,958
Gradiente de temperatura Korenev	17,766	40,828
Deflexión por alabeo térmico [mm]	3,099	6,223

Los datos que se ingresan en el programa ISLAB2000 (Khazanovich et al., 2000) se muestran en la Tabla 3-1, correspondiente a cada ciudad de Chile que se considera dentro del estudio. El único dato que no debe considerarse es el sistema de ejes de carga. La estructura de pavimento que se usa depende de cada ciudad, pues varía el tipo de suelo y la estación de pesaje.

En el ANEXO C se muestran detalladamente los datos considerados para obtener los datos de entrada de la red, además se especifican los valores de cada dato de entrada asociado a cada ciudad, estación de pesaje y tipo de suelo.

4.2.2. Programa de elementos finitos ISLAB2000

El programa ISLAB2000 (Khazanovich et al., 2000) es un software de elementos finitos para el análisis de los sistemas de pavimentos rígidos. El programa fue desarrollado por ERES Division of Applied Research Associates (ARA), con el apoyo del Departamento de Transporte de Michigan y de Minnesota. ISLAB2000 (Khazanovich et al., 2000) es uno de los programas más modernos para modelar los esfuerzos y deformaciones en un sistema de losas de pavimento. Las características que distinguen al ISLAB2000 (Khazanovich et al., 2000) del resto de los programas son las siguientes:

- Tiene una amplia selección de modelos para la subrasante, incluyendo Winkler, sólido elástico, Pasternak, Kerr-Vlasov y Zhemochkin-Sinitsyn-Shtaerman.
- Es capaz de modelar el efecto de acciones independientes en dos capas de pavimento.
- Se puede analizar el efecto de una distribución de temperatura lineal o no lineal a través del espesor del pavimento.
- Es posible examinar las profundidades parciales de las grietas.
- Tiene un código de elementos finitos más eficiente, teniendo un número máximo permitido de nodos significativamente incrementado, en comparación a las versiones anteriores.

- Se elimina la característica que las juntas de un pavimento en una sola dirección posean las mismas propiedades.
- Además, el programa permite la modelación de varias capas del sistema de pavimento, en comparación de otras versiones donde solo se ocupaban dos.

4.2.3. Medición de la deflexión de la losa en el programa ISLAB2000

Implementando el programa ISLAB2000 (Khazanovich et al., 2000) para obtener las deflexiones por el alabeo térmico con respecto al sistema de losas del estudio, se aplica la misma lógica explicada en la sección 3.2.3, en donde se utiliza la Ec. 3-5 para tener la deflexión de interés. Además, se utiliza el mismo mallado, explicado en el punto 3.2.3, adaptando la cantidad de cuadros al momento de modificar el largo de la losa, pero manteniendo el tamaño de cada cuadro del mallado.

4.2.4. Consideraciones para las redes neuronales artificiales

Al momento de obtener la configuración óptima de RNA, se tiene que considerar las propiedades del pavimento, cómo trabajar con el programa MATLAB, los elementos a ocupar en las RNA, el procesamiento de datos y la medición de las deflexiones con el programa ISLAB2000 (Khazanovich et al., 2000). En las siguientes subsecciones se explica cada tópico, basándose en lo explicado en los capítulos anteriores y estableciéndose un criterio para obtener resultados lógicos.

4.2.4.1. Estructuras de pavimento

Las ciudades donde se aplica este estudio están ubicadas a lo largo de nuestro país, por lo tanto, se abarca la mayoría de los tipos de climas y suelos presentes en Chile. Para las estructuras de pavimento, en cada ciudad varía las características de los suelos y se clasifican de acuerdo a la Tabla 4-2. Se puede apreciar que, para cada tipo de suelo, se tiene una pequeña descripción en donde se le asocia la posición geográfica de Chile.

Tabla 4-2 Listado de suelos ensayados (Delgadillo et al., 2013)

N° de identificación	Tipo de Suelo
1	Arenas de grano medio a fino, comunes en ciudades importantes de Chile como Viña del Mar, Valparaíso, Concepción, Iquique y Antofagasta.
2	Arenas de grano fino, típico suelo granular de duna clasificable como SP y A-3(0).
3	Suelos residuales clasificables como arenas limosas o arenas arcillosas, de grano grueso o de grano fino, con app. 5% a 35% de finos bajo malla ASTM #200 (maicillos).
4	Arcillas gravo-arenosas y/o arcillas arenosas (greda típica)
5	Arcillas y limos.
7	Gravas arenosas de lechos de ríos y/o valles de origen hídrico fluvio-aluvial, muchas veces encontrado bajo una capa superior de arcilla, de común ocurrencia en zonas como Quillota, San Felipe, Los Andes, Rancagua, Melipilla y Santiago.
10	Arenas limosas de origen volcánico (pumacitas)
11	Limos del sur de Chile (trumaos)
12	Suelos cementados de la zona norte (chusca)
13	Suelos finos de la zona austral (mazacote)

En la Tabla 4-3 se muestra la clasificación AASHTO de cada tipo de suelo y el módulo resiliente respectivo. Estos datos se utilizan en el programa ISLAB2000 (Khazanovich et al., 2000), considerando una fundación tipo Winkler, además de ingresar el módulo de reacción de subrasante para cada caso.

Tabla 4-3 Módulos resilientes medidos para suelos chilenos (Delgadillo et al., 2013)

Suelo	Clasificación AASHTO	Mr medido promedio [MPa]
1	A-1-b	107
2	A-3	80
3	A-2-4	74
4	A-6	86
5	A-7-6	256
7	A-1-a	186
10	A-2-4	68
11	A-4	72

Suelo	Clasificación AASHTO	M_r medido promedio [MPa]
12	A-4	132
13	A-6	241

En el ANEXO B se muestra las estructuras de pavimento, para todas las ciudades, que se consideran en este trabajo. Además del tipo de suelo, se incluye el punto de medición de los datos necesarios, siendo estos las estaciones de pesaje. Para cada estación se tiene un espesor específico de losa de hormigón, de esa forma se amplía el rango de casos a estudiar.

4.2.4.2. Programa matemático MATLAB

El programa MATLAB es una herramienta de software matemático que ofrece un entorno de desarrollo integrado (IDE) con un lenguaje de programación propio. Entre sus características básicas se hallan: la manipulación de matrices, la representación de datos y funciones, la implementación de algoritmos, la creación de interfaces de usuario (GUI) y la comunicación con programas de otros lenguajes y con otros dispositivos hardware. El paquete MATLAB dispone de dos herramientas adicionales que expanden sus capacidades, tales como, Simulink (plataforma de simulación multidominio) y GUIDE (editor de interfaces de usuario – GUI). Además, se puede ampliar las capacidades de MATLAB con las cajas de herramientas (toolboxes); y las de Simulink con los paquetes de bloques (blocksets).

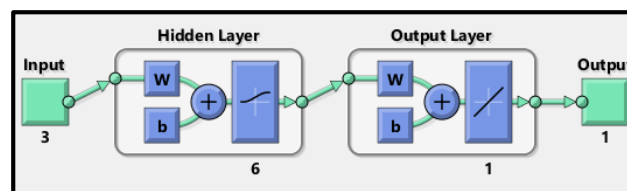


Figura 4-19 Ejemplo de RNA usando programa MATLAB.

Mediante la caja de herramientas denominada NNTOOL, es posible utilizar las RNA en el programa MATLAB. En la Figura 4-19 se puede apreciar una configuración ejemplo de una RNA en este programa. Se destacan varios elementos importantes de una RNA, que se vieron en detalle en el punto 4.1.4, tales como los datos de entrada, capa oculta, pesos sinápticos, valor umbral de las neuronas, función de transferencia, capa de salida y dato de salida u objetivo.

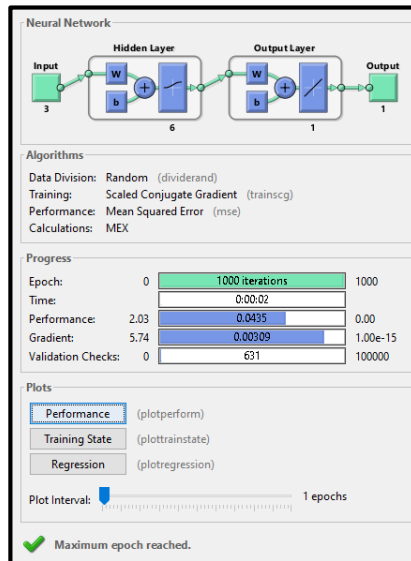


Figura 4-20 Interface de la herramienta nntool de MATLAB.

Usando NNTOOL en combinación con la automatización usando lenguaje MATLAB, se inspeccionan todos los casos posibles de configuración, obteniéndose el error y el coeficiente de correlación de Pearson. Se varía la cantidad de neuronas por cada capa oculta y la cantidad de iteraciones que necesita cada RNA para aprender de los datos de entradas. Al ejecutar el código se muestra, como ventana emergente la Figura 4-20, entregando la configuración de RNA a analizar, el modo de entrenamiento, método para medir el rendimiento y el avance de las iteraciones hasta que llegue al máximo establecido.

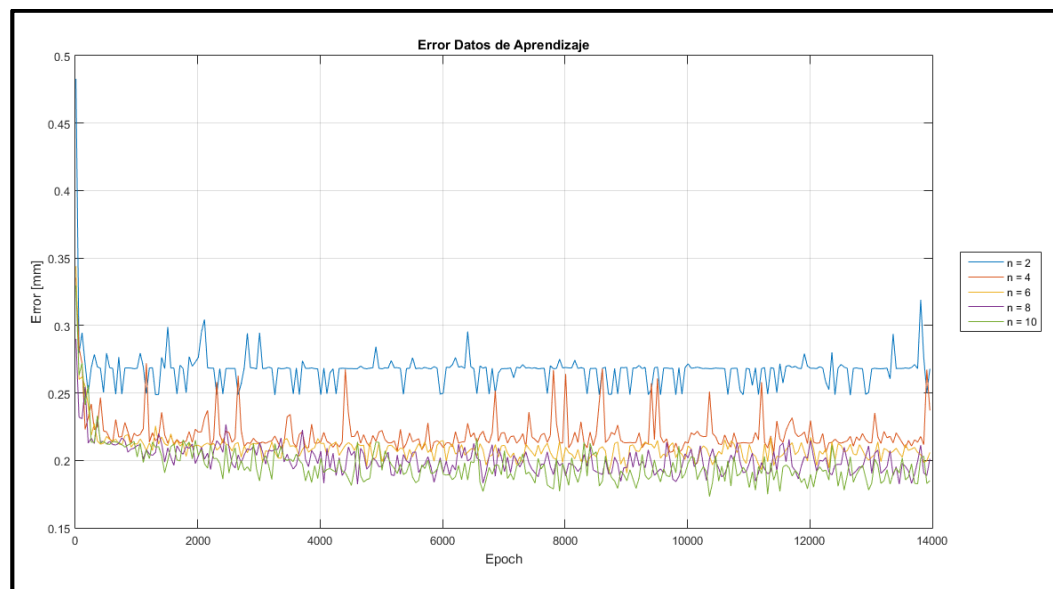


Figura 4-21 Tendencia del error con respecto a la cantidad de iteraciones

Al finalizar lo programado en el código, se muestran múltiples gráficos mostrando los resultados obtenidos para un mejor entendimiento de estos. En la Figura 4-21, se muestra a modo de ejemplo la tendencia del error con respecto a la cantidad de iteraciones para el caso de una capa oculta. La cantidad de neuronas varía entre 2 a 10 y las iteraciones entre 10 a 14000. Se considera un rango amplio de iteraciones para abarcar el caso donde se obtiene el error mínimo y sobrepasando la condición de sobreaprendizaje.

4.2.4.3. Elementos de la red neuronal artificial

En las Tabla 4-4, Tabla 4-5 y Tabla 4-6 se muestra la cantidad de capas ocultas, neuronas e iteraciones. El valor inicial y final corresponde a los extremos del rango de cada elemento, donde Δ es la cantidad de pasos en que se avanza a lo largo del intervalo. Bajo estos parámetros se programa el código MATLAB, de esta forma se va cambiando la cantidad de neuronas, cuando se analiza completamente el rango de iteraciones para una configuración determinada.

Tabla 4-4 Elementos de la RNA con una capa oculta.

Configuración de RNA con una capa oculta		
Elementos de la RNA	Cantidad	Δ
Neuronas	Valor inicial = 2 Valor final = 44	2
Iteraciones	Valor inicial = 10 Valor final = 14000	50

Tabla 4-5 Elementos de la RNA con dos capas ocultas.

Configuración de RNA con dos capas ocultas		
Elementos de la RNA	Cantidad	Δ
Neuronas Capa oculta N°1	Valor inicial = 2 Valor final = 24	2
Neuronas Capa oculta N°2	Valor inicial = 2 Valor final = 40	2
Iteraciones	Valor inicial = 50 Valor final = 14000	150

Tabla 4-6 Elementos de la RNA con tres capas ocultas.

Configuración de RNA con tres capas ocultas		
Elementos de la RNA	Cantidad	Δ
Neuronas Capa oculta N°1	Valor inicial = 2 Valor final = 12	2
Neuronas Capa oculta N°2	Valor inicial = 2 Valor final = 24	2
Neuronas Capa oculta N°3	Valor inicial = 2 Valor final = 30	2
Iteraciones	Valor inicial = 50 Valor final = 14000	250

El método que se ocupa para entrenar la RNA es el algoritmo de Retropropagación o Back-propagation, correspondiendo a un aprendizaje supervisado, tal como se explica en el punto 4.1.4.2. La función que se usa para medir el desempeño de la RNA, es decir, para calcular el error, se utiliza la función Mean Square Error (MSE), consistente en el error promedio cuadrático. Para las capas ocultas la función de transferencia a utilizar es la función sigmoideal y para la capa de salida se usa la función lineal. Como el dato de salida es solo la deflexión por el alabeo térmico, la cantidad de neuronas en esa capa corresponde a uno.

4.2.4.4. Procesamiento de datos

La cantidad total de datos de entrada, generados a partir del programa ISLAB2000 (Khazanovich et al., 2000), es de 1632. De acuerdo al sistema de entrenamiento de la RNA, se tiene que repartir la cantidad de datos en dos grupos, en datos de aprendizaje y en datos de simulación. Como se dijo en el punto 4.1.4.2, la cantidad de datos de aprendizaje debe ser mayor que los datos de simulación, pues a partir de ellos la RNA va a ajustar sus pesos sinápticos para predecir las deflexiones.

Tabla 4-7 Porcentaje de datos para aprendizaje y simulación

Tipo de dato	Porcentaje del total [%]
Dato de aprendizaje	70
Dato de simulación	30

De acuerdo a la Tabla 4-7, se fijan los porcentajes para cada tipo de dato, se reparten de manera aleatoria, tratando a la vez que en ambos grupos se abarque todos los datos obtenidos en las 6 ciudades.

En la siguiente sección se presentan los resultados obtenidos por el programa MATLAB, entregándose las configuraciones de RNA para obtener las deflexiones por alabeo térmico.

4.3. CONFIGURACIÓN DE LA RED NEURONAL ARTIFICIAL

La configuración de la RNA a utilizar para calcular la deflexión por alabeo térmico, se escoge mediante los errores y correlaciones obtenidos de los datos usados para las fases de aprendizaje y simulación. En las Tabla 4-8, Tabla 4-9, y Tabla 4-10 se muestran las configuraciones escogidas de acuerdo a las capas ocultas usadas. Las configuraciones escogidas tienen ciertas características que las destacan del resto, tienen bajos errores en los datos de aprendizaje y simulación, y ambos errores tienen valores similares entre sí. Para los tres casos, se enfatiza una configuración que cumple con los criterios de selección, de las cuales son: se genera el error más bajo dentro de su grupo seleccionado y posee una cantidad óptima de neuronas e iteraciones.

En el caso de la configuración de RNA con una capa oculta, las opciones no son muy variadas, tal como se muestra en la Tabla 4-8. Apenas se seleccionan 4 casos, teniendo errores altos en comparación con los casos que tienen más de una capa oculta. Con estos resultados se puede verificar que la RNA no es capaz de predecir las deflexiones por falta de aprendizaje. A pesar que el valor de las correlaciones es alto, el error está entre un 2,6% y 5,7% con respecto a las deflexiones calculadas, siendo porcentajes altos para predecir futuros casos.

Tabla 4-8 Configuraciones escogidas para una capa oculta.

n ⁽¹⁾	Iteraciones	Datos de Aprendizaje		Datos de Simulación	
		Error [mm]	Correlación	Error [mm]	Correlación
4	11410	0,20580	0,88139	0,19977	0,88039
6	9010	0,19050	0,89842	0,20651	0,86488
14	7060	0,17217	0,91701	0,19030	0,89533
22	12960	0,16642	0,92245	0,17722	0,90139

(1) Número de neuronas en la 1° capa oculta.

Al aumentar a dos capas ocultas, aumenta la cantidad de configuraciones escogidas, como se ve en la Tabla 4-9. En comparación al caso anterior, se aprecia que el error disminuye considerablemente, para los datos de aprendizaje disminuye en un 12,6% y para los datos de simulación disminuye en un 27%, teniéndose un rango entre 2,1% y 4,7% de error. También existe una mejora en el valor del coeficiente de correlación, pero como se dijo en un principio, ya la correlación tiene un valor alto. De acuerdo a la configuración destacada, se puede ver que existe un aumento de neuronas y una reducción de iteraciones con respecto a la alternativa anterior, además de una acumulación de neuronas en la segunda capa. Esta situación no es lo ideal, pues la RNA debe poseer una baja cantidad de neuronas posible para que se comporte de manera estable. Considerando la acumulación de neuronas, es posible aumentar a tres capas ocultas para que se repartan las neuronas de manera equilibrada.

Tabla 4-9 Configuraciones escogidas para dos capas ocultas.

n ⁽¹⁾	nn ⁽²⁾	Σ	Iteraciones	Datos de aprendizaje		Datos de Simulación	
				Error [mm]	Correlación	Error [mm]	Correlación
4	22	26	11300	0,16311	0,92550	0,14766	0,93092
4	34	38	9200	0,14563	0,94061	0,13016	0,95307
4	36	40	11000	0,14268	0,94300	0,14863	0,93059
6	6	12	12350	0,16586	0,92296	0,14177	0,93692
6	10	16	12950	0,15315	0,93433	0,16948	0,91648
6	28	34	9200	0,14537	0,94088	0,12931	0,94695
8	10	18	2750	0,17287	0,91631	0,13861	0,93852
10	2	12	5750	0,17062	0,91872	0,17483	0,91245
22	36	58	950	0,17914	0,91013	0,15475	0,92618
24	14	38	12950	0,17626	0,91301	0,14414	0,93322

(1) Número de neuronas en la 1° capa oculta.

(2) Número de neuronas en la 2° capa oculta.

Observando la Tabla 4-10, se tienen más casos para escoger, pues la cantidad de combinaciones aumenta al ingresar una capa oculta. Viendo el error generado para tres capas ocultas, no existe un mejoramiento notable en comparación con los casos anteriores, teniéndose un porcentaje de error entre 1,9% y 4,6%, Solo se mejoró el límite inferior, pero es un mejoramiento positivo pues tener ese porcentaje de error permite que la RNA calcule deflexiones de manera idónea. Otro detalle importante es la cantidad de neuronas de la configuración destacada, teniendo 14 neuronas menos con respecto al caso anterior. Con esto, se puede decir que tener una gran cantidad de neuronas no asegura un buen desempeño de la red, ya que bastó con 20 neuronas para conseguir el error mínimo de todas las configuraciones escogidas, considerando los criterios de selección descritos previamente.

Tabla 4-10 Configuraciones escogidas para tres capas ocultas.

n ⁽¹⁾	nn ⁽²⁾	nnn ⁽³⁾	Σ	Iteraciones	Datos de aprendizaje		Datos de simulación	
					Error [mm]	Correlación	Error [mm]	Correlación
4	6	24	34	6800	0,13706	0,94740	0,13246	0,94450
4	10	16	30	7300	0,14409	0,94190	0,14098	0,94633
4	14	24	42	6050	0,11677	0,96191	0,13182	0,95291
4	16	30	50	11550	0,11224	0,96475	0,13963	0,94720
4	18	26	48	7550	0,12241	0,95804	0,13470	0,94349
6	6	4	16	10300	0,15861	0,92956	0,13332	0,94520
6	6	12	24	14050	0,12661	0,95515	0,15520	0,92414
6	12	20	38	6300	0,15916	0,92917	0,15005	0,93214
6	14	8	28	7550	0,12079	0,95919	0,15251	0,92645
6	24	12	42	5550	0,14793	0,93889	0,13879	0,93999
8	8	10	26	8050	0,15206	0,93538	0,12126	0,95318
10	2	26	38	13550	0,13950	0,94569	0,15348	0,92617
10	6	4	20	7800	0,14346	0,94257	0,11748	0,95664
10	24	2	36	5050	0,14458	0,94146	0,14523	0,93770
12	8	10	30	8550	0,13112	0,95192	0,14357	0,93452

(1) Número de neuronas en la 1° capa oculta.

(2) Número de neuronas en la 2° capa oculta.

(3) Número de neuronas en la 3° capa oculta.

Para explicar los resultados seleccionados, en las siguientes secciones se tratan los temas relacionados con el ordenamiento de los resultados obtenidos por el programa MATLAB, el criterio de selección y análisis para trabajar con los errores. Finalmente se muestran los gráficos del error con respecto a la configuración de RNA calculados por el programa MATLAB, verificando la tendencia de cada configuración de acuerdo a la categorización de los resultados.

4.3.1. Categorización de los Resultados

El código mediante el cual se automatiza la ejecución de cada configuración de las RNA, permite la generación de una gran cantidad de datos. Al probar con múltiples iteraciones, neuronas y capas ocultas, es necesario realizar un ordenamiento o categorización de los resultados, para tener un mejor entendimiento de los resultados procesados y poder escoger de mejor manera la configuración a utilizar.

La categorización de los resultados corresponde al siguiente:

- Error Mínimo de Datos de Aprendizaje : Corresponde al mínimo error obtenido por determinada cantidad de iteraciones en la fase de aprendizaje.
- Error Prueba de Datos de Simulación : Conciene al error generado en la fase de simulación usando la configuración con el error mínimo en fase de aprendizaje.
- Error Mínimo de Datos de Simulación : Corresponde al mínimo error obtenido por determinada cantidad de iteraciones en la fase de simulación.
- Error Prueba de Datos de Aprendizaje : Conciene al error generado en la fase de aprendizaje usando la configuración con el error mínimo en fase de simulación.

De acuerdo a estas cuatro categorías, se pretende ordenar los resultados de tal forma que, al encontrar un error mínimo correspondiente a una fase determinada, se debe comparar el desempeño de la configuración en la fase contraria. Esto se debe al criterio de selección descrito anteriormente, donde se busca que el error producto de la fase de aprendizaje sea parecido al error de la fase de simulación.

4.3.2. Criterios de selección y análisis

Con la categorización de resultados establecida, es significativo tener criterios de selección y análisis, para discriminar cada configuración con el fin de cumplir el objetivo de predecir la deflexión por alabeo térmico. Los criterios de selección y análisis que se implementan en esta parte del trabajo son las siguientes:

- *Buscar el error mínimo en las cuatro categorías de resultados.*

Obteniéndose las variables previamente descritas, se procede a buscar los errores mínimos de acuerdo a la cantidad de neuronas en las cuatro categorías. Esta condición garantiza que la RNA puede pronosticar las deflexiones de manera más exacta, y al buscar ese error tanto en los datos de aprendizaje como simulación, se pueden abarcar más configuraciones. Teniéndose el error mínimo, por ejemplo, considerando una configuración a partir de los datos de aprendizaje, también es importante conocer el error producto de esa misma configuración en los datos de simulación. En el siguiente criterio se ve en detalle lo dicho anteriormente.

- *Revisar que los errores en fase de aprendizaje y simulación sean análogos.*

Además de revisar que los errores sean mínimos, igualmente es importante que los errores de los datos de aprendizaje y simulación sean semejantes. De acuerdo a este criterio, la RNA tendrá la capacidad de predecir un grupo de datos que sean distintos a los datos usados en la fase de aprendizaje. En el punto 4.1.4.3 se explica el fenómeno del sobre aprendizaje de la RNA, donde el error en la fase de aprendizaje es considerablemente menor, pero al aplicar otro grupo de datos el error aumenta de manera abrupta. Ese comportamiento debe ser evitado, por lo cual es importante considerar este criterio

- *Escoger la configuración óptima de neuronas e iteraciones.*

Mediante el código de automatización, es posible manejar muchas combinaciones de neuronas, por lo tanto, existen alternativas que pueden tenerse muy buenos resultados si la distribución de neuronas y la cantidad de iteraciones es óptima. En base a lo anterior, además se revisar el valor del error, también es importante monitorear la cantidad de neuronas e iteraciones de la RNA. Existen casos donde se tienen bajos errores usando una cantidad de recursos escasa, mientras que, en otros casos, usando muchas neuronas y llegando hasta el tope de iteraciones se obtiene el mismo error. Este criterio busca la eficiencia de la RNA, pues el ahorro de tiempo es una característica importante en cualquier procedimiento de cálculo.

4.3.3. Resultados por configuración de capas ocultas

Con el objetivo de tener una mayor claridad para revisar los resultados, se elaboran gráficos se muestran los errores obtenidos con respecto a la cantidad de neuronas y capas ocultas. De acuerdo a la cantidad de capas ocultas, se especifica en los gráficos el error asociado a cada configuración. Mediante estos gráficos, se aplican los criterios de selección y análisis para escoger las configuraciones deseadas.

A continuación, en las siguientes subsecciones se muestran los gráficos con los resultados obtenidos de acuerdo a la configuración de RNA. Se ordenan de acuerdo a la cantidad de capas ocultas, colocando los gráficos que muestran las configuraciones destacadas en el punto 4.3. Para tener un mayor detalle de todos los gráficos, revisar el ANEXO D.

4.3.3.1. Resultados con una capa oculta

En las Figura 4-22, Figura 4-23, Figura 4-24 y Figura 4-25 se aprecian los gráficos con los errores mínimos generados por una determinada cantidad de iteraciones para cada configuración de neuronas. Estos gráficos se muestran de acuerdo a la categorización de los datos, siendo en total cuatro para este grupo. Al tener una capa oculta, como se dijo anteriormente, las combinaciones son reducidas, por ende, las opciones para elegir una buena configuración a partir de los gráficos son escasas.

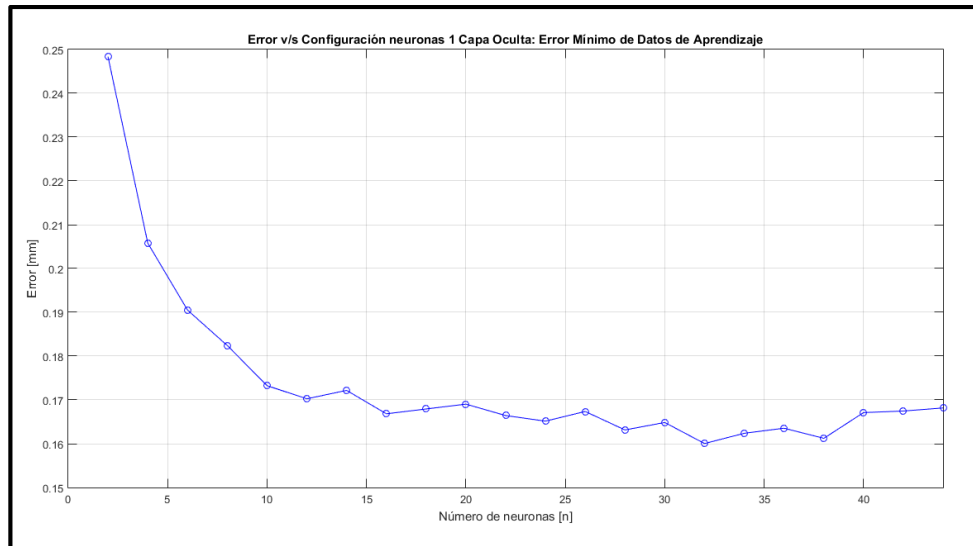


Figura 4-22 Error v/s 1 capa oculta: Error Mínimo de Datos de Aprendizaje.

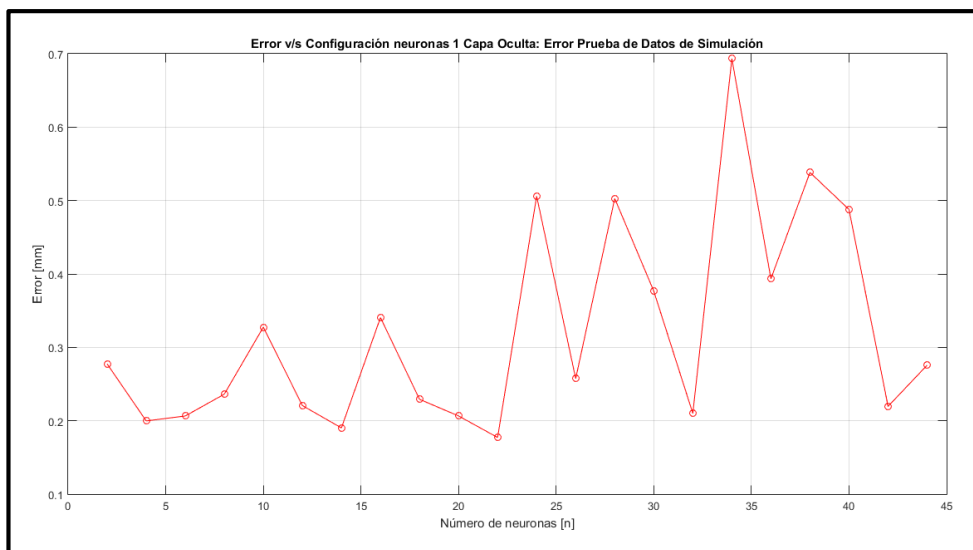


Figura 4-23 Error v/s 1 capa oculta: Error Prueba de Datos de Simulación.

En las Figura 4-22 y Figura 4-23 se muestran el error mínimo en fase de aprendizaje y el error en fase de simulación aplicando la configuración anterior.

En las Figura 4-24 y Figura 4-25 se muestran el error mínimo en fase de simulación y el error en fase de aprendizaje aplicando la configuración anterior.

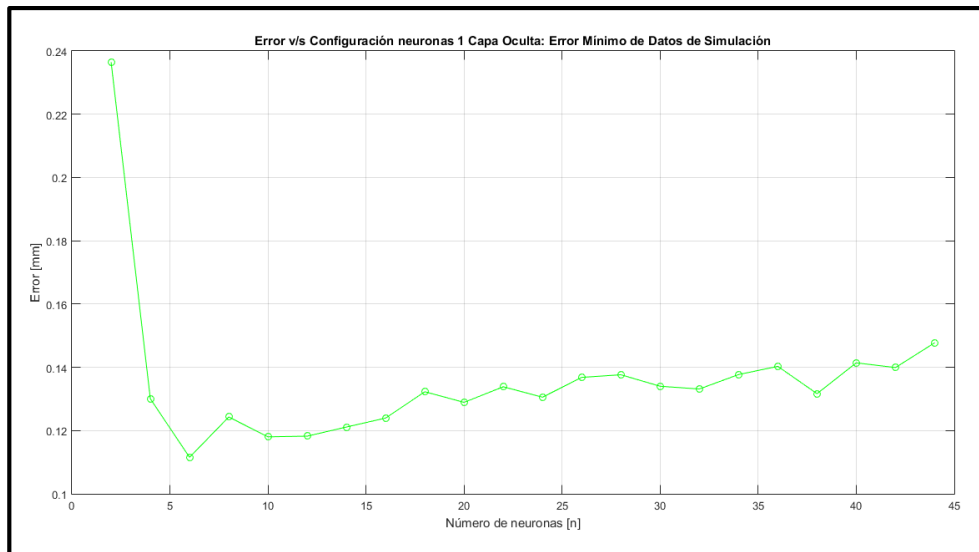


Figura 4-24 Error v/s 1 capa oculta: Error Mínimo de Datos de Simulación.

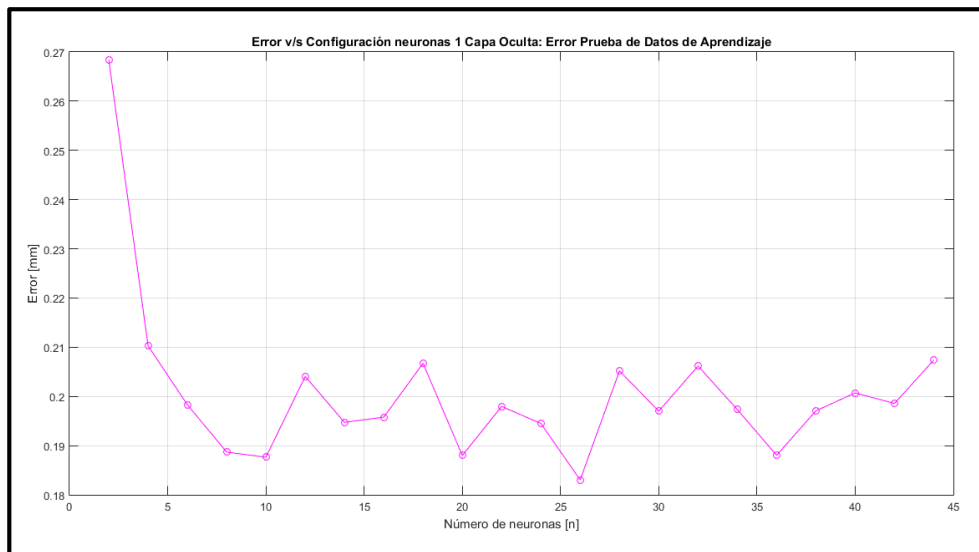


Figura 4-25 Error v/s 1 capa oculta: Error Prueba de Datos de Aprendizaje.

4.3.3.2. Resultados con dos capas ocultas

Usando la misma lógica que en la subsección anterior, se muestran los resultados en los siguientes gráficos. Solo se muestran los gráficos con la mitad de cantidad de configuraciones trabajadas, para revisar el desempeño de la configuración escogida. El resto de los resultados se ve en detalle en el ANEXO D.

En las Figura 4-26 y Figura 4-27 se muestran el error mínimo en fase de aprendizaje y el error en fase de simulación aplicando la configuración anterior.

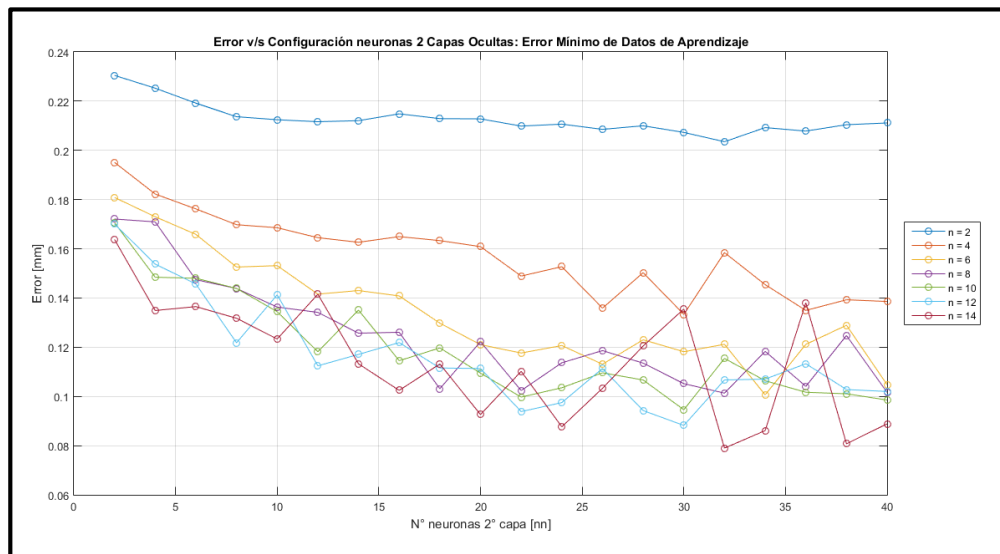


Figura 4-26 Error v/s 2 capas ocultas: Error Mínimo de Datos de Aprendizaje.

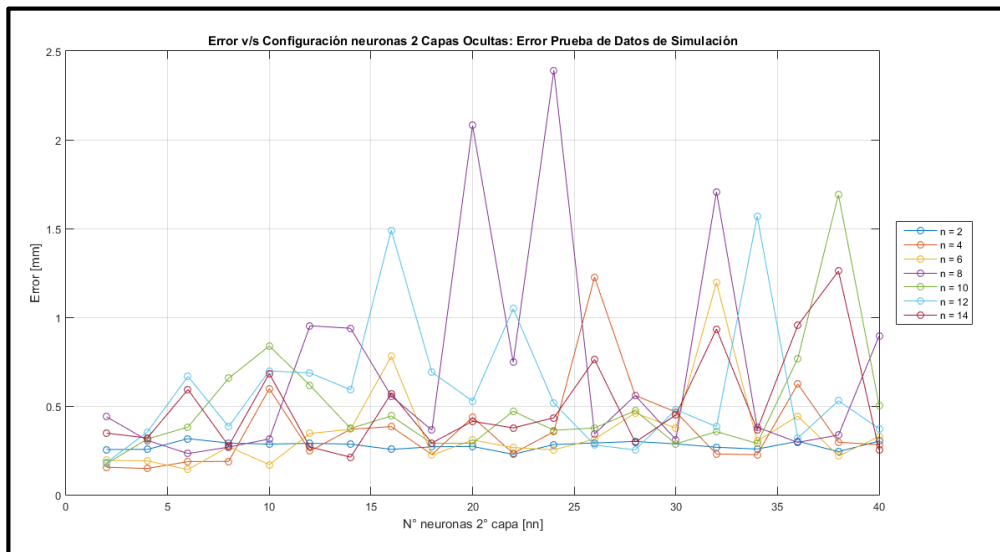


Figura 4-27 Error v/s 2 capas ocultas: Error Prueba de Datos de Simulación.

En las Figura 4-28 y Figura 4-29 se muestran el error mínimo en fase de simulación y el error en fase de aprendizaje aplicando la configuración anterior.

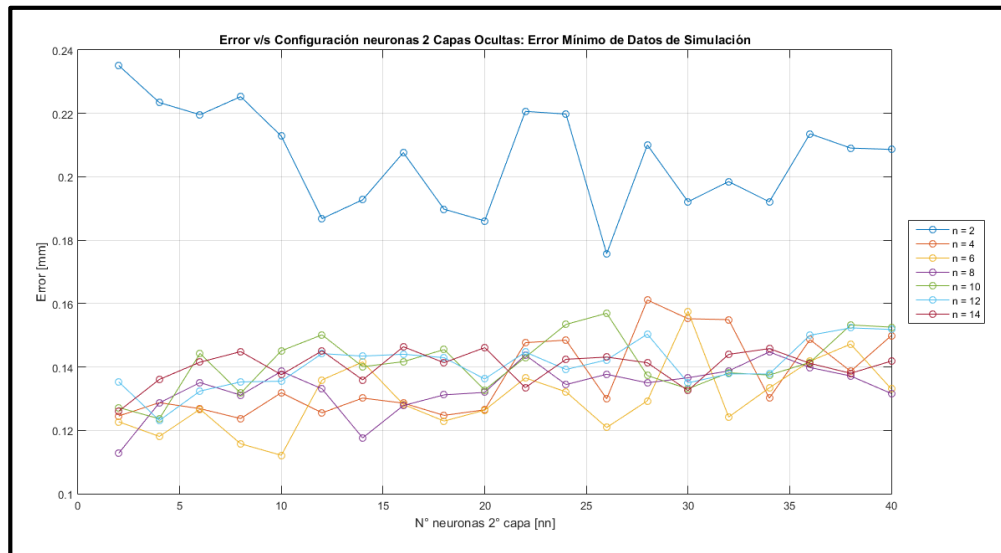


Figura 4-28 Error v/s 2 capas ocultas: Error Mínimo de Datos de Simulación.

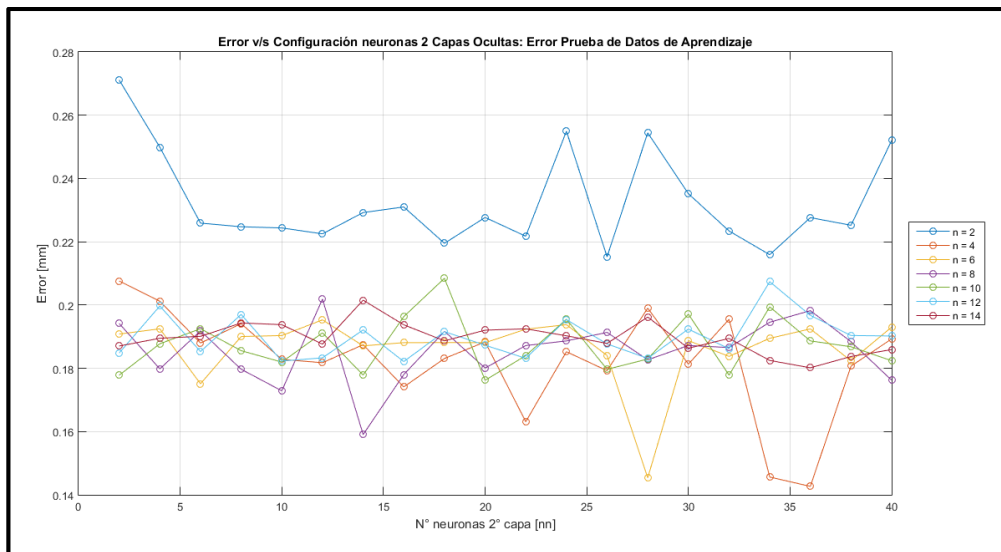


Figura 4-29 Error v/s 2 capas ocultas: Error Prueba de Datos de Aprendizaje.

4.3.3.3. Resultados con tres capas ocultas

En las Figura 4-30, Figura 4-31, Figura 4-32 y Figura 4-33 se muestran los errores mínimos de cada categoría de los datos con respecto a un cierto valor de neuronas en la tercera capa oculta. Se utilizan estos gráficos para una mejor visualización de los resultados, para así aplicar los criterios de selección y escoger la configuración con tres capas ocultas.

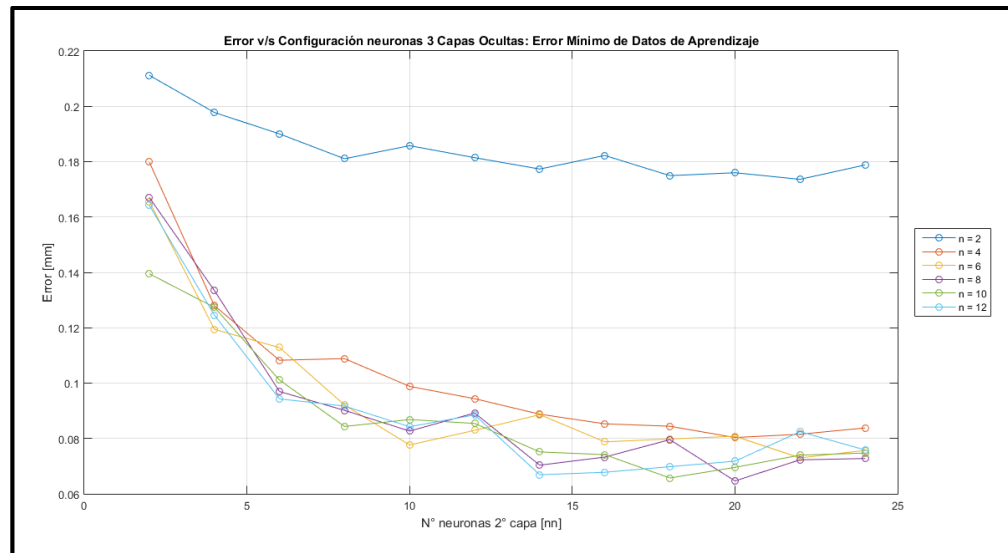


Figura 4-30 Error v/s 3 capas ocultas: Error Mínimo de Datos de Aprendizaje fijando valor de neuronas en 3° capa.

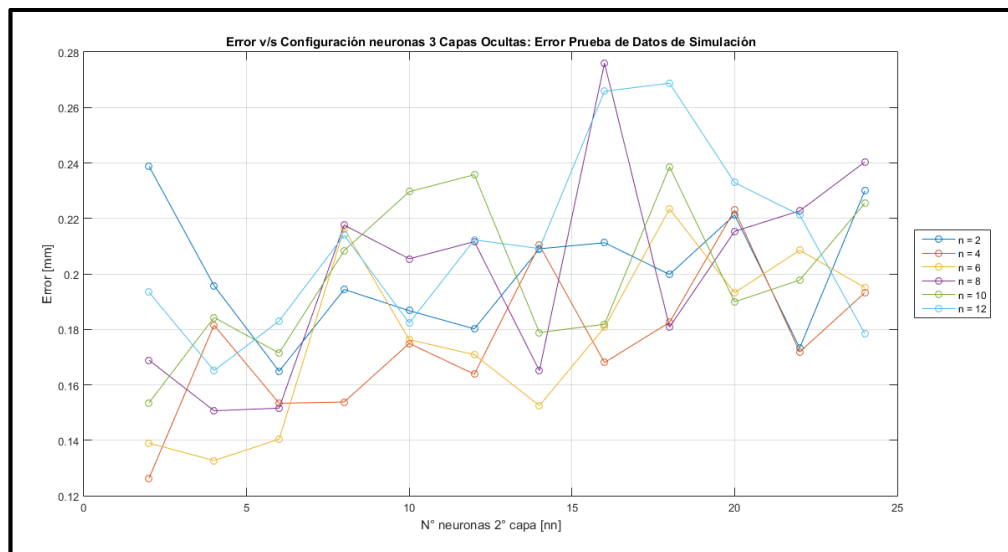


Figura 4-31 Error v/s 3 capas ocultas: Error Prueba de Datos de Simulación fijando valor de neuronas en 3° capa.

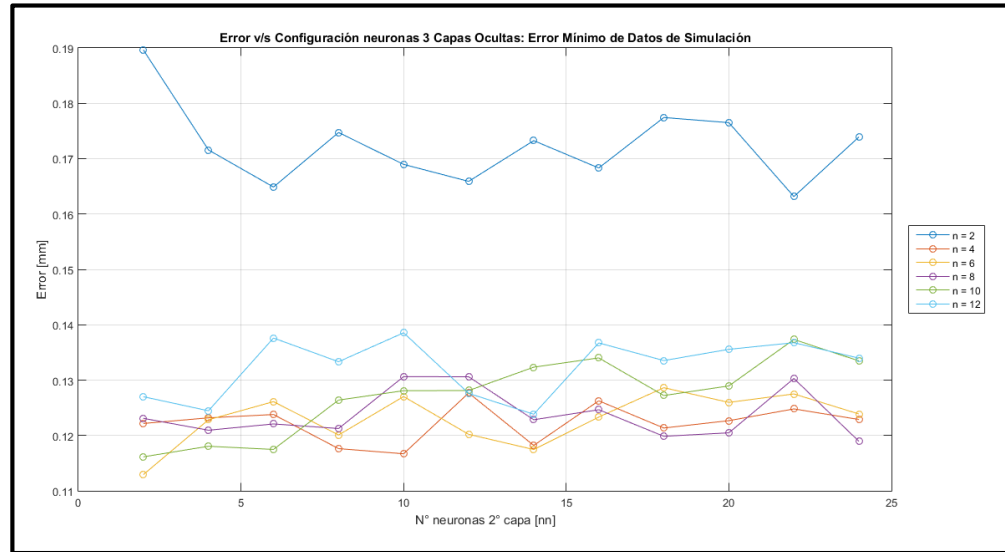


Figura 4-32 Error v/s 3 capas ocultas: Error Mínimo de Datos de Simulación fijando valor de neuronas en 3° capa.

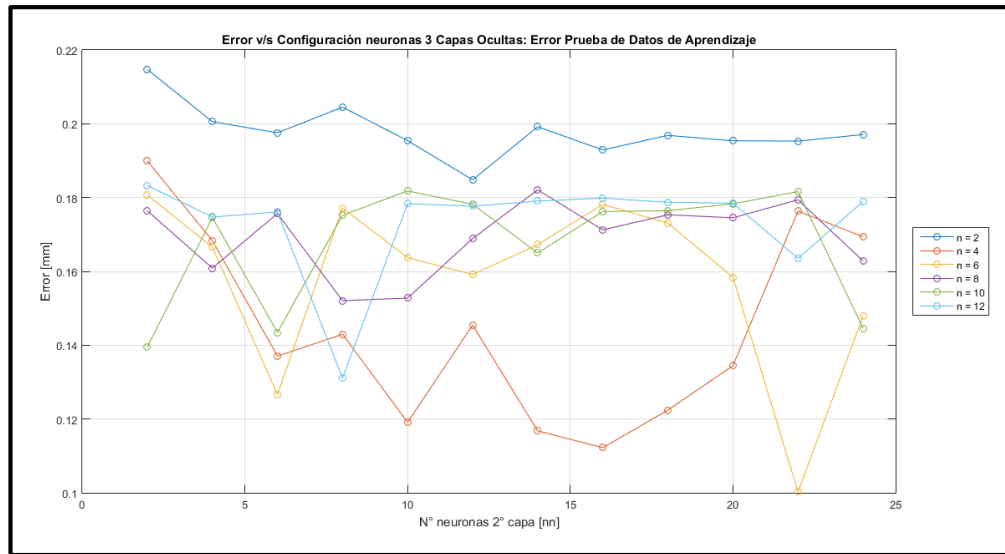


Figura 4-33 Error v/s 3 capas ocultas: Error Prueba de Datos de Aprendizaje fijando valor de neuronas en 3° capa.

De acuerdo a los resultados mostrados en el punto 4.3, se muestran los siguientes gráficos para el caso de 10 neuronas en la primera capa. Para el resto de los casos, se pueden apreciar en el ANEXO D.

En las Figura 4-34 y Figura 4-35 se muestran el error mínimo en fase de aprendizaje y el error en fase de simulación aplicando la configuración anterior.

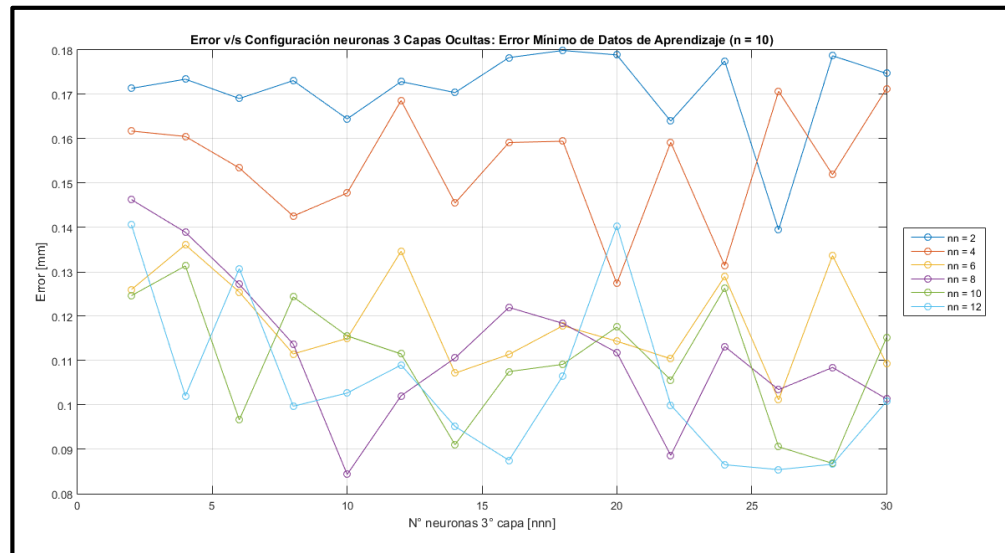


Figura 4-34 Error v/s 3 capas ocultas: Error Mínimo de Datos de Aprendizaje para 1° capa con 10 neuronas.

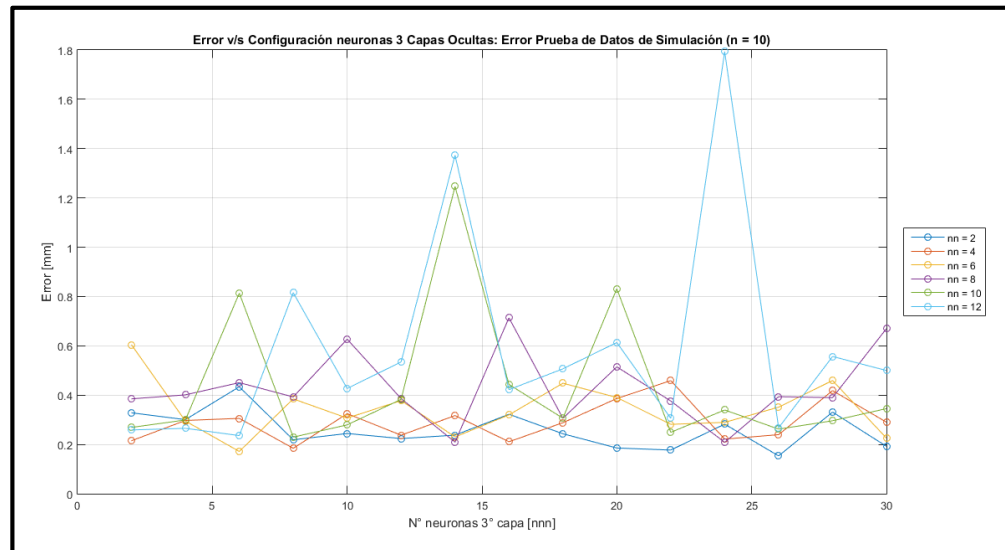


Figura 4-35 Error v/s 3 capas ocultas: Error Prueba de Datos de Simulación para 1° capa con 10 neuronas.

En las Figura 4-36 y Figura 4-37 se muestran el error mínimo en fase de simulación y el error en fase de aprendizaje aplicando la configuración anterior.

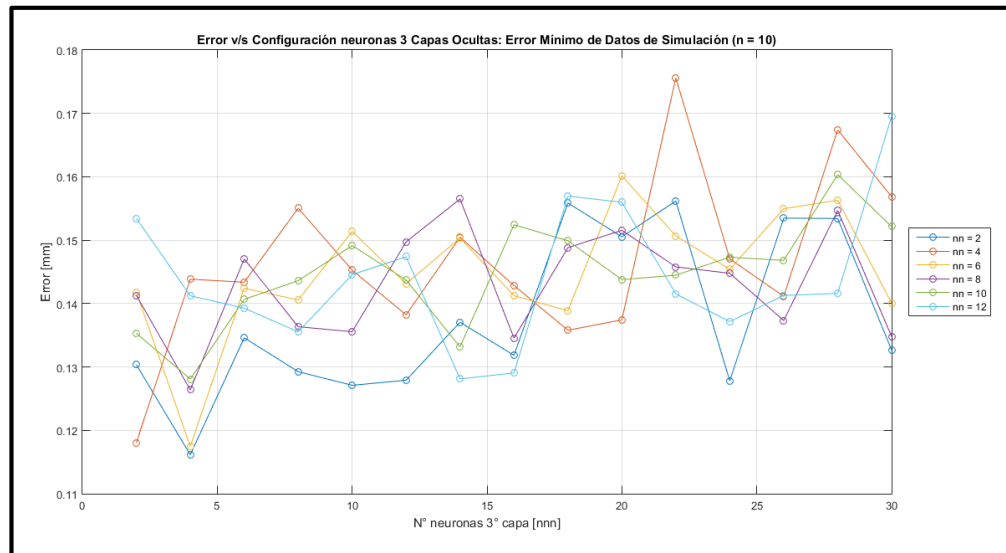


Figura 4-36 Error v/s 3 capas ocultas: Error Mínimo de Datos de Simulación para 1° capa con 10 neuronas.

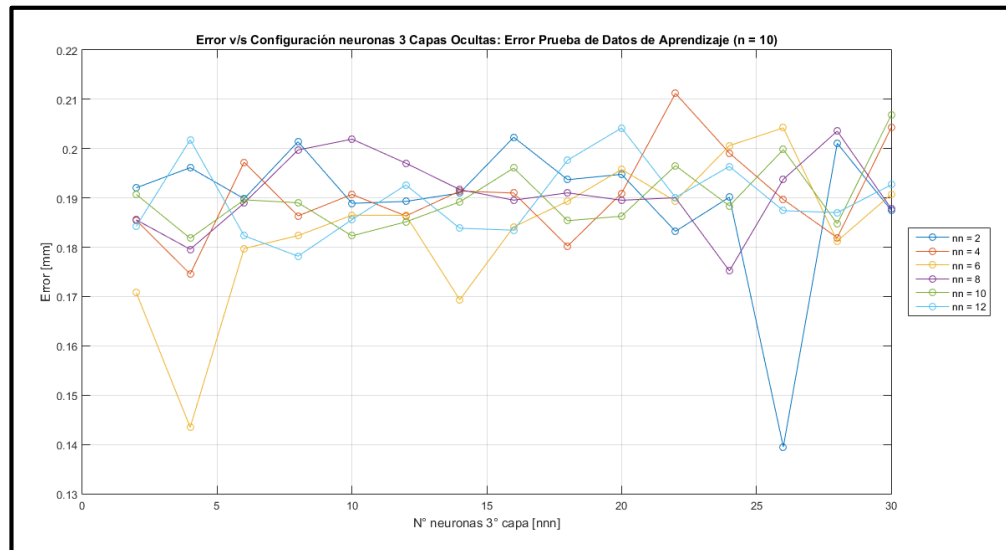


Figura 4-37 Error v/s 3 capas ocultas: Error Prueba de Datos de Aprendizaje para 1° capa con 10 neuronas.

4.3.4. Análisis final de las redes neuronales artificiales

Al realizar este procedimiento, se pudo apreciar el comportamiento de las RNA al abarcar muchas combinaciones de neuronas y capas ocultas, mediante el cual se registraron los errores y los coeficientes de correlación de los datos generados por el ISLAB2000 (Khazanovich et al., 2000). Con esto se comprueba la efectividad de cálculo de las RNA, pues al determinar la configuración idónea para calcular la deflexión por alabeo térmico, existe un ahorro de tiempo considerable en comparación con el programa de elementos finitos.

Como se puede ver en los gráficos anteriores, la tendencia del error para cada configuración es caótica, no existe un comportamiento ordenado que facilite la decisión de elegir una configuración con respecto a otra. La razón de este comportamiento es el valor de los pesos sinápticos, pues para cada corrida tiene valores aleatorios. Por ende, al ir aprendiendo la RNA, estos valores se ajustan a mínimos locales, donde no necesariamente todos los casos van a caer en el mismo punto o van a caer en el mínimo global. Lo único que asegura una tendencia del error es con respecto a la variación de iteraciones, tal como se vio en la Figura 4-21. Por lo tanto, es importante revisar todos los casos de manera secuencial y automatizada, pues al revisar las configuraciones de manera arbitraria, se pierden datos y las conclusiones al respecto no serían precisas.

Ya con el análisis terminado, se presenta a continuación las conclusiones y recomendaciones de esta memoria. De esta forma, se engloba todo el trabajo realizado y se presentan posibles temas de trabajo de investigación para continuar con los tópicos analizados.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En este capítulo se presentan las conclusiones obtenidas por el trabajo realizado, de acuerdo a los objetivos generales. Además, considerando la revisión bibliográfica con respecto a los temas de la memoria, se destacan los elementos importantes para complementar las conclusiones sobre los objetivos generales y cómo estos se cumplieron. En consideración a lo anterior, se muestran las recomendaciones para extender la investigación sobre el deterioro del escalonamiento aplicando los datos en las ciudades de Chile.

5.1. CONCLUSIONES

- La herramienta principal del modelo del escalonamiento es el concepto de losa circular equivalente de Korenev, siendo transformada a losa rectangular por Khazanovich. Gracias a este concepto, permite que el cálculo en el modelo de escalonamiento sea eficiente, ya sea para obtener los esfuerzos y deflexiones en el que está sometida la estructura de pavimento, como también para la utilización de todos los datos necesarios que influyen en el escalonamiento. Para el caso estudiado de las deflexiones por el alabeo térmico, se comprobó su eficiencia en el cálculo de las deflexiones al implementar el gradiente de temperatura adimensional de Korenev y el radio de rigidez relativa en las RNA.
- De acuerdo a los resultados conseguidos para el primer objetivo general, se logra obtener el factor de conversión con respecto a la inclinación de la junta transversal, viéndose el comportamiento de este factor a medida que el ángulo y la posición de la carga varía. Igualmente, se concluye que el uso del factor de conversión, para usar las JTE en el pavimento de hormigón, es una medida adecuada para poder diseñar con el modelo de la GEMDP. Basándose en las investigaciones realizadas en la calibración local del modelo de escalonamiento (Vásquez, 2014) (Moraga, 2015), se concluye que el modelo del deterioro no se acomoda de buena forma a las JTE, entregando un escalonamiento predicho cercano al doble del valor medido en terreno. Entonces, mediante la utilización del factor de conversión, se obtiene el escalonamiento en las JTE ocupando el proceso de cálculo del modelo de escalonamiento de la GEMDP.
- Las investigaciones realizadas en la calibración local del modelo de escalonamiento (Vásquez, 2014) (Moraga, 2015) son estudios complementarios del análisis del factor de conversión realizado en este trabajo, en donde las investigaciones realizadas por Vásquez (2014) y Moraga (2015) utilizan datos medidos en terreno de proyectos donde las juntas transversales poseen un esviaje y relaciona el escalonamiento calculado con el medido. De

acuerdo a sus resultados, solo se corrobora que los escalonamientos con JTE no se adecuan al modelo de la GEMDP en comparación con los proyectos con JTR, como se dijo anteriormente, debido a esto es necesario adaptar esos datos con un factor para que sean comparables. Con los datos disponibles de los proyectos, es difícil reconocer un patrón entre los escalonamientos con ambas juntas de interés, pues se desconoce la asociación de los escalonamientos con respecto a la zona geográfica o a las condiciones climáticas de los proyectos.

- Basándose en los valores de los ángulos recomendados para las JTE, se comprueba que, al implementar el esviaje en las juntas transversales existe una disminución en el valor del escalonamiento, siendo la inclinación en el sentido horario la configuración con mejor comportamiento para implementar las JTE en un pavimento. Considerando una inclinación entre 5 [°] y 20 [°] en el sentido horario, el valor del factor de conversión se encuentra entre 1,1 y 1,6, convirtiendo las JTE en un elemento de diseño a considerar en el futuro. Cabe destacar que este análisis es realizado en el primer año de funcionamiento del pavimento y utilizando un valor fijo en el espesor de la losa de hormigón, por lo tanto, es un estudio preliminar que ayuda a la corroboración de la funcionalidad de las JTE. Para complementar este análisis, es necesario extender el tiempo de estudio, considerar más ciudades nacionales, variar los espesores de las losas y, en lo posible, utilizar espectros de carga o similares para analizar el efecto del factor de conversión en situaciones acorde a la realidad de Chile.
- Con respecto a los resultados calculados para el segundo objetivo general, mediante las RNA, se consigue calcular las deflexiones por alabeo térmico obteniéndose errores bajos y coeficientes de correlación altos. A partir de lo anterior, se concluye que la configuración con tres capas ocultas entrega los errores y los coeficientes de correlación más satisfactorios. Acorde a esta configuración, tanto para los datos de aprendizaje como los datos de simulación entrega el mínimo error calculado, comprobando que la RNA tiene un buen comportamiento ante datos externos. De esta forma, se corrobora que esta configuración es óptima para ser usada en el cálculo de la deflexión y del escalonamiento, para implementarse en el diseño de pavimento de hormigón en Chile.
- Otro punto importante a destacar es el comportamiento de la RNA al variar la cantidad de capas ocultas y de neuronas. Se comprueba que, para este trabajo, existe una gran mejora en los valores del error y el coeficiente de correlación al aumentar la cantidad de capas ocultas y en la buena organización de las neuronas. Con esto se confirma que es posible implementar una cantidad óptima de neuronas para conseguir buenos resultados, con la

condición de distribuirlas de forma eficiente. En este caso en particular, la configuración escogida tiene una forma piramidal, dirigiéndose de más a menos neuronas en el proceso de aprendizaje y cálculo.

- Mediante el trabajo realizado con la variación de cantidades de capas ocultas y neuronas, se proporciona un punto de partida para los futuros estudios de RNA, para completar el modelo de escalonamiento para los pavimentos en Chile. Además, gracias a las propiedades de las RNA, se tiene la opción de mejorar la configuración óptima, ingresando una mayor cantidad de datos relacionados con los pavimentos chilenos, ya sea agregando más estaciones climatológicas o datos de pesaje de tráfico. Gracias al aumento de base de datos, se genera un mayor proceso de aprendizaje y una mejor aproximación a las deflexiones deseadas.

A continuación, se presentan las recomendaciones para poder continuar con la investigación realizada en esta memoria.

5.2. RECOMENDACIONES

- Para complementar el proceso de cálculo del escalonamiento, se recomienda realizar un estudio que obtenga la configuración de RNA para calcular las deflexiones generadas por las cargas de tráfico. Como se muestra en el ANEXO B, a lo largo del país existen múltiples estaciones de pesaje, permitiendo obtener los espectros de tráfico que requiere el modelo de la GEMDP para calcular estas deflexiones. Es un paso importante que debe realizarse, pues, de esta forma se calcula el escalonamiento para diseñar el pavimento de hormigón a utilizar en Chile.
- Con respecto al programa para calcular el escalonamiento en Chile, se recomienda utilizar un lenguaje de programación que permita integrar y utilizar las RNA necesarias, además de crear una interfaz de usuario para ingresar los datos de la estructura de pavimento que se desea diseñar. Teniendo el programa de cálculo del escalonamiento, es recomendable extender el estudio de las JTE, de esta forma se obtienen los escalonamientos para una vida de diseño de 20 años aplicando el factor de conversión. Mediante los datos medidos en terreno en pavimentos de hormigón con JTE en Chile, mostrados en las investigaciones de la calibración local del modelo de escalonamiento (Vásquez, 2014) (Moraga, 2015), es posible corroborar la funcionalidad del factor de conversión para poder implementarse en el futuro.

6. REFERENCIAS

- American Association of State and Highway Transportation Officials (AASHTO), "Guide for Design of Pavement Structures", 1993.
- American Concrete Institute (ACI), "Committee 325 - Concrete Overlays for Pavement Rehabilitation", ACI 325.13R-06, Farmington Hills, MI, 2006.
- American Concrete Pavement Association (ACPA), "Design and Construction of Joints for Concrete Highways", Technical Bulletin, vol. 10, 1991.
- Applied Research Associates (ARA), Inc., "Guide for Mechanistic- Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures", Final Report, NCHRP Project 1-37a, Washington, D.C., 2004.
- Ayton, G. P., "Concrete Highway Pavements in Australia", In Fifth International Conference on Concrete Pavement Design and Rehabilitation, Vol. 1, Purdue University, West Lafayette, IN, 1993.
- Beale, M. H., Hagan, M. T., & Demuth, H. B., "Neural network toolbox™ User's Guide". En R2014b, The MathWorks, Inc., 3 Apple Hill Drive Natick, MA 01760-2098, www. mathworks. Com, 2014.
- Bravo M., "Medición del coeficiente de expansión térmica en hormigones chilenos para pavimentos". Memoria Ingeniero Civil, Profesor Guía: Rodrigo Delgadillo Sturla, Departamento de Obras Civiles, UTFSM, Valparaíso, Chile, 2015.
- Darter M., Khazanovich L., Yu T., Mallela J., "Reliability analysis of cracking and faulting prediction in the new mechanistic-empirical pavement design procedure", Transportation Research Record, no. 1936, pp. 150-160, 2005.
- Davids B., "EverFE Theory Manual", University of Maine, febrero 2003.
- Delatte, N., "Concrete Pavement Design, Construction and Performance", 2008.
- Delgadillo et al., "Informe de Avance Proyecto Innova Chile – Corfo 11BPC-10220", UTFSM, 2013.
- Eisenmann J., Leykauf G., "Effect of Paving Temperatures on pavement Performance", Proceedings 2nd International Workshop on the Theoretical Design of Concrete Pavements, Siquenza, Spain, 1990.
- Eisenmann J., Leykauf G., "Simplified Calculation Method of Slab Curling Caused by Surface Shrinkage", Proceedings 2nd International Workshop on the Theoretical Design of Concrete Pavements, Siquenza, Spain, 1990.
- Elzo I., "Aplicación del Método AASHTO 2008 para el diseño de pavimentos rígidos en Chile". Memoria Ingeniero Civil, Profesor Guía: Rodrigo Delgadillo Sturla, Departamento de Obras Civiles, UTFSM, Valparaíso, Chile, 2014.

- Federal Highway Administration (FHWA), “Concrete Pavement Joints, Technical Advisory, T 5040.30”, Washington, DC, 1990a.
- Huang, Y. H., “Pavement Analysis and Design” 2a Edition, 2003.
- Khazanovich L., Selezneva O. I., Yu H. T., Darter M. I., “Development of Rapid Solutions for Prediction of Critical Continuously Reinforced Concrete Pavement Stresses.” Transportation Research Record, 1778, 64-72, 2001.
- Khazanovich L., Yu H. T., Rao S., Galasova K., Shats E., Jones R., “ISLAB2000; Finite Element Analysis Program for Rigid and Composite Pavements”, User’s Guide, Champaign IL: ERES Consultants, 2000.
- McGhee, K. H., “NCHRP Synthesis of highway practice 211: Design, Construction and Maintenance of PCC Pavement Joints”. Washington, DC: National Cooperative of Highway Research Program, 1995.
- Ministerio de Obras Públicas (MOP), “Funciones y Operaciones de las Plazas de Pesaje, Unidad Nacional de Pesaje”, Dirección de Vialidad, 2001.
- Moraga P., “Recalibración de los modelos de deterioro de la Guía Empírico Mecanicista (AASHTO 2008) para pavimentos de hormigón simple”. Memoria Ingeniero Civil, Profesor Guía: Rodrigo Delgadillo Sturla, Departamento de Obras Civiles, UTFSM, Valparaíso, Chile, 2015.
- Osorio L., “Validación y análisis de estadísticas climáticas chilenas para el diseño empírico – mecanicista de pavimentos”. Memoria Ingeniero Civil, Profesor Guía: Rodrigo Delgadillo Sturla, Departamento de Obras Civiles, UTFSM, Valparaíso, Chile, 2014.
- Poblete M., Ceza P., David J., Espinosa R., García A., González J., “Model of Slab Cracking for Portland Cement Concrete Pavements”, Transportation Research Record, (1307), 1991.
- Poblete M., García A., David J., Ceza P., Espinosa R., “Moisture effect on the behavior of PCC pavements”, Proceedings 2nd International Workshop on the Theoretical Design of Concrete Pavements, Siquenza, Spain, 1990.
- Riad M. Y., Shoukry S. N., William G. W., Fahmy M. R., “Effect of skewed joints on the performance of jointed concrete pavement through 3D dynamic finite element analysis”, Department of Civil and Environmental Engineering, West Virginia University, Morgantown, WV, 26506, USA, julio 2009.
- Riad M. Y., Shoukry S. N., William G. W., Rao-Hejamadi D., “Curling of concrete slabs on grade: experimental versus theoretical analysis”, Department of Civil and Environmental Engineering, West Virginia University, Morgantown, WV, 26506, USA, junio 2008.
- Smith, K. D., Wade, M. J., Peshkin, D. G., Khazanovich, L., Yu, H. T., & Darter, M. I., “Performance of Concrete Pavements. Volume II: Evaluation of Inservice Concrete Pavements”, FHWA-RD-95-110, Washington, DC, 1998.

- Vandenbossche J. M., Mu F., Gutierrez J. J., Sherwood J., “An evaluation of the built-in temperature difference input parameter in the jointed plain concrete pavement cracking model of the Mechanistic–Empirical Pavement Design Guide”, *International Journal of Pavement Engineering*, 12:03, 215-228, 2011.
- Vásquez J., “Calibración local del modelo de escalonamiento de juntas transversales de la Guía de Diseño Empírico Mecanicista (AASHTO 2008) para pavimentos de hormigón simple con juntas sin barras de traspaso de carga”. Memoria de Ingeniero Civil y Grado de Magister en Ciencias de la Ingeniería Civil, Profesor Guía: Rodrigo Delgadillo Sturla, Departamento de Obras Civiles, UTFSM, Valparaíso, Chile, 2014.
- Yu H. T., Khazanovich L., Darter M. I., “Consideration of JPCP Curling and Warping in the 2002 Design Guide”, ERES Consultants Division of Applied Research Associates, Inc., enero 2004.

7. ANEXOS

ANEXO A. TABLAS DE RESULTADOS DEL FACTOR DE CONVERSIÓN

En las Tabla 7-1 y Tabla 7-2 se muestran los valores de los escalonamientos obtenidos utilizando el modelo de escalonamiento de la GEMDP. Los escalonamientos dependen del sentido de giro de la JTE, de la posición de la carga y del valor del ángulo mes a mes.

Tabla 7-1 Tabla de escalonamientos con JTE con sentido de giro horario

Age(mo)	Month	Losa normal		Losa Esviada 5[°]		Losa Esviada 10[°]		Losa Esviada 15[°]		Losa Esviada 20[°]	
		Esc. Final [mm]		Esc. Final [mm]		Esc. Final [mm]		Esc. Final [mm]		Esc. Final [mm]	
1	January	0,000268782	0,000268535	0,000228725	0,0001954	0,000171345					
2	February	0,000345947	0,000345529	0,000294531	0,000250837	0,000220836					
3	March	0,000419784	0,000419689	0,000357867	0,000304137	0,000268604					
4	April	0,000492241	0,00049257	0,000420193	0,000356614	0,000315623					
5	May	0,000548141	0,000548856	0,000468528	0,000397329	0,000351872					
6	June	0,000603882	0,00060478	0,000516633	0,000437748	0,000388020					
7	July	0,000659208	0,000660373	0,000564321	0,000477982	0,000423921					
8	August	0,000714384	0,000715727	0,000612004	0,000517761	0,000459913					
9	September	0,000784245	0,000786139	0,000672233	0,000568649	0,000505630					
10	October	0,000853907	0,000856503	0,000732211	0,000619375	0,000551206					
11	November	0,000923236	0,000926532	0,000791876	0,000669853	0,000596598					
12	December	0,000992475	0,000996469	0,000851527	0,000720194	0,000642000					
Age(mo)	Month	Esc. Final [mm]		Esc. Final [mm]		Esc. Final [mm]		Esc. Final [mm]		Esc. Final [mm]	
		Esc. Final [mm]		Esc. Final [mm]		Esc. Final [mm]		Esc. Final [mm]		Esc. Final [mm]	
1	January	0,00028022	0,000264641	0,000227098	0,000189723	0,000158371					
2	February	0,000360267	0,000338703	0,00028996	0,000238883	0,000199318					
3	March	0,000436827	0,000409756	0,000350228	0,000285992	0,000238495					
4	April	0,000512155	0,000479562	0,000409427	0,000331996	0,000276840					
5	May	0,000570334	0,000533581	0,000455644	0,000368193	0,000307068					
6	June	0,000628371	0,000587423	0,000501582	0,000404258	0,000337085					
7	July	0,000685762	0,000640773	0,000546988	0,000439841	0,000366738					
8	August	0,000743138	0,000694047	0,000592365	0,000475507	0,000396336					
9	September	0,000815632	0,000761478	0,000649384	0,000519653	0,000433165					
10	October	0,000887753	0,000828667	0,000706167	0,000563634	0,000469866					
11	November	0,000959677	0,000895697	0,000762618	0,000607383	0,000506415					
12	December	0,001031555	0,000962597	0,000819061	0,000651153	0,000542809					

Tabla 7-2 Tabla de escalonamientos con JTE con sentido de giro anti horario

Age(mo)	Month	Losa normal		Losa Esviada -5[°]		Losa Esviada -10[°]		Losa Esviada -15[°]		Losa Esviada -20[°]		Losa Esviada -25[°]	
		Esc. Final [mm]		Esc. Final [mm]		Esc. Final [mm]		Esc. Final [mm]		Esc. Final [mm]		Esc. Final [mm]	
1	January	0,000268782		0,000267585		0,000258699		0,000258892		0,000215511		0,000197283	
2	February	0,000345947		0,000343758		0,000331755		0,000332061		0,000276087		0,000252813	
3	March	0,000419784		0,000416983		0,000401994		0,000402041		0,000334222		0,000305836	
4	April	0,000492241		0,000488802		0,000471081		0,000470611		0,000391360		0,000357868	
5	May	0,000548141		0,000544216		0,00052451		0,000523667		0,000435497		0,000398166	
6	June	0,000603882		0,000599392		0,000577746		0,000576573		0,000479508		0,000438523	
7	July	0,000659208		0,000653972		0,000630404		0,000628962		0,000523072		0,000478400	
8	August	0,000714384		0,000708598		0,000683021		0,000681329		0,000566487		0,000518211	
9	September	0,000784245		0,000778028		0,000749898		0,000747718		0,000621695		0,000568565	
10	October	0,000853907		0,000847317		0,000816686		0,000813902		0,000676752		0,000618814	
11	November	0,000923236		0,000916228		0,00088306		0,000879759		0,000731465		0,000668786	
12	December	0,000992475		0,000985308		0,000949397		0,000945702		0,000786065		0,000718841	
Age(mo)	Month	Esc. Final [mm]		Esc. Final [mm]		Esc. Final [mm]		Esc. Final [mm]		Esc. Final [mm]		Esc. Final [mm]	
		Esc. Final [mm]		Esc. Final [mm]		Esc. Final [mm]		Esc. Final [mm]		Esc. Final [mm]		Esc. Final [mm]	
1	January	0,00028022		0,000273805		0,000279392		0,000259305		0,000213951		0,000200033	
2	February	0,000360267		0,000353642		0,000355038		0,000335767		0,000277351		0,000259987	
3	March	0,000436827		0,000430662		0,000433576		0,000409106		0,000338530		0,000317578	
4	April	0,000512155		0,000506337		0,000510891		0,000481259		0,000398964		0,000374454	
5	May	0,000570334		0,000564517		0,000570239		0,000536683		0,000445058		0,000417840	
6	June	0,000628371		0,000622264		0,000629404		0,000591837		0,000491077		0,000461217	
7	July	0,000685762		0,000679415		0,000687937		0,000646662		0,000536735		0,000504286	
8	August	0,000743138		0,000736748		0,00074639		0,000701321		0,000582231		0,000547346	
9	September	0,000815632		0,000809945		0,000821292		0,00077161		0,000640964		0,000602802	
10	October	0,000887753		0,000882824		0,000896071		0,000841837		0,000699536		0,000658228	
11	November	0,000959677		0,000955504		0,000970573		0,000911761		0,000757955		0,000713464	
12	December	0,001031555		0,001028188		0,001045013		0,000981816		0,000816339		0,000768706	

A continuación, en la Tabla 7-3 se muestran los valores obtenidos del factor de conversión dependiendo del valor del ángulo de inclinación considerando los escalonamientos mostrados anteriormente.

Tabla 7-3 Valores del factor de conversión considerando carga y ángulo

Ángulo	Factor Carga Central	Factor Carga Borde izquierdo
-25	1,3785	1,3540
-20	1,2607	1,2732
-15	1,0482	1,0573
-10	1,0453	0,9937
-5	1,0076	1,0073
0	1,0000	1,0000
5	0,9975	1,0703
10	1,1675	1,2552
15	1,3789	1,5653
20	1,5519	1,8774

ANEXO B. ESTRUCTURAS DE PAVIMENTO PARA LAS REDES NEURONALES

Las estructuras de pavimento, además de variar las propiedades del suelo, también se consideran las estaciones de pesaje. A pesar que no se incluyen las cargas para el cálculo de la deflexión por alabeo térmico, cada estación de pesaje tiene diferentes espesores de losa de hormigón. En la Figura 7-1 se muestran las ubicaciones de las estaciones de pesaje.

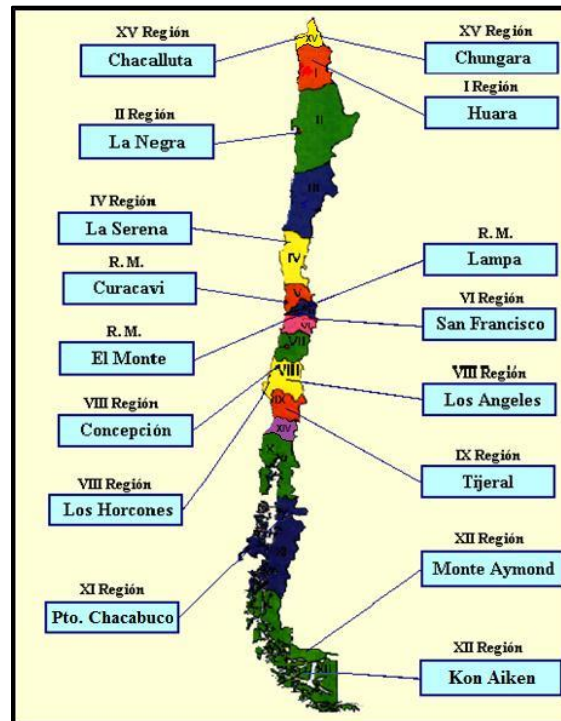


Figura 7-1 Ubicación geográfica de las plazas de pesaje fijo pertenecientes a la red nacional de pesaje (MOP, 2001)

De acuerdo a las ciudades que se consideran, se utilizan los datos de las siguientes estaciones de pesaje: Chacalluta, Chungara, Curacaví, El Monte, SH3 Der., Concepción, Los Horcones, Tjeral, Monte Aymond y Kon Aiken. En las siguientes tablas se muestran los sistemas de pavimentos de cada ciudad, detallando el tipo de suelo y la estación de pesaje, además de los datos generales de los pavimentos aplicados en todas las estaciones de pesaje.

Tabla 7-4 Datos generales de las estructuras de pavimento

Datos del pavimento	
Erosión	4
μ_{pcc}	0.2
μ_{Base}	0.3
α	$1.10E-05$ [1/°C]
ξ_{su}	798.4 [microstrain]

Tabla 7-5 Estructura de pavimento para la ciudad de Arica

Suelo	Tipo de capa	Tipo de Material	Espesor [mm]		Densidad [kgf/m³]
			Chungara	Chacalluta	
12	JPCP	Hormigón	180	190	2449
	Base no estabilizada	A-1-a	150	150	2220
	Subbase	A-4	300	300	2020
	Subrasante	A-4	--	--	2020

Tabla 7-6 Estructura de pavimento para la ciudad de Valparaíso

Suelo	Tipo de capa	Tipo de Material	Espesor [mm]		Densidad [kgf/m³]
			Curacaví	El Monte	
1	JPCP	Hormigón	215	210	2449
	Base no estabilizada	A-1-a	150	150	2220
	Subbase	A-1-b	300	300	1990
	Subrasante	A-1-b	--	--	1990
2	JPCP	Hormigón	205	200	2449
	Base no estabilizada	A-1-a	150	150	2220
	Subbase	A-3	300	300	1750
	Subrasante	A-3	--	--	1750
3	JPCP	Hormigón	200	195	2449
	Base no estabilizada	A-1-a	150	150	2220
	Subbase	A-2-4	300	300	1900
	Subrasante	A-2-4	--	--	1900
7	JPCP	Hormigón	210	--	2449
	Base no estabilizada	A-1-a	150	--	2220
	Subbase	A-1-a	300	--	2210
	Subrasante	A-1-a	--	--	2210

Tabla 7-7 Estructura de pavimento para la ciudad de Santiago

Suelo	Tipo de capa	Tipo de Material	Espesor [mm]			Densidad [kgf/m³]
			SH3 Der.	El Monte	Curacaví	
3	JPCP	Hormigón	205	200	--	2449
	Base no estabilizada	A-1-a	150	150	--	2220
	Subbase	A-2-4	300	300	--	1900
	Subrasante	A-2-4	--	--	--	1900
4	JPCP	Hormigón	200	220	225	2449
	Base no estabilizada	A-1-a	150	150	150	2220
	Subbase	A-6	300	300	300	1810
	Subrasante	A-6	--	--	--	1810
7	JPCP	Hormigón	200	220	--	2449
	Base no estabilizada	A-1-a	150	150	--	2220
	Subbase	A-1-a	300	300	--	2210
	Subrasante	A-1-a	--	--	--	2210
10	JPCP	Hormigón	200	205	210	2449
	Base no estabilizada	A-1-a	150	150	150	2220
	Subbase	A-2-4	300	300	300	1580
	Subrasante	A-2-4	--	--	--	1580

Tabla 7-8 Estructura de pavimento para la ciudad de Concepción

Suelo	Tipo de capa	Tipo de Material	Espesor [mm]		Densidad [kgf/m³]
			Concepción	Los Horcones	
1	JPCP	Hormigón	195	185	2449
	Base no estabilizada	A-1-a	150	150	2220
	Subbase	A-1-b	300	300	1990
	Subrasante	A-1-b	--	--	1990
5	JPCP	Hormigón	205	185	2449
	Base no estabilizada	A-1-a	150	150	2220
	Subbase	A-7-6	300	300	1890
	Subrasante	A-7-6	--	--	1890
7	JPCP	Hormigón	195	185	2449
	Base no estabilizada	A-1-a	150	150	2220
	Subbase	A-1-a	300	300	2210
	Subrasante	A-1-a	--	--	2210

Tabla 7-9 Estructura de pavimento para la ciudad de Puerto Montt

Suelo	Tipo de capa	Tipo de Material	Espesor [mm]	Densidad [kgf/m³]
			Tijeral	
5	JPCP	Hormigón	185	2449
	Base no estabilizada	A-1-a	150	2220
	Subbase	A-7-6	300	1890
	Subrasante	A-7-6	--	1890
7	JPCP	Hormigón	175	2449
	Base no estabilizada	A-1-a	150	2220
	Subbase	A-1-a	300	2210
	Subrasante	A-1-a	--	2210
11	JPCP	Hormigón	180	2449
	Base no estabilizada	A-1-a	150	2220
	Subbase	A-4	300	990
	Subrasante	A-4	--	990

Tabla 7-10 Estructura de pavimento para la ciudad de Punta Arenas

Suelo	Tipo de capa	Tipo de Material	Espesor [mm]		Densidad [kgf/m³]
			Monte Aymond	Kon Aiken	
1	JPCP	Hormigón	185	195	2449
	Base no estabilizada	A-1-a	150	150	2220
	Subbase	A-1-b	300	300	1990
	Subrasante	A-1-b	--	--	1990
5	JPCP	Hormigón	195	210	2449
	Base no estabilizada	A-1-a	150	150	2220
	Subbase	A-7-6	300	300	1890
	Subrasante	A-7-6	--	--	1890
13	JPCP	Hormigón	195	205	2449
	Base no estabilizada	A-1-a	150	150	2220
	Subbase	A-6	300	300	1980
	Subrasante	A-6	--	--	1980

ANEXO C. DATOS MENSUALES DE PAVIMENTO PARA LAS REDES NEURONALES

En las siguientes tablas se muestran los datos empleados para generar la base de datos de las RNA por ciudad, estación de pesaje y tipo de suelo. Además, se detalla la base de datos utilizada en las RNA especificando el radio de rigidez relativa, el gradiente de temperatura adimensional de Korenev y las deflexiones dependiendo del espaciamiento entre juntas.

Tabla 7-11 Ciudad Arica Suelo 12 Chacalluta

Edad [Mes]	E _{pcc} [Mpa]	Mr _{base} [Mpa]	k [kPa/mm]	R.H. [%]	T [°C]	lm [mm]	Φm	Deflexión por alabeo térmico [mm]			
								3.5 [m]	4.0 [m]	4.5 [m]	5.0 [m]
1	14685,83	345,22	74	63,4	-31,13	587,74	24,14	3,62	3,84	3,92	3,91
2	29923,25	347,08	74	62,4	-30,90	702,22	34,21	4,48	4,97	5,37	5,69
3	30750,62	347,08	74	64,9	-30,56	707,02	34,30	4,45	4,93	5,34	5,66
4	31233,25	347,08	74	66,9	-30,34	709,78	34,32	4,42	4,91	5,32	5,64
5	31577,99	347,08	74	67,7	-28,83	711,73	32,79	4,18	4,63	5,00	5,30
6	31784,83	347,08	74	68,9	-27,68	712,89	31,58	3,99	4,42	4,77	5,03
7	32060,62	347,08	74	69,2	-27,44	714,43	31,44	3,96	4,38	4,73	4,99
8	32198,52	347,08	74	70,1	-27,50	715,20	31,58	3,97	4,40	4,74	5,02
9	32336,41	347,08	74	70,2	-27,62	715,96	31,79	3,99	4,42	4,78	5,05
10	32474,31	347,08	74	68,1	-27,93	716,73	32,21	4,05	4,49	4,85	5,14
11	32612,2	347,08	74	66,5	-28,41	717,49	32,83	4,13	4,58	4,96	5,26
12	32681,15	347,08	74	64	-28,68	717,87	33,18	4,18	4,64	5,02	5,33

Tabla 7-12 Ciudad Arica Suelo 12 Chungara

Edad [Mes]	E _{pcc} [Mpa]	Mr _{base} [Mpa]	k [kPa/mm]	R.H. [%]	T [°C]	lm [mm]	Φm	Deflexión por alabeo térmico [mm]			
								3.5 [m]	4.0 [m]	4.5 [m]	5.0 [m]
1	14685,83	345,22	75	63,4	-30,87	562,65	24,77	3,60	3,78	3,83	3,79
2	29923,25	347,08	75	62,4	-30,62	672,24	35,07	4,57	5,04	5,42	5,69
3	30750,62	347,08	74	64,9	-30,34	679,12	34,99	4,55	5,03	5,41	5,69
4	31233,25	347,08	74	66,9	-30,18	681,76	35,08	4,54	5,02	5,40	5,69
5	31577,99	347,08	74	67,7	-28,72	683,64	33,56	4,29	4,73	5,09	5,34
6	31784,83	347,08	74	68,9	-27,57	684,75	32,32	4,09	4,51	4,84	5,07
7	32060,62	347,08	74	69,2	-27,33	686,24	32,18	4,06	4,47	4,80	5,03
8	32198,52	347,08	74	70,1	-27,44	686,97	32,38	4,08	4,50	4,83	5,06
9	32336,41	347,08	74	70,2	-27,56	687,71	32,60	4,11	4,53	4,86	5,10
10	32474,31	347,08	74	68,1	-27,82	688,44	32,97	4,16	4,59	4,93	5,18
11	32612,2	347,08	74	66,5	-28,25	689,17	33,55	4,24	4,68	5,03	5,30
12	32681,15	347,08	74	64	-28,45	689,53	33,82	4,28	4,72	5,09	5,35

Tabla 7-13 Ciudad Valparaíso Suelo 1 Curacaví

Edad [Mes]	E _{pcc} [Mpa]	Mr _{base} [Mpa]	k [kPa/mm]	R.H. [%]	T [°C]	lm [mm]	Φm	Deflexión por alabeo térmico [mm]			
								3.5 [m]	4.0 [m]	4.5 [m]	5.0 [m]
1	14685,83	336,46	102	65,7	-32,47	594,78	27,78	3,67	3,95	4,12	4,18
2	29923,25	338,19	102	67,5	-31,73	710,62	38,76	4,24	4,74	5,19	5,59
3	30750,62	338,19	103	68,7	-31,12	713,74	38,73	4,17	4,66	5,10	5,50
4	31233,25	338,19	103	69,5	-29,90	716,52	37,50	3,99	4,47	4,88	5,25
5	31577,99	338,26	103	75,6	-29,00	718,49	36,57	3,86	4,32	4,71	5,07
6	31784,83	338,12	103	74,9	-28,51	719,66	36,06	3,79	4,24	4,63	4,97
7	32060,62	338,19	103	73,3	-28,22	721,22	35,85	3,75	4,19	4,58	4,91
8	32198,52	338,12	103	70,2	-28,66	721,99	36,49	3,83	4,27	4,67	5,02
9	32336,41	337,98	103	69,5	-29,24	722,77	37,30	3,91	4,38	4,79	5,16
10	32474,31	337,98	103	66,9	-29,65	723,53	37,91	3,98	4,46	4,88	5,26
11	32612,2	337,98	103	65,9	-30,19	724,30	38,68	4,06	4,55	4,99	5,38
12	32681,15	337,98	103	63,5	-30,62	724,68	39,28	4,13	4,63	5,07	5,49

Tabla 7-14 Ciudad Valparaíso Suelo 1 El Monte

Edad [Mes]	E _{pcc} [Mpa]	Mr _{base} [Mpa]	k [kPa/mm]	R.H. [%]	T [°C]	lm [mm]	Φm	Deflexión por alabeo térmico [mm]			
								3.5 [m]	4.0 [m]	4.5 [m]	5.0 [m]
1	14685,83	336,46	102	65,7	-32,36	584,43	28,02	3,68	3,95	4,11	4,15
2	29923,25	338,19	103	67,5	-31,62	696,55	39,27	4,29	4,80	5,23	5,62
3	30750,62	338,19	103	68,7	-31,06	701,31	39,11	4,23	4,72	5,16	5,54
4	31233,25	338,19	103	69,5	-29,84	704,05	37,87	4,05	4,52	4,93	5,29
5	31577,99	338,26	103	75,6	-28,94	705,99	36,92	3,92	4,37	4,76	5,10
6	31784,83	338,12	103	74,9	-28,46	707,14	36,43	3,85	4,29	4,67	5,00
7	32060,62	338,19	103	73,3	-28,22	708,67	36,28	3,82	4,25	4,64	4,96
8	32198,52	338,12	103	70,2	-28,61	709,43	36,86	3,88	4,33	4,72	5,06
9	32336,41	337,98	103	69,5	-29,18	710,19	37,67	3,97	4,43	4,84	5,20
10	32474,31	337,98	103	66,9	-29,59	710,94	38,29	4,04	4,51	4,93	5,30
11	32612,2	337,98	103	65,9	-30,13	711,70	39,06	4,12	4,61	5,04	5,43
12	32681,15	337,98	103	63,5	-30,51	712,07	39,60	4,19	4,68	5,13	5,52

Tabla 7-15 Ciudad Valparaíso Suelo 2 Curacaví

Edad [Mes]	E _{pcc} [Mpa]	Mr _{base} [Mpa]	k [kPa/mm]	R.H. [%]	T [°C]	lm [mm]	Φm	Deflexión por alabeo térmico [mm]			
								3.5 [m]	4.0 [m]	4.5 [m]	5.0 [m]
1	14685,83	336,4	72	65,7	-32,32	626,24	23,80	3,87	4,18	4,36	4,43
2	29923,25	338,19	72	67,5	-31,57	748,21	33,18	4,45	4,97	5,44	5,86
3	30750,62	338,12	72	68,7	-30,95	753,32	32,98	4,37	4,89	5,35	5,77
4	31233,25	338,19	72	69,5	-29,79	756,26	31,99	4,19	4,69	5,13	5,52
5	31577,99	338,19	72	75,6	-28,94	758,34	31,25	4,07	4,55	4,97	5,34
6	31784,83	338,12	72	74,9	-28,51	759,58	30,88	4,00	4,47	4,89	5,25
7	32060,62	338,19	72	73,3	-28,22	761,22	30,70	3,96	4,43	4,84	5,20
8	32198,52	338,12	72	70,2	-28,66	762,04	31,25	4,04	4,51	4,93	5,31
9	32336,41	337,98	72	69,5	-29,13	762,85	31,82	4,11	4,60	5,04	5,42
10	32474,31	337,98	72	66,9	-29,54	763,67	32,34	4,18	4,68	5,13	5,53
11	32612,2	337,98	72	65,9	-30,02	764,48	32,94	4,26	4,77	5,23	5,65
12	32681,15	337,84	72	63,5	-30,45	764,88	33,45	4,33	4,85	5,32	5,75

Tabla 7-16 Ciudad Valparaíso Suelo 2 El Monte

Edad [Mes]	E _{pcc} [Mpa]	Mr _{base} [Mpa]	k [kPa/mm]	R.H. [%]	T [°C]	lm [mm]	Φm	Deflexión por alabeo térmico [mm]			
								3.5 [m]	4.0 [m]	4.5 [m]	5.0 [m]
1	14685,83	336,4	72	65,7	-32,22	614,81	24,02	3,89	4,18	4,35	4,40
2	29923,25	338,19	72	67,5	-31,45	734,55	33,47	4,51	5,03	5,49	5,90
3	30750,62	338,12	73	68,7	-30,90	737,03	33,57	4,43	4,96	5,41	5,82
4	31233,25	338,19	73	69,5	-29,73	739,91	32,55	4,25	4,75	5,19	5,57
5	31577,99	338,19	73	75,6	-28,94	741,94	31,86	4,14	4,62	5,03	5,40
6	31784,83	338,12	73	74,9	-28,46	743,15	31,43	4,06	4,53	4,94	5,29
7	32060,62	338,19	73	73,3	-28,22	744,76	31,30	4,03	4,49	4,90	5,25
8	32198,52	338,12	73	70,2	-28,55	745,56	31,73	4,08	4,56	4,98	5,34
9	32336,41	337,98	73	69,5	-29,06	746,36	32,37	4,17	4,66	5,09	5,47
10	32474,31	337,98	73	66,9	-29,43	747,15	32,85	4,23	4,73	5,17	5,57
11	32612,2	337,98	73	65,9	-29,97	747,94	33,52	4,33	4,84	5,29	5,70
12	32681,15	337,98	73	63,5	-30,29	748,34	33,92	4,38	4,90	5,36	5,78

Tabla 7-17 Ciudad de Valparaíso Suelo 3 Curacaví

Edad [Mes]	E _{pcc} [Mpa]	Mr _{base} [Mpa]	k [kPa/mm]	R.H. [%]	T [°C]	lm [mm]	Φm	Deflexión por alabeo térmico [mm]			
								3.5 [m]	4.0 [m]	4.5 [m]	5.0 [m]
1	14685,83	336,4	40	65,7	-32,11	712,13	17,84	3,97	4,28	4,46	4,53
2	29923,25	338,12	40	67,5	-31,40	850,83	24,91	4,54	5,08	5,55	5,96
3	30750,62	338,05	40	68,7	-30,84	856,65	24,80	4,47	5,00	5,47	5,88
4	31233,25	338,12	40	69,5	-29,73	859,99	24,09	4,30	4,81	5,25	5,64
5	31577,99	338,12	40	75,6	-29,00	862,35	23,63	4,19	4,68	5,11	5,49
6	31784,83	338,05	40	74,9	-28,46	863,76	23,27	4,11	4,59	5,01	5,37
7	32060,62	338,05	40	73,3	-28,16	865,63	23,12	4,07	4,54	4,96	5,31
8	32198,52	338,05	40	70,2	-28,44	866,56	23,40	4,11	4,60	5,02	5,39
9	32336,41	337,84	40	69,5	-28,95	867,48	23,87	4,20	4,70	5,13	5,52
10	32474,31	337,91	40	66,9	-29,32	868,41	24,23	4,26	4,77	5,21	5,61
11	32612,2	337,84	40	65,9	-29,75	869,33	24,63	4,33	4,85	5,31	5,72
12	32681,15	337,77	40	63,5	-30,12	869,79	24,97	4,39	4,92	5,39	5,81

Tabla 7-18 Ciudad Valparaíso Suelo 3 El Monte

Edad [Mes]	E _{pcc} [Mpa]	Mr _{base} [Mpa]	k [kPa/mm]	R.H. [%]	T [°C]	lm [mm]	Φm	Deflexión por alabeo térmico [mm]			
								3.5 [m]	4.0 [m]	4.5 [m]	5.0 [m]
1	14685,83	336,4	40	65,7	-32,00	698,81	18,01	3,99	4,29	4,45	4,51
2	29923,25	338,12	40	67,5	-31,29	834,92	25,14	4,61	5,14	5,60	6,00
3	30750,62	338,05	40	68,7	-30,79	840,63	25,08	4,54	5,07	5,53	5,93
4	31233,25	338,05	40	69,5	-29,68	843,91	24,36	4,37	4,88	5,31	5,69
5	31577,99	338,12	40	75,6	-28,94	846,23	23,88	4,25	4,75	5,17	5,53
6	31784,83	338,05	40	74,9	-28,46	847,61	23,56	4,18	4,66	5,07	5,43
7	32060,62	338,05	40	73,3	-28,11	849,44	23,37	4,13	4,61	5,01	5,36
8	32198,52	338,05	40	70,2	-28,38	850,36	23,65	4,18	4,66	5,07	5,43
9	32336,41	337,84	40	69,5	-28,90	851,26	24,14	4,27	4,76	5,19	5,57
10	32474,31	337,91	40	66,9	-29,20	852,17	24,44	4,32	4,82	5,26	5,64
11	32612,2	337,84	40	65,9	-29,69	853,07	24,90	4,40	4,92	5,37	5,77
12	32681,15	337,77	40	63,5	-30,01	853,52	25,19	4,46	4,98	5,44	5,85

Tabla 7-19 Ciudad Valparaíso Suelo 7 Curacaví

Edad [Mes]	E _{pcc} [Mpa]	Mr _{base} [Mpa]	k [kPa/mm]	R.H. [%]	T [°C]	lm [mm]	Φm	Deflexión por alabeo térmico [mm]			
								3.5 [m]	4.0 [m]	4.5 [m]	5.0 [m]
1	14685,83	330,6	104	65,7	-32,25	581,58	28,20	3,54	3,78	3,91	3,94
2	29923,25	332,26	104	67,5	-31,51	694,84	39,32	4,20	4,69	5,10	5,45
3	30750,62	332,26	104	68,7	-31,01	699,60	39,24	4,15	4,63	5,04	5,39
4	31233,25	332,26	104	69,5	-29,84	702,33	38,05	3,98	4,43	4,83	5,16
5	31577,99	332,26	104	75,6	-29,00	704,26	37,18	3,86	4,30	4,67	4,99
6	31784,83	331,98	103	74,9	-28,51	707,11	36,49	3,79	4,22	4,58	4,89
7	32060,62	332,33	104	73,3	-28,16	706,93	36,38	3,75	4,17	4,52	4,82
8	32198,52	332,19	103	70,2	-28,55	709,40	36,78	3,81	4,24	4,61	4,92
9	32336,41	332,05	103	69,5	-29,02	710,16	37,46	3,88	4,33	4,71	5,03
10	32474,31	332,05	103	66,9	-29,43	710,92	38,08	3,95	4,40	4,80	5,14
11	32612,2	331,91	103	65,9	-29,91	711,67	38,78	4,03	4,49	4,90	5,25
12	32681,15	332,05	104	63,5	-30,29	710,33	39,51	4,08	4,56	4,98	5,34

Tabla 7-20 Ciudad Santiago Suelo 3 El Monte

Edad [Mes]	E _{pcc} [Mpa]	Mr _{base} [Mpa]	k [kPa/mm]	R.H. [%]	T [°C]	lm [mm]	Φm	Deflexión por alabeo térmico [mm]			
								3.5 [m]	4.0 [m]	4.5 [m]	5.0 [m]
1	14685,83	337,22	40	51,1	-32,27	712,13	17,93	3,99	4,31	4,49	4,56
2	29923,25	338,95	40	58,4	-31,68	850,83	25,13	4,59	5,13	5,61	6,03
3	30750,62	338,95	40	57,9	-30,95	856,65	24,89	4,49	5,02	5,49	5,90
4	31233,25	338,88	40	66,8	-30,40	859,99	24,64	4,41	4,93	5,39	5,80
5	31577,99	338,88	40	77	-29,83	862,36	24,31	4,33	4,84	5,29	5,68
6	31784,83	339,02	40	80,4	-29,57	863,77	24,17	4,29	4,80	5,24	5,63
7	32060,62	338,95	40	80,3	-29,61	865,63	24,31	4,30	4,81	5,26	5,66
8	32198,52	338,95	40	78,2	-29,38	866,56	24,17	4,27	4,77	5,21	5,61
9	32336,41	338,88	40	73,7	-29,57	867,49	24,38	4,30	4,81	5,26	5,66
10	32474,31	338,81	40	67,3	-29,70	868,41	24,54	4,32	4,84	5,29	5,70
11	32612,2	338,74	40	57,3	-29,86	869,33	24,72	4,35	4,87	5,33	5,74
12	32681,15	338,74	40	53,3	-29,56	869,79	24,50	4,31	4,82	5,27	5,67

Tabla 7-21 Ciudad Santiago Suelo 3 SH3 Der

Edad [Mes]	E _{pcc} [Mpa]	Mr _{base} [Mpa]	k [kPa/mm]	R.H. [%]	T [°C]	lm [mm]	Φm	Deflexión por alabeo térmico [mm]			
								3.5 [m]	4.0 [m]	4.5 [m]	5.0 [m]
1	14685,83	337,22	40	51,1	-32,37	725,37	17,77	3,97	4,30	4,50	4,59
2	29923,25	338,95	40	58,4	-31,73	866,65	24,86	4,52	5,05	5,54	5,97
3	30750,62	338,88	40	57,9	-31,06	872,57	24,67	4,43	4,96	5,43	5,86
4	31233,25	338,88	40	66,8	-30,51	875,98	24,42	4,35	4,87	5,34	5,76
5	31577,99	338,88	40	77	-29,89	878,39	24,06	4,26	4,77	5,22	5,63
6	31784,83	339,02	40	80,4	-29,62	879,82	23,92	4,22	4,73	5,18	5,58
7	32060,62	338,88	40	80,3	-29,61	881,72	24,01	4,22	4,73	5,18	5,59
8	32198,52	338,95	40	78,2	-29,44	882,67	23,93	4,20	4,70	5,15	5,56
9	32336,41	338,88	40	73,7	-29,63	883,61	24,13	4,23	4,74	5,20	5,61
10	32474,31	338,81	40	67,3	-29,76	884,55	24,29	4,26	4,77	5,23	5,65
11	32612,2	338,74	40	57,3	-29,97	885,49	24,51	4,29	4,81	5,28	5,70
12	32681,15	338,74	40	53,3	-29,68	885,96	24,30	4,25	4,76	5,22	5,64

Tabla 7-22 Ciudad Santiago Suelo 4 Curacaví

Edad [Mes]	E _{pcc} [Mpa]	Mr _{base} [Mpa]	k [kPa/mm]	R.H. [%]	T [°C]	lm [mm]	Φm	Deflexión por alabeo térmico [mm]			
								3.5 [m]	4.0 [m]	4.5 [m]	5.0 [m]
1	14685,83	337,36	62	51,1	-32,68	696,86	21,31	3,77	4,12	4,36	4,50
2	29923,25	338,95	62	58,4	-32,07	832,58	29,85	4,23	4,76	5,24	5,70
3	30750,62	339,02	62	57,9	-31,40	838,28	29,63	4,15	4,66	5,14	5,60
4	31233,25	339,02	62	66,8	-30,73	841,55	29,22	4,06	4,56	5,03	5,48
5	31577,99	338,95	62	77	-30,05	843,86	28,73	3,96	4,46	4,91	5,34
6	31784,83	339,15	62	80,4	-29,68	845,24	28,47	3,91	4,40	4,85	5,27
7	32060,62	339,02	62	80,3	-29,66	847,07	28,58	3,91	4,40	4,85	5,28
8	32198,52	339,02	62	78,2	-29,50	847,98	28,48	3,89	4,38	4,83	5,25
9	32336,41	338,95	62	73,7	-29,74	848,88	28,77	3,93	4,42	4,87	5,31
10	32474,31	338,88	62	67,3	-29,93	849,79	29,02	3,96	4,46	4,92	5,35
11	32612,2	338,88	62	57,3	-30,25	850,69	29,39	4,01	4,51	4,98	5,43
12	32681,15	338,81	62	53,3	-30,06	851,14	29,24	3,98	4,48	4,95	5,39

Tabla 7-23 Ciudad Santiago Suelo 4 El Monte

Edad [Mes]	Epcc [Mpa]	Mrbase [Mpa]	k [kPa/mm]	R.H. [%]	T [°C]	lm [mm]	Φm	Deflexión por alabeo térmico [mm]			
								3.5 [m]	4.0 [m]	4.5 [m]	5.0 [m]
1	14685,83	337,36	62	51,1	-32,63	685,27	21,52	3,80	4,15	4,37	4,50
2	29923,25	338,95	62	58,4	-32,01	818,73	30,13	4,29	4,82	5,31	5,76
3	30750,62	339,02	62	57,9	-31,29	824,33	29,86	4,20	4,72	5,20	5,64
4	31233,25	339,02	62	66,8	-30,68	827,55	29,51	4,12	4,63	5,10	5,53
5	31577,99	338,95	62	77	-30,00	829,82	29,01	4,02	4,52	4,97	5,40
6	31784,83	339,15	62	80,4	-29,62	831,18	28,74	3,97	4,46	4,91	5,32
7	32060,62	339,02	62	80,3	-29,66	832,98	28,90	3,98	4,47	4,92	5,35
8	32198,52	339,02	62	78,2	-29,44	833,87	28,75	3,95	4,44	4,88	5,30
9	32336,41	338,95	62	73,7	-29,68	834,76	29,04	3,99	4,48	4,94	5,36
10	32474,31	338,88	62	67,3	-29,87	835,65	29,29	4,02	4,52	4,98	5,41
11	32612,2	338,88	62	57,3	-30,19	836,54	29,66	4,07	4,58	5,04	5,48
12	32681,15	338,81	62	53,3	-29,95	836,98	29,46	4,03	4,54	5,00	5,44

Tabla 7-24 Ciudad Santiago Suelo 4 SH3 Der

Edad [Mes]	Epcc [Mpa]	Mrbase [Mpa]	k [kPa/mm]	R.H. [%]	T [°C]	lm [mm]	Φm	Deflexión por alabeo térmico [mm]			
								3.5 [m]	4.0 [m]	4.5 [m]	5.0 [m]
1	14685,83	337,36	62	51,1	-32,22	638,23	22,29	3,90	4,19	4,36	4,42
2	29923,25	339,02	62	58,4	-31,62	762,54	31,23	4,53	5,07	5,53	5,94
3	30750,62	339,02	62	57,9	-30,95	767,75	30,99	4,45	4,97	5,43	5,83
4	31233,25	339,02	62	66,8	-30,40	770,75	30,67	4,37	4,88	5,33	5,73
5	31577,99	338,95	62	77	-29,83	772,87	30,26	4,28	4,79	5,23	5,62
6	31784,83	339,15	62	80,4	-29,57	774,13	30,10	4,25	4,74	5,18	5,57
7	32060,62	339,02	62	80,3	-29,61	775,80	30,27	4,26	4,76	5,20	5,59
8	32198,52	339,02	62	78,2	-29,38	776,64	30,10	4,22	4,72	5,16	5,54
9	32336,41	338,95	62	73,7	-29,57	777,47	30,35	4,26	4,76	5,20	5,59
10	32474,31	338,88	62	67,3	-29,65	778,29	30,50	4,27	4,78	5,23	5,62
11	32612,2	338,88	62	57,3	-29,80	779,12	30,72	4,30	4,81	5,26	5,66
12	32681,15	338,81	62	53,3	-29,56	779,53	30,51	4,26	4,77	5,21	5,61

Tabla 7-25 Ciudad Santiago Suelo 7 El Monte

Edad [Mes]	E _{pcc} [Mpa]	Mr _{base} [Mpa]	k [kPa/mm]	R.H. [%]	T [°C]	lm [mm]	Φm	Deflexión por alabeo térmico [mm]			
								3.5 [m]	4.0 [m]	4.5 [m]	5.0 [m]
1	14685,83	331,43	104	51,1	-32,63	602,12	27,86	3,54	3,82	3,98	4,03
2	29923,25	333,09	104	58,4	-31,95	719,40	38,95	4,14	4,63	5,06	5,45
3	30750,62	333,15	104	57,9	-31,29	724,32	38,67	4,07	4,55	4,97	5,35
4	31233,25	333,15	104	66,8	-30,62	727,14	38,14	3,98	4,45	4,86	5,23
5	31577,99	333,09	104	77	-29,94	729,14	37,50	3,88	4,34	4,75	5,11
6	31784,83	333,22	104	80,4	-29,57	730,33	37,16	3,84	4,28	4,68	5,03
7	32060,62	333,09	104	80,3	-29,61	731,91	37,37	3,85	4,30	4,70	5,06
8	32198,52	333,29	104	78,2	-29,44	732,70	37,23	3,82	4,27	4,68	5,03
9	32336,41	332,95	103	73,7	-29,68	735,25	37,43	3,86	4,32	4,72	5,09
10	32474,31	332,95	103	67,3	-29,93	736,04	37,83	3,90	4,37	4,78	5,15
11	32612,2	332,74	103	57,3	-30,25	736,82	38,31	3,95	4,42	4,84	5,23
12	32681,15	332,88	103	53,3	-30,01	737,20	38,05	3,92	4,38	4,80	5,18

Tabla 7-26 Ciudad Santiago Suelo 7 SH3 Der

Edad [Mes]	E _{pcc} [Mpa]	Mr _{base} [Mpa]	k [kPa/mm]	R.H. [%]	T [°C]	lm [mm]	Φm	Deflexión por alabeo térmico [mm]			
								3.5 [m]	4.0 [m]	4.5 [m]	5.0 [m]
1	14685,83	331,43	105	51,1	-32,27	559,45	29,05	3,57	3,80	3,89	3,89
2	29923,25	333,09	106	58,4	-31,62	666,83	40,83	4,35	4,83	5,23	5,56
3	30750,62	333,15	106	57,9	-30,90	671,39	40,45	4,26	4,73	5,13	5,45
4	31233,25	333,15	106	66,8	-30,34	674,01	40,03	4,18	4,65	5,03	5,35
5	31577,99	333,09	106	77	-29,83	675,87	39,57	4,11	4,56	4,95	5,25
6	31784,83	333,29	106	80,4	-29,51	676,97	39,27	4,06	4,51	4,89	5,19
7	32060,62	333,09	106	80,3	-29,55	678,43	39,50	4,08	4,53	4,91	5,22
8	32198,52	333,29	106	78,2	-29,38	679,16	39,35	4,05	4,50	4,88	5,19
9	32336,41	333,02	105	73,7	-29,57	681,50	39,50	4,09	4,54	4,93	5,24
10	32474,31	332,95	105	67,3	-29,70	682,23	39,76	4,11	4,57	4,96	5,28
11	32612,2	332,74	105	57,3	-29,86	682,95	40,05	4,14	4,61	5,00	5,33
12	32681,15	332,88	105	53,3	-29,56	683,31	39,70	4,10	4,55	4,94	5,26

Tabla 7-27 Ciudad Santiago Suelo 10 Curacaví

Edad [Mes]	E _{pcc} [Mpa]	Mr _{base} [Mpa]	k [kPa/mm]	R.H. [%]	T [°C]	lm [mm]	Φm	Deflexión por alabeo térmico [mm]			
								3.5 [m]	4.0 [m]	4.5 [m]	5.0 [m]
1	14685,83	337,36	53	51,1	-32,42	688,36	20,24	3,96	4,31	4,55	4,67
2	29923,25	338,95	54	58,4	-31,84	818,59	28,63	4,47	5,02	5,52	5,99
3	30750,62	339,02	54	57,9	-31,12	824,19	28,37	4,38	4,91	5,41	5,87
4	31233,25	339,02	54	66,8	-30,57	827,40	28,09	4,30	4,83	5,31	5,77
5	31577,99	339,02	54	77	-29,94	829,68	27,66	4,21	4,72	5,20	5,64
6	31784,83	339,15	54	80,4	-29,62	831,03	27,45	4,16	4,67	5,14	5,58
7	32060,62	339,02	54	80,3	-29,61	832,83	27,56	4,17	4,68	5,15	5,58
8	32198,52	339,02	54	78,2	-29,44	833,72	27,46	4,14	4,65	5,12	5,55
9	32336,41	338,95	54	73,7	-29,63	834,61	27,69	4,17	4,69	5,16	5,60
10	32474,31	338,88	54	67,3	-29,82	835,50	27,94	4,20	4,72	5,20	5,65
11	32612,2	338,88	54	57,3	-30,02	836,39	28,18	4,24	4,76	5,25	5,70
12	32681,15	338,81	54	53,3	-29,79	836,83	28,00	4,20	4,72	5,20	5,65

Tabla 7-28 Ciudad Santiago Suelo 10 El Monte

Edad [Mes]	E _{pcc} [Mpa]	Mr _{base} [Mpa]	k [kPa/mm]	R.H. [%]	T [°C]	lm [mm]	Φm	Deflexión por alabeo térmico [mm]			
								3.5 [m]	4.0 [m]	4.5 [m]	5.0 [m]
1	14685,83	337,36	54	51,1	-32,37	672,94	20,64	3,99	4,33	4,55	4,66
2	29923,25	338,95	54	58,4	-31,73	804,00	28,88	4,53	5,09	5,58	6,05
3	30750,62	339,02	54	57,9	-31,06	809,50	28,66	4,45	4,99	5,48	5,93
4	31233,25	339,02	54	66,8	-30,51	812,66	28,37	4,37	4,90	5,38	5,83
5	31577,99	338,95	54	77	-29,89	814,90	27,95	4,27	4,80	5,27	5,70
6	31784,83	339,15	54	80,4	-29,62	816,23	27,79	4,24	4,75	5,22	5,65
7	32060,62	339,02	54	80,3	-29,61	817,99	27,90	4,24	4,75	5,22	5,66
8	32198,52	339,02	54	78,2	-29,44	818,87	27,80	4,22	4,73	5,19	5,62
9	32336,41	338,95	54	73,7	-29,63	819,74	28,03	4,24	4,77	5,23	5,67
10	32474,31	338,88	54	67,3	-29,76	820,62	28,22	4,27	4,79	5,27	5,71
11	32612,2	338,88	54	57,3	-29,97	821,49	28,48	4,31	4,84	5,32	5,77
12	32681,15	338,81	54	53,3	-29,68	821,92	28,23	4,26	4,79	5,26	5,70

Tabla 7-29 Ciudad Santiago Suelo 10 SH3 Der

Edad [Mes]	E _{pcc} [Mpa]	Mr _{base} [Mpa]	k [kPa/mm]	R.H. [%]	T [°C]	lm [mm]	Φm	Deflexión por alabeo térmico [mm]			
								3.5 [m]	4.0 [m]	4.5 [m]	5.0 [m]
1	14685,83	337,36	54	51,1	-32,27	660,66	20,83	4,02	4,35	4,56	4,64
2	29923,25	339,02	54	58,4	-31,62	789,33	29,14	4,60	5,15	5,64	6,09
3	30750,62	339,02	54	57,9	-30,95	794,73	28,92	4,51	5,05	5,54	5,98
4	31233,25	339,02	54	66,8	-30,40	797,83	28,63	4,43	4,96	5,44	5,87
5	31577,99	339,02	54	77	-29,83	800,03	28,24	4,34	4,86	5,33	5,76
6	31784,83	339,15	54	80,4	-29,57	801,33	28,09	4,31	4,82	5,29	5,70
7	32060,62	339,02	54	80,3	-29,61	803,07	28,25	4,32	4,84	5,30	5,73
8	32198,52	339,02	54	78,2	-29,38	803,93	28,09	4,28	4,80	5,26	5,68
9	32336,41	338,95	54	73,7	-29,57	804,79	28,32	4,32	4,84	5,30	5,73
10	32474,31	338,88	54	67,3	-29,70	805,64	28,52	4,34	4,86	5,34	5,77
11	32612,2	338,88	54	57,3	-29,86	806,50	28,72	4,37	4,90	5,38	5,81
12	32681,15	338,81	54	53,3	-29,56	806,92	28,47	4,32	4,84	5,32	5,75

Tabla 7-30 Ciudad Concepción Suelo 1 Concepción

Edad [Mes]	E _{pcc} [Mpa]	Mr _{base} [Mpa]	k [kPa/mm]	R.H. [%]	T [°C]	lm [mm]	Φm	Deflexión por alabeo térmico [mm]			
								3.5 [m]	4.0 [m]	4.5 [m]	5.0 [m]
1	14685,83	287,44	102	73,4	-31,35	552,82	28,17	3,63	3,85	3,94	3,94
2	29923,25	288,89	103	76,9	-30,45	658,88	39,24	4,33	4,81	5,20	5,52
3	30750,62	288,89	103	78,1	-30,01	663,39	39,21	4,28	4,75	5,15	5,47
4	31233,25	288,82	103	80,9	-29,34	665,97	38,64	4,19	4,64	5,03	5,34
5	31577,99	287,03	103	87,2	-29,27	667,80	38,76	4,18	4,64	5,03	5,34
6	31784,83	285,72	103	86,3	-28,57	668,88	37,95	4,07	4,52	4,89	5,18
7	32060,62	287,17	103	85,1	-28,33	670,33	37,80	4,04	4,48	4,85	5,14
8	32198,52	286,82	103	83,5	-28,11	671,05	37,58	4,01	4,44	4,81	5,10
9	32336,41	286,13	103	81,7	-28,29	671,77	37,90	4,04	4,48	4,85	5,15
10	32474,31	286,13	103	80	-28,48	672,48	38,24	4,07	4,52	4,90	5,21
11	32612,2	285,86	103	75,9	-28,52	673,19	38,37	4,08	4,54	4,91	5,22
12	32681,15	285,93	103	74,2	-29,01	673,55	39,07	4,17	4,63	5,02	5,35

Tabla 7-31 Ciudad Concepción Suelo 1 Los Horcones

Edad [Mes]	E _{pcc} [Mpa]	Mr _{base} [Mpa]	k [kPa/mm]	R.H. [%]	T [°C]	lm [mm]	Φm	Deflexión por alabeo térmico [mm]			
								3.5 [m]	4.0 [m]	4.5 [m]	5.0 [m]
1	14685,83	287,44	103	73,4	-31,15	530,24	28,88	3,60	3,78	3,84	3,81
2	29923,25	288,89	104	76,9	-30,23	631,98	40,20	4,41	4,87	5,24	5,51
3	30750,62	288,82	104	78,1	-29,84	636,30	40,23	4,37	4,84	5,20	5,48
4	31233,25	288,82	104	80,9	-29,18	638,79	39,65	4,27	4,72	5,08	5,35
5	31577,99	287,03	104	87,2	-29,27	640,53	39,99	4,30	4,76	5,12	5,40
6	31784,83	285,65	104	86,3	-28,57	641,57	39,16	4,19	4,63	4,98	5,24
7	32060,62	287,17	104	85,1	-28,33	642,97	39,00	4,15	4,59	4,94	5,20
8	32198,52	286,82	104	83,5	-28,05	643,66	38,69	4,11	4,54	4,88	5,14
9	32336,41	286,06	104	81,7	-28,17	644,34	38,95	4,13	4,57	4,92	5,18
10	32474,31	286,13	104	80	-28,32	645,03	39,23	4,16	4,61	4,96	5,22
11	32612,2	285,79	104	75,9	-28,36	645,71	39,37	4,17	4,62	4,97	5,24
12	32681,15	285,93	104	74,2	-28,73	646,05	39,93	4,24	4,69	5,06	5,34

Tabla 7-32 Ciudad Concepción Suelo 5 Concepción

Edad [Mes]	E _{pcc} [Mpa]	Mr _{base} [Mpa]	k [kPa/mm]	R.H. [%]	T [°C]	lm [mm]	Φm	Deflexión por alabeo térmico [mm]			
								3.5 [m]	4.0 [m]	4.5 [m]	5.0 [m]
1	14685,83	287,44	103	73,4	-31,34	572,44	27,59	3,53	3,78	3,91	3,93
2	29923,25	288,89	103	76,9	-30,51	683,93	38,35	4,17	4,65	5,05	5,42
3	30750,62	288,82	103	78,1	-30,17	688,61	38,44	4,14	4,62	5,03	5,39
4	31233,25	288,82	103	80,9	-29,51	691,30	37,90	4,05	4,52	4,92	5,27
5	31577,99	287,03	103	87,2	-29,33	693,19	37,87	4,03	4,49	4,90	5,25
6	31784,83	285,65	103	86,3	-28,62	694,32	37,07	3,92	4,37	4,76	5,10
7	32060,62	287,17	103	85,1	-28,38	695,83	36,92	3,89	4,34	4,72	5,05
8	32198,52	286,82	103	83,5	-28,11	696,57	36,65	3,85	4,29	4,67	5,00
9	32336,41	286,06	103	81,7	-28,29	697,31	36,96	3,88	4,33	4,71	5,05
10	32474,31	286,13	103	80	-28,43	698,05	37,23	3,91	4,36	4,75	5,09
11	32612,2	285,79	103	75,9	-28,52	698,79	37,42	3,92	4,38	4,77	5,12
12	32681,15	285,93	103	74,2	-29,01	699,16	38,11	4,00	4,47	4,88	5,23

Tabla 7-33 Ciudad Concepción Suelo 5 Los Horcones

Edad [Mes]	E _{pcc} [Mpa]	Mr _{base} [Mpa]	k [kPa/mm]	R.H. [%]	T [°C]	lm [mm]	Φm	Deflexión por alabeo térmico [mm]			
								3.5 [m]	4.0 [m]	4.5 [m]	5.0 [m]
1	14685,83	287,44	104	73,4	-30,98	528,96	28,86	3,53	3,72	3,78	3,76
2	29923,25	288,89	104	76,9	-30,18	631,98	40,13	4,38	4,84	5,21	5,50
3	30750,62	288,82	104	78,1	-29,79	636,30	40,16	4,34	4,80	5,18	5,47
4	31233,25	288,82	104	80,9	-29,23	638,79	39,71	4,26	4,71	5,08	5,36
5	31577,99	287,03	104	87,2	-29,33	640,53	40,07	4,29	4,75	5,12	5,42
6	31784,83	285,65	103	86,3	-28,62	643,12	39,04	4,17	4,62	4,98	5,26
7	32060,62	287,17	104	85,1	-28,33	642,97	39,00	4,13	4,57	4,93	5,20
8	32198,52	286,82	104	83,5	-28,00	643,66	38,62	4,08	4,51	4,86	5,13
9	32336,41	286,06	103	81,7	-28,06	645,90	38,61	4,09	4,53	4,88	5,16
10	32474,31	286,13	103	80	-28,15	646,59	38,81	4,11	4,55	4,91	5,19
11	32612,2	285,79	103	75,9	-28,19	647,27	38,94	4,12	4,56	4,93	5,20
12	32681,15	285,93	103	74,2	-28,56	647,61	39,50	4,19	4,64	5,01	5,30

Tabla 7-34 Ciudad Concepción Suelo 7 Concepción

Edad [Mes]	E _{pcc} [Mpa]	Mr _{base} [Mpa]	k [kPa/mm]	R.H. [%]	T [°C]	lm [mm]	Φm	Deflexión por alabeo térmico [mm]			
								3.5 [m]	4.0 [m]	4.5 [m]	5.0 [m]
1	14685,83	294,54	92	73,4	-31,20	567,29	26,62	3,45	3,65	3,72	3,71
2	29923,25	296,68	92	76,9	-30,34	677,78	36,96	4,22	4,68	5,04	5,32
3	30750,62	296,41	92	78,1	-29,95	682,42	36,99	4,19	4,64	5,01	5,29
4	31233,25	296,06	92	80,9	-29,34	685,08	36,52	4,10	4,54	4,90	5,18
5	31577,99	294,54	91	87,2	-29,27	688,83	36,43	4,10	4,54	4,91	5,19
6	31784,83	293,1	91	86,3	-28,62	689,95	35,74	4,00	4,43	4,78	5,05
7	32060,62	295,3	92	85,1	-28,33	689,57	35,72	3,96	4,38	4,73	5,00
8	32198,52	294,48	92	83,5	-28,05	690,30	35,44	3,91	4,33	4,68	4,94
9	32336,41	293,65	91	81,7	-28,18	692,93	35,48	3,94	4,36	4,71	4,98
10	32474,31	293,65	91	80	-28,32	693,67	35,74	3,97	4,40	4,75	5,02
11	32612,2	294,41	92	75,9	-28,41	692,51	36,12	3,98	4,42	4,77	5,05
12	32681,15	293,65	91	74,2	-28,79	694,77	36,45	4,05	4,49	4,86	5,15

Tabla 7-35 Ciudad Concepción Suelo 7 Los Horcones

Edad [Mes]	E _{pcc} [Mpa]	Mr _{base} [Mpa]	k [kPa/mm]	R.H. [%]	T [°C]	lm [mm]	Φm	Deflexión por alabeo térmico [mm]			
								3.5 [m]	4.0 [m]	4.5 [m]	5.0 [m]
1	14685,83	294,48	93	73,4	-30,98	543,98	27,30	3,43	3,59	3,63	3,60
2	29923,25	296,54	93	76,9	-30,12	649,93	37,88	4,31	4,74	5,08	5,32
3	30750,62	296,34	93	78,1	-29,79	654,37	37,98	4,28	4,72	5,06	5,31
4	31233,25	295,92	93	80,9	-29,23	656,93	37,56	4,20	4,63	4,97	5,21
5	31577,99	294,41	92	87,2	-29,27	660,51	37,61	4,22	4,66	5,00	5,25
6	31784,83	293,1	92	86,3	-28,57	661,58	36,83	4,11	4,53	4,85	5,09
7	32060,62	295,16	93	85,1	-28,33	661,23	36,88	4,07	4,49	4,82	5,05
8	32198,52	294,41	93	83,5	-28,00	661,94	36,53	4,02	4,43	4,75	4,98
9	32336,41	293,58	92	81,7	-28,06	664,43	36,49	4,04	4,45	4,77	5,01
10	32474,31	293,58	92	80	-28,15	665,14	36,68	4,06	4,47	4,80	5,04
11	32612,2	294,34	92	75,9	-28,19	665,85	36,80	4,07	4,49	4,82	5,06
12	32681,15	293,58	92	74,2	-28,56	666,20	37,33	4,13	4,56	4,90	5,15

Tabla 7-36 Ciudad Puerto Montt Suelo 5 Tijeral

Edad [Mes]	E _{pcc} [Mpa]	Mr _{base} [Mpa]	k [kPa/mm]	R.H. [%]	T [°C]	lm [mm]	Φm	Deflexión por alabeo térmico [mm]			
								3.5 [m]	4.0 [m]	4.5 [m]	5.0 [m]
1	14685,83	247,87	102	80,3	-29,28	531,37	27,01	3,27	3,43	3,47	3,45
2	29923,25	248,49	102	81,9	-28,95	634,86	38,12	4,17	4,61	4,95	5,20
3	30750,62	248,69	102	86,1	-28,95	639,21	38,65	4,20	4,64	5,00	5,27
4	31233,25	248,97	102	90,3	-29,07	641,70	39,11	4,23	4,69	5,05	5,33
5	31577,99	248,42	102	93	-29,16	643,46	39,45	4,26	4,72	5,09	5,38
6	31784,83	247,45	102	93,4	-28,35	644,51	38,47	4,13	4,57	4,92	5,19
7	32060,62	247,45	102	92,3	-28,16	645,90	38,38	4,10	4,54	4,89	5,16
8	32198,52	247,73	102	90,3	-27,83	646,60	38,01	4,05	4,48	4,83	5,09
9	32336,41	247,45	102	88,2	-27,79	647,29	38,03	4,05	4,48	4,82	5,09
10	32474,31	247,45	102	85,8	-27,09	647,98	37,16	3,93	4,35	4,68	4,93
11	32612,2	247,45	102	83,1	-26,47	648,66	36,38	3,83	4,23	4,54	4,78
12	32681,15	247,45	102	81,7	-26,29	649,01	36,18	3,80	4,20	4,51	4,74

Tabla 7-37 Ciudad Puerto Montt Suelo 7 Tijeral

Edad [Mes]	E _{pcc} [Mpa]	Mr _{base} [Mpa]	k [kPa/mm]	R.H. [%]	T [°C]	lm [mm]	Φm	Deflexión por alabeo térmico [mm]			
								3.5 [m]	4.0 [m]	4.5 [m]	5.0 [m]
1	14685,83	266,07	86	80,3	-29,09	532,09	25,34	3,14	3,24	3,24	3,20
2	29923,25	266,97	86	81,9	-28,73	635,72	35,72	4,19	4,58	4,86	5,03
3	30750,62	267,1	86	86,1	-28,79	640,07	36,29	4,23	4,64	4,93	5,12
4	31233,25	267,24	86	90,3	-29,01	642,57	36,86	4,29	4,71	5,01	5,21
5	31577,99	266,9	86	93	-29,11	644,33	37,19	4,32	4,74	5,06	5,27
6	31784,83	266,34	86	93,4	-28,35	645,38	36,33	4,19	4,60	4,89	5,09
7	32060,62	266,34	86	92,3	-28,16	646,78	36,24	4,17	4,57	4,87	5,06
8	32198,52	266,55	86	90,3	-27,77	647,47	35,82	4,10	4,50	4,79	4,98
9	32336,41	266,34	86	88,2	-27,67	648,17	35,77	4,09	4,49	4,78	4,96
10	32474,31	266,34	86	85,8	-26,98	648,86	34,95	3,97	4,35	4,62	4,80
11	32612,2	266,34	86	83,1	-26,30	649,54	34,13	3,85	4,21	4,48	4,64
12	32681,15	266,34	86	81,7	-26,12	649,89	33,94	3,83	4,18	4,44	4,60

Tabla 7-38 Ciudad Puerto Montt Suelo 11 Tijeral

Edad [Mes]	E _{pcc} [Mpa]	Mr _{base} [Mpa]	k [kPa/mm]	R.H. [%]	T [°C]	lm [mm]	Φm	Deflexión por alabeo térmico [mm]			
								3.5 [m]	4.0 [m]	4.5 [m]	5.0 [m]
1	14685,83	247,87	51	80,3	-29,18	619,13	19,30	3,91	4,21	4,38	4,43
2	29923,25	248,49	51	81,9	-28,84	739,71	27,22	4,59	5,13	5,61	6,03
3	30750,62	248,69	51	86,1	-28,90	744,77	27,66	4,63	5,17	5,67	6,10
4	31233,25	248,9	51	90,3	-29,07	747,67	28,04	4,67	5,23	5,73	6,18
5	31577,99	248,42	51	93	-29,16	749,73	28,28	4,69	5,26	5,76	6,22
6	31784,83	247,45	51	93,4	-28,35	750,94	27,58	4,55	5,09	5,58	6,02
7	32060,62	247,45	51	92,3	-28,22	752,57	27,58	4,53	5,07	5,56	6,00
8	32198,52	247,73	51	90,3	-27,83	753,38	27,25	4,47	5,00	5,47	5,90
9	32336,41	247,45	51	88,2	-27,79	754,18	27,26	4,46	4,99	5,47	5,90
10	32474,31	247,45	51	85,8	-27,04	754,98	26,59	4,33	4,84	5,30	5,71
11	32612,2	247,45	51	83,1	-26,41	755,78	26,02	4,22	4,72	5,16	5,54
12	32681,15	247,45	51	81,7	-26,23	756,18	25,88	4,19	4,68	5,12	5,50

Tabla 7-39 Ciudad Punta Arenas Suelo 1 Monte Aymond

Edad [Mes]	E _{pcc} [Mpa]	Mr _{base} [Mpa]	k [kPa/mm]	R.H. [%]	T [°C]	lm [mm]	Φm	Deflexión por alabeo térmico [mm]			
								3.5 [m]	4.0 [m]	4.5 [m]	5.0 [m]
1	14685,83	329,09	105	67,1	-28,44	527,86	26,62	3,16	3,30	3,32	3,29
2	29923,25	330,74	106	69,6	-28,07	629,17	37,69	4,04	4,44	4,75	4,97
3	30750,62	330,74	106	72,3	-27,51	633,48	37,45	3,97	4,37	4,68	4,89
4	31233,25	330,74	106	77,6	-27,01	635,95	37,06	3,90	4,29	4,59	4,80
5	31577,99	316,33	105	81,8	-27,16	639,14	37,29	3,93	4,34	4,65	4,87
6	31784,83	265,79	103	86,6	-28,07	643,03	38,28	4,10	4,53	4,87	5,12
7	32060,62	213,81	99	83,9	-27,16	650,58	36,47	3,96	4,37	4,69	4,91
8	32198,52	215,6	100	81,6	-26,61	649,65	35,98	3,87	4,26	4,57	4,78
9	32336,41	264,28	103	76,5	-26,46	645,79	36,39	3,84	4,23	4,53	4,75
10	32474,31	309,71	105	70,5	-26,43	643,60	36,79	3,83	4,23	4,53	4,74
11	32612,2	329,98	106	67,4	-26,25	642,85	36,79	3,80	4,19	4,49	4,71
12	32681,15	330,88	106	65,5	-25,90	643,20	36,34	3,75	4,13	4,42	4,62

Tabla 7-40 Ciudad Punta Arenas Suelo 1 Kon Aiken

Edad [Mes]	E _{pcc} [Mpa]	Mr _{base} [Mpa]	k [kPa/mm]	R.H. [%]	T [°C]	lm [mm]	Φm	Deflexión por alabeo térmico [mm]			
								3.5 [m]	4.0 [m]	4.5 [m]	5.0 [m]
1	14685,83	329,09	103	67,1	-28,53	551,63	25,76	3,16	3,33	3,39	3,37
2	29923,25	330,74	104	69,6	-28,18	657,47	36,50	3,94	4,36	4,69	4,94
3	30750,62	330,74	105	72,3	-27,62	660,39	36,44	3,87	4,28	4,61	4,86
4	31233,25	330,74	105	77,6	-27,12	662,97	36,06	3,80	4,20	4,53	4,78
5	31577,99	314,26	104	81,8	-27,16	666,31	36,14	3,82	4,22	4,56	4,81
6	31784,83	266,97	102	86,6	-28,01	670,43	37,02	3,96	4,40	4,75	5,03
7	32060,62	215,74	99	83,9	-27,16	676,68	35,52	3,84	4,25	4,59	4,85
8	32198,52	221,8	99	81,6	-26,61	677,43	34,87	3,75	4,15	4,48	4,73
9	32336,41	270,07	102	76,5	-26,52	673,33	35,35	3,73	4,13	4,46	4,70
10	32474,31	311,3	104	70,5	-26,54	670,97	35,81	3,74	4,14	4,47	4,71
11	32612,2	329,98	105	67,4	-26,41	670,16	35,88	3,72	4,11	4,44	4,69
12	32681,15	330,88	105	65,5	-26,01	670,52	35,38	3,65	4,04	4,36	4,59

Tabla 7-41 Ciudad Punta Arenas Suelo 5 Monte Aymond

Edad [Mes]	E _{pcc} [Mpa]	Mr _{base} [Mpa]	k [kPa/mm]	R.H. [%]	T [°C]	lm [mm]	Φm	Deflexión por alabeo térmico [mm]			
								3.5 [m]	4.0 [m]	4.5 [m]	5.0 [m]
1	14685,83	329,09	105	67,1	-28,42	548,98	25,91	3,12	3,29	3,35	3,34
2	29923,25	330,74	105	69,6	-28,12	655,90	36,60	3,91	4,33	4,67	4,93
3	30750,62	330,74	105	72,3	-27,62	660,39	36,44	3,85	4,27	4,61	4,87
4	31233,25	330,74	105	77,6	-27,18	662,97	36,14	3,79	4,20	4,54	4,80
5	31577,99	322,95	105	81,8	-27,27	664,75	36,46	3,82	4,23	4,57	4,84
6	31784,83	289,79	103	86,6	-28,12	668,90	37,35	3,96	4,40	4,77	5,06
7	32060,62	248,28	101	83,9	-27,22	673,45	35,96	3,83	4,24	4,59	4,87
8	32198,52	247,25	101	81,6	-26,61	674,17	35,22	3,73	4,13	4,47	4,73
9	32336,41	285,24	103	76,5	-26,41	671,76	35,38	3,70	4,10	4,42	4,69
10	32474,31	316,61	105	70,5	-26,43	669,39	35,83	3,70	4,10	4,43	4,69
11	32612,2	330,4	105	67,4	-26,25	670,17	35,66	3,67	4,07	4,40	4,66
12	32681,15	330,88	105	65,5	-25,90	670,52	35,23	3,62	4,01	4,33	4,58

Tabla 7-42 Ciudad Punta Arenas Suelo 5 Kon Aiken

Edad [Mes]	E _{pcc} [Mpa]	Mr _{base} [Mpa]	k [kPa/mm]	R.H. [%]	T [°C]	lm [mm]	Φm	Deflexión por alabeo térmico [mm]			
								3.5 [m]	4.0 [m]	4.5 [m]	5.0 [m]
1	14685,83	329,09	105	67,1	-28,57	580,18	25,09	3,10	3,31	3,41	3,42
2	29923,25	330,74	105	69,6	-28,23	693,18	35,40	3,75	4,18	4,54	4,85
3	30750,62	330,74	105	72,3	-27,79	697,92	35,33	3,71	4,13	4,49	4,80
4	31233,25	330,74	105	77,6	-27,23	700,64	34,89	3,63	4,04	4,40	4,70
5	31577,99	322,54	104	81,8	-27,27	704,22	34,96	3,65	4,06	4,42	4,73
6	31784,83	288,34	103	86,6	-28,07	706,93	35,93	3,77	4,21	4,59	4,92
7	32060,62	252,55	101	83,9	-27,22	711,79	34,64	3,65	4,07	4,43	4,75
8	32198,52	253,11	101	81,6	-26,61	712,56	33,94	3,56	3,97	4,32	4,62
9	32336,41	289,51	103	76,5	-26,46	709,99	34,15	3,54	3,94	4,29	4,58
10	32474,31	317,71	104	70,5	-26,54	709,14	34,50	3,55	3,96	4,31	4,61
11	32612,2	330,33	104	67,4	-26,41	709,95	34,40	3,54	3,94	4,29	4,58
12	32681,15	330,88	105	65,5	-26,06	708,63	34,15	3,48	3,88	4,22	4,51

Tabla 7-43 Ciudad Punta Arenas Suelo 13 Monte Aymond

Edad [Mes]	E _{pcc} [Mpa]	Mr _{base} [Mpa]	k [kPa/mm]	R.H. [%]	T [°C]	lm [mm]	Φm	Deflexión por alabeo térmico [mm]			
								3.5 [m]	4.0 [m]	4.5 [m]	5.0 [m]
1	14685,83	329,09	94	67,1	-28,42	564,38	24,52	3,10	3,27	3,33	3,31
2	29923,25	330,74	94	69,6	-28,12	674,30	34,63	3,90	4,31	4,65	4,90
3	30750,62	330,74	94	72,3	-27,62	678,92	34,48	3,84	4,25	4,58	4,84
4	31233,25	330,74	94	77,6	-27,18	681,57	34,20	3,78	4,19	4,52	4,77
5	31577,99	322,88	93	81,8	-27,27	685,23	34,31	3,81	4,22	4,55	4,81
6	31784,83	289,79	92	86,6	-28,12	688,05	35,30	3,96	4,39	4,75	5,03
7	32060,62	248,28	90	83,9	-27,22	693,15	33,94	3,82	4,23	4,57	4,84
8	32198,52	247,25	90	81,6	-26,61	693,89	33,25	3,72	4,12	4,45	4,70
9	32336,41	285,17	92	76,5	-26,41	691,00	33,43	3,69	4,08	4,41	4,66
10	32474,31	316,61	93	70,5	-26,43	690,01	33,72	3,70	4,09	4,42	4,67
11	32612,2	330,4	93	67,4	-26,25	690,81	33,56	3,67	4,06	4,38	4,63
12	32681,15	330,88	93	65,5	-25,90	691,18	33,15	3,61	4,00	4,31	4,55

Tabla 7-44 Ciudad Punta Arenas Suelo 13 Kon Aiken

Edad [Mes]	E _{pcc} [Mpa]	Mr _{base} [Mpa]	k [kPa/mm]	R.H. [%]	T [°C]	lm [mm]	Φm	Deflexión por alabeo térmico [mm]			
								3.5 [m]	4.0 [m]	4.5 [m]	5.0 [m]
1	14685,83	329,09	94	67,1	-28,51	585,83	23,99	3,10	3,29	3,37	3,37
2	29923,25	330,74	94	69,6	-28,18	699,93	33,84	3,79	4,21	4,57	4,85
3	30750,62	330,74	93	72,3	-27,73	706,60	33,58	3,75	4,17	4,52	4,80
4	31233,25	330,74	93	77,6	-27,23	709,36	33,23	3,68	4,09	4,43	4,71
5	31577,99	322,67	93	81,8	-27,27	711,27	33,46	3,70	4,11	4,46	4,74
6	31784,83	289,03	91	86,6	-28,07	716,17	34,18	3,83	4,26	4,63	4,94
7	32060,62	252,83	90	83,9	-27,22	719,54	33,10	3,70	4,12	4,47	4,77
8	32198,52	253,38	90	81,6	-26,61	720,32	32,43	3,61	4,01	4,35	4,63
9	32336,41	287,51	91	76,5	-26,46	719,25	32,49	3,59	3,99	4,33	4,60
10	32474,31	316,88	93	70,5	-26,48	716,24	32,95	3,59	4,00	4,33	4,61
11	32612,2	330,33	93	67,4	-26,36	717,06	32,87	3,58	3,98	4,31	4,59
12	32681,15	330,88	93	65,5	-26,01	717,44	32,47	3,53	3,92	4,25	4,51

ANEXO D. GRÁFICOS DE RESULTADOS DE LA REDES NEURONALES

Resultados con una capa oculta

Para conocer la tendencia del error y del coeficiente de correlación con respecto a las iteraciones en las fases de aprendizaje y simulación, se presentan los siguientes gráficos. Se observa una tendencia decreciente al aumentar las iteraciones hasta llegar a entre 1000 y 2000. Posterior a ese valor, el error oscila con respecto a un valor, siendo más estable el comportamiento. Ocurre lo mismo para el caso del coeficiente de correlación.

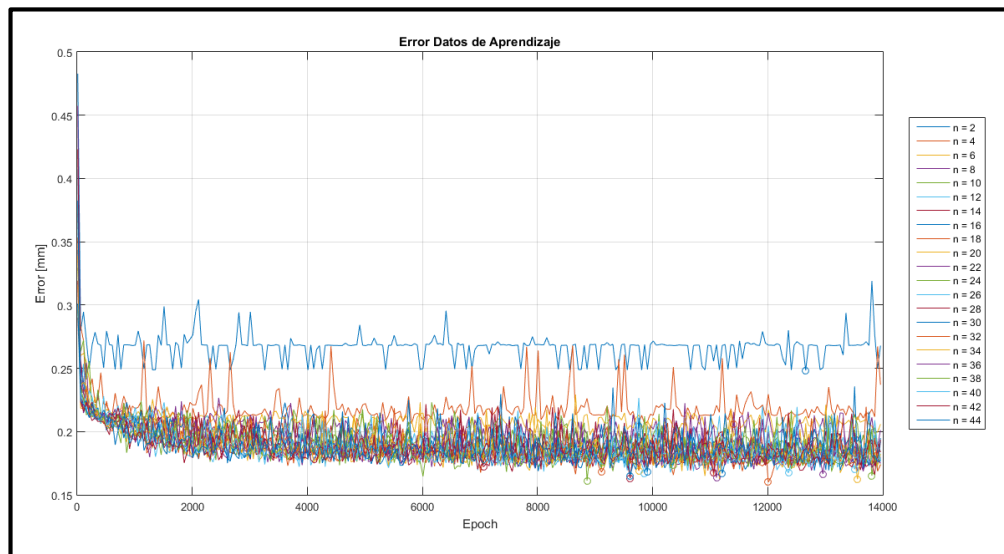


Figura 7-2 Gráfico de Error en Datos de Aprendizaje.

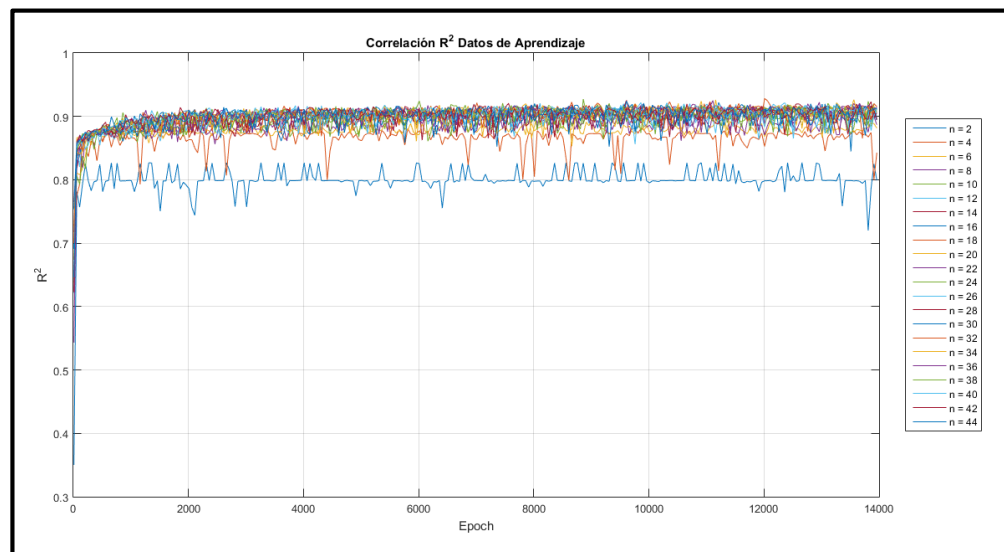


Figura 7-3 Gráfico de Correlación en Datos de Aprendizaje.

Como se puede ver en las Figura 7-4 y Figura 7-5, para los datos de simulación, el error y la correlación tienen un comportamiento más errático, esto se debe a que la RNA se presenta con datos que no están presentes en la fase de aprendizaje, y al tener solo una capa oculta, no tiene la capacidad de procesar de mejor manera los datos de entrada.

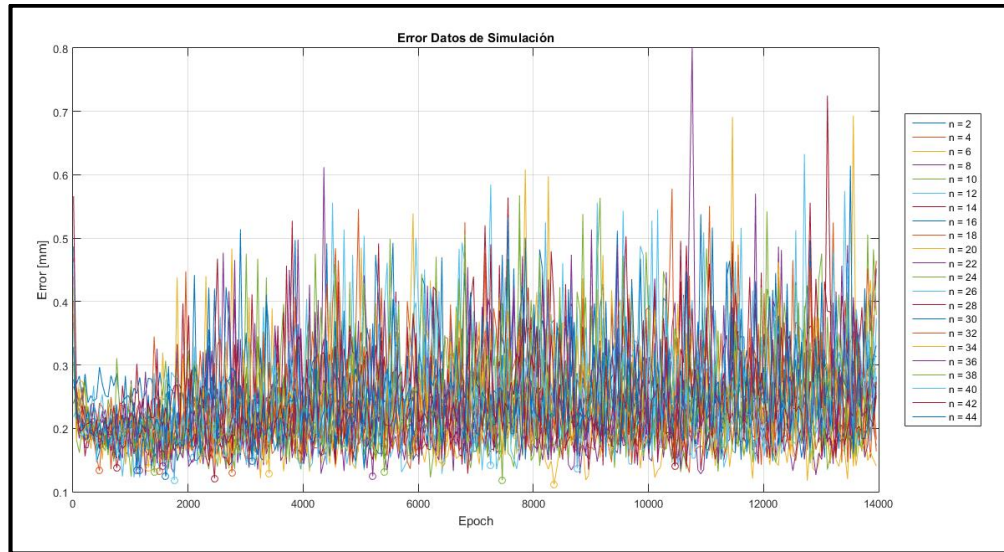


Figura 7-4 Gráfico de Error de Datos de Simulación.

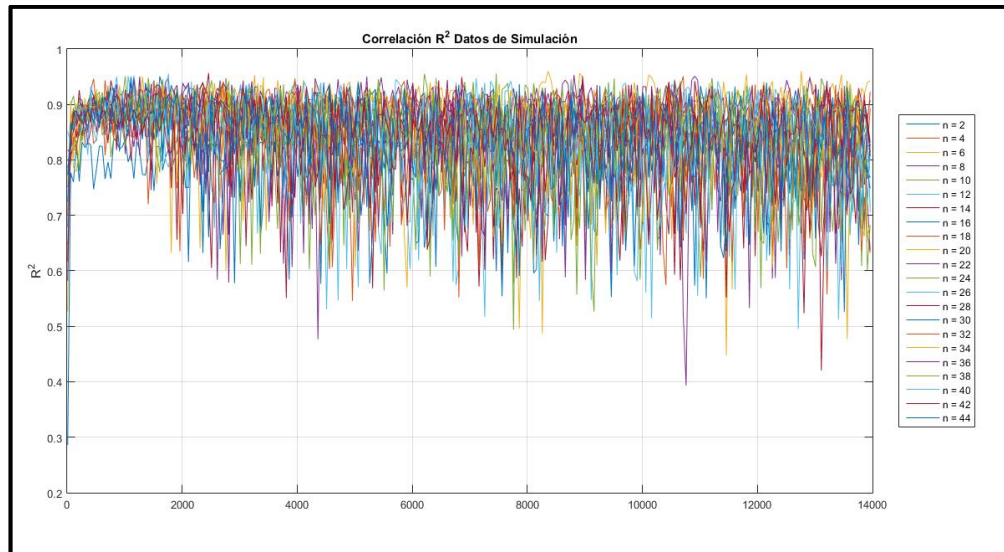


Figura 7-5 Gráfico de Correlación de Datos de Simulación.

En los siguientes gráficos se muestran los errores mínimos y los errores de prueba para una capa oculta en la RNA.

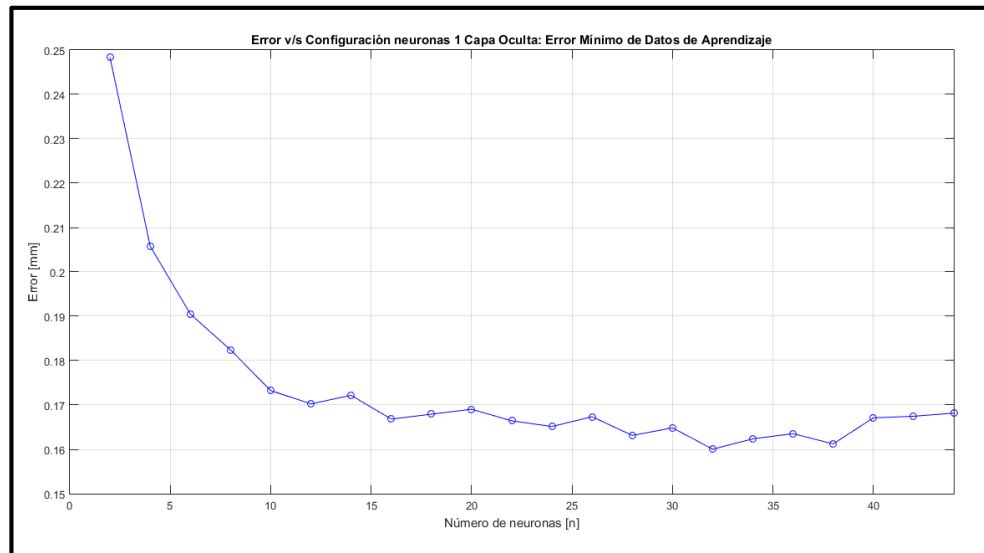


Figura 7-6 Error v/s 1 capa oculta: Error Mínimo de Datos de Aprendizaje.

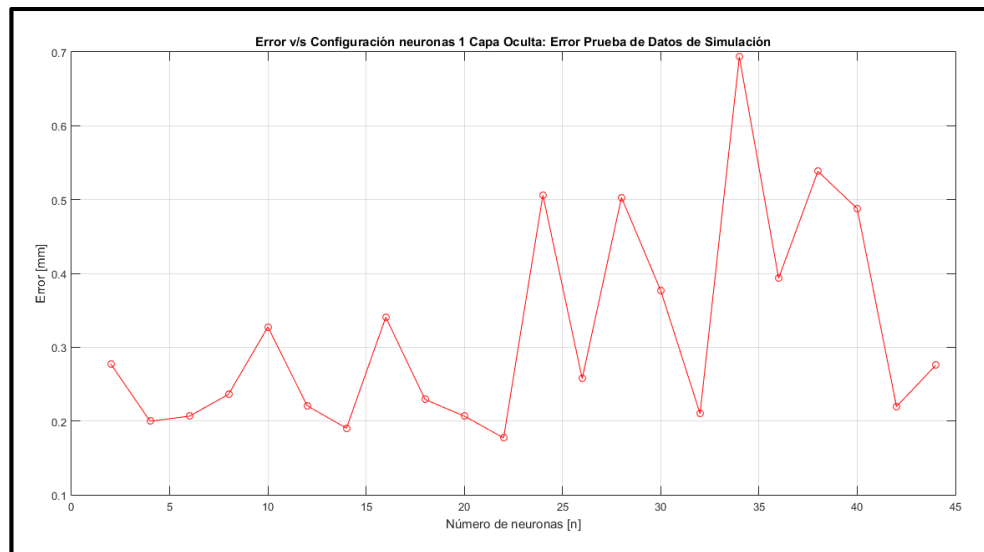


Figura 7-7 Error v/s 1 capa oculta: Error Prueba de Datos de Simulación.

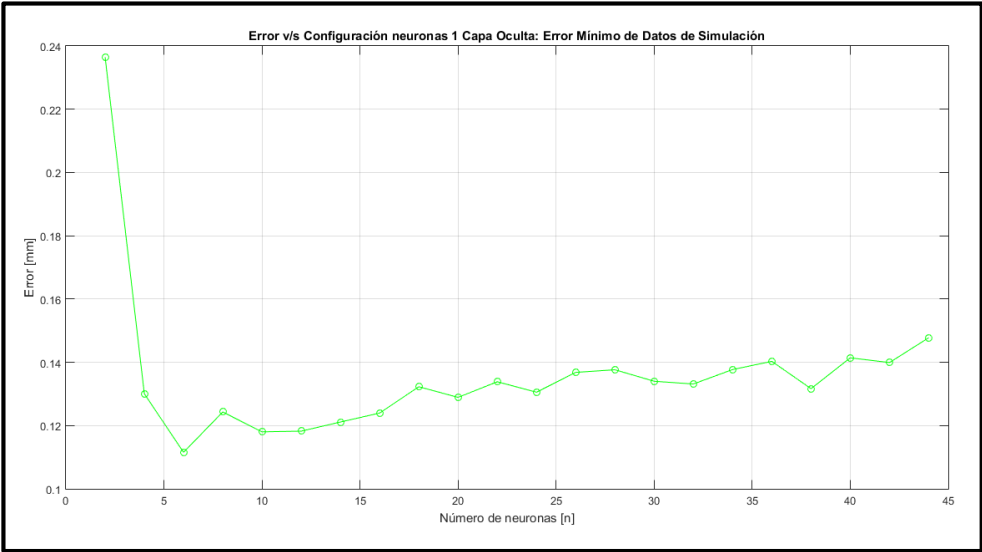


Figura 7-8 Error v/s 1 capa oculta: Error Mínimo de Datos de Simulación.

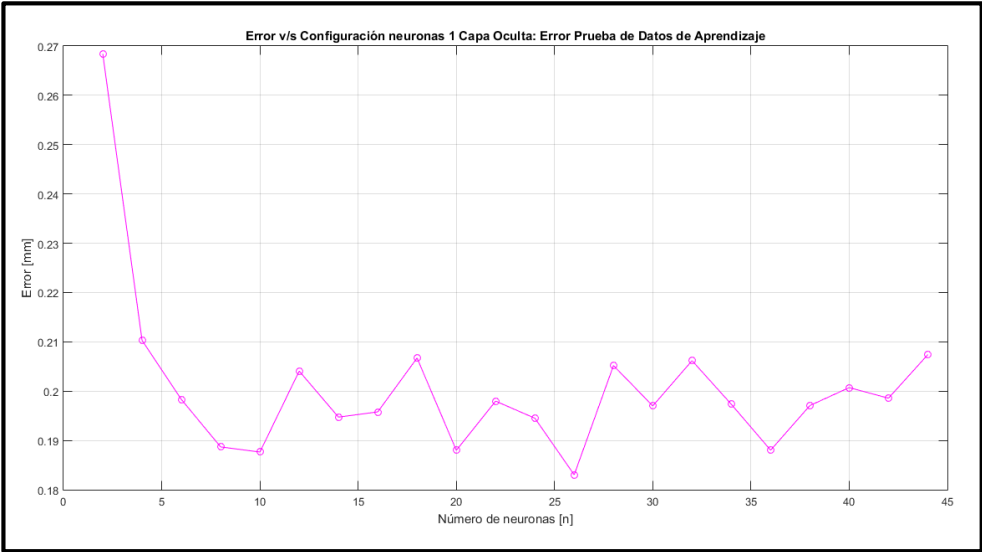


Figura 7-9 Error v/s 1 capa oculta: Error Prueba de Datos de Aprendizaje.

Resultados con dos capas ocultas

A continuación, se muestran los gráficos con los errores mínimos obtenidos para dos capas ocultas, se dividen en dos partes para una mejor comprensión de los resultados.

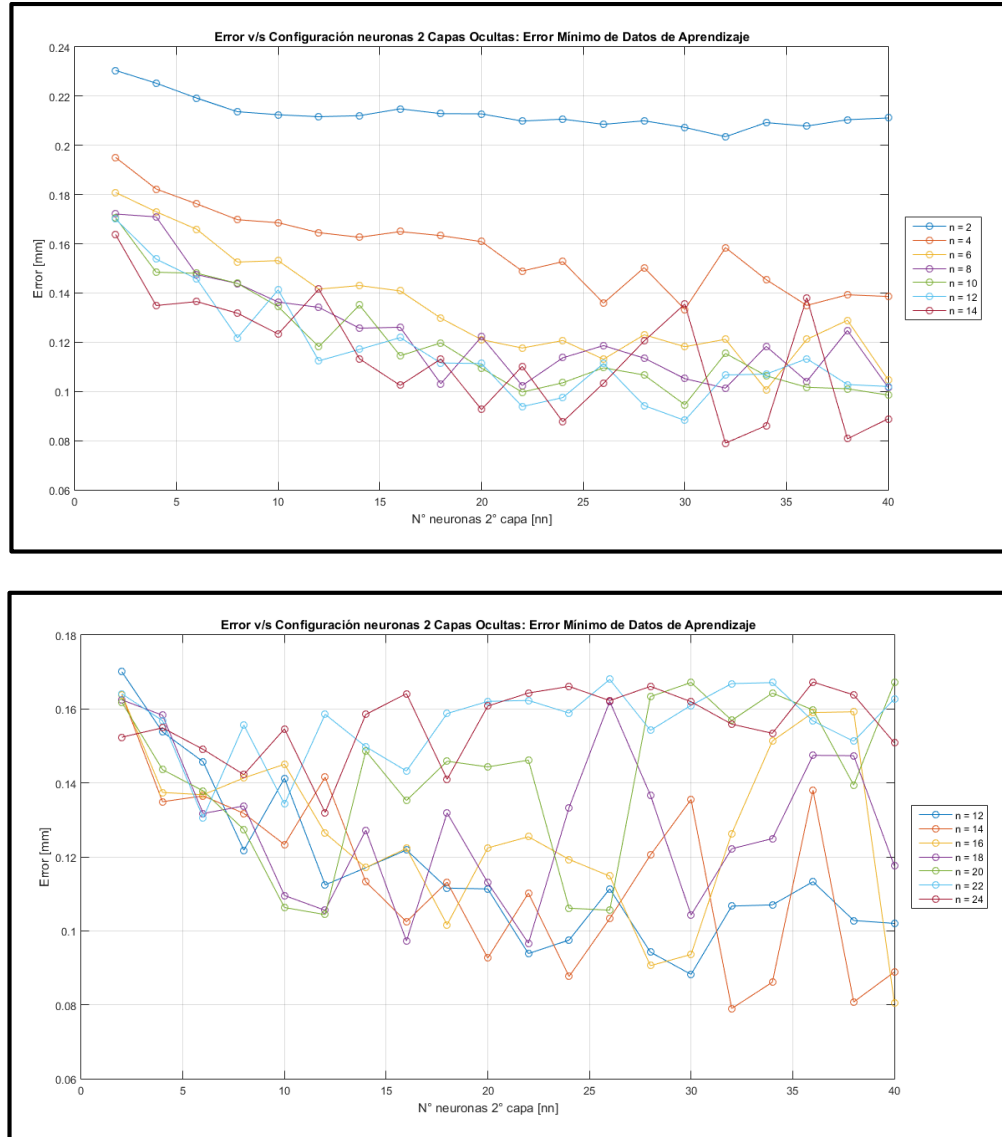


Figura 7-10 Error v/s 2 capas ocultas: Error Mínimo de Datos de Aprendizaje.

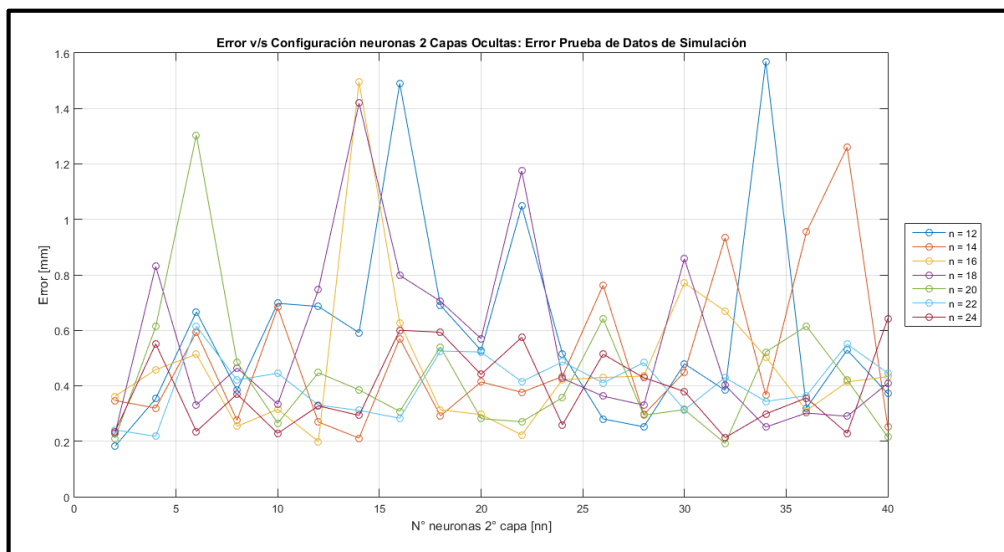
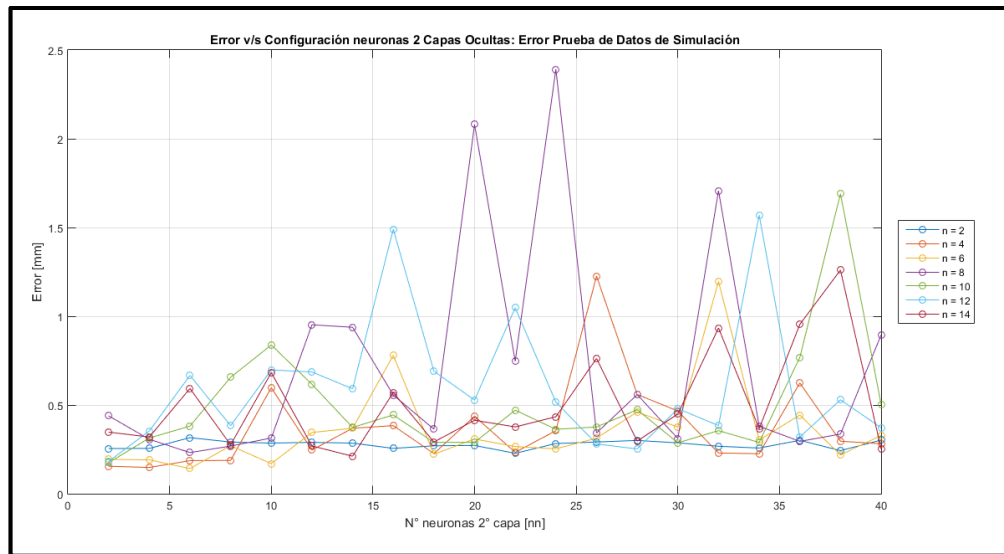


Figura 7-11 Error v/s 2 capas ocultas: Error Prueba de Datos de Simulación.

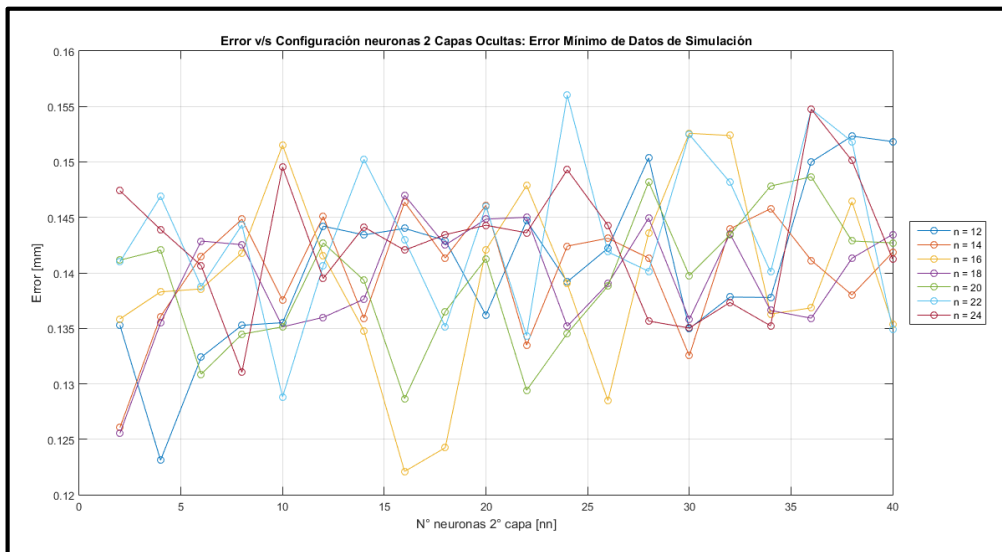
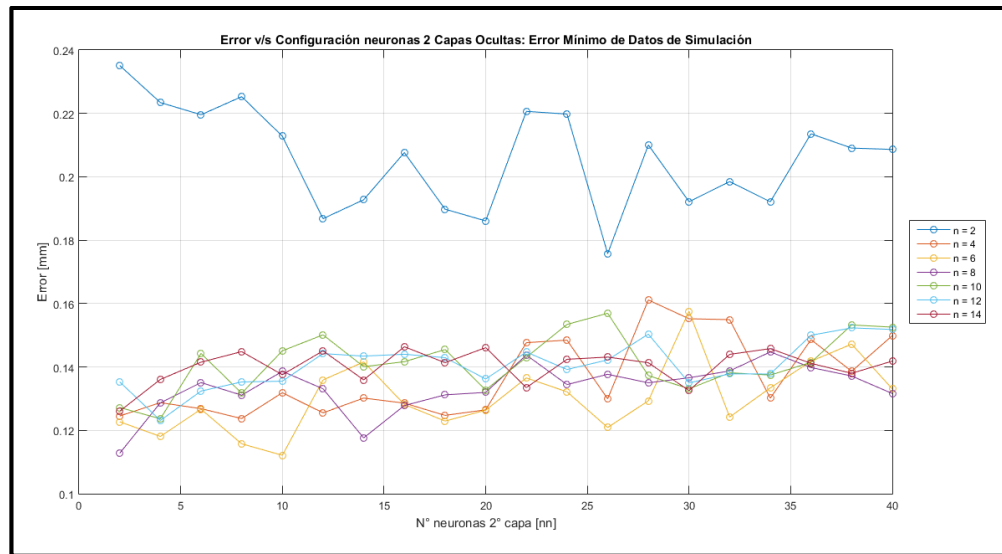


Figura 7-12 Error v/s 2 capas ocultas: Error Mínimo de Datos de Simulación.

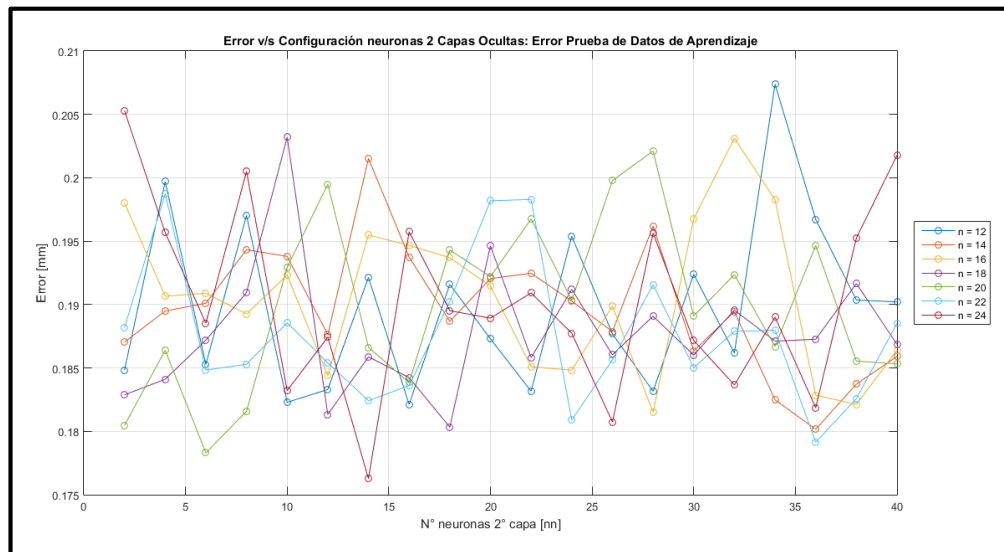
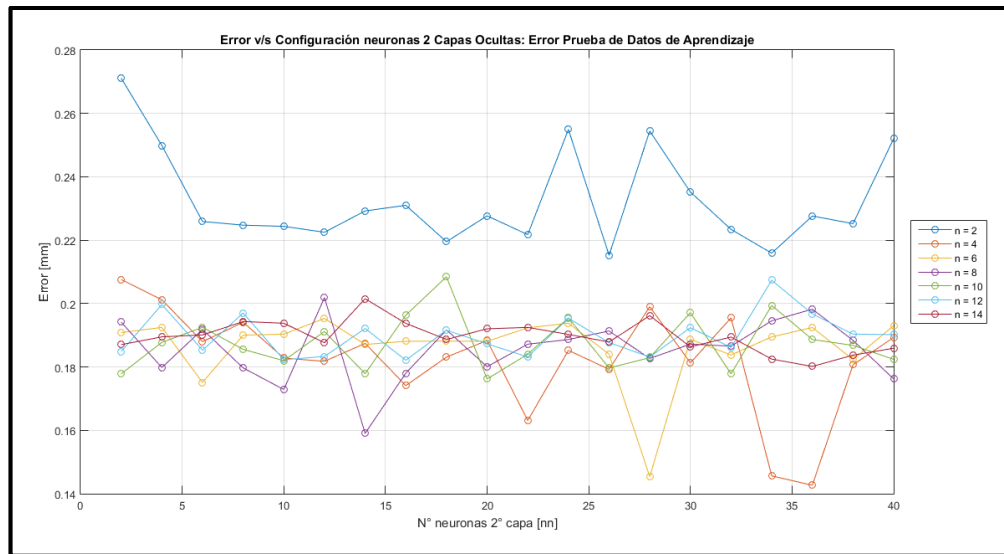


Figura 7-13 Error v/s 2 capas ocultas: Error Prueba de Datos de Aprendizaje.

Resultados con tres capas ocultas

A continuación, se muestran los gráficos con los errores mínimos obtenidos para tres capas ocultas, se dividen en dos partes para una mejor comprensión de los resultados. Además, para cada agrupación de gráficos se especifica la cantidad de neuronas de la primera capa oculta.

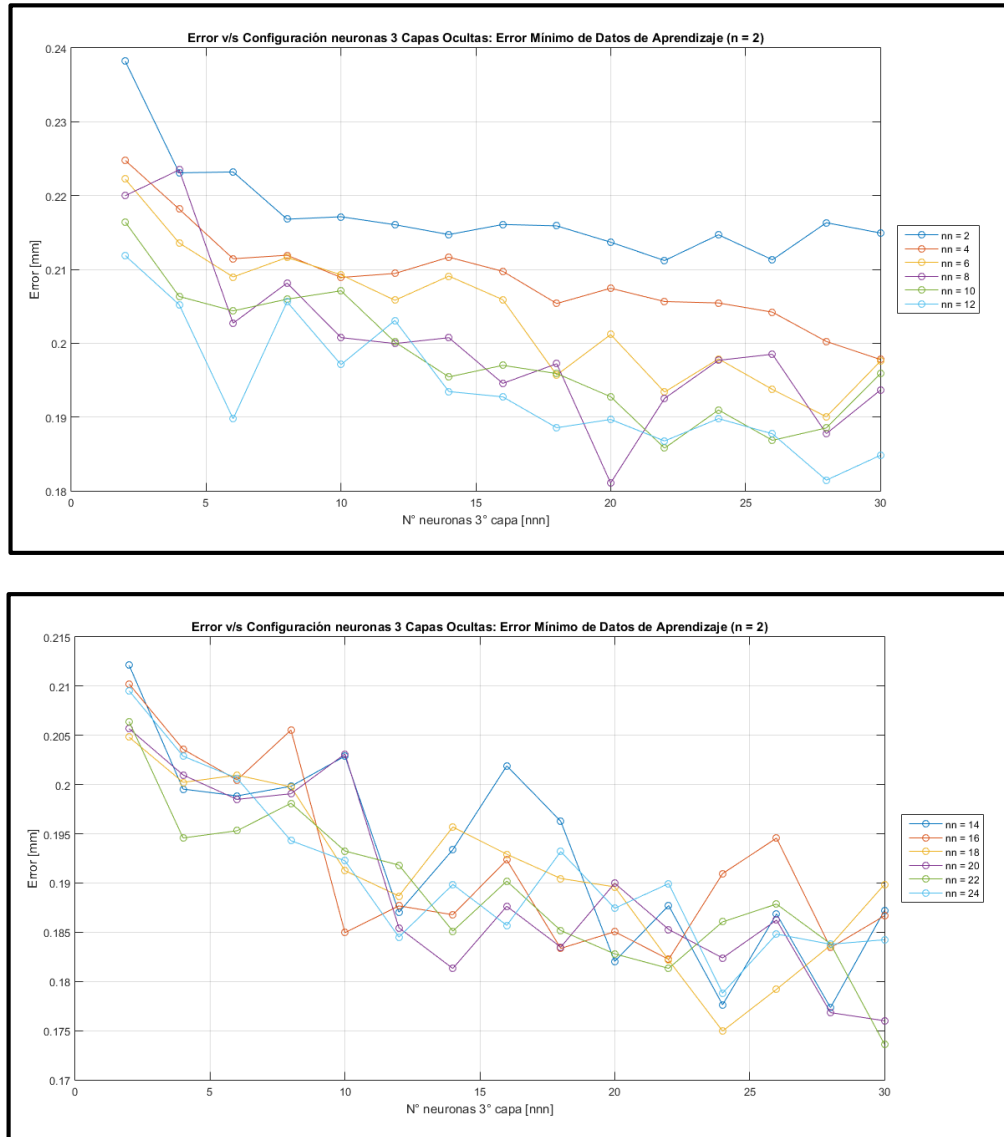


Figura 7-14 Error v/s 3 capas ocultas: Error Mínimo de Datos de Aprendizaje para 1° capa con 2 neuronas.

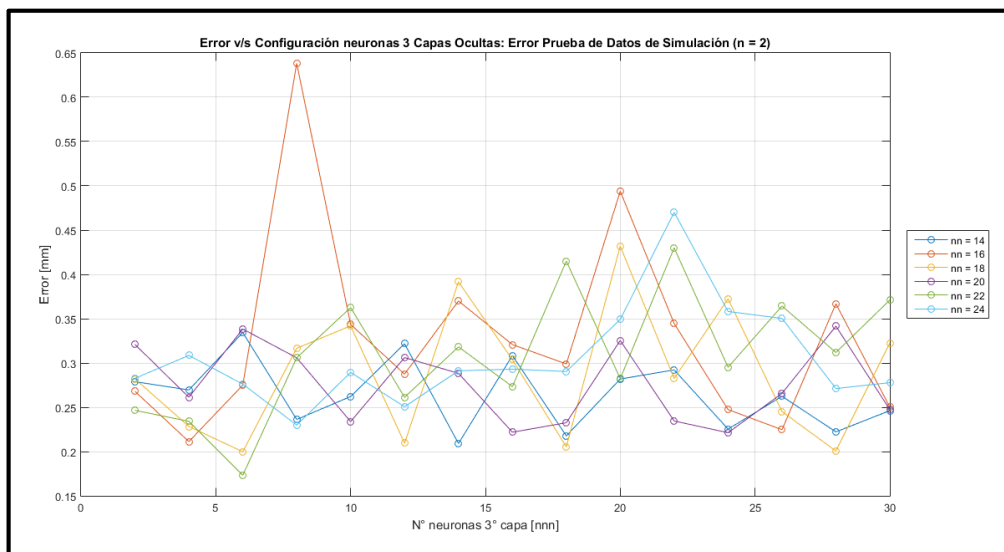
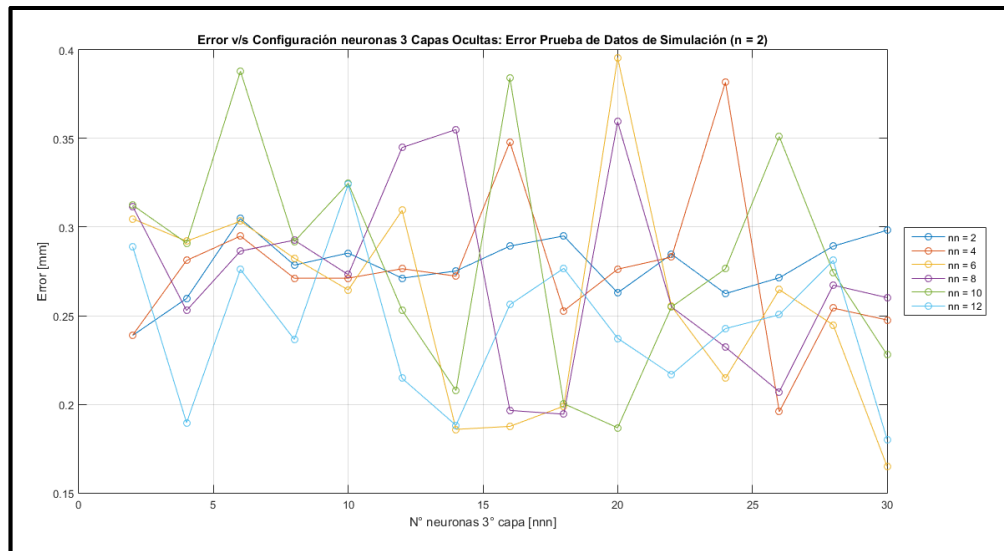


Figura 7-15 Error v/s 3 capas ocultas: Error Prueba de Datos de Simulación para 1° capa con 2 neuronas.

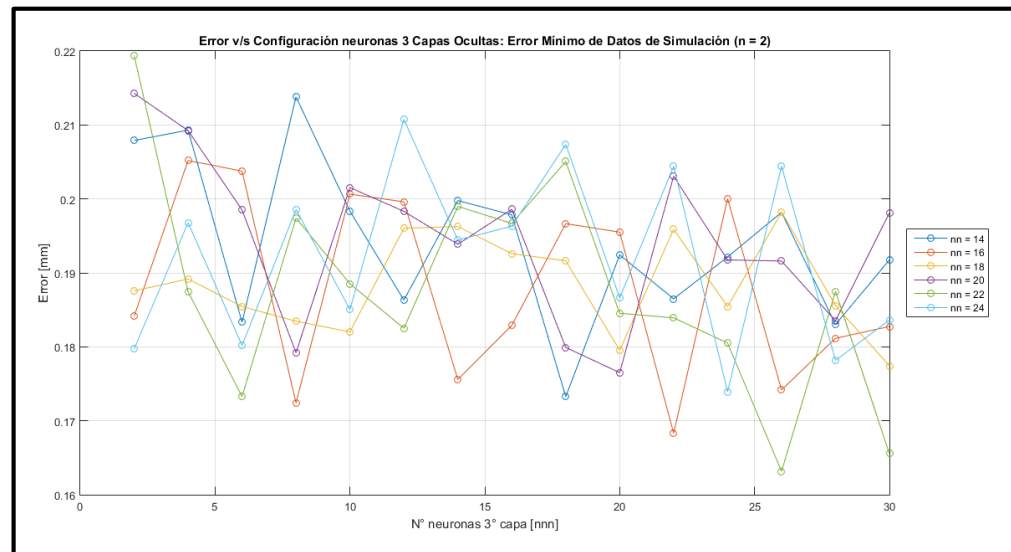
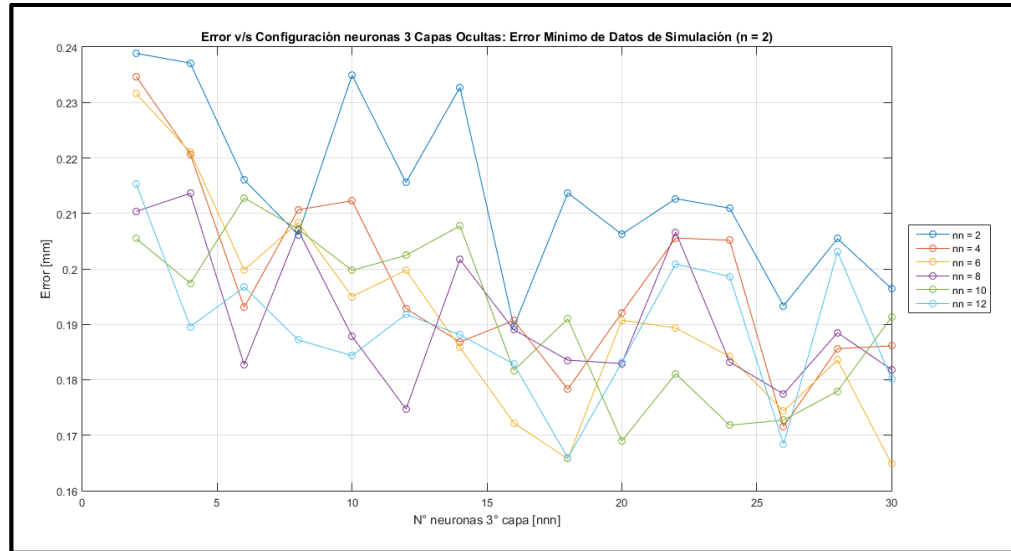


Figura 7-16 Error v/s 3 capas ocultas: Error Mínimo de Datos de Simulación para 1° capa con 2 neuronas.

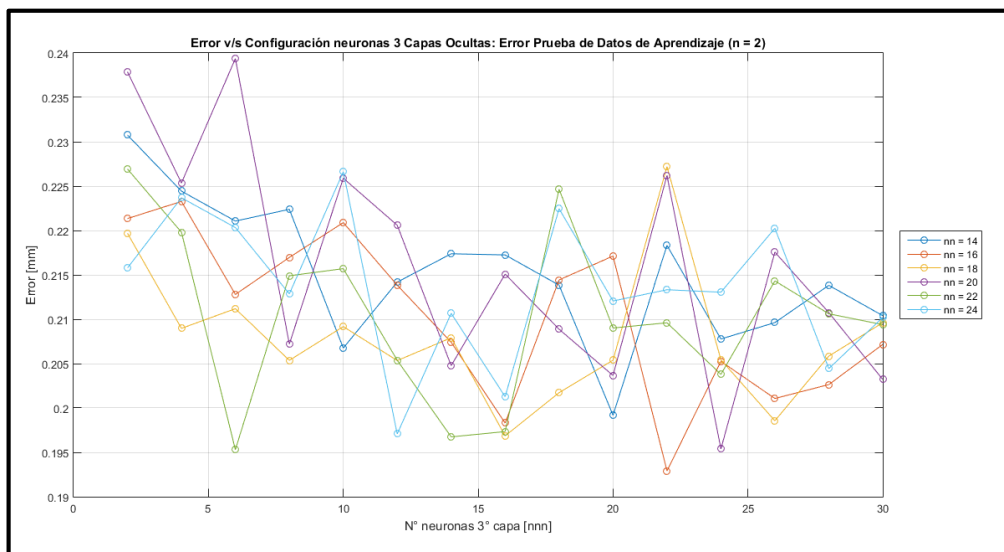
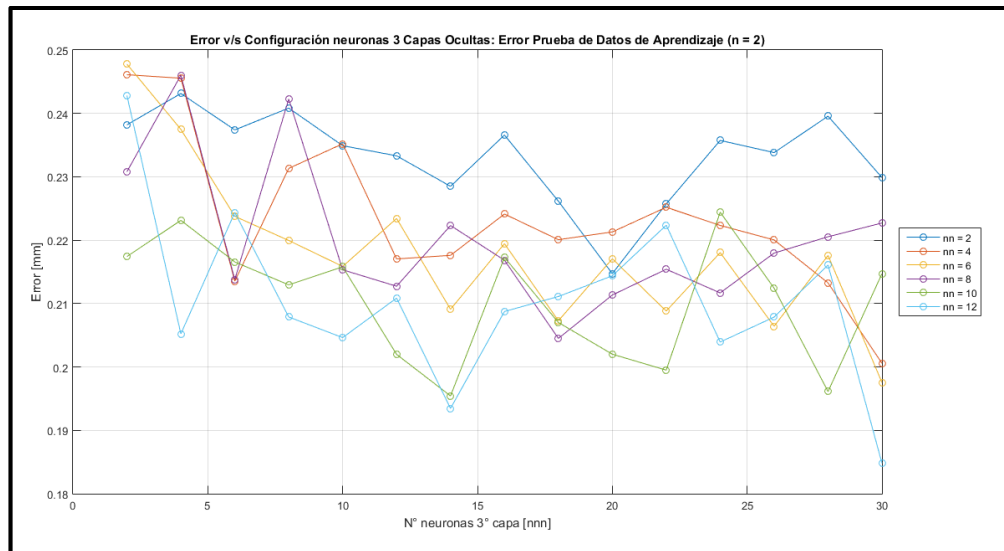


Figura 7-17 Error v/s 3 capas ocultas: Error Prueba de Datos de Aprendizaje para 1° capa con 2 neuronas.

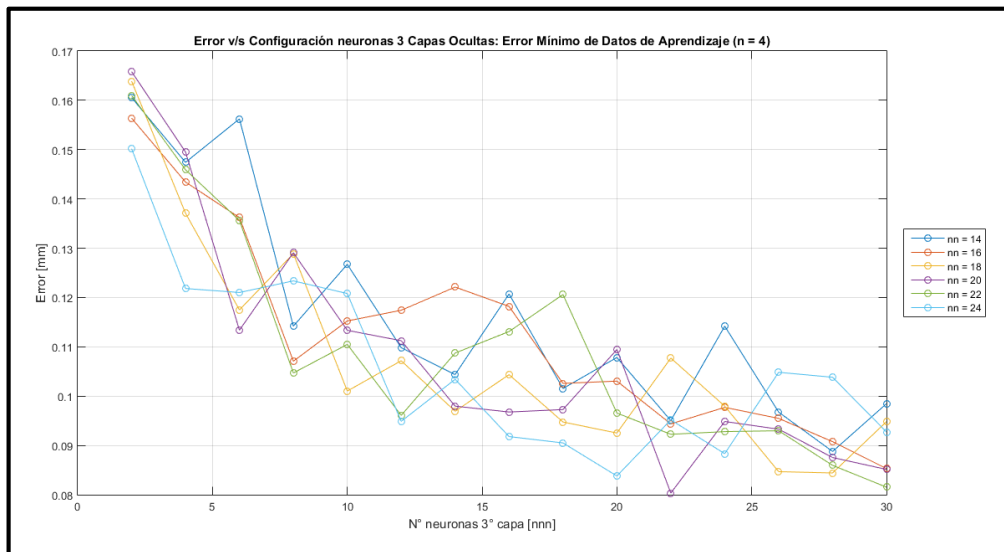
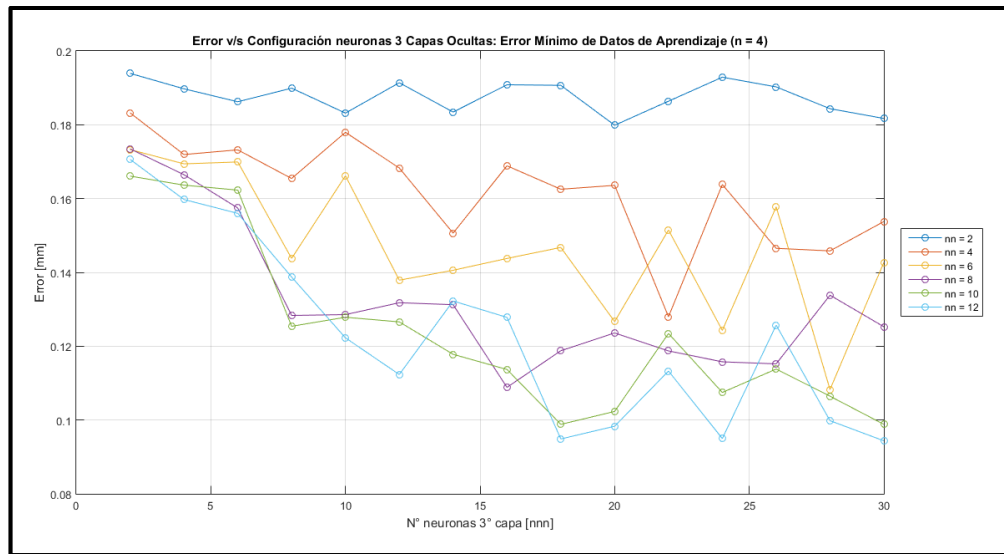


Figura 7-18 Error v/s 3 capas ocultas: Error Mínimo de Datos de Aprendizaje para 1° capa con 4 neuronas.

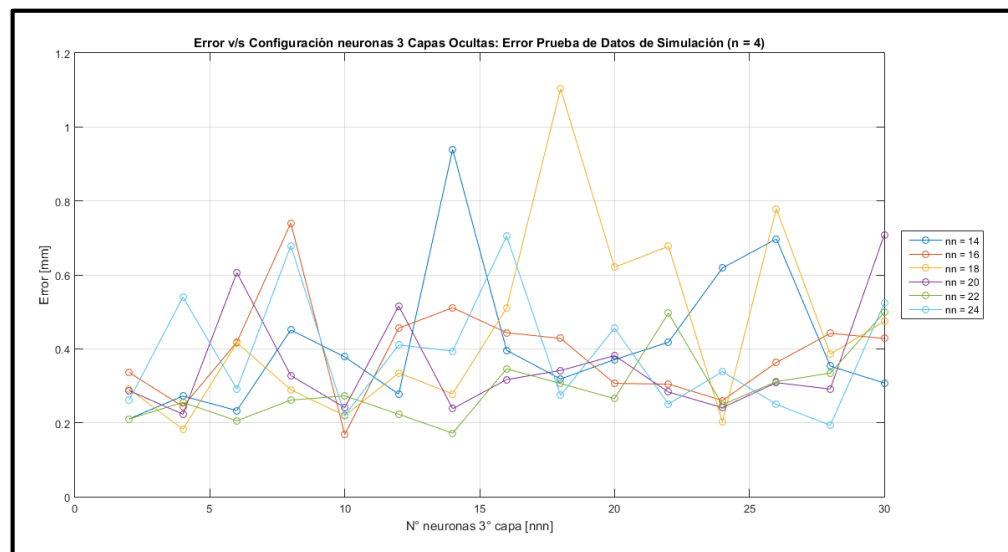
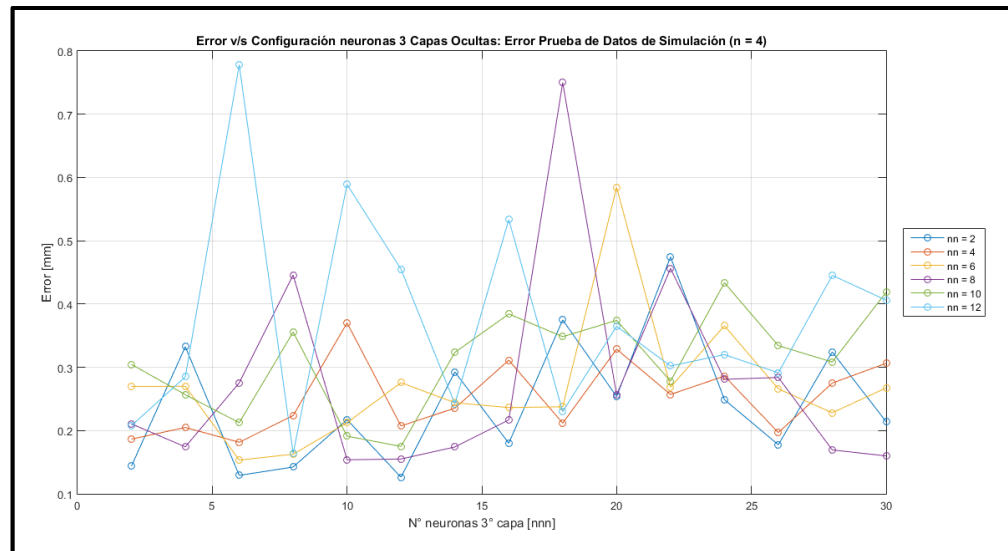


Figura 7-19 Error v/s 3 capas ocultas: Error Prueba de Datos de Simulación para 1° capa con 4 neuronas.

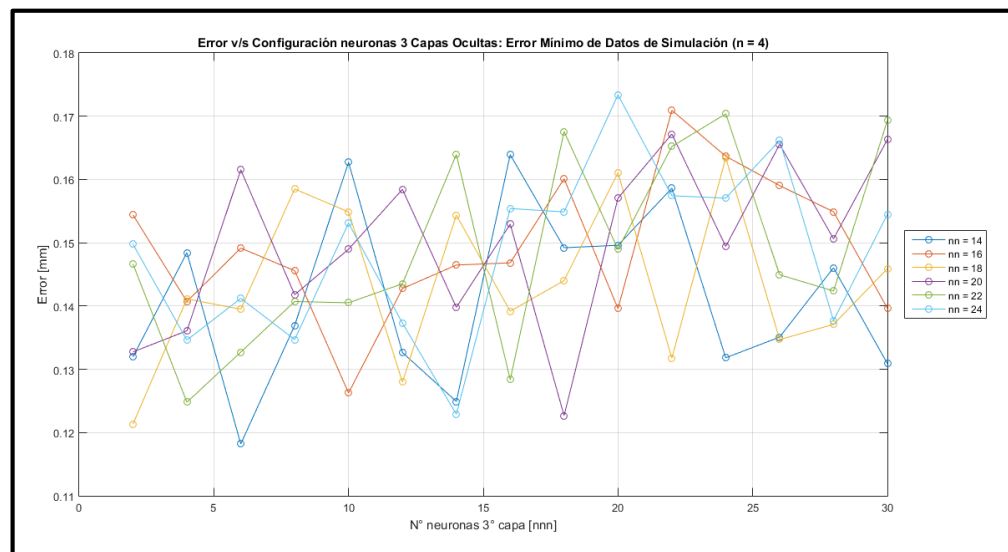
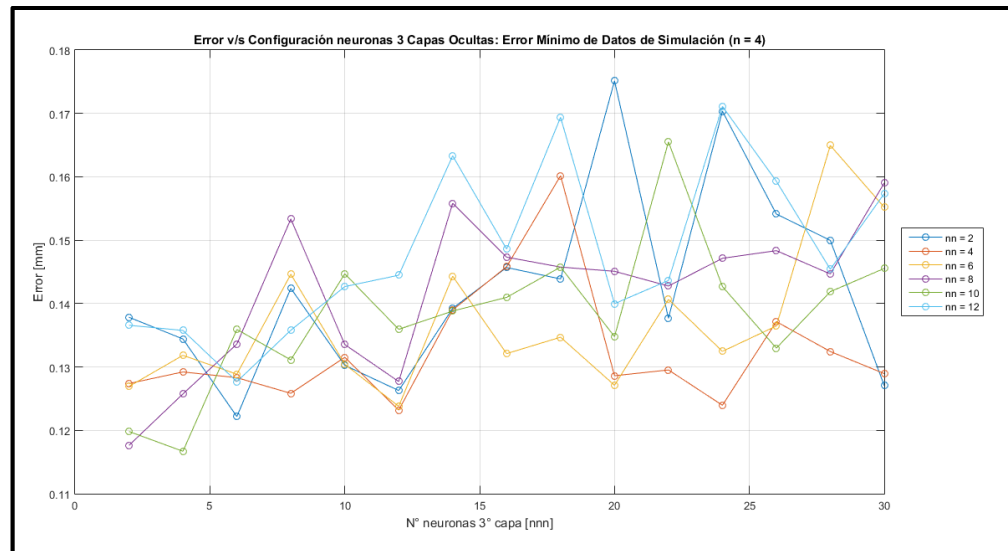


Figura 7-20 Error v/s 3 capas ocultas: Error Mínimo de Datos de Simulación para 1° capa con 4 neuronas.

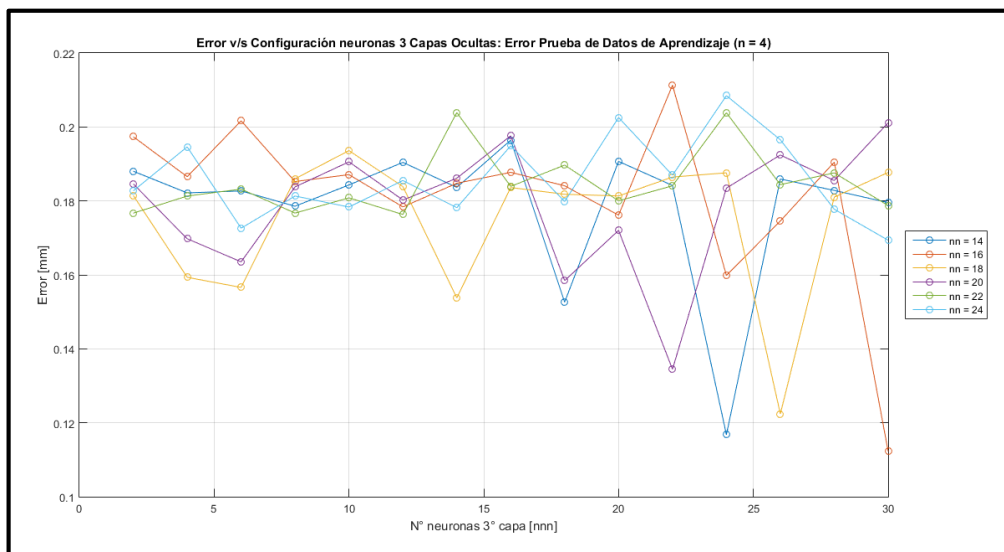
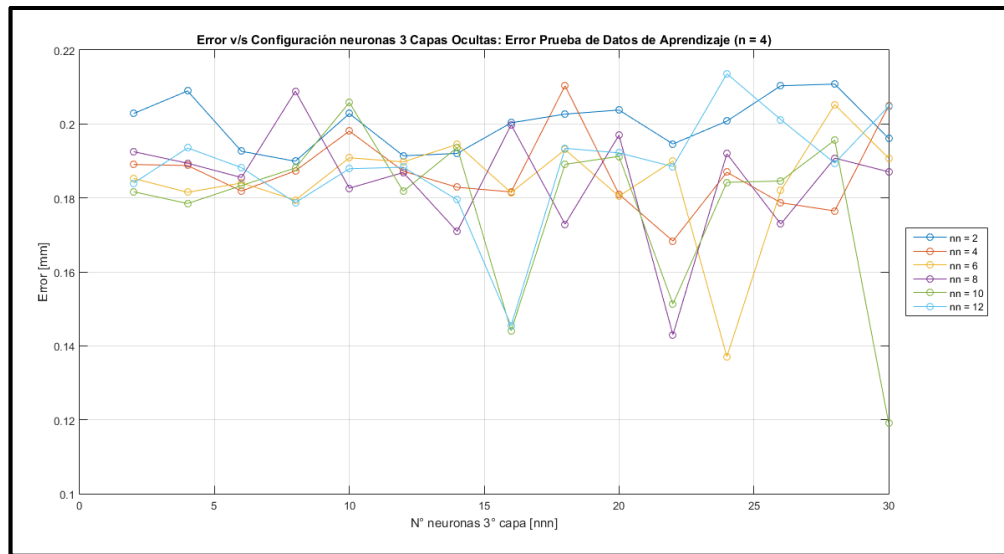


Figura 7-21 Error v/s 3 capas ocultas: Error Prueba de Datos de Aprendizaje para 1° capa con 4 neuronas.

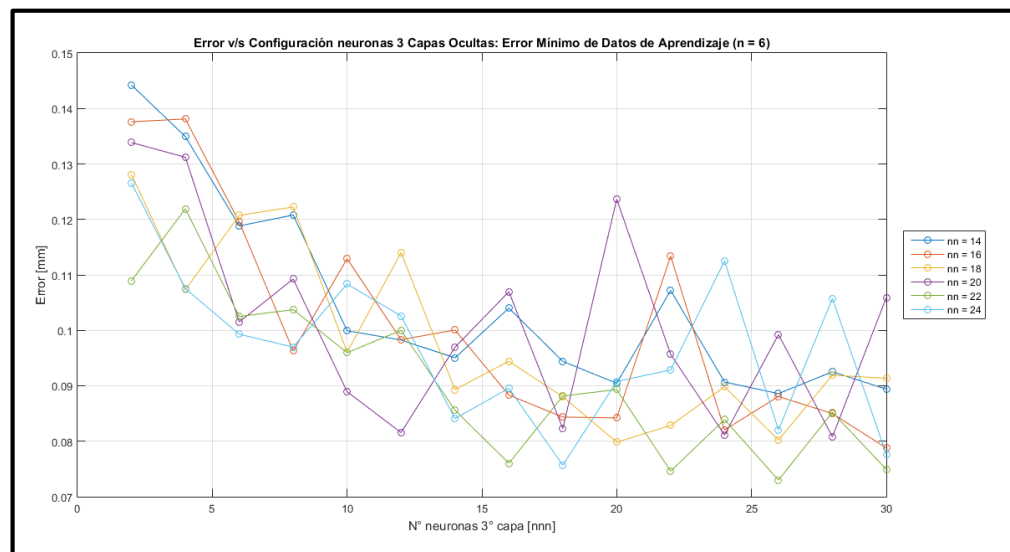
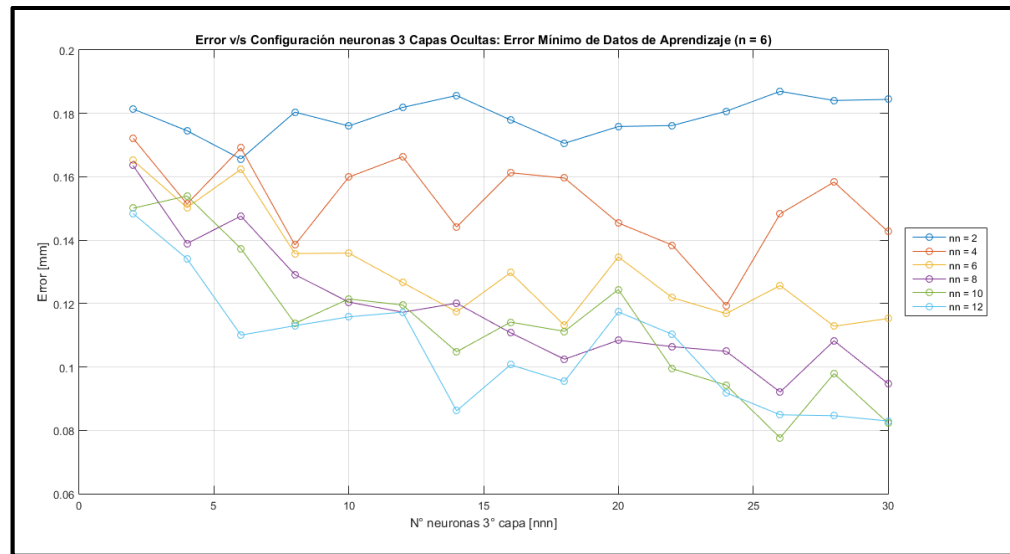


Figura 7-22 Error v/s 3 capas ocultas: Error Mínimo de Datos de Aprendizaje para 1° capa con 6 neuronas.

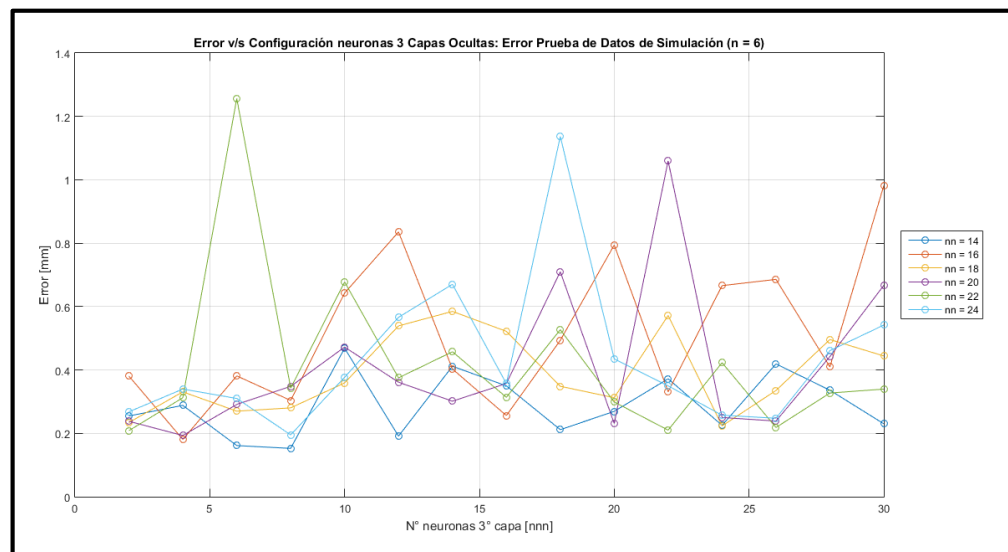
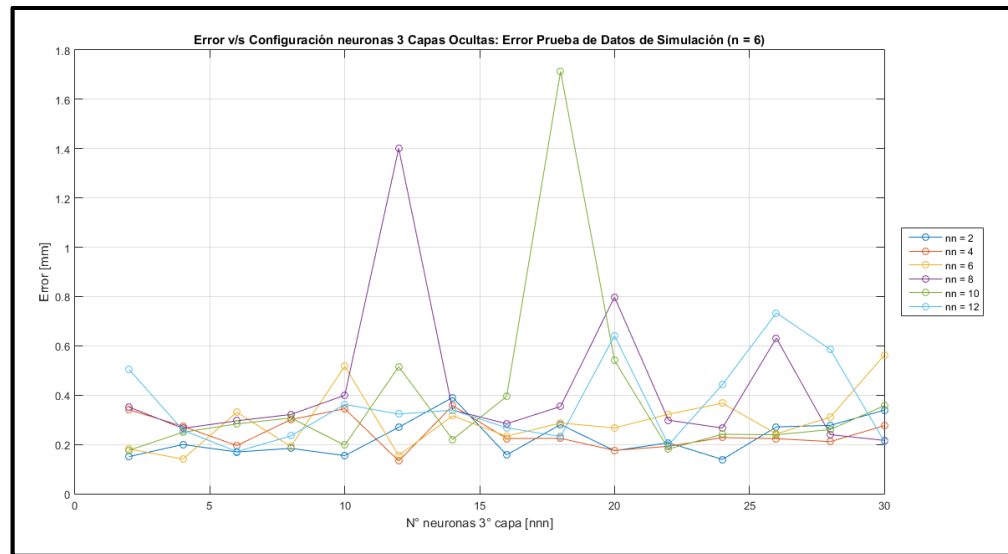


Figura 7-23 Error v/s 3 capas ocultas: Error Prueba de Datos de Simulación para 1° capa con 6 neuronas.

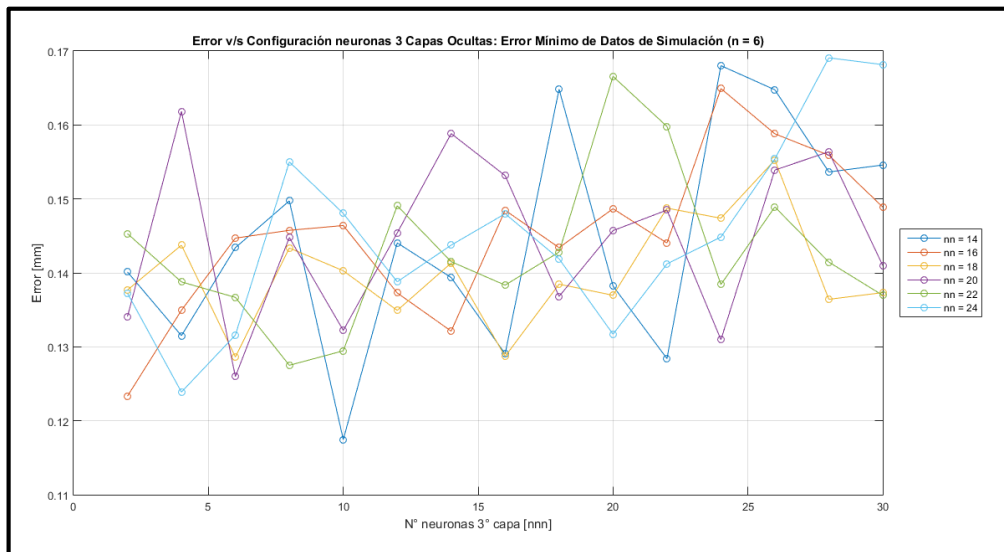
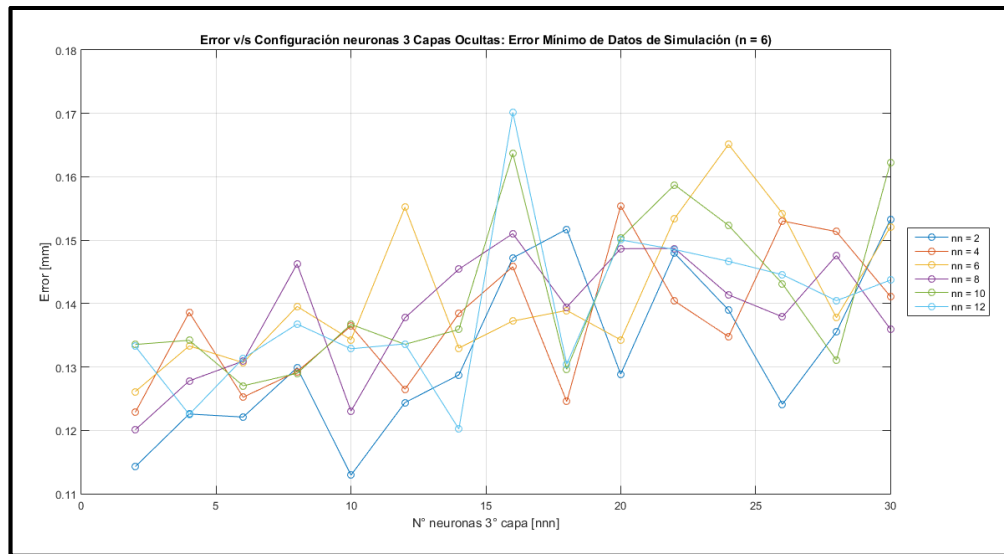


Figura 7-24 Error v/s 3 capas ocultas: Error Mínimo de Datos de Simulación para 1° capa con 6 neuronas.

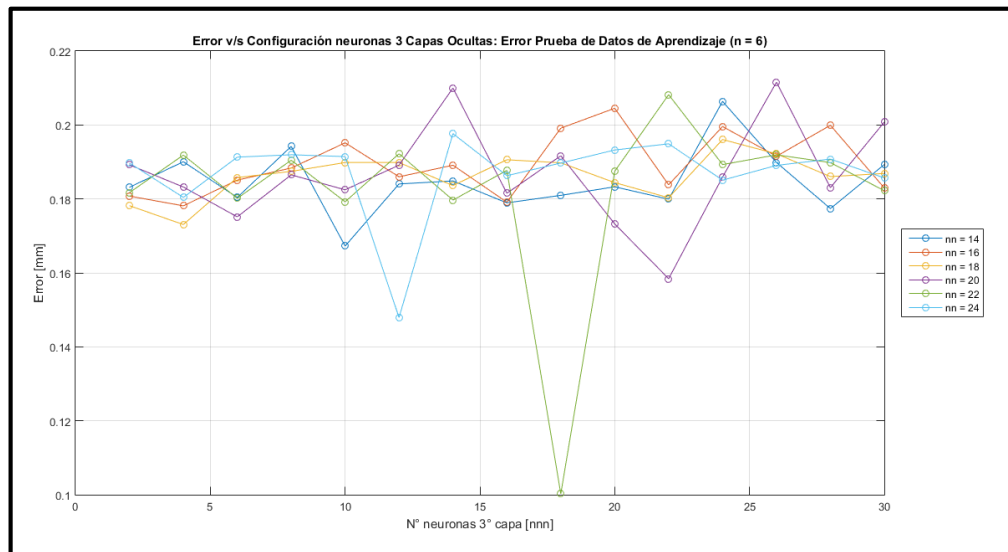
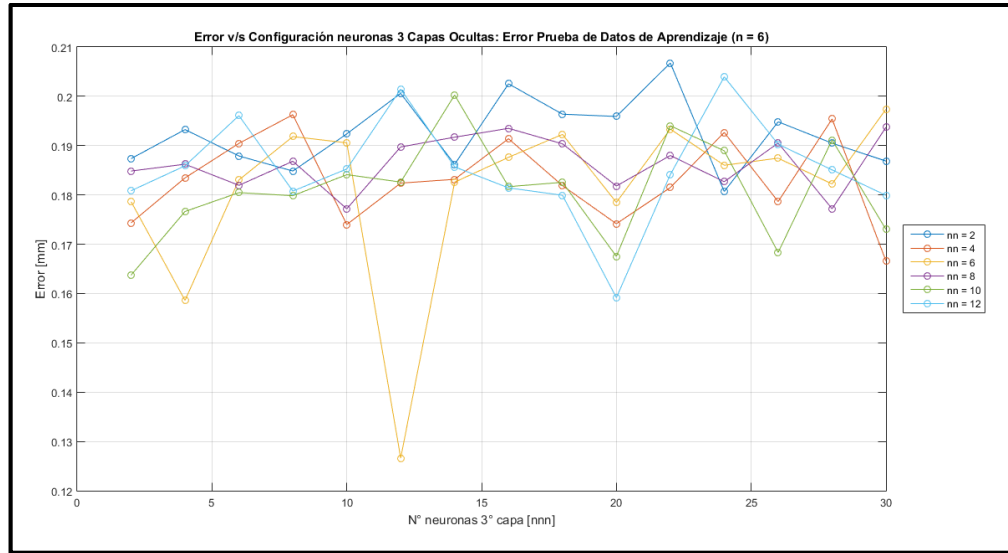


Figura 7-25 Error v/s 3 capas ocultas: Error Prueba de Datos de Aprendizaje para 1° capa con 6 neuronas.

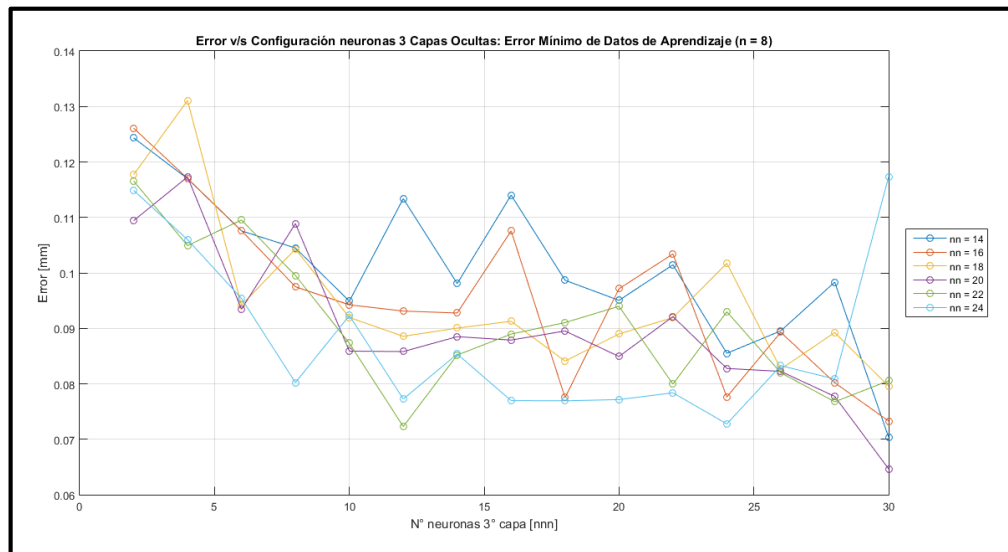
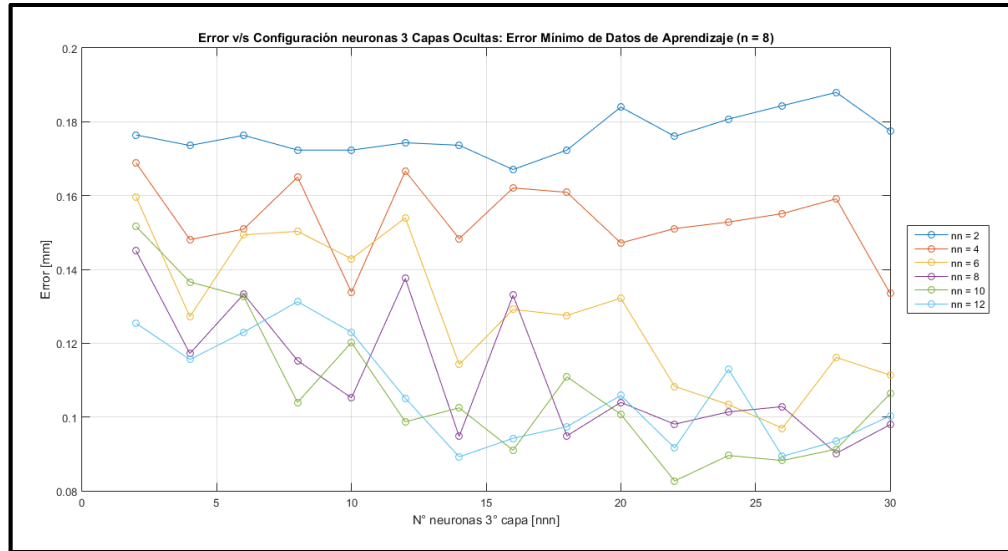


Figura 7-26 Error v/s 3 capas ocultas: Error Mínimo de Datos de Aprendizaje para 1° capa con 8 neuronas.

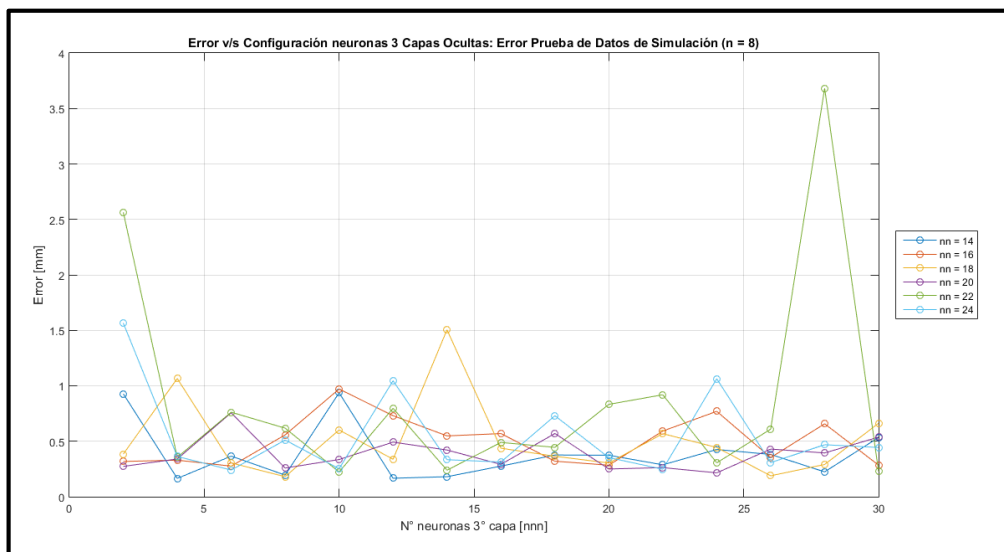
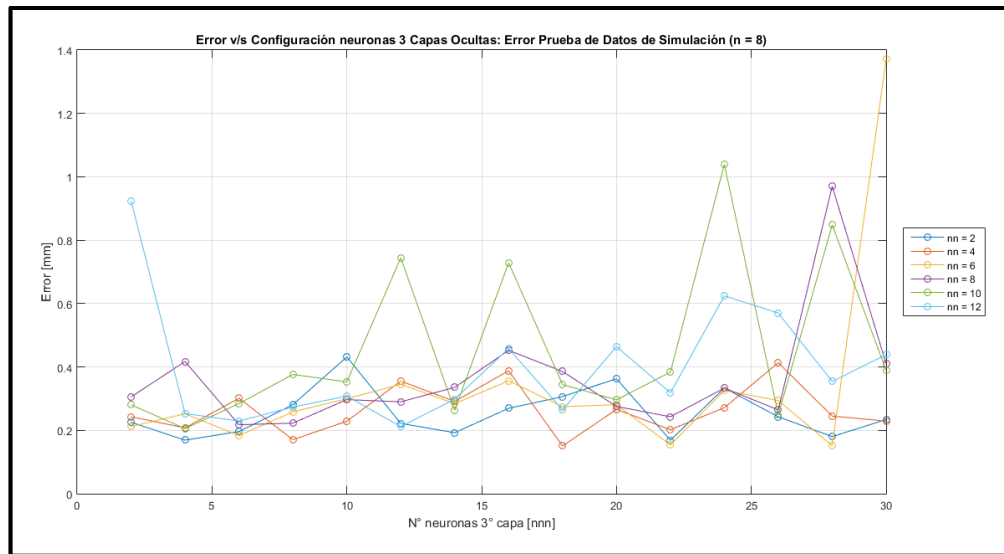


Figura 7-27 Error v/s 3 capas ocultas: Error Prueba de Datos de Simulación para 1° capa con 8 neuronas.

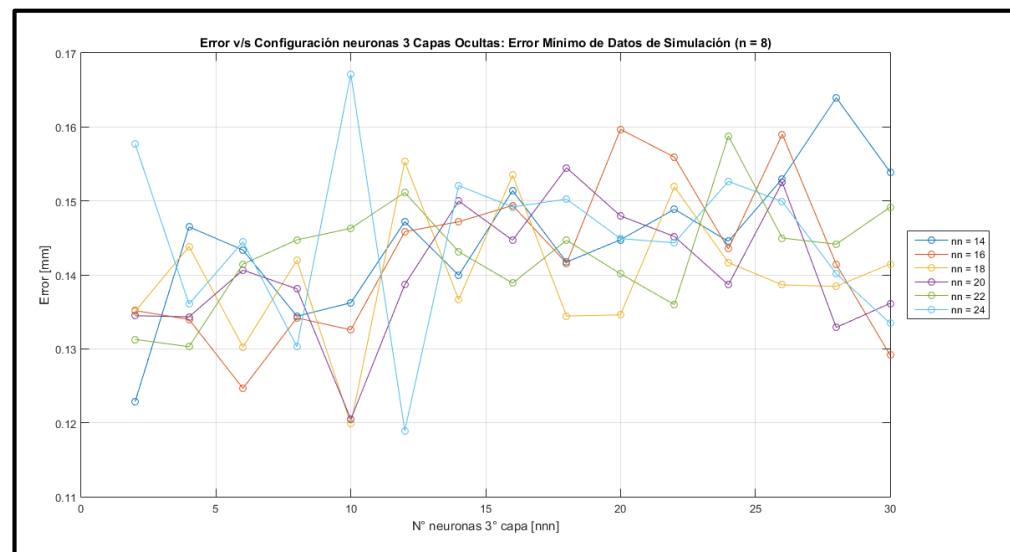
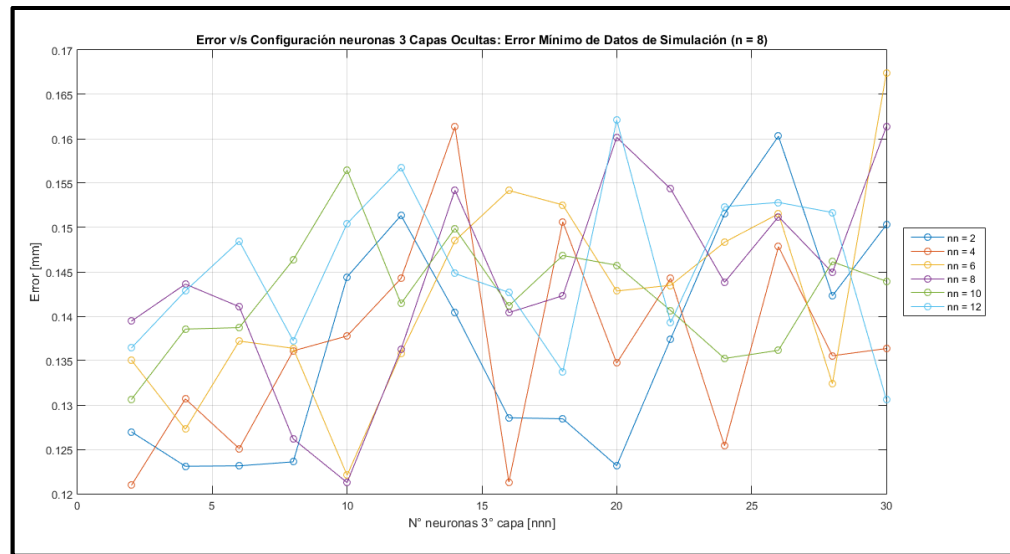


Figura 7-28 Error v/s 3 capas ocultas: Error Mínimo de Datos de Simulación para 1° capa con 8 neuronas.

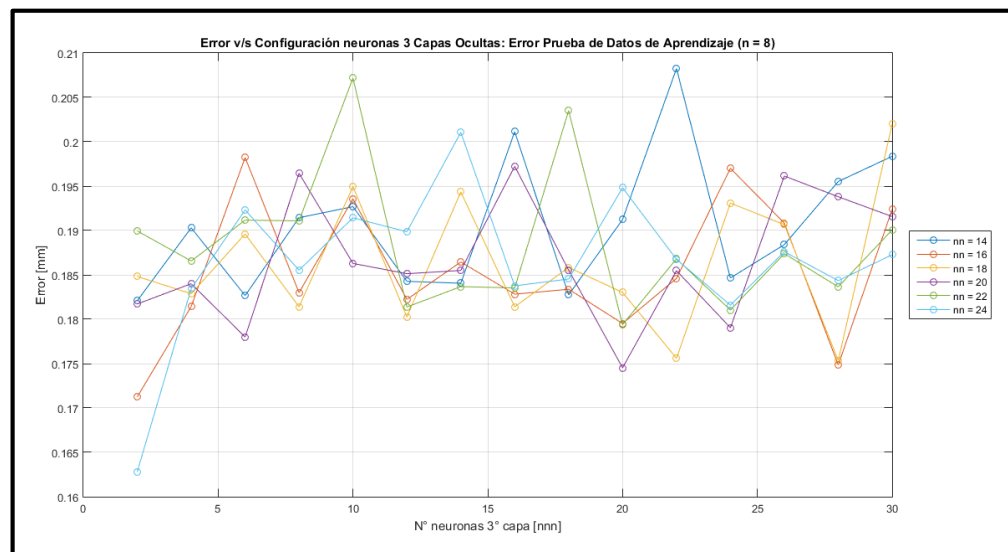
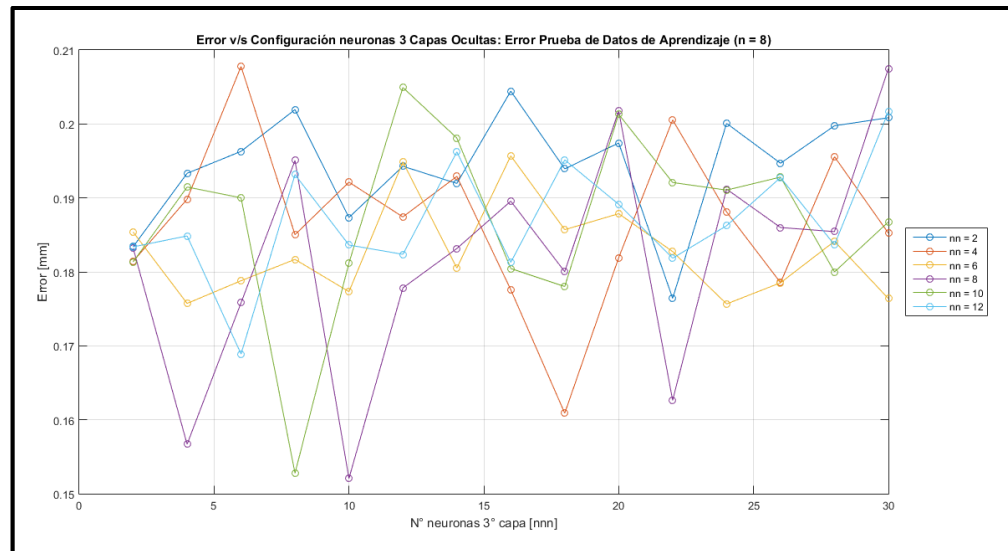


Figura 7-29 Error v/s 3 capas ocultas: Error Prueba de Datos de Aprendizaje para 1° capa con 8 neuronas.

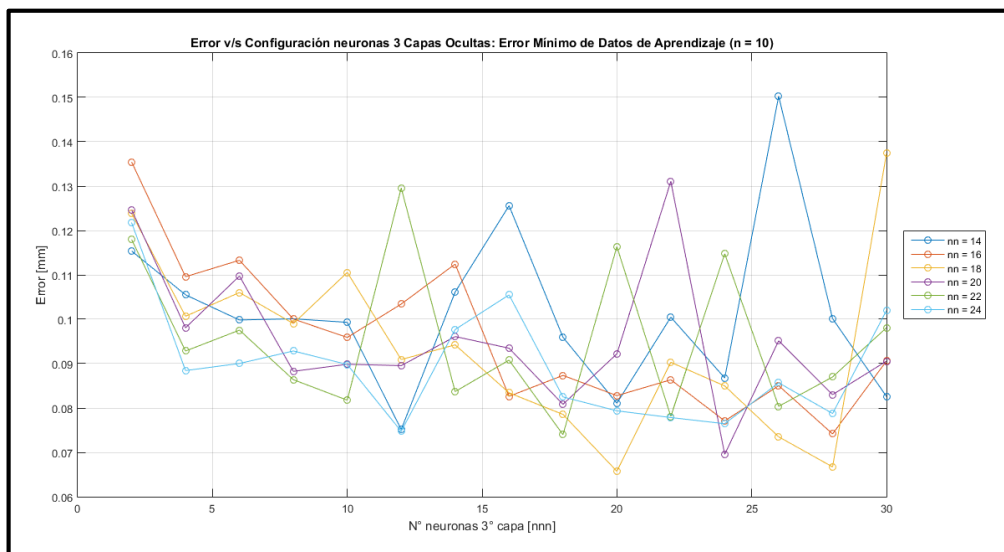
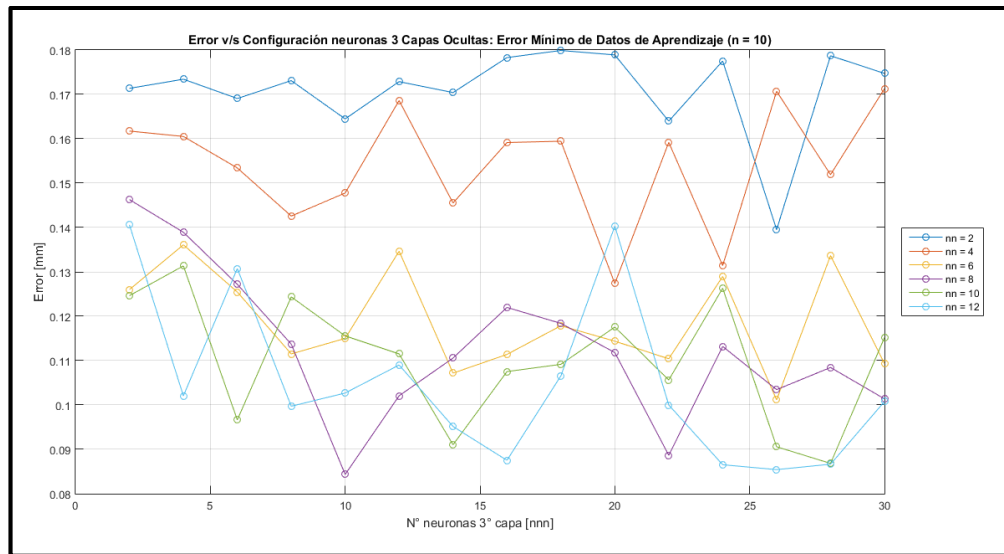


Figura 7-30 Error v/s 3 capas ocultas: Error Mínimo de Datos de Aprendizaje para 1° capa con 10 neuronas.

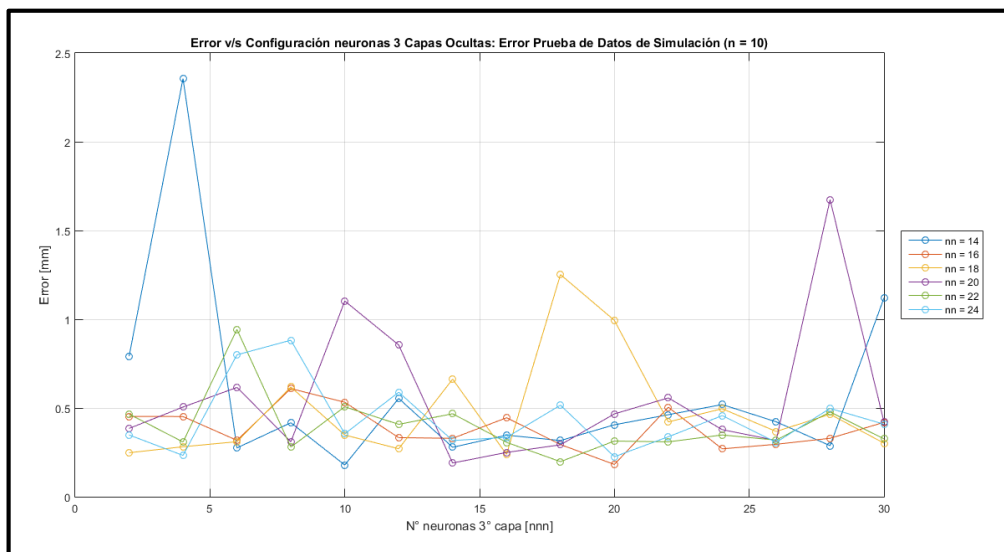
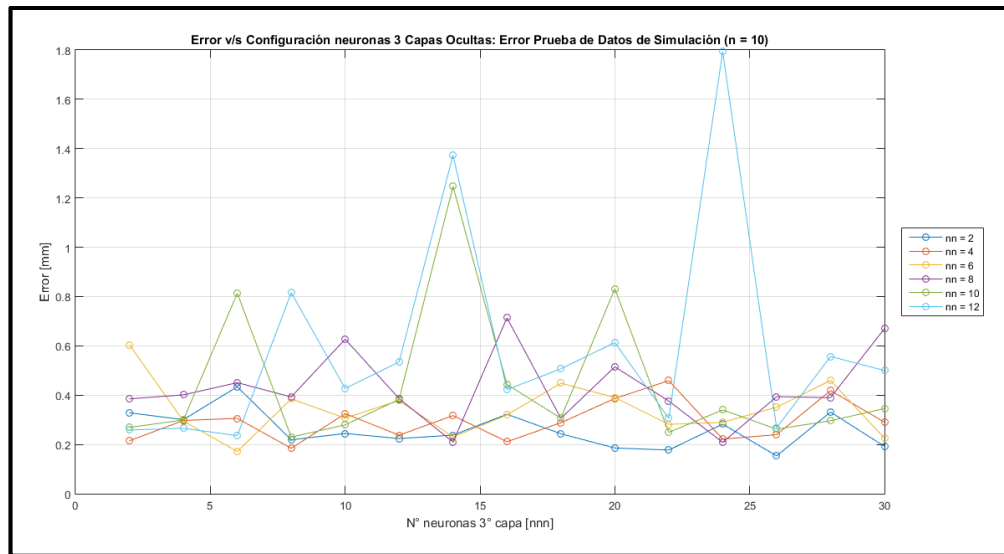


Figura 7-31 Error v/s 3 capas ocultas: Error Prueba de Datos de Simulación para 1° capa con 10 neuronas.

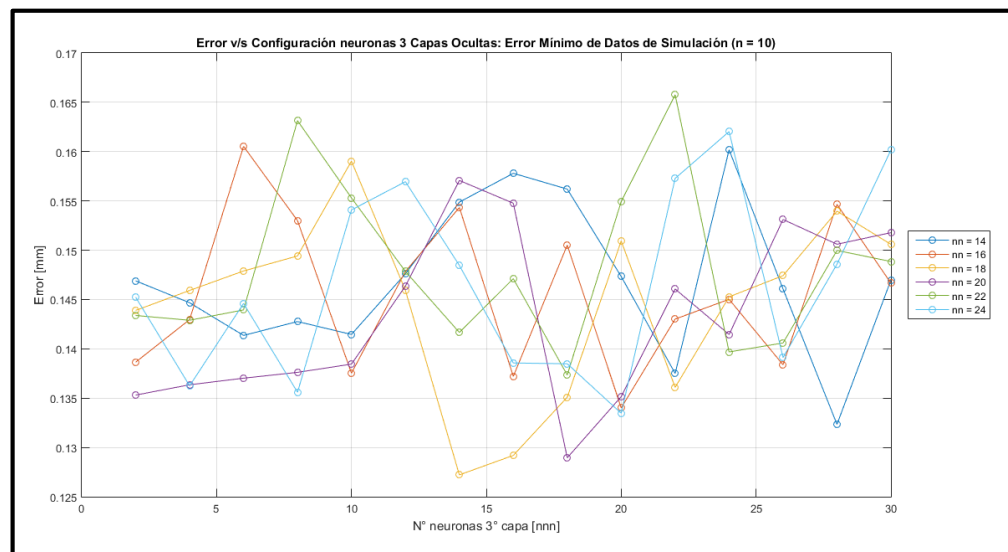
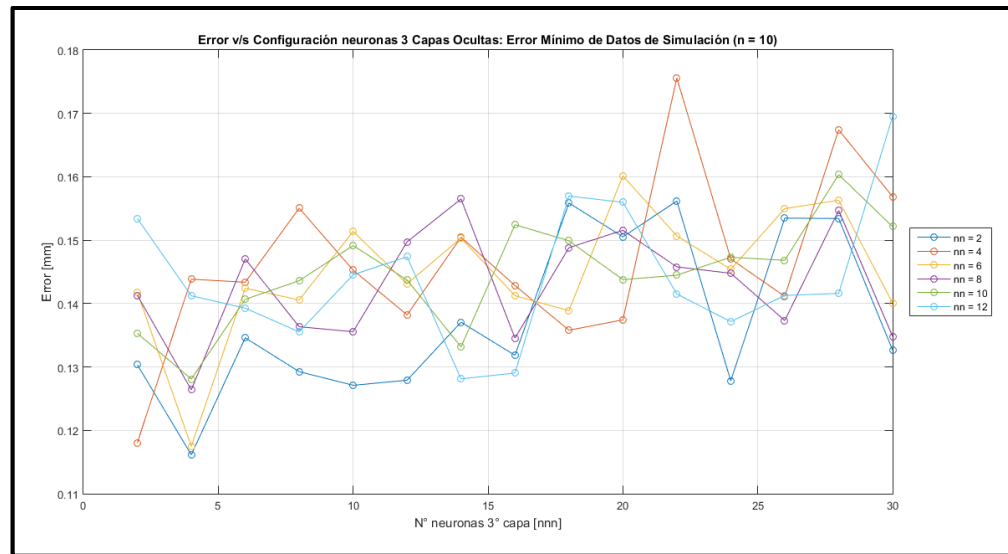


Figura 7-32 Error v/s 3 capas ocultas: Error Mínimo de Datos de Simulación para 1° capa con 10 neuronas.

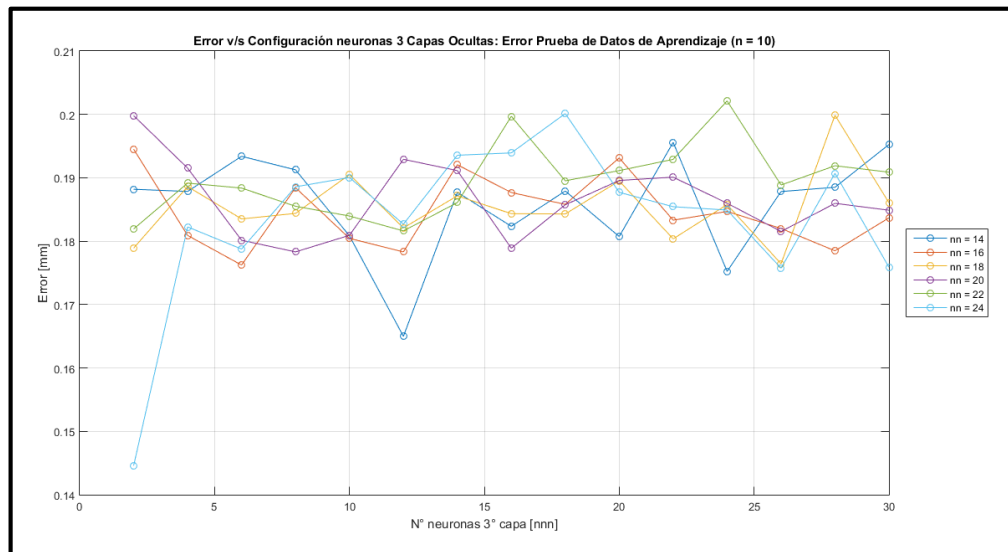
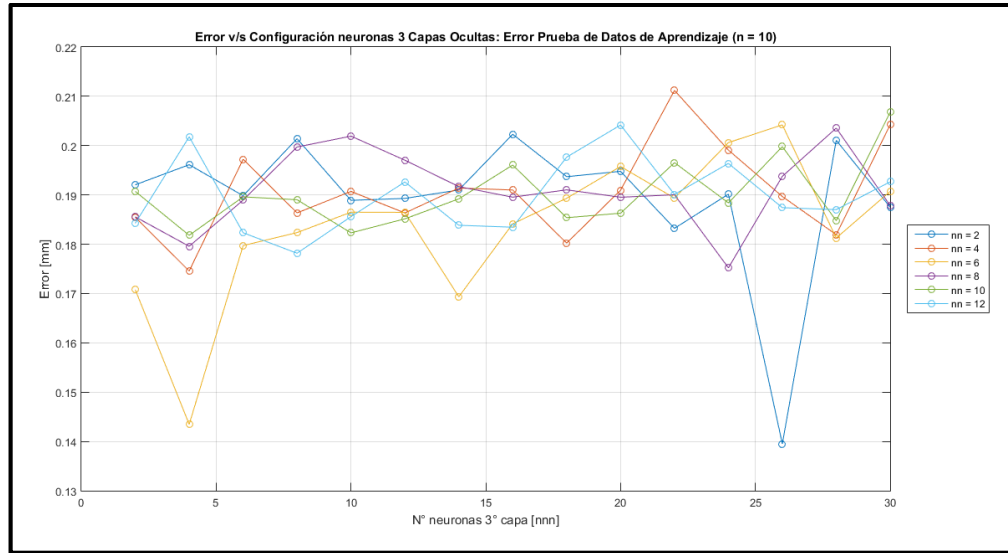


Figura 7-33 Error v/s 3 capas ocultas: Error Prueba de Datos de Aprendizaje para 1° capa con 10 neuronas.

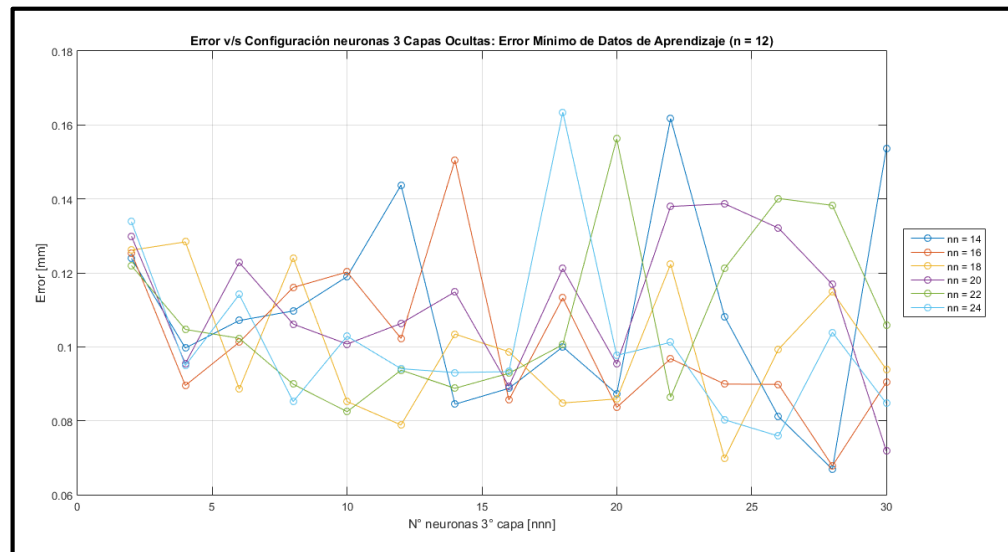
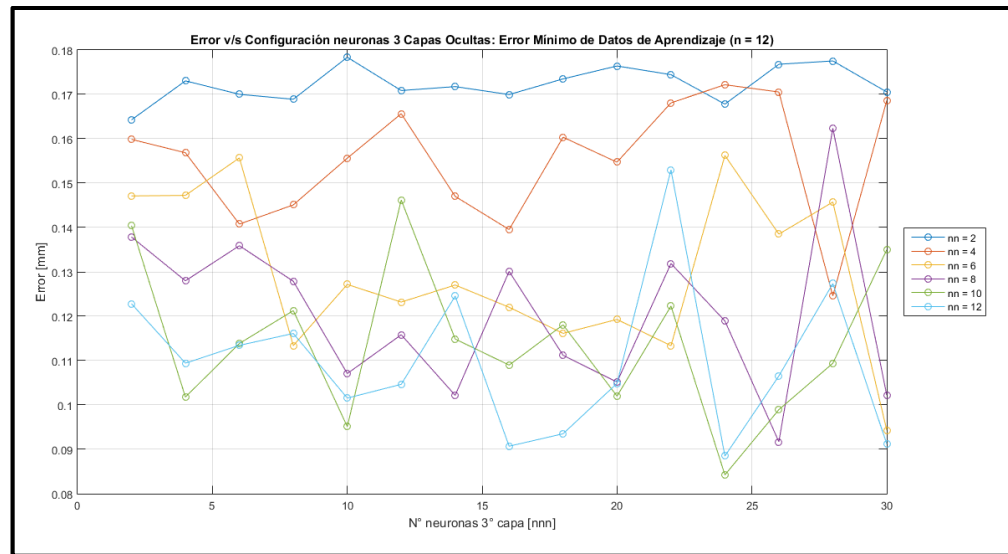


Figura 7-34 Error v/s 3 capas ocultas: Error Mínimo de Datos de Aprendizaje para 1° capa con 12 neuronas.

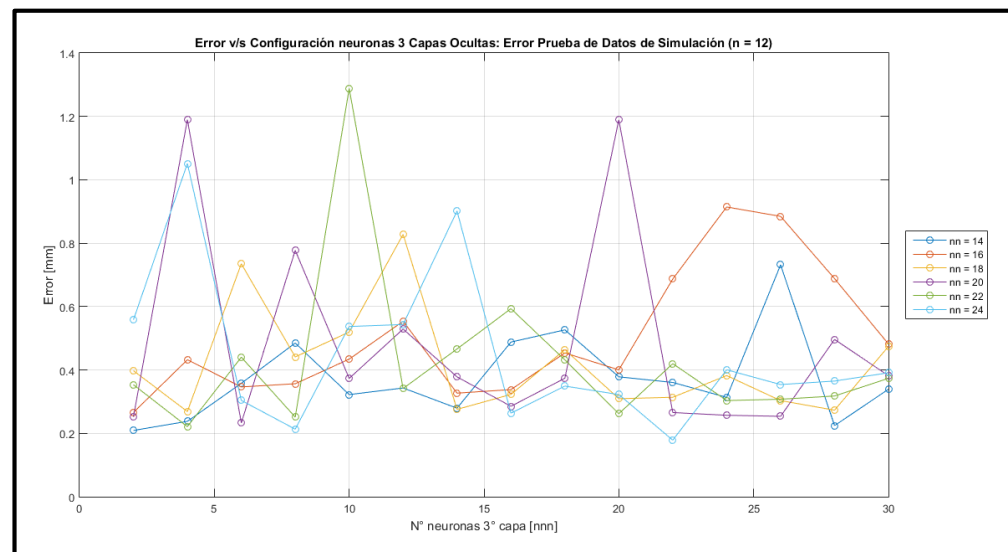
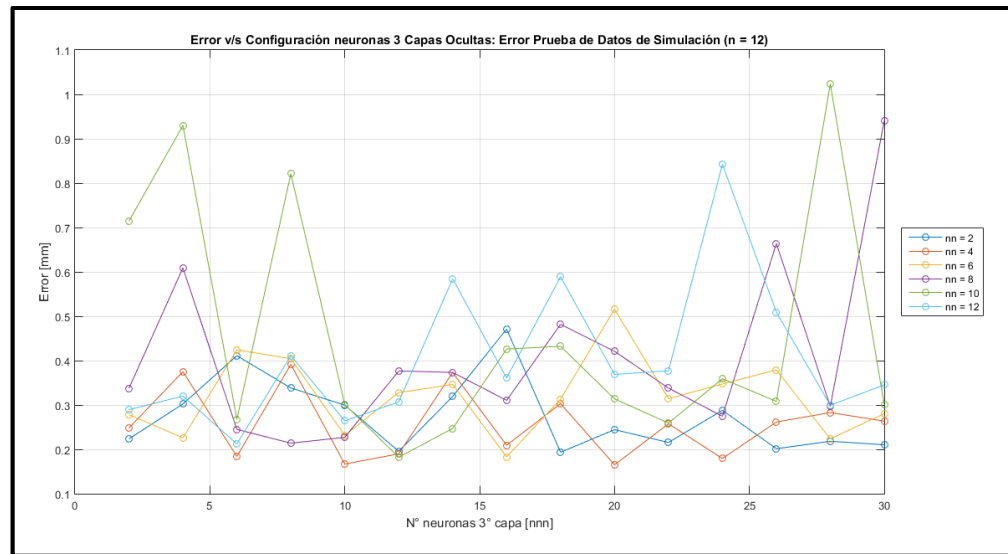


Figura 7-35 Error v/s 3 capas ocultas: Error Prueba de Datos de Simulación para 1° capa con 12 neuronas.

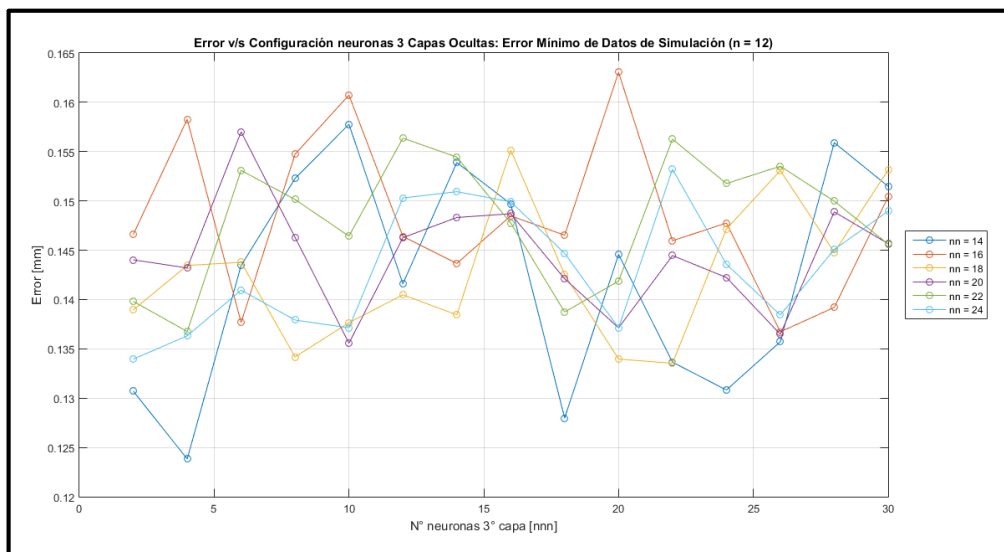
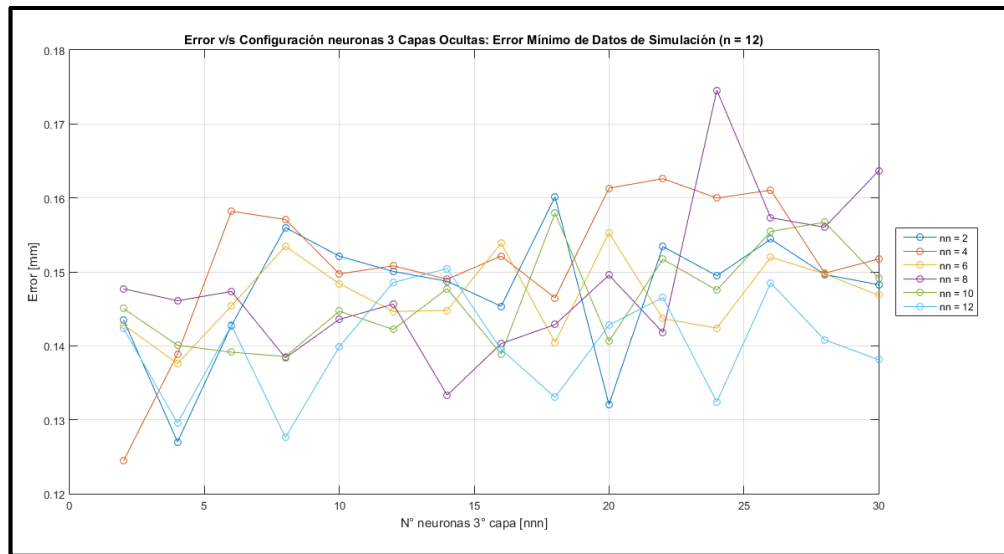


Figura 7-36 Error v/s 3 capas ocultas: Error Mínimo de Datos de Simulación para 1° capa con 12 neuronas.

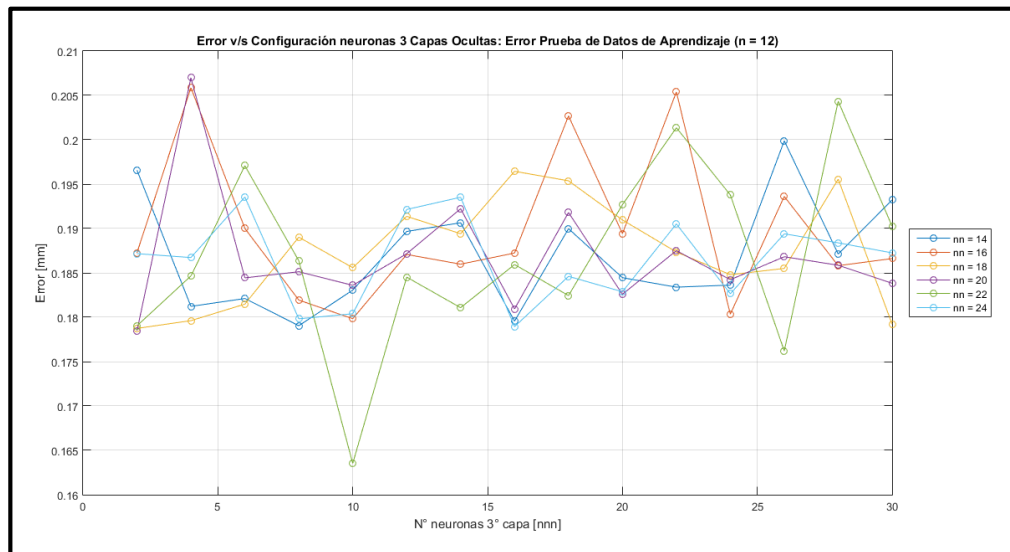
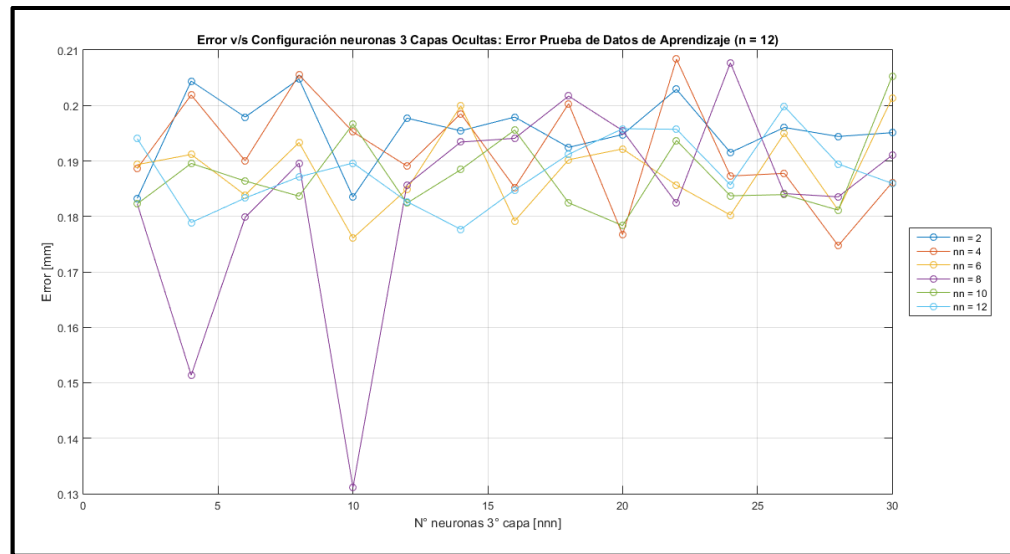


Figura 7-37 Error v/s 3 capas ocultas: Error Prueba de Datos de Aprendizaje para 1° capa con 12 neuronas.