

# UCUENCA

Facultad de Ingeniería  
Carrera de Ingeniería Civil

## Análisis y evaluación de modelos de deterioro para pavimentos asfálticos

Trabajo de titulación previo a la  
obtención del título de  
Ingeniera Civil

Autora:

Sophia Micaela Lituma AVECILLAS

CI: 0104969266

Correo electrónico: [sophiamicaela22@gmail.com](mailto:sophiamicaela22@gmail.com)

Tutor:

Ing. Jaime Asdrúbal Bojorque Iñiguez, PhD.

CI: 0102857885

**Cuenca, Ecuador**

06-septiembre-2022

## RESUMEN

Estudios realizados a lo largo del tiempo indican que en la mayoría de los casos la estructura de una vía se diseña para una vida útil de no menos de 20 años; sin embargo, se conoce que los pavimentos prestan condiciones adecuadas de servicio únicamente entre 8 y 12 años debido a deterioros presentes en el pavimento. Este trabajo de investigación busca analizar y evaluar los modelos de deterioro existentes para pavimentos asfálticos, con la finalidad de valorar los parámetros involucrados en el comportamiento del deterioro. Para analizar los distintos modelos de deterioro considerados en esta investigación, se utilizará la herramienta computacional MATLAB, donde se programarán los modelos y se variarán los parámetros de acuerdo a cada tipo de deterioro y se obtendrán los resultados de manera gráfica. De los resultados obtenidos se observó que, los parámetros de edad del pavimento y el tráfico son directamente proporcionales al inicio o progresión de la mayoría de deterioros modelos. También del análisis de otros parámetros se encontró que el uso de contenido de ligante por encima del contenido óptimo en superficies bituminosas ayuda a que ciertos deterioros en los pavimentos asfálticos se presenten con menor severidad o en menor tiempo. Del estudio realizado se concluye la importancia del análisis de los modelos de deterioro ya que ha permitido definir los parámetros más críticos para los tipos de deterioro analizados según su modelo de deterioro.

**Palabras clave:** Pavimentos asfálticos. Deterioro. Modelos de deterioro. Parámetros.

## ABSTRACT

Studies carried out over time indicate that in most cases the structure of a road is designed for a useful life of no less than 20 years; however, it is known that pavements provide adequate service conditions for only between 8 and 12 years due to pavement deterioration. This research work seeks to analyze and evaluate the existing deterioration models for asphalt pavements, in order to assess the parameters involved in the deterioration behavior. To analyze the different deterioration models considered in this research, MATLAB computational tool will be used, here models will be programmed and the parameters will be varied according to each type of deterioration and the results will be obtained in a graphic form. From the results obtained, it was observed that the parameters age of the pavement and the traffic are directly proportional to the beginning or progression of most of the model deteriorations. Also from the analysis of other parameters, it was found that the use of binder content above the optimal content in bituminous surfaces helps certain deteriorations in asphalt pavements to occur with less severity or in less time. From the study carried out, the importance of the analysis of the deterioration models is concluded, since it has allowed defining the most critical parameters for the types of deterioration analyzed according to their deterioration model.

**Key words:** Asphalt pavements. Deterioration. Deterioration models. Parameters.

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

RESUMEN.....	1
ABSTRACT .....	2
DEDICATORIA .....	17
AGRADECIMIENTOS.....	18
CAPÍTULO I: GENERALIDADES.....	19
1.1.    Introducción .....	19
1.2.    Antecedentes.....	20
1.3.    Planteamiento del problema y justificación .....	21
1.4.    Objetivos .....	22
1.5.    Alcance.....	22
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO.....	23
2.1.    Generalidades de los pavimentos.....	23
2.2.    Tipos de Pavimentos .....	24
2.2.1.    Pavimentos flexibles .....	24
2.2.2.    Pavimento rígido.....	24
2.2.3.    Pavimentos compuestos.....	24
2.2.4.    Pavimentos articulados.....	24
2.3.    Estructura de los pavimentos flexibles .....	25
2.3.1.    Subrasante .....	25
2.3.2.    Subbase .....	25
2.3.3.    Base .....	25
2.3.4.    Capa de rodadura.....	26
2.4.    Factores para el diseño de pavimentos .....	26
2.4.1.    Tráfico y cargas .....	26
2.4.2.    Medio Ambiente.....	27
2.4.3.    Materiales.....	27
2.4.4.    Criterio de falla .....	28
2.5.    Deterioro en los pavimentos .....	29
2.6.    Variables que afectan el deterioro de los pavimentos .....	29
2.6.1.    Tráfico .....	29
2.6.2.    Clima y medio ambiente .....	31
2.6.3.    Edad del Pavimento.....	33
2.7.    Tipos de deterioro en los pavimentos .....	33

# UCUENCA

2.7.1.	Agrietamiento .....	34
2.7.2.	Parches y Baches.....	40
2.7.3.	Deformación de la superficie .....	42
2.7.4.	Defectos superficiales.....	44
2.7.5.	Otros Deterioros .....	46
2.8.	Modelos de deterioro .....	47
2.9.	Tipos de modelos de deterioro.....	47
2.10.	Modelos de deterioro.....	48
2.10.1.	Inicio de todo agrietamiento estructural .....	48
2.10.2.	Progresión de todo agrietamiento estructural.....	49
2.10.3.	Inicio de agrietamiento transversal por temperatura .....	50
2.10.4.	Progresión de agrietamiento transversal por temperatura.....	51
2.10.5.	Inicio de la desintegración del pavimento .....	52
2.10.6.	Progresión de la desintegración del pavimento.....	53
2.10.7.	Inicio de baches.....	54
2.10.8.	Progresión de baches.....	54
2.10.9.	Inicio del ahuellamiento .....	56
2.10.10.	Progresión del ahuellamiento .....	59
2.10.11.	Rugosidad.....	59
CAPÍTULO III: METODOLOGÍA .....		63
3.1	Consideraciones generales .....	63
3.2	Rangos de variación para parámetros comunes.....	64
3.3	Funciones utilizadas en la programación de los modelos de deterioro.....	67
3.3.1	Función ini_agr_estr .....	67
3.3.2	Función pgr_agr_estr.....	69
3.3.3	Función ini_agr_trans_temp .....	71
3.3.4	Función pgr_agr_trans_temp.....	72
3.3.5	Función ini_desintegracion .....	74
3.3.6	Función pgr_desintegracion.....	75
3.3.7	Función ini_baches.....	77
3.3.8	Función pgr_baches .....	78
3.3.9	Función ini_ahu_den_ini.....	79
3.3.10	Función ini_ahue_def_estr.....	80
3.3.11	Función ini_ahue_def_plas .....	81
3.3.12	Función pgr_ahuellamiento.....	82

# UCUENCA

3.3.13	Función ini_rugosidad_comp_est .....	83
3.3.14	Función ini_rugosidad_comp_agrietamiento.....	85
3.3.15	Función ini_rugosidad_comp_ahuellamiento .....	85
3.3.16	Función ini_rugosidad_comp_baches.....	86
3.3.17	Función ini_rugosidad_comp_ambiental.....	87
3.3.18	Función cambio_rugosidad.....	88
CAPÍTULO IV: ANÁLISIS DE RESULTADOS.....		89
4.1	Inicio de todo agrietamiento estructural .....	89
4.1.1	Análisis para una mezcla asfáltica sobre la superficie original (HSOLD=0).	89
4.1.2	Análisis para una mezcla asfáltica de una sobrecapa o sello (HSOLD>0) ..	90
4.1.3	Análisis para un tratamiento superficial sobre la superficie original (HSOLD=0) 93	
4.1.4	Análisis para un tratamiento superficial de una sobrecapa o sello (HSOLD>0). 94	
4.2	Progresión de todo agrietamiento estructural.....	98
4.3	Inicio de agrietamiento transversal por temperatura .....	100
4.3.1	Análisis en la superficie original (HSOLD=0). .....	100
4.3.2	Análisis en una sobrecapa o sello (HSOLD>0). .....	101
4.4	Progresión de agrietamiento transversal por temperatura.....	103
4.4.1	Análisis en la superficie original (HSOLD=0). .....	103
4.4.2	Análisis en una sobrecapa o sello (HSOLD>0). .....	104
4.5	Inicio de la desintegración del pavimento .....	106
4.5.1	Análisis general .....	106
4.5.2	Análisis para una mezcla asfáltica para materiales de una mezcla fría (CM) 107	
4.5.3	Análisis en un tratamiento superficial para todos los materiales excepto (SL y CAPE) 108	
4.6	Progresión de la desintegración del pavimento.....	109
4.7	Inicio de baches.....	111
4.8	Progresión de baches.....	113
4.8.1	Análisis de variación del factor de lapso de tiempo (TLF).....	113
4.8.2	Análisis de variación del factor de política de parcheo (PEFF) .....	113
4.8.3	Análisis para todos los tipos de pavimentos cuando los baches comienzan por el deterioro de agrietamiento. ....	114
4.8.4	Progreso de baches como la suma de baches causados por los distintos deterioros causantes .....	117

# UCUENCA

4.9	Inicio del ahuellamiento (Densificación inicial) .....	118
4.10	Inicio del ahuellamiento (Deformación estructural).....	119
4.10.1	Análisis de la deformación estructural sin agrietamiento.....	119
4.10.2	Análisis de la deformación estructural con agrietamiento.....	120
4.10.3	Análisis de la deformación estructural caso estándar .....	122
4.11	Inicio del ahuellamiento (Deformación plástica) .....	123
4.12	Progresión del ahuellamiento .....	125
4.13	Rugosidad (Componente estructural) .....	126
4.14	Rugosidad (Componente de agrietamiento).....	130
4.15	Rugosidad (Componente de ahuellamiento).....	131
4.16	Rugosidad (Componente de baches).....	131
4.17	Rugosidad (Componente ambiental).....	134
4.18	Cambio total en la rugosidad .....	134
CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....		136
5.1.	Conclusiones y recomendaciones .....	136
5.2	Futuras líneas de investigación.....	138
REFERENCIAS .....		140
ANEXOS.....		142

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1: Clasificación de humedad. [14] .....	32
Tabla 2.2: Clasificación de temperatura. [14] .....	32
Tabla 2.3: Relación entre el tiempo y la calidad de drenaje [14]. .....	32
Tabla 2.4: Valores de los coeficientes de drenaje. [14] .....	33
Tabla 3.1: Rangos de los parámetros para el inicio de todo agrietamiento estructural.....	68
Tabla 3.2: Valores para el caso base de análisis para el modelo de inicio de todo agrietamiento estructural. ....	68
Tabla 3.3: Coeficientes para el modelo de inicio de todo agrietamiento estructural [14]...	69
Tabla 3.4: Rangos de los parámetros para el progreso de todo agrietamiento estructural. ....	70
Tabla 3.5: Valores para el caso base de análisis para el modelo de progresión de todo agrietamiento estructural. ....	70
Tabla 3.6: Coeficientes para el modelo de progreso de todo agrietamiento estructural [14]. ....	70
Tabla 3.7: Rangos parámetros para el inicio del agrietamiento transversal por temperatura. ....	71
Tabla 3.8: Valores para el caso base de análisis para el modelo de inicio del agrietamiento transversal por temperatura. ....	71
Tabla 3.9: Coeficientes para el modelo de inicio del agrietamiento transversal por temperatura [14]. ....	72
Tabla 3.10: Rangos parámetros para el progreso del agrietamiento transversal por temperatura. ....	73
Tabla 3.11: Valores para el caso base de análisis para el modelo de inicio del agrietamiento transversal por temperatura. ....	74
Tabla 3.12: Coeficientes para el modelo de inicio del agrietamiento transversal por temperatura [14]. ....	74
Tabla 3.13: Rangos parámetros para el inicio de la desintegración del pavimento. ....	75
Tabla 3.14: Valores para el caso base de análisis para el modelo de inicio del deterioro del pavimento. ....	75
Tabla 3.15: Coeficientes para el modelo de inicio de la desintegración del pavimento [14]. ....	75
Tabla 3.16: Rangos parámetros para el progreso de la desintegración del pavimento.....	76



# UCUENCA

Tabla 3.17: Valores para el caso base de análisis para el modelo de progreso del deterioro del pavimento. ....	76
Tabla 3.18: Coeficientes para el modelo de progreso de la desintegración del pavimento [14]. ....	76
Tabla 3.19: Rangos parámetros para el inicio de baches.....	77
Tabla 3.20: Valores para el caso base de análisis para el modelo de inicio de baches....	77
Tabla 3.21: Coeficientes para el modelo de inicio de baches [14]. ....	77
Tabla 3.22: Rangos parámetros para el progreso de baches.....	78
Tabla 3.23: Valores para el caso base de análisis para el modelo de progreso de baches. ....	79
Tabla 3.24: Coeficientes para el modelo de progreso de baches [14]. ....	79
Tabla 3.25: Rangos parámetros para el inicio de ahuellamiento por densificación inicial. ....	80
Tabla 3.26: Valores para el caso base de análisis para el inicio de ahuellamiento por densificación inicial. ....	80
Tabla 3.27: Coeficientes para el modelo de inicio de ahuellamiento por densificación inicial [14]. ....	80
Tabla 3.28: Rangos parámetros para el inicio del ahuellamiento por densificación inicial. ....	81
Tabla 3.29: Valores para el caso base de análisis para el inicio del ahuellamiento por densificación inicial. ....	81
Tabla 3.30: Coeficientes para el modelo de inicio del ahuellamiento por densificación inicial [14]. ....	81
Tabla 3.31: Rangos parámetros para el progreso del ahuellamiento por deformación plástica. ....	82
Tabla 3.32: Valores para el caso base de análisis para el progreso del ahuellamiento por deformación plástica. ....	82
Tabla 3.33: Coeficientes para el progreso del ahuellamiento por deformación plástica [14]. ....	82
Tabla 3.34: Rangos parámetros para el análisis de rugosidad en su componente estructural. ....	84
Tabla 3.35: Valores para el caso base de análisis para el análisis de rugosidad en su componente estructural. ....	84
Tabla 3.36: Coeficientes para el análisis de rugosidad en su componente estructural [14]. ....	84
Tabla 3.37: Coeficiente ambiental 'm' [14]. ....	84

# UCUENCA

Tabla 3.38: Valores de parámetros y coeficientes para el análisis de rugosidad en su componente de agrietamiento [14].....	85
Tabla 3.39: Valores de parámetros y coeficientes para el análisis de rugosidad en su componente de ahuellamiento [14]. .....	86
Tabla 3.40: Valores para parámetros para el análisis de rugosidad en su componente de baches .....	87
Tabla 3.41: Valores para el caso base de análisis para el análisis de rugosidad en su componente de baches.....	87
Tabla 3.42: Coeficientes para el análisis de rugosidad en su componente de baches[14]. .....	87
Tabla 3.43: Valores de parámetros y coeficientes para el análisis de rugosidad en su componente ambiental.....	88

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1: Agrietamiento por fatiga de alta severidad [15].	35
Figura 2.2: Severidad de agrietamiento por fatiga [15].	35
Figura 2.3: Agrietamiento en bloque con agrietamiento por fatiga [15].	36
Figura 2.4: Agrietamiento en bloque [15].	36
Figura 2.5: Agrietamiento de borde de baja severidad [15].	37
Figura 2.6: Agrietamiento de Borde [15].	37
Figura 2.7: Agrietamiento longitudinal en la trayectoria de la rueda [15].	38
Figura 2.8: Agrietamiento Longitudinal [15].	38
Figura 2.9: Agrietamiento transversal de alta severidad [15].	39
Figura 2.10: Agrietamiento Transversal [15].	39
Figura 2.11: Deterioro de parche de alta severidad [15].	40
Figura 2.12: Parches/Deterioro de parches [15].	41
Figura 2.13: Bache de alta severidad [15].	41
Figura 2.14: Baches [15].	42
Figura 2.15: Agua empozada en las roderas [15].	43
Figura 2.16: Ahuellamiento o roderas [15].	43
Figura 2.17: Desplazamiento en la superficie del pavimento [15].	44
Figura 2.18: Desplazamiento (Shoving) [15].	44
Figura 2.19: Pérdida de textura por exudación [15].	45
Figura 2.20: Agregado Pulido [15].	45
Figura 2.21: Pérdida de agregado grueso por desintegración del pavimento [15].	46
Figura 2.22: Purga y bombeo de agua [15].	47
Figura 4.1: Inicio de todo agrietamiento estructural para HSOLD=0 en MA (CDS).	89
Figura 4.2: Inicio de todo agrietamiento estructural para HSOLD=0 en MA (SNP).	90
Figura 4.3: Inicio de todo agrietamiento estructural para HSOLD>0 en MA, para todos los materiales excepto CM, SL y CAPE (CDS).	91
Figura 4.4: Inicio de todo agrietamiento estructural para HSOLD>0 en MA, para todos los materiales excepto CM, SL y CAPE (SNP).	91
Figura 4.5: Inicio de todo agrietamiento estructural para HSOLD>0 en MA, para todos los materiales excepto CM, SL y CAPE (HSNEW).	92
Figura 4.6: Inicio de todo agrietamiento estructural para HSOLD>0 en MA, para todos los materiales excepto CM, SL y CAPE (PCRW).	93
Figura 4.7: Inicio de todo agrietamiento estructural para HSOLD=0 en ST (CDS).	93

# UCUENCA

Figura 4.8: Inicio de todo agrietamiento estructural para HSOLD=0 en ST (SNP).....	94
Figura 4.9: Inicio de todo agrietamiento estructural para HSOLD>0 en ST, para todos los materiales excepto CM, SL y CAPE (CDS).....	95
Figura 4.10: Inicio de todo agrietamiento estructural para HSOLD>0 en ST, para todos los materiales excepto CM, SL y CAPE (HSNEW).....	95
Figura 4.11: Inicio de todo agrietamiento estructural para HSOLD>0 en ST, para todos los materiales excepto CM, SL y CAPE (SNP).....	96
Figura 4.12: Inicio de todo agrietamiento estructural para HSOLD>0 en ST, para todos los materiales excepto CM, SL y CAPE (PCRW).....	96
Figura 4.13: Inicio de todo agrietamiento estructural para HSOLD>0 en ST, para los materiales CM, SL y CAPE (PCRA).....	97
Figura 4.14: Inicio de todo agrietamiento estructural para HSOLD>0 en ST, para los materiales CM, SL y CAPE (CDS).....	97
Figura 4.15: Inicio de todo agrietamiento estructural para HSOLD>0 en ST, para los materiales CM, SL y CAPE (SNP).....	98
Figura 4.16: Progreso de todo agrietamiento estructural para HSOLD=0 en AM.....	99
Figura 4.17: Progreso de todo agrietamiento estructural para HSOLD>0 en AM, para todos los materiales excepto CM.....	99
Figura 4.18: Progreso de todo agrietamiento estructural para HSOLD=0 en ST.....	100
Figura 4.19: Progreso de todo agrietamiento estructural para HSOLD>0 en ST, para todos los materiales excepto CM.....	100
Figura 4.20: Inicio de agrietamiento transversal por temperatura en la superficie original (HSOLD=0).....	101
Figura 4.21: Inicio de agrietamiento transversal por temperatura en sobrecapas o sellos(HSOLD>), (CCT).....	102
Figura 4.22: Inicio de agrietamiento transversal por temperatura en sobrecapas o sellos(HSOLD>0), para CCT=5. (CDS).....	102
Figura 4.23: Progreso de agrietamiento transversal por temperatura en la superficie original (HSOLD=0), (NCTa).....	103
Figura 4.24: Progreso de agrietamiento transversal por temperatura en la superficie original (HSOLD=0), (CDS).....	104
Figura 4.25: Progreso de agrietamiento transversal por temperatura en una sobrecapa o sello (HSOLD>0), (PNCT).....	104

# UCUENCA

Figura 4.26: Progreso de agrietamiento transversal por temperatura en una sobrecapa o sello (HSOLD>0), (NCTa).....	105
Figura 4.27: Progreso de agrietamiento transversal por temperatura en una sobrecapa o sello (HSOLD>0), (CDS).....	106
Figura 4.28: Inicio de la desintegración para los distintos tipos de pavimentos y materiales. ....	107
Figura 4.29: Inicio de la desintegración para una mezcla asfáltica (AM) de material mezcla fría (CM), (CDS).....	108
Figura 4.30: Inicio de la desintegración para una mezcla asfáltica (AM) de material mezcla fría (CM), (RRF).....	108
Figura 4.31: Inicio de la desintegración para un tratamiento superficial (ST) para todos los materiales excepto SL y CAPE, (CDS) .....	109
Figura 4.32: Inicio de la desintegración para un tratamiento superficial (ST) para todos los materiales excepto SL y CAPE, (RRF) .....	109
Figura 4.33: Progreso de la desintegración de pavimento para todos los tipos de pavimentos y materiales, (ARVa).....	110
Figura 4.34: Progreso de la desintegración de pavimento para todos los tipos de pavimentos y materiales, (CDS) .....	110
Figura 4.35: Progreso de la desintegración de pavimento para todos los tipos de pavimentos y materiales, (RRF).....	111
Figura 4.36: Inicio de baches para todos los tipos de pavimentos y materiales, (HS) ....	111
Figura 4.37: Inicio de baches para todos los tipos de pavimentos y materiales, (CDB)..	112
Figura 4.38: Inicio de baches para todos los tipos de pavimentos y materiales, (MMP) .	112
Figura 4.39: Variación de Fpat VS. TLF .....	113
Figura 4.40: PEFF VS. Fpat para el inicio de baches por agrietamiento y desintegración .....	114
Figura 4.41: PEFF VS. Fpat para el inicio de baches por alargamiento .....	114
Figura 4.42: Progresión de baches para todos los pavimentos cuando el deterioro causante es el agrietamiento, (ADISi) .....	115
Figura 4.43: Progresión de baches para todos los pavimentos cuando el deterioro causante es el agrietamiento, (CDS).....	115
Figura 4.44: Progresión de baches para todos los pavimentos cuando el deterioro causante es el agrietamiento, (ELANES) .....	116

# UCUENCA

Figura 4.45: Progresión de baches para todos los pavimentos cuando el deterioro causante es el agrietamiento, (MMP).....	116
Figura 4.46: Progresión de baches para todos los pavimentos cuando el deterioro causante es el agrietamiento, (HS) .....	117
Figura 4.47: Suma de baches para los distintos tipos de deterioros causantes.....	117
Figura 4.48: Inicio del ahuellamiento por su componente de densificación inicial para todos los tipos de pavimentos, (SNP).....	118
Figura 4.49: Inicio del ahuellamiento por su componente de densificación inicial para todos los tipos de pavimentos, (COMP).....	119
Figura 4.50: Inicio del ahuellamiento por su componente de deformación estructural cuando no hay agrietamiento, para todos los tipos de pavimentos, (SNP) .....	120
Figura 4.51: Inicio del ahuellamiento por su componente de deformación estructural cuando no hay agrietamiento, para todos los tipos de pavimentos, (COMP).....	120
Figura 4.52: Inicio del ahuellamiento por su componente de deformación estructural cuando hay agrietamiento, para todos los tipos de pavimentos, (SNP) .....	121
Figura 4.53: : Inicio del ahuellamiento por su componente de deformación estructural cuando hay agrietamiento, para todos los tipos de pavimentos, (COMP) .....	121
Figura 4.54: Inicio del ahuellamiento por su componente de deformación estructural cuando hay agrietamiento, para todos los tipos de pavimentos, (MMP) .....	122
Figura 4.55: Inicio del ahuellamiento por su componente de deformación estructural cuando hay agrietamiento, para todos los tipos de pavimentos, (ACXa) .....	122
Figura 4.56: Inicio del ahuellamiento por su componente de deformación estructural analizado para el caso estándar .....	123
Figura 4.57: Inicio del ahuellamiento por su componente de deformación plástica para mezclas asfálticas, (CDS).....	124
Figura 4.58: Inicio del ahuellamiento por su componente de deformación plástica para mezclas asfálticas, (HS) .....	124
Figura 4.59: Inicio del ahuellamiento por su componente de deformación plástica para mezclas asfálticas, (Sh).....	125
Figura 4.60: Progreso del ahuellamiento considerando el caso de análisis estándar.....	126
Figura 4.61: Cambio en la rugosidad por el componente estructural en todos los tipos de pavimentos, (m).....	126
Figura 4.62: Cambio en la rugosidad por el componente estructural en todos los tipos de pavimentos, (AGE3).....	127

# UCUENCA

Figura 4.63: Cambio en la rugosidad por el componente estructural en todos los tipos de pavimentos, (ACXa).....	127
Figura 4.64: Cambio en la rugosidad por el componente estructural en todos los tipos de pavimentos, (HSNEW).....	128
Figura 4.65: Cambio en la rugosidad por el componente estructural en todos los tipos de pavimentos, (SNP).....	128
Figura 4.66: Cambio en la rugosidad por el componente estructural en todos los tipos de pavimentos, (HSOLD).....	129
Figura 4.67: Cambio en la rugosidad por el componente estructural en todos los tipos de pavimentos para ACXa=25%, (PACX).....	129
Figura 4.68: Cambio en la rugosidad por el componente estructural en todos los tipos de pavimentos para ACXa=75%, (PACX).....	130
Figura 4.69: Cambio en la rugosidad por el componente de agrietamiento para todos los tipos de pavimentos.....	130
Figura 4.70: Cambio en la rugosidad por el componente de ahuellamiento para todos los tipos de pavimentos.....	131
Figura 4.71: Cambio en la rugosidad por el componente de baches para todos los tipos de pavimentos, (NPTa).....	132
Figura 4.72: Cambio en la rugosidad por el componente de baches para todos los tipos de pavimentos, (Fpat).....	132
Figura 4.73: Cambio en la rugosidad por el componente de baches para todos los tipos de pavimentos, (FM).....	133
Figura 4.74: Cambio en la rugosidad por el componente de baches para todos los tipos de pavimentos, (Ppt).....	133
Figura 4.75: Cambio en la rugosidad por el componente ambiental para todos los tipos de pavimentos.....	134
Figura 4.76 Cambio en la rugosidad del pavimento para cada componente.....	135
Figura 4.77: Cambio total en la rugosidad para todos los tipos de pavimentos.....	135

## Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio Institucional

---

Sophia Micaela Lituma Avecillas en calidad de autor/a y titular de derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación "Análisis y evaluación de modelos de deterioro para pavimentos asfálticos", de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Asimismo, autorizo a la Universidad de Cuenca para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el repositorio institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, 06 de septiembre del 2022



---

Sophia Micaela Lituma Avecillas

C.I: 0104969266



Sophia Micaela Lituma AVECILLAS, autor/a del trabajo de titulación "Análisis y evaluación de modelos de deterioro para pavimentos asfálticos", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor/a.

Cuenca, 06 de septiembre del 2022



---

Sophia Micaela Lituma AVECILLAS

C.I: 0104969266

## DEDICATORIA

Este trabajo de titulación se lo dedico a mi familia, en especial a mi madre Romina por ser mi fuerza y apoyo incondicional. A mi padre Carlos Manuel y a mi abuelito Carlos Enrique por ser mi inspiración para convertirme en ingeniera.

## AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios por permitirme culminar esta etapa de mi vida y alcanzar esta meta tan anhelada. Al Ing. Jaime Bojorque Iñiguez, Ph.D. por su tiempo, esfuerzo y dedicación en la tutoría de este trabajo de titulación. A mis padres Romina y Carlos por su apoyo, consejo y cariño en todo momento. A mi hermana Francisca, por ser mi mejor compañía. A mis abuelitos Carlos, Cumandá, Román y Noralma por su cariño, consejos y constantes ánimos. A Gabriel, por ser mi cómplice y mi mayor apoyo en este camino. Finalmente, agradezco a mis amigos que me acompañaron durante este caminar e hicieron de estos años de universidad una experiencia inolvidable.

### 1.1. Introducción

Análisis históricos realizados por distintas instituciones indican que al momento de diseñar la estructura de una vía se proyecta que esta tenga una vida útil de por lo menos 20 - 25 años, sin embargo, se conoce que las pavimentaciones en carreteras brindan condiciones de servicio adecuadas únicamente entre 8 y 12 años cuando no se efectúan labores apropiadas ya sea de mantenimiento o rehabilitación [1].

Comúnmente en los proyectos de pavimentación la mayor preocupación se centra en el proceso de diseño y construcción del pavimento esperando que este pueda soportar las cargas impuestas y logre alcanzar la vida útil deseada. Sin embargo, a menudo se deja de lado la importancia de realizar procesos adecuados de mantenimiento y rehabilitación, dando paso a que el proceso de recuperación del pavimento sea complicado y costoso [2]. En consecuencia, la ingeniería vial reconoce la importancia de contar con una base de datos que recopile información sobre tratamientos realizados en las vías, condiciones climatológicas y niveles de tránsito para desarrollar metodologías para un manejo sistemático de la gestión vial [3].

Con el nuevo concepto instaurado por la ingeniería vial, las entidades gubernamentales encargadas del estado de las vías, al identificar la problemática del deterioro en las carreteras, comienzan a realizar estudios con el fin de comprender el fenómeno del deterioro en los pavimentos [1]. Así, se desarrollaron modelos de deterioro, que de acuerdo con la Asociación Mundial de Carreteras son una representación matemática que hace posible predecir el estado del pavimento, basándose en información referente a su estado actual, factores de deterioro y los efectos de procesos de mantenimiento y rehabilitación, conformando una parte esencial de los sistemas de gestión de pavimentos [4].

Conocida la importancia de los modelos de deterioro en la gestión de pavimentos y debido a la poca o nula importancia que se da al estado de los pavimentos en el país, en el presente trabajo de investigación se analizarán modelos de deterioro para pavimentos asfálticos y se evaluará el efecto relativo de sus parámetros. Esto se lo realizará empleando la herramienta computacional MATLAB para evaluar los diferentes parámetros de entrada. El análisis permitirá conocer los efectos de la variación de distintos parámetros tanto para el inicio como para la progresión de los deterioros, permitiendo conocer los parámetros más críticos

para los deterioros y haciendo posible definir los métodos apropiados para el mantenimiento y conservación de las vías de pavimento asfáltico.

## 1.2. Antecedentes

En los años 60 se empezó a estudiar la importancia de la planificación, diseño, construcción y mantenimiento de las carreteras y al entenderlas como actividades interconectadas se desarrolla el concepto de sistemas de gestión de pavimentos, que según Solminihac (2001), se define como un conjunto de operaciones que se ejecutan con el fin de mantener por un tiempo determinado condiciones de servicio óptimas en la vía, minimizando costos económicos, sociales y ambientales. Entonces, establecida la importancia de los sistemas de gestión se comienza a realizar más estudios [1].

En 1968, el Banco Mundial en conjunto con el Laboratorio Central de Puentes y Carreteras de Francia (LCPC) y el Laboratorio británico de Investigación de Transporte y Carreteras (TRRL) realizaron estudios para definir los términos de referencia para el diseño de carreteras. A partir de la información obtenida el Banco Mundial encomienda al Instituto Tecnológico de Massachusetts la elaboración de un modelo para investigar la interacción entre los costos de obras y de la operación de los vehículos, desarrollándose así el Modelo de costos de carretera (HCM) por sus siglas en inglés. Más adelante, el Banco Mundial financia estudios con el fin de desarrollar tecnologías y determinar el deterioro de carreteras pavimentadas y no pavimentadas, así como los factores que afectan los costos de operación de los vehículos. En años subsecuentes se realizaron estudios en Kenia, El Caribe, Brasil y otros países permitiendo ampliar la validez de los modelos desarrollados [5]. El desarrollo y conocimiento de estos modelos permitió el desarrollo de programas computacionales que hacen posible predecir el comportamiento de los pavimentos a lo largo del tiempo y el gasto que implica la conservación de los mismos.

Debido a la capacidad de los modelos para predecir el deterioro en los pavimentos, se los considera una herramienta esencial en los sistemas de gestión por su capacidad para predecir la evolución del estado del pavimento a lo largo del tiempo partiendo de información de su estado al inicio del servicio [6]. La aplicación de los modelos de deterioro hace posible la planificación de actividades de mantenimiento y rehabilitación lo que en consecuencia permite tener mayor control sobre los presupuestos destinados para las estructuras viales, optimizando y conservando inversiones, a la par que se garantiza el confort y la seguridad

de sus usuarios. Sin embargo, el empleo de modelos de deterioro no es práctica común en nuestro medio.

### 1.3. Planteamiento del problema y justificación

En la red vial de la provincia del Azuay, como es el caso de la vía El Descanso-Puente Europa-Gualaceo-Paute, la vía Cuenca-Girón, la vía Zhud-Biblián, así como en muchas otras a nivel nacional, es común que las carreteras presenten niveles de deterioro preocupantes [7]. El Ministerio de Transporte y Obras Públicas (MTO) dio a conocer en febrero del 2022 que, de los 10,285 km de vías, 6,880 km están en buen estado mientras que 3,405 km están en una estado malo y regular. Es decir, cerca del 33% de las vías no se encuentran en condiciones adecuadas para ser transitadas por presencia de gran cantidad de baches, grietas pronunciadas, presencia excesiva de agua, entre otras [8].

La falta de estudios y recopilación de información del estado de los pavimentos ha provocado una carencia de conocimiento sobre las causales del deterioro en los pavimentos en la red vial del país, ocasionado que las actividades de mantenimiento que se ejecutan en las vías a menudo no sean las más adecuadas, provocando que a corto y mediano plazo los deterioros se propaguen haciendo que los gobiernos locales tengan que asumir costos desmedidos para la gestión de las vías.

Se conoce que los sistemas viales implican gran inversión y valor de uso, por lo que, es fundamental contar con información y conocimiento que justifique el uso adecuado de recursos económicos para que no se presenten gastos excesivos ni insuficientes, sino lo necesario en el momento preciso para evitar el avance del deterioro y así asegurar el confort y seguridad para los usuarios [3]. Para evitar estos inconvenientes es importante contar con un sistema de gestión de pavimentos, donde por medio de la aplicación de modelos se pueda predecir los futuros deterioros del pavimento [9].

El análisis de modelos existentes para predecir el deterioro en los pavimentos asfálticos ayudará a solventar, en parte, la problemática que se evidencia en la gestión de las vías de la provincia y del país, ya que mediante la evaluación de los modelos será posible descubrir los parámetros críticos causantes de la propagación y avance de los distintos tipos de deterioros a corto y largo plazo. En consecuencia, este conocimiento podrá aplicarse para

gestionar de manera adecuada los procesos de mantenimiento y rehabilitación de los pavimentos asfálticos.

## 1.4. Objetivos

### Objetivo General

Analizar y evaluar los modelos de deterioro existentes para pavimentos asfálticos, con la finalidad de valorar los parámetros involucrados en el comportamiento del deterioro.

### Objetivos Específicos

1. Investigar los distintos tipos de deterioro en pavimentos asfálticos.
2. Definir los parámetros para cada modelo dependiendo del tipo de deterioro.
3. Implementar los modelos de deterioro en la herramienta MATLAB.
4. Evaluar los modelos de deterioro variando parámetros para definir la variación en el comportamiento del deterioro.
5. Emitir los análisis y discusiones de los resultados.

## 1.5. Alcance

El presente trabajo propone el análisis de distintos modelos de deterioro en pavimentos asfálticos con la finalidad de obtener mayor conocimiento sobre las causales críticas en los distintos tipos de deterioro. Para alcanzar dicho fin, se investigará sobre los distintos tipos de deterioro que se evidencian en los pavimentos y se identificarán los causantes de su aparición y progresión. Luego se procederá a elegir entre modelos de deterioro existentes aquellos que tengan mayor aplicabilidad considerando modelos que contengan parámetros cuya información sea de fácil acceso. Con la herramienta computacional MATLAB se programarán los modelos, variando parámetros de acuerdo a cada tipo de deterioro y se obtendrán resultados que podrán entenderse mejor de manera gráfica. Finalmente, se evaluarán los resultados obtenidos y se definirán qué parámetros provocan que los deterioros analizados se presenten con mayor o menor intensidad.

En este capítulo se presenta la información necesaria para el entendimiento y desarrollo de este trabajo de investigación. Se describen los conceptos básicos relacionados a los pavimentos: tipos, estructura, parámetros de diseño, tipos de deterioro y variables que afectan en los deterioros. Se define brevemente los modelos de deterioro y se presentan los modelos a considerarse en el análisis.

### 2.1. Generalidades de los pavimentos

Un pavimento es una estructura apoyada en la subrasante de una vía, compuesta por un conjunto de capas sobrepuestas de forma horizontal, diseñadas y construidas de manera técnica con materiales adecuados mediante procesos de compactación; con el propósito que la estructura sea capaz de resistir cargas repetidas de tránsito durante el periodo de vida para el cual fue diseñado.

Montejo [10], expone que los pavimentos deben reunir las siguientes características:

- Ser resistente a las cargas impuestas por el tránsito.
- Ser resistente a la intemperie.
- Presentar una textura superficial adecuada para las velocidades de circulación previstas en la vía garantizando seguridad vial.
- Ser resistente al desgaste derivado del efecto abrasivo de las llantas de los vehículos.
- Debe presentar regularidad superficial longitudinal y transversal para el confort de los usuarios.
- Debe ser duradero.
- Debe contar con condiciones de drenaje adecuadas para evitar el represamiento de agua en la vía.
- El ruido de rodadura debe ser moderado, no debe afectar ni al usuario adentro del vehículo ni al exterior.
- Debe tener un color adecuado para evitar deslumbramiento y reflejos para el conductor brindando seguridad al tránsito.



- Debe ser económico.

## **2.2. Tipos de Pavimentos**

Los pavimentos se clasifican en cuatro grandes clases: pavimentos flexibles, pavimentos semi-rígidos o semi-flexibles, pavimentos rígidos y pavimentos articulados.

### **2.2.1. Pavimentos flexibles**

Es un sistema en capas donde los materiales de mejores características estructurales se encuentran en la parte superior de la estructura, por lo que en las capas superiores la intensidad de los esfuerzos es mayor, y menor hacia la base. En cuanto a la estructura de las capas, este tipo de pavimentos está compuesto por una capa bituminosa en la parte superior apoyada sobre dos capas no rígidas conocidas como base y subbase. Puede excluirse cualquiera de las capas no rígidas dependiendo de las necesidades del proyecto. A menudo es el diseño de pavimento más económico, pero con una menor vida útil [11].

### **2.2.2. Pavimento rígido**

Es una estructura compuesta principalmente por una losa de concreto hidráulico que puede o no apoyarse sobre una capa de base o subbase, ya que pudiera asentarse directamente sobre la subrasante de la vía según la resistencia de la losa. Debido a la rigidez y elasticidad propia del concreto hidráulico los esfuerzos tienden a distribuirse en una superficie mayor causando que una parte importante de la capacidad de la estructura sea la de la propia losa, por ello la facilidad de prescindir de capas [12].

### **2.2.3. Pavimentos compuestos**

Se denominan también pavimentos semi-rígidos o semi-flexibles. En este tipo de pavimentos una de sus capas tiende a rigidizarse con el fin de corregir propiedades mecánicas de los materiales. A menudo, esta rigidización se realiza con aditivos que pueden ser asfalto, cemento, cal, entre otros [10].

### **2.2.4. Pavimentos articulados**

Los pavimentos articulados son aquellos que en su capa de rodadura están compuestos por bloques de concreto prefabricado de espesor uniforme (adoquines). Se colocan sobre

# UCUENCA

una capa delgada de arena apoyada sobre una capa de base granular o directamente sobre la subrasante dependiendo de la capacidad de estas capas. [10]

## 2.3. Estructura de los pavimentos flexibles

Según la AASHTO [13], la estructura de los pavimentos flexibles es la siguiente:

### 2.3.1. Subrasante

Es la capa donde se asienta la estructura del pavimento. El material de la subrasante generalmente es el suelo propio del terreno o material de préstamo, y debe estar correctamente compactada a una densidad específica previo a la colocación de las capas superiores.

### 2.3.2. Subbase

Es la capa que se encuentra entre la subrasante y la capa de base, compuesta por material granular compactado. Se diferencia de la capa de base por presentar características de resistencia, plasticidad y gradación menos exigentes.

La capa de subbase cumple con algunas funciones

- Previene el ingreso de material fino de la subrasante a la base.
- Ayuda minimizar los efectos producidos por cambios volumétricos derivados de procesos de expansión o cambios extremos de temperatura, evitando deformaciones en la capa de rodadura.
- Previene la acumulación de agua entre o debajo de la estructura del pavimento.
- Ayuda a soportar las cargas producidas por los vehículos para una mejor distribución de esfuerzos hacia la subrasante.
- En el diseño ayuda a disminuir el espesor de la capa de rodadura y por ende disminuir costos del proyecto.

### 2.3.3. Base

Es la capa de material granular compactado que se encuentra por debajo de la capa de rodadura. Si el proyecto cuenta con una capa de subbase, la capa de base se asentará

# UCUENCA

sobre ella, caso contrario lo hará sobre la subrasante. La función principal de la capa de base es brindar soporte estructural al pavimento permitiendo una correcta distribución de esfuerzos hacia las capas inferiores. Al igual que la capa de subbase ayuda a disminuir costos por la disminución de espesor de la capa de rodadura.

## **2.3.4. Capa de rodadura**

Es la capa más superficial del pavimento. Está compuesta por una mezcla de minerales agregados y material bituminoso y se coloca sobre la capa de base. La capa de rodadura está diseñada para resistir la abrasión debida a las cargas del tráfico, impedir el ingreso de agua a la estructura y proporcionar una buena superficie, color y textura para brindar seguridad al tránsito. En el proceso constructivo de esta capa es de vital importancia en el proceso de construcción que los materiales queden bien compactados, caso contrario el pavimento será más susceptible a presentar deterioros que reducirán la vía útil y desempeño del pavimento.

## **2.4. Factores para el diseño de pavimentos**

Según Huang [11], los factores de diseño en el diseño de pavimentos se clasifican en: tráfico y cargas, medio ambiente, materiales y criterio de falla.

### **2.4.1. Tráfico y cargas**

El tráfico y cargas considera los ejes de carga, el número de repeticiones de carga, el área de contacto de los neumáticos y la velocidad de los vehículos.

*Ejes de carga:* Para el diseño del pavimento es importante analizar la separación entre las ruedas de los vehículos para conocer las cargas de los ejes y su efecto en los esfuerzos y deformaciones que se generan en la estructura.

*Número de repeticiones de carga:* Se analiza el número de repeticiones de carga para conocer el daño producido en el pavimento y por ende la acumulación de deformaciones.

*Área de contacto:* Es necesario conocer el área de contacto entre el neumático y el pavimento para suponer cómo se presentan las cargas de los ejes. El tamaño del área de contacto depende de la presión de las llantas y para el diseño de pavimentos la presión de las llantas se considera igual a la presión de contacto, entonces, dentro de las

# UCUENCA

consideraciones se tiene que las cargas más pesadas por eje tienen presiones neumáticas mayores y por ende efectos más destructivos.

*Velocidad de los vehículos:* Se considera la velocidad de los vehículos en el diseño de pavimentos porque mientras mayor sea la velocidad, mayor será el módulo resiliente y las deformaciones en el pavimento serán menores.

## **2.4.2. Medio Ambiente**

Las variables consideradas en el diseño de pavimento relacionadas con el medio ambiente son la precipitación y temperatura ya que influyen directamente sobre el módulo elástico de las distintas capas.

*Temperatura:* En los pavimentos asfálticos la temperatura afecta directamente al módulo resiliente. Las propiedades elásticas y visco elásticas de las mezclas asfálticas calientes (HMA) se ven afectadas por la temperatura. A bajas temperaturas la HMA se rigidiza reduciendo las tensiones en el pavimento, pero una HMA más rígida presenta una vida por fatiga reducida, a la vez que puede producir que los pavimentos asfálticos se agrieten. Otro problema derivado de las temperaturas bajas es la penetración de heladas que produce que en épocas de invierno la subrasante sea más fuerte mientras que en verano es más débil. El problema se presenta cuando el hielo presente en la subrasante se derrite alcanzando un estado de saturación.

*Precipitación:* La presencia de lluvia y nieve afecta el nivel de infiltración en la subrasante aumentando el nivel freático, por lo que se debe contar con adecuadas prácticas de drenaje. Cuando no se pueda contar con buenas prácticas de drenaje se recomienda diseñar el pavimento con módulos resilientes menores; sin embargo, no sería la solución ya que un drenaje pobre ocasiona falta de resistencia al corte, pérdida de apoyo y problemas de bombeo.

## **2.4.3. Materiales**

Los métodos de diseño mecanístico-empíricos resaltan la importancia de analizar los materiales a usarse en la estructura del pavimento ya que de sus propiedades dependerá las respuestas a esfuerzos, deformaciones y desplazamientos; información que en conjunto con el criterio de falla permite conocer las fallas que puedan ocurrir en el pavimento.

# UCUENCA

Para el diseño de pavimentos flexibles [11] establece necesario tener las siguientes consideraciones.

1. Cuando la mezcla asfáltica caliente (HMA) se considera visco elástico lineal, debe especificarse la deformación por fluencia (creep compliance). Si la temperatura en la prueba de fluencia no es la misma que la temperatura utilizada para el diseño del pavimento, se debe proporcionar el factor de cambio de temperatura-tiempo, que indica la sensibilidad de las mezclas asfálticas a la temperatura.
2. Si el diseño se basa en el agrietamiento por fatiga, se deben especificar las propiedades de fatiga de las mezclas asfálticas.
3. Si el diseño se basa en la profundidad del surco sumando las deformaciones permanentes de todas las capas, se deben especificar los parámetros de deformación permanente de cada capa.
4. Si se utilizan como base para el diseño otros deterioros, como el agrietamiento a baja temperatura, se deben especificar las propiedades apropiadas, como la rigidez del asfalto a la temperatura de diseño en invierno.

De igual manera es de suma importancia conocer la calidad del suelo de la subrasante ya que de este depende en gran parte el espesor que tendrá la estructura del pavimento. En esta capa se evalúa su capacidad de soporte y resistencia a la deformación ante las cargas del tránsito. Así mismo, se debe considerar la sensibilidad del suelo a la humedad para evitar variaciones volumétricas.

#### **2.4.4. Criterio de falla**

En el método de diseño de pavimentos mecanístico-empírico se establece un criterio de falla específico a un tipo de deterioro, contrario al método de la AASHTO que utiliza como criterio el índice de serviciabilidad presente (PSI).

De acuerdo con [11], en los pavimentos flexibles se presentan tres tipos principales de deterioro a considerarse para el diseño, estos son: agrietamiento por fatiga, agrietamiento por temperatura y ahuellamiento.

*Agrietamiento por fatiga:* Se produce por la deformación por tracción horizontal en la parte inferior de la mezcla asfáltica caliente. El criterio de falla considerado relaciona la

deformación por tracción con el número de repeticiones de carga permitidas mediante el ensayo de fatiga en laboratorio.

*Agrietamiento por temperatura:* Este deterioro considera el agrietamiento por altas y bajas temperaturas. El pavimento tenderá a agrietarse cuando la tensión térmica calculada sea mayor que la resistencia a la fractura. El agrietamiento por fatiga térmica es causado por los esfuerzos de tracción en la capa de asfalto debidos al ciclo diario de temperatura.

*Ahuellamiento:* Este deterioro se identifica únicamente en pavimentos asfálticos y se lo observa por la deformación permanente o presencia de surcos a lo largo de la trayectoria de las ruedas de los vehículos. Para controlar el ahuellamiento en los pavimentos se establecen dos criterios de diseño: el primero establece un límite para el esfuerzo de compresión vertical en la parte superior de la subrasante, mientras que, el segundo limita la formación de surcos a una cantidad tolerable.

## **2.5. Deterioro en los pavimentos**

El deterioro de los pavimentos es un factor muy importante a considerar en el diseño, ya que, tener conocimiento sobre los tipos de deterioro permite identificar sus posibles causas. Sin embargo, el estudio del deterioro de pavimentos es un fenómeno bastante complicado por la interacción de distintos mecanismos. La magnitud de los deterioros está ligada al tráfico, deficiencias en los materiales, condiciones climáticas, procesos de construcción y procesos de mantenimiento.

## **2.6. Variables que afectan el deterioro de los pavimentos**

De acuerdo al manual Modelling Road Deterioration and Works Effects [14], las variables que se describen a continuación son las más comunes en la mayoría de modelos de deterioro.

### **2.6.1. Tráfico**

Los volúmenes de tráfico existentes en las carreteras se analizan en función del tipo de vehículo dependiendo del análisis que se vaya a realizar. Los volúmenes de tráfico se expresan como el Tráfico Promedio Diario Anual (AADT por sus siglas en inglés).

$$AADT = \frac{\text{Tráfico total anual en ambas direcciones}}{365}$$

# UCUENCA

Para predecir el impacto de los vehículos en el deterioro de los pavimentos, es necesario conocer las siguientes medidas de tráfico:

- Número de ejes de vehículos (YAX): Se define como el número total de ejes de vehículos que circulan por un lugar determinado en un tiempo específico.
- Número equivalente de cargas estándar por eje (ESA): Combina los efectos dañinos del espectro de carga completo de carga por eje utilizando una unidad de medida común relacionada al daño.

## 2.6.1.1. Ejes de vehículos

Para cada tipo de vehículo (k), el número de ejes de vehículos ( $YAX_k$ ), que transita una sección dada en un año en particular, se calcula del volumen de tráfico multiplicado por el número de ejes por tipo de vehículo involucrado.

$$YAX_k = \frac{T_k(NAXLES_k)}{ELANES \times 10^6}$$

El número total de todos los ejes, YAX, en un año específico se obtiene sumando los YAX's para todos los tipos de vehículos.

$$YAX = \sum_{k=1}^K YAX_k$$

Donde:

YAX = Número total anual de ejes de todos los tipos de vehículos (millones por carril).

T<sub>k</sub> = Volumen de tráfico anual del tipo de vehículo k, (k=1, 2, ..., K)

NAXLES<sub>k</sub> = Número de ejes por tipo de vehículo k.

ELANES = Número efectivo de carriles para la sección de la carretera.

## 2.6.1.2. Factor de carga de eje estándar equivalente

El factor de carga de eje equivalente estándar se define como el número de aplicaciones de una carga estándar de 80 kN de un eje simple de neumático doble que causarían el mismo daño a la carretera, que la aplicación de la carga del eje que está siendo considerada. La expresión para su cálculo es:

$$ESALF_k = \sum_{i=1}^{I_k} \frac{P_{ki}}{100} \sum_{j=1}^{J_k} \left( \frac{AXL_{kij}}{SAXL_j} \right)^{LE}$$

Donde:

$ESALF_k$  = Factor de cargas de eje estándar equivalente para un tipo de vehículo k, en ejes de carga estándar equivalentes.

$I_k$  = El número de subgrupos i (definido en términos de rangos de carga) del tipo de vehículo k ( $i= 1, 2, \dots, I_k$ )

$P_{ki}$  = Porcentaje de vehículos en un subgrupo i del tipo de vehículo k.

LE = Equivalente de equivalencia de carga por eje (predeterminado=4)

$J_k$  = Número de ejes simples por tipo de vehículo k.

$AXL_{kij}$  = Carga promedio en el eje j de rango de carga i en el tipo de vehículo k, toneladas.

$SAXL_j$  = Carga estándar por eje simple del grupo de eje tipo j.

Para las modelaciones que se presentan a continuación el número anual de ejes de carga estándar equivalente se denota como YE4.

$$YE4 = \sum_{k=1}^K \frac{T_k(ESALF_k)}{ELANES \times 10^6}$$

YE4 = Número total anual de ejes de carga estándar equivalentes, en millones/carril.

## 2.6.2. Clima y medio ambiente

El clima en el cual está situada la carretera tiene un impacto importante en la tasa a la cual se deteriorará la vía. Los factores ambientales importantes se relacionan con condiciones de temperatura, precipitación y vientos.

### 2.6.2.1. Humedad y Temperatura

Para las modelaciones se considerará una clasificación de cinco humedades y cinco temperaturas. (Ver tabla 2.1 y 2.2).



Tabla 2.1: Clasificación de humedad. [14]

Moisture Classification	Description	Thornthwaite Moisture Index	Annual Precipitation (mm)
Arid	Very low rainfall, high evaporation	-100 to -61	< 300
Semi-arid	Low rainfall	-60 to -21	300 to 800
Sub-humid	Moderate rainfall, or strongly seasonal rainfall	-20 to +19	800 to 1600
Humid	Moderate warm seasonal rainfall	+20 to +100	1500 to 3000
Per-humid	High rainfall, or very many wet-surface days	> 100	> 2400

Tabla 2.2: Clasificación de temperatura. [14]

Temperature Classification	Description	Temperature Range (°C)
Tropical	Warm temperatures in small range	20 to 35
Sub-tropical - hot	High day cool night temperatures, hot-cold seasons	-5 to 45
Sub-tropical - cool	Moderate day temperatures, cool winters	-10 to 30
Temperate - cool	Warm summer, shallow winter freeze	-20 to 25
Temperate - freeze	Cool summer, deep winter freeze	-40 to 20

Para los modelos, el rango de temperatura se define el rango de temperatura ambiental mensual. Este se obtiene promediando las temperaturas de los 12 meses del año.

### 2.6.2.2. Precipitación

La precipitación media mensual (MMP) será el factor relacionado con la precipitación usado para modelar el deterioro de los pavimentos.

### 2.6.2.3. Coeficiente de drenaje

El coeficiente de drenaje se determina considerando la calidad de drenaje y el porcentaje de tiempo en el que el pavimento está expuesto a niveles de humedad cercanos a la saturación. La calidad del drenaje es función de la permeabilidad de los materiales subsuperficiales, las pendientes, la distancia para drenar el agua y el tipo de estructuras de drenaje existentes. (Ver tabla 2.3 y 2.4).

Tabla 2.3: Relación entre el tiempo y la calidad de drenaje [14].

Quality of Drainage	Water Removed From Layer Within
Excellent	2 hours
Good	1 day
Fair	1 week
Poor	1 month
Very Poor	water will not drain

Tabla 2.4: Valores de los coeficientes de drenaje. [14]

Quality of Drainage	Per cent of Time Pavement Structure is Exposed to Moisture Levels Approaching Saturation			
	< 1%	1 to 5%	5 to 25%	> 25%
Excellent	1.40 – 1.35	1.35 - 1.30	1.30 - 1.20	1.20
Good	1.35 – 1.25	1.25 - 1.15	1.15 - 1.00	1.00
Fair	1.25 – 1.15	1.15 - 1.05	1.00 - 0.80	0.80
Poor	1.15 – 1.05	1.05 - 0.80	0.80 - 0.60	0.60
Very Poor	1.05 – 0.95	0.95 - 0.75	0.75 - 0.40	0.40

### 2.6.3. Edad del Pavimento

Para la modelación del deterioro de pavimentos es necesario definir la edad de la superficie del pavimento desde la ejecución de algún trabajo de mantenimiento o rehabilitación en particular.

- AGE1 = Se refiere a la edad de los tratamientos preventivos. Se define como el tiempo, en número de años desde el último tratamiento preventivo, sellado, sobrecapa, reconstrucción del pavimento o cualquier nueva actividad de construcción.
- AGE2 = Se refiere a la edad de la superficie. Se define como el tiempo, en número de años desde el último trabajo de sellado, sobrecapa, reconstrucción del pavimento o nueva actividad de construcción.
- AGE3 = Se refiere a la edad de rehabilitación. Se define como el tiempo, en número de años, desde la última sobrecapa, reconstrucción del pavimento o nueva actividad de construcción.
- AGE4 = Se refiere a la edad base de la construcción. Se define como el tiempo, en número de años, desde la última reconstrucción o nueva actividad de construcción que involucra la construcción de una nueva capa de base.

### 2.7. Tipos de deterioro en los pavimentos

El Manual de Identificación de Deterioros en el Pavimento para Carreteras [15] clasifica los deterioros en pavimentos asfálticos de acuerdo a las siguientes categorías.

- Agrietamiento
- Parches y Baches
- Deformación de la superficie
- Defectos superficiales

Según [10], [11], [15] los deterioros se caracterizan de la siguiente manera.

## 2.7.1. Agrietamiento

### 2.7.1.1. Agrietamiento por fatiga o piel de cocodrilo

Descripción: Se presenta como una serie de grietas causadas por fatiga en áreas sometidas a repetición de cargas de tráfico. En el desarrollo inicial se presentan como grietas interconectadas, que más tarde se propagan hacia más lugares, formando piezas angulares de muchos lados asemejándose a un patrón de piel de cocodrilo (Ver Figura 2.1).

Causa: Los agrietamientos ocurren en la parte inferior de la capa de rodadura debido a esfuerzos de tracción.

Unidad de medida: El agrietamiento por fatiga se mide en metros cuadrados (m<sup>2</sup>).

Niveles de severidad

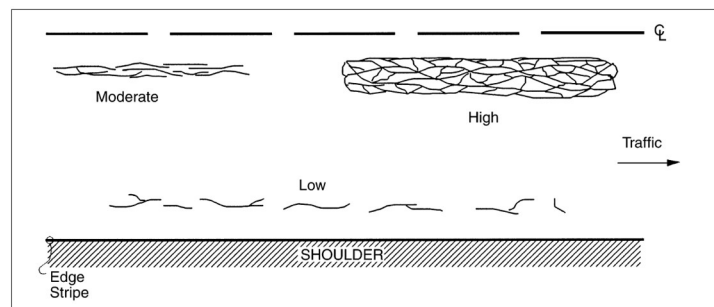
- Bajo: Se evidencian grietas con poca o nula conexión; las grietas no están selladas ni desconchadas y no se evidencia bombeo.
- Medio: Se evidencia un área de grietas interconectadas que forman un patrón completo; las grietas están ligeramente desconchadas y necesitan ser selladas. Aún no se observa bombeo.
- Alto: Se evidencia presencia moderada y severa de grietas desconchadas interconectadas que forman un patrón completo. Las grietas necesitan ser selladas, el bombeo es evidente, y algunas piezas se mueven con el tráfico.

En la Figura 2.2, se muestran los tipos de severidad para el agrietamiento por fatiga.

Figura 2.1: Agrietamiento por fatiga de alta severidad [15].



Figura 2.2: Severidad de agrietamiento por fatiga [15].



## 2.7.1.2. Agrietamiento en bloque

Descripción: Se presenta como un conjunto de grietas que divide la superficie asfáltica en piezas aproximadamente rectangulares cuyo tamaño varía entre 0.1 a 10 m<sup>2</sup> (Ver la Figura 2.3 y 2.4).

Causa: Es causado por la contracción de la mezcla asfáltica en caliente y por los esfuerzos y deformaciones derivados de los ciclos diarios de temperatura. Si bien este tipo de deterioro no está relacionado a las cargas, estas pueden aumentar la severidad de las grietas.

Unidad de medida: El agrietamiento en bloque se mide en metros cuadrados (m<sup>2</sup>).

Niveles de severidad:

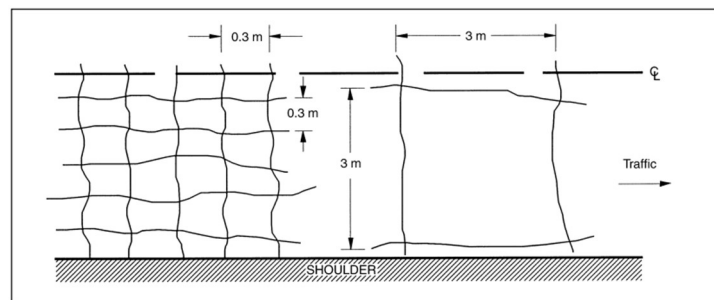
- Bajo: Las grietas tienen un ancho medio  $\leq 6$  mm o las grietas se encuentran selladas y en buen estado por lo que su profundidad no se puede determinar.
- Medio: Las grietas tienen un ancho medio  $>6$  mm y  $\leq 19$  mm, o fisuras de ancho  $\leq 19$  mm y agrietamiento aleatorio adyacente de baja severidad. Se considera agrietamiento aleatorio adyacente cuando está dentro de los 0.3 m de un deterioro primario.

- Alto: Grietas de ancho  $>19$  mm o fisuras de ancho  $\leq 19$  mm y agrietamiento aleatorio adyacente de moderada a alta severidad.

Figura 2.3: Agrietamiento en bloque con agrietamiento por fatiga [15].



Figura 2.4: Agrietamiento en bloque [15].



### 2.7.1.3. Agrietamiento de borde

Descripción: Son grietas que se presentan en forma de media luna o grietas continuas que intersecan al borde del pavimento dentro de los 0.6 m adyacente a la berma. También se consideran las grietas longitudinales que se encuentran fuera de la trayectoria de la rueda a una distancia de 0.6 m del borde del pavimento (Ver Figura 2.5 y 2.6).

Causa: Pueden generarse por el uso de mezclas asfálticas de agregado fino con asfalto de baja penetración. También pueden ocasionarse por falta de tráfico en la vía.

Unidad de medida: El agrietamiento de borde se cuantifica midiendo la longitud de pavimento afectado en metros lineales (m).

Nivel de severidad:

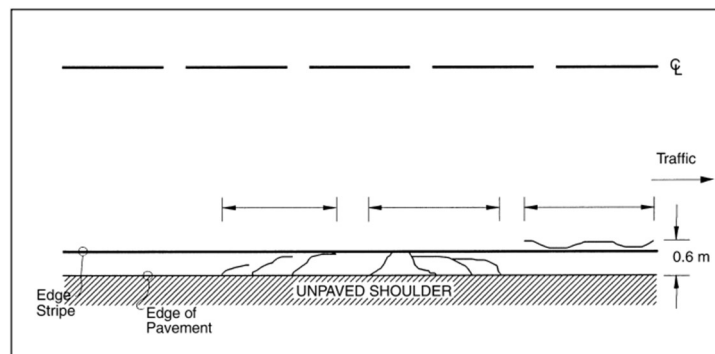
- Bajo: Las grietas no presentan ruptura ni desprendimiento de material.

- Medio: Las grietas presentan rupturas y pérdida de material de hasta el 10% de la longitud de la zona afectada del pavimento.
- Alto: Las grietas presentan ruptura y pérdida de material considerable mayor al 10% de la longitud de la zona afectada del pavimento.

Figura 2.5: Agrietamiento de borde de baja severidad [15].



Figura 2.6: Agrietamiento de Borde [15].



#### 2.7.1.4. Agrietamiento longitudinal

Descripción: Son grietas que se presentan de manera paralela a la línea central del pavimento. Se divide en grietas observadas en la trayectoria de las ruedas de los vehículos y fuera de la trayectoria de las ruedas (Ver Figura 2.7 y 2.8).

Causa: Aparecen como consecuencia del endurecimiento del asfalto, contracciones del asfalto por las variaciones de temperatura o pueden ocasionarse por reflexión de grietas causadas por grietas por bajo la superficie asfáltica. También puede producirse por un mal proceso de construcción en la junta de carril. Este tipo de grietas usualmente no se relacionan con cargas de tráfico.

Unidad de medida: El agrietamiento longitudinal se mide en metro lineales (m).

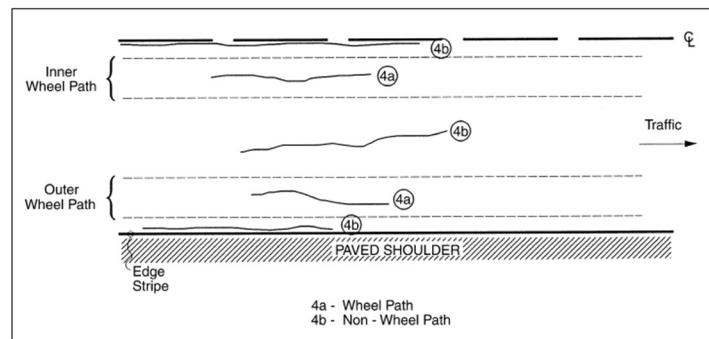
Nivel de severidad:

- Bajo: Las grietas presentan un ancho medio  $\leq 6$  mm o grietas selladas en buenas condiciones cuyo ancho no se puede determinar.
- Medio: Las grietas tienen un ancho medio  $> 6$  mm y  $\leq 19$  mm, o fisuras de ancho  $\leq 19$  mm con agrietamiento aleatorio adyacente de baja severidad.
- Alto: Las grietas tienen un ancho medio  $> 19$  mm o fisuras de ancho  $\leq 19$  mm y agrietamiento aleatorio adyacente de moderada a alta severidad.

Figura 2.7: Agrietamiento longitudinal en la trayectoria de la rueda [15].



Figura 2.8: Agrietamiento Longitudinal [15].



## 2.7.1.5. Agrietamiento transversal

Descripción: Son grietas que se presentan de manera transversal a la línea central del pavimento y se extienden a través de esta. (Ver Figura 2.9 y 2.10).

Causa: Aparecen como consecuencia del endurecimiento del asfalto, contracciones del asfalto por las variaciones de temperatura o pueden ocasionarse por reflexión de grietas

causas por grietas por bajo la superficie asfáltica. Usualmente no se relacionan con cargas de tráfico.

Unidad de medida: El agrietamiento transversal se mide en metro lineales (m).

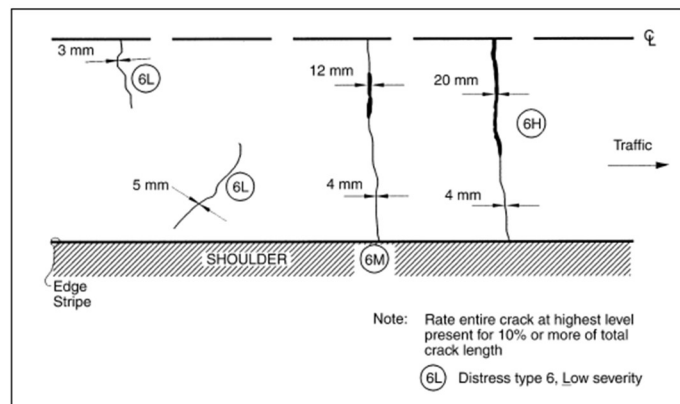
Nivel de severidad:

- Bajo: Las grietas presentan un ancho medio  $\leq 6$  mm o grietas selladas en buenas condiciones cuyo ancho no se puede determinar.
- Medio: Las grietas tienen un ancho medio  $>6$  mm y  $\leq 19$  mm, o fisuras de ancho  $\leq 19$  mm con agrietamiento aleatorio adyacente de baja severidad.
- Alto: Las grietas tienen un ancho medio  $>19$  mm o fisuras de ancho  $\leq 19$  mm y agrietamiento aleatorio adyacente de moderada a alta severidad.

Figura 2.9: Agrietamiento transversal de alta severidad [15].



Figura 2.10: Agrietamiento Transversal [15].





## 2.7.2. Parches y Baches

### 2.7.2.1. Parches y parches deteriorados

Descripción: Porción de la superficie del pavimento mayor o igual a 0.1 m<sup>2</sup> que ha sido reemplazada o donde ha sido aplicado material adicional después de la construcción original. (Ver Figura 2.11 y 2.12).

Causa: Se ocasionan por las cargas de tráfico, materiales pobres y malas prácticas de construcción.

Unidad de medida: Este deterioro se cuantifica contando el número de parches y estableciendo la superficie afectada en metros cuadrados (m<sup>2</sup>).

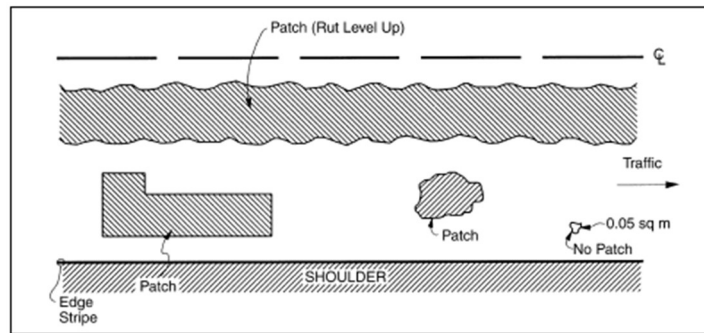
Nivel de severidad:

- Bajo: Los parches presentan a lo mucho, deterioros de baja severidad de cualquier tipo, incluyendo ahuellamiento < 6 mm. No se evidencia bombeo y no hay pérdida de material en el parche.
- Medio: Los parches presentan deterioros de moderada severidad de cualquier tipo o ahuellamiento de 6 a 12 mm. No se evidencia bombeo.
- Alto: Los parches presentan deterioros de alta severidad de cualquier tipo incluyendo ahuellamiento >12 mm, o los parches presentan distintos materiales en él. Se evidencia bombeo.

Figura 2.11: Deterioro de parche de alta severidad [15].



Figura 2.12: Parches/Deterioro de parches [15].



## 2.7.2.2. Baches

Descripción: Son agujeros en forma circular o de cuenco de varios tamaños que se encuentran en la superficie del pavimento. (Ver Figura 2.13 y 2.14).

Causa: Pueden ocasionarse por roturas en el pavimento debido a agrietamiento por fatiga, desintegración localizada de material, o procesos de hielo y deshielo.

Unidad de medida: Se cuenta el número de parches y se define la superficie afectada en metros cuadrados ( $m^2$ ).

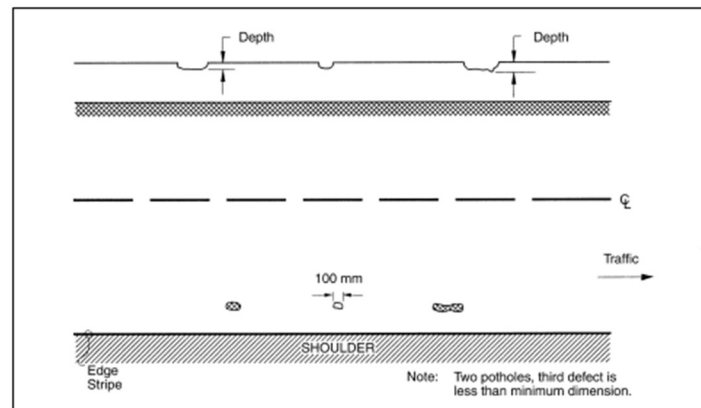
Nivel de severidad:

- Bajo: Profundidad del bache <25 mm.
- Medio: Profundidad del bache de 25 a 50 mm.
- Alto: Profundidad del bache >50 mm.

Figura 2.13: Bache de alta severidad [15].



Figura 2.14: Baches [15].



## 2.7.3. Deformación de la superficie

### 2.7.3.1. Ahuellamiento

**Descripción:** El ahuellamiento se presenta como una depresión en la superficie del pavimento, a lo largo de la trayectoria de las ruedas de los vehículos. Suele notarse más después de las lluvias, cuando las huellas de las ruedas se llenan de agua. (Ver Figura 2.15 y 2.16).

**Causa:** A menudo se presentan como consecuencia de procesos de consolidación o por el movimiento de materiales debido a cargas de tráfico. También puede ocasionarse por el movimiento plástico de la mezcla asfáltica, ya sea en climas cálidos o por procesos inadecuados de compactación durante la construcción.

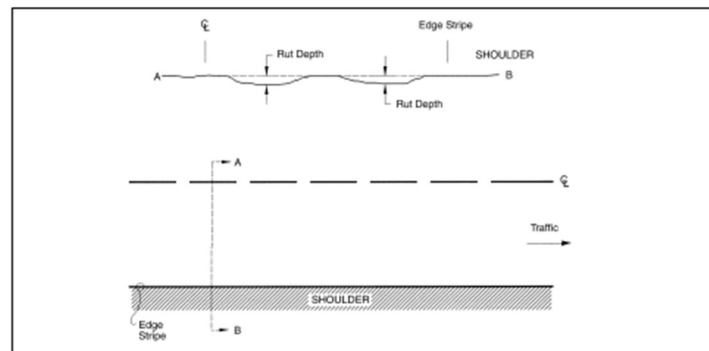
**Unidad de medida:** La superficie afectada se mide en metros cuadrados (m<sup>2</sup>).

**Nivel de severidad:** No aplica. La severidad del deterioro podría categorizarse en función de las medidas a tomarse por la presencia del deterioro.

Figura 2.15: Agua empozada en las roderas [15].



Figura 2.16: Ahuellamiento o roderas [15].



### 2.7.3.2. Desplazamiento en la superficie del pavimento (Shoving)

Descripción: Es el desplazamiento longitudinal en un área determinada de la superficie del pavimento. Generalmente se localizan en colinas, curvas o en intersecciones. Se asocia a un desplazamiento vertical. (Ver Figura 2.17 y 2.18).

Causa: Generalmente es causado por el proceso de frenado y aceleración de los vehículos.

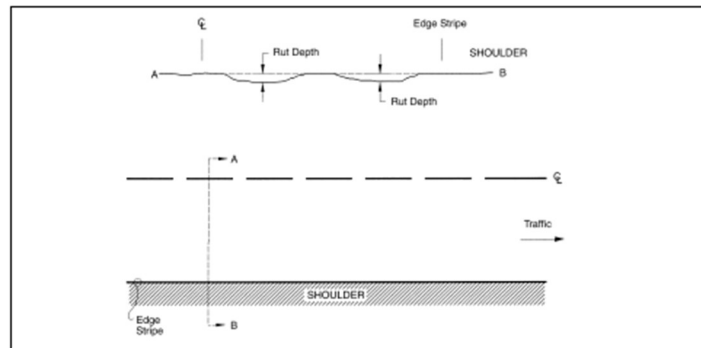
Unidad de medida: La superficie afectada se mide en metros cuadrados ( $m^2$ ).

Nivel de severidad: No aplica. La severidad puede determinarse por el efecto que este deterioro produce en la calidad de la conducción.

Figura 2.17: Desplazamiento en la superficie del pavimento [15].



Figura 2.18: Desplazamiento (Shoving) [15].



## 2.7.4. Defectos superficiales

### 2.7.4.1. Exudación o Sangrado

Descripción: Es la formación de una película de material bituminoso sobre la superficie del pavimento, creando una superficie reflectante, brillante y similar al vidrio que tiene a volverse pegajosa. En épocas de invierno, el asfalto acumulado en la superficie disminuyendo la resistencia al deslizamiento. (Ver Figura 2.19).

Causa: Es causado por un alto contenido de asfalto o bajo contenido de vacíos de aire en la mezcla asfáltica.

Unidad de medida: El área dañada se registra en metros cuadrados ( $m^2$ ).

Nivel de severidad: No aplica. La exudación indica problemas de rendimiento relacionados a la mezcla asfáltica.

Figura 2.19: Pérdida de textura por exudación [15].



## 2.7.4.2. Agregado Pulido

Descripción: En la superficie del asfalto se observa agregado el agregado grueso sin rugosidad o sin partículas angulares, disminuyendo la resistencia al deslizamiento. (Ver Figura 2.20).

Causa: A menudo es causado por la repetición de cargas de tráfico y es más evidente en la trayectoria de las ruedas.

Unidad de medida: Se registra en metros cuadrados ( $m^2$ ) la superficie afectada.

Nivel de severidad: No aplica. Sin embargo, el grado de pulido del agregado se ve reflejado en la reducción de fricción en la superficie.

Figura 2.20: Agregado Pulido [15].



## 2.7.4.3. Desintegración del pavimento

Descripción: Es el desgaste de la superficie del pavimento como consecuencia del desprendimiento de partículas de agregado y la pérdida de ligante asfáltico. El

# UCUENCA

desmoronamiento va desde la pérdida de finos hasta de material grueso, generando una superficie muy áspera. (Ver Figura 2.21).

Causa: La causa principal es el desprendimiento de agregado debido al decapado y por la pérdida de ligante asfáltico por endurecimiento.

Unidad de medida: Se mide el área afectada en metros cuadrados ( $m^2$ ).

Nivel de severidad: No aplica. La presencia de desmoronamiento en la superficie indica problemas en la mezcla asfáltica.

Figura 2.21: Pérdida de agregado grueso por desintegración del pavimento [15].



## 2.7.5. Otros Deterioros

### 2.7.5.1. Sangrado y bombeo de agua

Descripción: Es la expulsión de agua y material fino a través de las grietas por cargas en movimiento. Con la expulsión de agua se transporta material fino, lo que resulta en un deterioro progresivo y pérdida de soporte de la estructura del pavimento. (Ver Figura 2.22).

Causa: Las posibles causas del bombeo de agua son: fuetes de aguas bajo la calzada, drenaje interno deficiente, capa superficial permeable.

Unidad de medida: El deterioro se cuantifica registrando el número de ocurrencias de bombeo sangrado y bombeo de agua y la longitud de pavimento afectado en metros lineales (m).

Nivel de severidad: No se consideran niveles de severidad porque la cantidad de agua bombeada dependerá de las condiciones de humedad.

Figura 2.22: Purga y bombeo de agua [15].



## 2.8. Modelos de deterioro

Los modelos de deterioro de pavimentos comienzan a desarrollarse en 1968, cuando el Banco Mundial junto con el LCP francés y el británico TRRL, realizan un estudio para establecer términos de referencia para el diseño de carreteras. Más adelante, el Banco Mundial encarga al MIT la realización de un modelo que permita examinar los costos de las obras y operación de vehículos. De estos estudios se desarrolla el HCM (Highway Cost Model).

Más adelante se llevó a cabo una serie de estudios para desarrollar tecnologías para determinar el deterioro en carreteras pavimentadas y no pavimentadas, así como los factores que afectan de mayor manera en los costos de operación de los vehículos. Estudios realizados en Kenia, El Caribe y Brasil permitieron dar amplia validez de los modelos de deterioro, haciendo posible incluso el desarrollo de softwares de gestión de firmas para utilización comercial [1].

## 2.9. Tipos de modelos de deterioro

Según Morosiuk Riley & Odoki [14], los modelos de deterioro pueden agruparse en dos categorías básicas:

- Probabilística: La condición se predice como una función de probabilidad de un rango de posibles condiciones.
- Determinístico: La condición se predice según un valor preciso con base en funciones matemáticas de deterioros observados o medidos.



Los modelos que se presentan en este trabajo son de naturaleza determinística, estos a su vez se clasifican en modelos mecanísticos y empíricos.

- Modelos mecanísticos: Se basa en el conocimiento de esfuerzos y deformaciones en el pavimento, calculados usando teorías fundamentales de comportamiento. Usualmente es necesaria mucha información y parámetros que tienden a ser difíciles de cuantificar en campo.
- Modelos empíricos: Se basa en análisis estadísticos de observaciones locales de tendencias deterioro. No son aplicables fuera de condiciones específicas en las que están basadas.

## 2.10. Modelos de deterioro

Para el análisis y evaluación del deterioro en pavimentos flexibles se programarán los modelos de deterioro del programa HDM4 que se presentan a continuación [14].

### 2.10.1. Inicio de todo agrietamiento estructural

Bases no estabilizadas

Si HSOLD=0

$$ICA = K_{cia} \left\{ CDS^2 a_0 \exp \left[ a_1 SNP + a_2 \left( \frac{YE4}{SNP^2} \right) \right] + CRT \right\}$$

Si HSOLD>0

- Para todos los materiales excepto CM (Mezcla Fría), SL (Sello de lechada bituminosa) y CAPE (Sello de capa).

$$ICA = K_{cia} \left\{ CDS^2 \left[ \max \left( a_0 \exp \left[ a_1 SNP + a_2 \left( \frac{YE4}{SNP^2} \right) \right], \max \left( 1 - \frac{PCRW}{a_3}, 0 \right) \right), (a_4 HSNEW) \right] + CRT \right\}$$

- Materiales para superficie CM, SL y CAPE

$$ICA = K_{cia} \left\{ CDS^2 \left[ \max \left( a_0 \exp \left( a_1 SNP + a_2 \left( \frac{YE4}{SNP^2} \right) \right), \max \left( 1 - \frac{PCRA}{a_3} \right), a_4 \right) \right] + CRT \right\}$$

Donde:

# UCUENCA

ICA = Tiempo al inicio de las fisuras estructurales, en años.

CDS = Indicador de defectos en la construcción para superficies bituminosas.

YE4 = Número anual de ejes estándar equivalentes, en millones por carril.

SNP = Número estructural promedio anual ajustado del pavimento.

HSNEW = Espesor del recapeo más reciente, en mm.

HSOLD = Espesor total de las capas de recapeos superficiales previos, en mm.

PCRA = Área de todo el agrietamiento antes del último recapeo o sobrecarpeta, en porcentaje.

PCRW = Área de agrietamiento ancho antes del proceso de recapeo o sobrecarpeta, en porcentaje.

$K_{cia}$  = Factor de calibración para el inicio de todo el agrietamiento estructural

CRT = Retraso en el inicio del agrietamiento debido a labores de mantenimiento, en años.

## 2.10.2. Progresión de todo agrietamiento estructural

$$dACA = K_{cpa} \left( \frac{CRP}{CDS} \right) Z_A [(Z_A a_0 a_1 \delta t_A + SCA^{a_1})^{1/a_1} - SCA]$$

La progresión del agrietamiento total comienza cuando  $\delta t_A > 0$  o  $ACA_a > 0$ .

Donde:

$$\delta t_A = 1 \text{ si } ACA_a > 0 \text{ caso contrario } \delta t_A = \max\{0, \min[(AGE2 - ICA), 1]\}$$

$$\text{Si } ACA_a > 50 \text{ entonces } Z_A = -1, \text{ caso contrario } Z_A = 1$$

$$ACA_a = \max(ACA_a, 0.5)$$

$$SCA = \min[ACA_a, (100 - ACA_a)]$$

$$Y = a_0 a_1 Z_A \delta t_A + SCA^{a_1}$$

Si  $Y < 0$ , entonces:

$$dACA = K_{cpa} \left( \frac{CRP}{CDS} \right) (100 - ACA_a)$$

Si  $Y \geq 0$ , entonces:

$$dACA = K_{cpa} \left( \frac{CRP}{CDS} \right) Z_A (Y^{1/a_1} - SCA)$$

Si  $ACA_a \leq 50$  y  $ACA_a + dACA > 50$  entonces:

$$dACA = K_{cpa} \left( \frac{CRP}{CDS} \right) (100 - c_1^{1/a_1} - ACA_a)$$

Donde:

$$c_1 = \max\{[2(50^{a_1}) - SCA^{a_1} - a_0 a_1 \delta t_A], 0\}$$

$dACA$  = Cambio incremental en el área de todo agrietamiento estructural durante el año de análisis, en porcentaje del total del área de la calzada.

$ACA_a$  = Área de todo agrietamiento estructural al inicio del año de análisis, en porcentaje.

$\delta t_A$  = Fracción del año de análisis en el cual aplica la progresión de todo agrietamiento estructural.

$AGE_2$  = Edad de la superficie del pavimento, en años.

$K_{cpa}$  = Factor de calibración para la progresión de todo agrietamiento estructural.

$CRP$  = Retraso en el progreso del agrietamiento debido a tratamiento preventivo, dado por  $CRP=1-0.12 CRT$ .

$CRT$  = Factor de retraso para tiempo de agrietamiento.

### 2.10.3. Inicio de agrietamiento transversal por temperatura

Si  $HSOLD=0$  (Superficie Original)

$$ICT = K_{cit} \max[1, (CDS)(CTT)]$$

Si  $HSOLD>0$  (Sobrecapa o sellado)

$$ICT = K_{cit}CDS(CCT + a_0 + a_1 + HSNEW)$$

Donde:

ICT = Tiempo para el inicio del agrietamiento transversal, en años.

CCT = Coeficiente de agrietamiento por temperatura.

HSNEW = Espesor del revestimiento o recapeo de la calzada, en mm.

CDS = Indicador de defectos en la construcción para superficies bituminosas.

$K_{cit}$  = Factor de calibración para el inicio del agrietamiento transversal por temperatura.

#### 2.10.4. Progresión de agrietamiento transversal por temperatura

El progreso del agrietamiento transversal por temperatura comienza cuando  $\delta t_T > 0$ .

Donde  $\delta t_T = 1$  si  $ACT_a > 0$ , caso contrario  $\delta t_T = \max\{0, \min[(AGE2 - ICT), 1]\}$

Si HSOLD=0 (Superficie Original)

$$dNCT = K_{cpt} \left( \frac{1}{CDS} \right) \max \left\{ 0, \min \left[ (NCT_{eq} - NCT_a), \left( \frac{2NCT_{eq}(AGE3 - ICT - 0.5)}{T_{eq}^2} \right) \right] \right\} \delta t_T$$

Si HSOLD>0 (Sobrecapa o sellado)

$$dNCT = K_{cpt} \left( \frac{1}{CDS} \right) \min \left\{ (NCT_{eq} - NCT_a), \max \left[ \min(a_3 PNCT, (PNCT - NCT_a)), \left( \frac{2NCT_{eq}(AGE3 - ICT - 0.5)}{T_{eq}^2} \right), 0 \right] \right\} \delta t_T$$

Donde:

dNCT = Cambio incremental en el número de agrietamiento transversal por temperatura durante el año de análisis, en no/km.

PNCT = Número de grietas transversales por temperatura antes de la última sobrecapa o sellado, en número/km.

NCTa = Número de grietas transversales por temperatura (reflejadas) al inicio del año de análisis en número/km.

NCTeq = Máximo número de grietas por temperatura, en número/km.

Teq = Tiempo desde el inicio del agrietamiento hasta alcanzar el número máximo de grietas por temperatura, en años.

AGE3 = Edad desde la última sobrecapa o reconstrucción.

$\delta t_T$  = Fracción del año de análisis en el cual aplica la progresión de agrietamiento transversal por temperatura.

Kcpt = Factor de calibración para la progresión del agrietamiento transversal por temperatura.

ACTa = Área de agrietamiento por temperatura total al inicio del año de análisis, en porcentaje.

AGE2 = Edad de la superficie del pavimento, en años.

HSOLD = Espesor total de las capas de recapeos superficiales previos, en mm.

## 2.10.5. Inicio de la desintegración del pavimento

$$IRV = K_{vi}(CDS)^2 a_0 (RRF) \exp[a_1 (YAX)]$$

Donde:

IRV = Tiempo para el inicio de la desintegración del pavimento, en años.

CDS = Indicador para defectos en la construcción en superficies bituminosas.

YAX = Número anual de ejes de todas las clases de vehículos en el año de análisis, en millones por año.

$K_{vi}$  = Factor de calibración para el inicio de la desintegración.

RRF = Factor de retraso de la desintegración debido a labores de mantenimiento.

## 2.10.6. Progresión de la desintegración del pavimento

$$dARV = \left(\frac{K_{vp}}{RFF}\right) \left(\frac{1}{CDS^2}\right) z[z(a_0 + a_1 YAX)a_2 \delta t_v + SRV^{a_2}]^{1/2} - SRV$$

El progreso de la desintegración del pavimento comienza cuando  $\delta t_v > 0$  o  $ARV_a > 0$ .

Donde:  $\delta t_v = 1$  si  $ARV_a > 0$

Caso contrario:  $\delta t_v = \max\{0, \min[(AGE2 - IRV), 1]\}$

Si  $ARV_a \geq 50$  entonces  $z = -1$ , caso contrario  $z = 1$

$$ARV_a = \max(ARV_a, 0.5)$$

$$SRV = \min[ARV_a, (100 - ARV_a)]$$

$$YAX = \max[\min(YAX, 1), 0.1]$$

$$Y = [(a_0 + a_1 YAX)a_2 z \delta t_v + SRV^{a_2}]$$

Si  $Y < 0$  entonces

$$dARV = \left(\frac{K_{vp}}{RFF}\right) \left(\frac{1}{CDS^2}\right) (100 - ARV_a)$$

Si  $Y > 0$  entonces

$$dARV = \left(\frac{K_{vp}}{RFF}\right) \left(\frac{1}{CDS^2}\right) z(Y^{1/a_2} - SRV)$$

Si  $ARV_a \leq 50$  y  $ARV_a + dARV > 50$  entonces

$$dARV = \left(\frac{K_{vp}}{RFF}\right) \left(\frac{1}{CDS^2}\right) (100 - c1^{1/a_2} - ARV_a)$$

$$c1 = \max\{[2(50^{a_2}) - SRV^{a_2} - (a_0 + a_1 YAX)a_2 \delta t_v], 0\}$$

Donde:

$dARV$  = Cambio en el área de desintegración durante el año de análisis, en porcentaje total del área de la calzada.

$ARV_a$  = Área de desintegración al inicio del año de análisis, en porcentaje.

$\delta t_v$  = Fracción del año de análisis en el que aplica el progreso de la desintegración del pavimento.

AGE2 = Edad de la superficie del pavimento, en años.

$K_{vp}$  = Factor de calibración para el progreso de la desintegración del pavimento.

## 2.10.7. Inicio de baches

$$IPT = K_{pi} a_0 \left[ \frac{(1 + a_1 HS)}{(1 + a_2 CDB)(1 + a_3 YAX)(1 + a_4 MMP)} \right]$$

Donde:

IPT = Tiempo entre el inicio de agrietamiento ancho o desintegración del pavimento y el inicio de baches, en años.

HS = Espesor total de la superficie bituminosa, en mm.

YAX = Número anual de ejes de todas las clases de vehículos en el año de análisis, en millones por carril.

MMP = Precipitación media mensual, en mm/mes.

$K_{pi}$  = Factor de calibración para el inicio de baches.

## 2.10.8. Progresión de baches

Factor de política de baches:

$$PEEF = 1 - \frac{Ppt}{100} (1 - TLF)$$

Donde:

PEEF = Factor de política de baches ( $0 < PEEF \leq 1$ )

Ppt = Porcentaje de baches a ser parchados ( $0 < Ppt \leq 100$ )

$$TLF = a_0 + (1 + a_0) \left( \frac{Fpat}{365} \right)^{a_1}$$

Donde:

TLF = Factor de lapso tiempo ( $0 < \text{TLF} \leq 1$ )

Fpat = Frecuencia de parcheo de baches, en días.

$$dNPT_i = K_{pp} a_0 ADIS_i (PEFF) \left( \frac{ELANES}{2} \right) \left[ \frac{(1 + a_1 CDB)(1 + a_2 YAX)(1 + a_3 MMP)}{(1 + a_4 HS)} \right]$$

Consideraciones

I) Si al inicio del primer año del periodo de análisis  $ACW_a = 0$ , entonces la progresión de los baches derivados de agrietamiento ancho comienza cuando  $AGE2 > ICT + IPT$  y  $ACW_a > ACW_{pi}$

O si al inicio del primer año del periodo de análisis  $ARV_a = 0$ , entonces la progresión de los baches derivados del desprendimiento comienza cuando  $AGE2 > IRV + IPT$  y  $ACV_a > ARV_{pi}$

II) Si al inicio del primer año del periodo de análisis  $0 < ACW_a \leq ACW_{pi}$ , entonces la progresión de los baches proveniente del agrietamiento ancho comienza cuando  $ACW_a > ACW_{pi}$ .

O si al inicio del primer año del periodo de análisis  $0 < ARV_a \leq ARV_{pi}$ , entonces la progresión de los baches proveniente de la desintegración comienza cuando  $ARV_a > ARV_{pi}$ .

III) Si al inicio del primer año del periodo de análisis  $ACW_a > ACW_{pi}$ , entonces la progresión de los baches proveniente del agrietamiento ancho inmediatamente.

O si al inicio del primer año del periodo de análisis  $ARV_a > ARV_{pi}$ , entonces la progresión de los baches proveniente de la desintegración comienza inmediatamente.

IV) Si durante el periodo de análisis  $ARV_a$  se convierte en  $< ARV_{pi}$  debido a que las áreas desintegradas se revierten a áreas agrietadas, entonces los baches siguen progresando de la desintegración del pavimento.

La progresión de bacheos por ampliación o alargamiento comienza si  $NPT_a > 0$  al inicio del año de análisis.



El incremento anual de número de baches por km de longitud de la vía está dado por:

$$dNPT = \sum_{i=1}^3 dNPT_i$$

Donde:

$dNPT$  = Número total adicional de baches por kilómetro durante el año de análisis.

$dNPT_i$  = Número adicional de baches por kilómetro derivados de deterioros (agrietamiento ancho, desintegración, alargamiento) durante el año de análisis.

$ADIS_i$  = Porcentaje de agrietamiento ancho al inicio del año de análisis, o número existente de baches por km al inicio del año de análisis.

$ACW_{pi}$  = Área mínima de agrietamiento ancho antes que los baches puedan ocurrir. (Valor por defecto = 20).

$ARV_{pi}$  = Área mínima de desintegración antes que los baches puedan ocurrir. Especificado por el usuario. (Valor por defecto = 30).

$ELANES$  = Número efectivo de carriles para la sección de la carretera.

$PEFF$  = Factor de política de bacheo

$K_{pp}$  = Factor de calibración para la progresión de los bachees y demás variables definidas para el inicio de baches.

## 2.10.9. Inicio del ahuellamiento

### 2.10.9.1. Densificación inicial

$$RDO = k_{rid} [a_0 (YE4 \cdot 10^6)^{(a1+a2DEF)} SNP^{a3} COMP^{a4}]$$

$RDO$  = Ahuellamiento ocasionado por densificación inicial, en mm.

$YE4$  = Número anual de ejes estándar equivalentes, en millones por carril.

$DEF$  = Deflexión promedio anual de la viga Benkelman, en mm. Para este modelo el valor de la deflexión se obtiene en función del valor de  $SNP$  mediante la fórmula:

$$DEF = 6.5SNP^{-1.6}$$

SNP = Número estructural promedio anual ajustado del pavimento.

COMP = Compactación relativa, en porcentaje.

$K_{rid}$  = Factor de calibración para la densificación inicial.

## 2.10.9.2. Deformación estructural

Deformación estructural sin agrietamiento

$$\Delta RDST_{uc} = K_{rst}(a_0 SNP^{a1} YE4^{a2} COMP^{a3})$$

Deformación estructural después del agrietamiento

$$\Delta RDST_{crk} = K_{rst}[a_0 SNP^{a1} YE4^{a2} MMP^{a3} ACX_a^{a4}]$$

Si ACRA = 0

$$\Delta RDST = \Delta RDST_{uc}$$

Si ACRA > 0

$$\Delta RDST = \Delta RDST_{uc} + \Delta RDST_{crk}$$

Donde:

$\Delta RDST$  = Aumento incremental total de la deformación estructural en el año de análisis, en mm.

$\Delta RDST_{uc}$  = Ahuellamiento incremental debido a deformación estructural sin agrietamiento en el año de análisis, en mm.

$\Delta RDST_{crk}$  = Ahuellamiento incremental debido a deformación estructural después del agrietamiento en el año de análisis, en mm.

MMP = Precipitación media mensual, en mm/mes.

$ACX_a$  = Área de agrietamiento indexado al principio del año de análisis, en porcentaje.

$K_{rst}$  = Factor de calibración para deformación estructural.

## 2.10.9.3. Deformación plástica

$$\Delta RDPD = K_{rpd} CDS^{a1} YE4 Sh^{a2} HS^{a3}$$

$\Delta RDPD$  = Aumento incremental en la deformación plástica en el año de análisis, en mm.

CDS = Indicador de defectos en la construcción para superficies bituminosas.

YE4 = Número anual de ejes estándar equivalentes, en millones por carril.

Sh = Velocidad de los vehículos pesados, en km/h.

HS = Espesor total de la superficie bituminosa, en mm.

$K_{spd}$  = Factor de calibración para deformación plástica.

## 2.10.9.4. Desgaste superficial

$$\Delta RDW = K_{rsw} [a_0 PASS^{a1} W^{a2} S^{a3} SALT^{a4}]$$

$\Delta RDW$  = Aumento incremental en la profundidad de la rodera o ahuellamiento debido a neumáticos tachonados en el año de análisis, en mm.

PASS = Número anual de pasadas de vehículos con neumáticos tachonados en una dirección, en miles.

S = Velocidad promedio del tráfico, en km/h.

SALT = Variable para vías con sal o sin sal (2=con sal, 1=sin sal)

W = Ancho de la vía, en m. (Calzada más ancho total de la berma)

$K_{rsw}$  = Factor de calibración para desgaste superficial.

Se presenta este modelo debido a es uno de los componentes del ahuellamiento, sin embargo, solo se presenta la expresión del modelo. No se lo analizará ya que este modelo aplica únicamente a zonas con épocas de invierno con nieve y existe la necesidad de usar vehículos con llantas tachonadas, caso que no se considera en ese trabajo de investigación.

## 2.10.10. Progresión del ahuellamiento

El incremento anual en la profundidad total del ahuellamiento se determina de acuerdo a:

Si  $AGE4 \leq 1$

$$\Delta RDM = RDO + \Delta RDPD + \Delta RDW$$

Caso contrario

$$\Delta RDM = \Delta RDST + \Delta RDPD + \Delta RDW$$

$\Delta RDM$  = Aumento incremental de la profundidad media total de ahuellamiento en ambas trayectorias de las ruedas en el año de análisis, en mm.

RDO = Densificación inicial, en mm.

$\Delta RDST$  = Aumento incremental total de la deformación estructural en el año de análisis, en mm.

$\Delta RDPD$  = Aumento incremental en la deformación plástica en el año de análisis, en mm.

$\Delta RDW$  = Aumento incremental de desgaste debido a neumáticos tachonados en el año de análisis, en mm.

## 2.10.11. Rugosidad

Para modelar la rugosidad del pavimento se consideran cinco componentes; estos son: estructural, agrietamiento, ahuellamiento, componentes ambientales y baches.

### 2.10.11.1. Componente estructural

$$\Delta RI_s = K_{gs} a_0 \exp[K_{gm} (m)(AGE3)] (1 + SNPK_b)^{-5} YE4$$

$$SNPK_b = \max[(SNPK_a - dSNPK), 1.5]$$

$$dSNPK = K_{snpk} a_0 [\min(a_1, ACX_a) HSNEW + \max(\min(ACX_a - PACX, a_2), 0) HSOLD]$$

Donde:

# UCUENCA

$\Delta RI_s$  = Cambio incremental en la rugosidad debido al deterioro estructural durante el año de análisis, en m/km IRI.

dSNPK = Reducción en el número estructural ajustado debido al agrietamiento.

SNPK<sub>b</sub> = Número estructural ajustado al inicio del año de análisis.

ACX<sub>a</sub> = Área de agrietamiento indexado al inicio del año de análisis, en porcentaje.

PACX = Área de agrietamiento indexado previo en la superficie antigua, en porcentaje.

$$0.62(PCRA) + 0.39(PCRW)$$

HSNEW = Espesor de la superficie más reciente, en mm.

HSOLD = Espesor total de las capas de superficie subyacentes anteriores, en mm.

AGE3 = Edad desde la última sobrecapa o reconstrucción, en años.

YE4 = Número anual de ejes estándar equivalentes, en millones por carril.

m = Coeficiente ambiental.

K<sub>gm</sub> = Factor de calibración para el coeficiente ambiental.

K<sub>snpk</sub> = Factor de calibración para SNPK.

K<sub>gs</sub> = Factor de calibración para el componente estructural de la rugosidad.

## 2.10.11.2. Componente de agrietamiento

$$\Delta RI_c = K_{gc} a_0 \Delta ACRA$$

Donde:

$\Delta RI_c$  = Cambio incremental en la rugosidad debido al agrietamiento durante el año de análisis, en m/km IRI.

$\Delta ACRA$  = Cambio incremental en el área total de agrietamiento durante el año de análisis, en porcentaje.

K<sub>gc</sub> = Factor de calibración para el componente de agrietamiento de rugosidad.

## 2.10.11.3. Componente de ahuellamiento

$$\Delta RI_r = K_{gr} a_0 (\Delta RDS)$$

Donde:

$\Delta RI_r$  = Cambio incremental en la rugosidad debido al desprendimiento durante el año de análisis, en m/km IRI.

$\Delta RDS$  = Cambio incremental en la desviación estándar de la profundidad del ahuellamiento en el año de análisis, en mm.

$K_{gr}$  = Factor de calibración para el componente de ahuellamiento de rugosidad.

## 2.10.11.4. Componente de baches

$$\Delta RI_p = K_{gp} a_0 (a_1 - FM) [(NPT_{bu})^{a_2} - (NPT_a)^{a_2}]$$

$$NPT_{bu} = NPT_b \left[ 1 - \left( \frac{Ppt}{100} \right) \left( 1 - \frac{Fpat}{365} \right) \right]$$

Donde:

$\Delta RI_p$  = Cambio incremental en la rugosidad debido a baches durante el año de análisis, en m/km IRI.

$NPT_a$  = Número de unidades de baches por km al inicio del año de análisis.

$NPT_b$  = Número de unidades de baches por km al final del año de análisis.

$NPT_{bu}$  = Número de unidades de baches por km al final del año de análisis, como percibido por el usuario de la carretera.

$FM$  = Índice de libertad de maniobra.

$Ppt$  = Porcentaje de baches parchados.

$Fpat$  = Frecuencia de parchado de baches, en días.

$K_{gp}$  = Factor de calibración para el componente de baches de rugosidad.

## 2.10.11.5. Componente Ambiental

$$\Delta RI_e = K_{gm} m RI_a$$

Donde:

$\Delta RI_e$  = Cambio incremental en la rugosidad debido a factores ambientales durante el año de análisis, en m/km IRI.

$RI_a$  = Rugosidad al inicio del año de análisis.

$m$  = Coeficiente ambiental.

$K_{gm}$  = Factor de calibración para el componente ambiental (Predeterminado=1).

## 2.10.11.6. Cambio total en la rugosidad

$$\Delta RI = \Delta RI_s + \Delta RI_c + \Delta RI_r + \Delta RI_p + \Delta RI_e$$

$\Delta RI$  = Cambio incremental total en la rugosidad durante el año de análisis, en m/km.

## CAPÍTULO III: METODOLOGÍA

En este capítulo se presentan las consideraciones generales adoptadas para el análisis de los modelos de deterioro para pavimentos asfálticos. También, se describen las funciones utilizadas para la programación de cada uno de los modelos de deterioro y los valores considerados para cada parámetro a analizarse.

### 3.1 Consideraciones generales

Para analizar y evaluar los distintos modelos de deterioro es necesario definir el tipo de superficie bituminosa. Esta se clasifica en dos grupos, las mezclas asfálticas y los tratamientos superficiales. De igual manera, es necesario definir el tipo de base. Para los pavimentos bituminosos existen cuatro tipos de bases; base granular (GB), base estabilizada (SB), base asfalto (AB) y pavimentos asfálticos (AP), esta última utilizada cuando se coloca una superficie sobre un pavimento asfáltico existente. Si bien, el análisis de los modelos no puede referirse a una zona de estudio específica, debido a la falta de información, a ingresarse en los modelos, para este estudio se ha decidido analizar los dos tipos de superficie, mezcla asfáltica y tratamiento superficial sobre una base granular, considerando que éstas son las superficies bituminosas más comunes en la provincia del Azuay cuando se realizan trabajos de pavimentación asfáltica.

La programación de los modelos de deterioro que se presentan en este trabajo de titulación se ha realizado mediante el software de Matlab. Por la naturaleza de los modelos, estos se han programado como funciones, lo que permitirá tener mayor flexibilidad al momento de cambiar los parámetros que influyen, ya sea en el inicio o progreso de los deterioros. El análisis tiene como finalidad determinar la sensibilidad de los modelos a la variación de sus parámetros. Sin embargo, el análisis no se podrá aplicar a una zona de estudio específica dada la dificultad para encontrar bibliografía que cuente con toda la información requerida por los distintos modelos. De igual forma, dada la imposibilidad para obtener todos los datos necesarios por cuestiones de tiempo y la dificultad práctica y económica que involucra, los rangos de variación para los parámetros se establecen en función de las recomendaciones encontradas en el manual de donde se han obtenido los modelos, así como de información existente en investigaciones realizadas.



# UCUENCA

Es importante mencionar que, en el modelo de progresión de baches existen algunas consideraciones que determinan el momento de inicio de la progresión de los mismos. Sin embargo, estas no se analizan ya que, para conocer la edad del pavimento a la que inicia el proceso del deterioro es necesario considerar varios parámetros cuyos valores deben imponerse de manera específica, no dentro de un rango, por ende, para los valores obtenidos no tendrán mayor relevancia su análisis.

## 3.2 Rangos de variación para parámetros comunes

Para los distintos modelos de deterioro que se analizan en este trabajo, algunos de los parámetros a evaluar se repiten. Con el fin de trabajar con un criterio general para el análisis, para todos los modelos los parámetros comunes que se describen a continuación variarán dentro de un mismo rango.

- CDS (Indicador de defectos en la construcción para superficies bituminosas)

El CDS es un factor que relaciona el contenido de ligante asfáltico y la rigidez con el diseño de material óptimo para una mezcla bituminosa específica. Permite definir qué tan propensa es una superficie a agrietarse o desmoronarse donde valores más bajos indican mayor susceptibilidad. Este indicador varía entre 0.5 y 1.5 según los valores recomendados por la bibliografía [14].

- SNP (Número estructural promedio anual ajustado del pavimento)

El número estructural del pavimento representa una medida de la resistencia total del pavimento en función de la resistencia de cada capa, y se denomina ajustado por considerar un ajuste del valor dependiendo de la temporada del año en que se la analice. Este parámetro variará dentro de un rango de 2 a 8, considerando los valores de SN que se presentan en la gráfica de diseño para pavimentos flexibles de la AASHTO Road Test [13].

- YE4 (Número anual de ejes estándar equivalentes, en millones por carril)

El valor de número anual de ejes estándar equivalentes permite conocer el número de repeticiones de eje de carga equivalente de 18 kips para el tráfico de la zona de estudio. Para el análisis, el rango dentro de cual variará este parámetro se ha definido en función de datos obtenidos desde la Unidad Ejecutora de la ciudad de Cuenca para el diseño de vías, donde se ha establecido valores entre los 500.000 hasta los 7'000.000. En los

# UCUENCA

modelos con el fin de considerar cargas mayores, el valor de YE4 variará entre 0 y 10'000.000 por carril.

- YAX (Número anual de ejes de todas las clases de vehículos en el año de análisis, en millones por carril).

El número anual de ejes de todas las clases de vehículos para el análisis se varía entre 0 y 5 millones considerando los valores recomendados por la bibliografía [14]; sin embargo, con el fin de tener un rango amplio para verificar cómo varía el modelo este parámetro variará entre 0 y 10 millones.

- CRT (Retraso en el inicio del agrietamiento debido a labores de mantenimiento, en años)

El valor del factor para el retraso del agrietamiento debido a labores de mantenimiento puede calcularse conociendo valores previos y posteriores a trabajos de rehabilitación para este factor. El valor por defecto recomendado para este factor es de 0, indicando que no influye en este deterioro [14]. Entonces, debido a la falta de información se trabajará con esa recomendación en los modelos.

- HSNEW (Espesor del recapeo más reciente, en mm)

El rango en el que se variará el espesor de recapeo más reciente de acuerdo a la gráfica para el diseño de sobrecapas basado en la deflexión de rebote y el tráfico del Método del Instituto del Asfalto varía entre las 0-16 in (0-406.4 mm) [11]. Para los distintos modelos los espesores de recapeo variarán entre 50 mm y 300 mm.

- HSOLD (Espesor total de las capas de recapeos superficiales previos, en mm)

El valor del recapeo superficial previo se ha establecido de acuerdo al concepto empleado previamente para el espesor de recapeos más recientes. A diferencia de los espesores anteriores se considerará el valor inicial desde cero teniendo en cuenta que de este valor depende la elección de los modelos. Entonces, este parámetro variará en el rango de 0 mm a 300 mm cuando sea usado para observar la variación de los modelos. Y cuando de este parámetro dependa el tipo de modelo a usarse se utilizarán; el valor de 0 mm para superficies existentes, 50 mm cuando se analicen nuevas superficies de tratamientos superficiales y 100 mm cuando se analicen nuevas superficies de mezclas asfálticas.

# UCUENCA

- HS (Espesor total de la superficie bituminosa, en mm).

El rango de variación para el espesor total de la superficie bituminosa se establece en función del tipo de superficie. Para el caso de estudio de una mezcla asfáltica el espesor se define que variará entre 0 y 300 mm considerando los valores de las gráficas para el diseño de pavimentos asfálticos recomendados por el Instituto del Asfalto. Por otra parte, para las superficies con tratamiento superficiales el espesor total a considerarse variará entre 0 y 100 mm considerando las tablas para tratamientos superficiales presentada por Montejo [10].

- AGE2 (Edad de la superficie del pavimento, en años).

Para definir los valores de este parámetro se considera el periodo de diseño estructural típico de los pavimentos asfálticos de 20 años. Entonces, estableciendo este valor como máximo se define un rango para variar en el modelo la edad de la superficie del pavimento de 0 a 20 años [10].

- AGE3 (Edad desde la última sobrecapa o reconstrucción).

Este parámetro variará entre 0 y 20 años considerando el tiempo de diseño estructural para el diseño de pavimentos asfálticos.

- Sh (Velocidad de los vehículos pesados, en km/h).

La velocidad de los vehículos pesados para los modelos variará en un rango de 0 a 100 km/h de acuerdo a las velocidades permitidas por la Agencia Nacional de Tránsito del Ecuador para distintos tipos de vías.

- MMP (Precipitación media mensual, en mm/mes).

Para definir el rango de la precipitación media mensual se ha revisado la información pluviométrica contenida en el anuario meteorológico más reciente. Con base en la información observada en las distintas estaciones meteorológicas de la provincia del Azuay se observa un rango de variación desde 0 mm/mes hasta los 150 mm/mes. En los modelos se analizará este parámetro desde los 0 mm/mes hasta los 200 mm/mes con el fin de analizar valores mayores.

- RRF (Factor de retraso de la desintegración debido a labores de mantenimiento).

# UCUENCA

Este parámetro permite retrasar el time para el inicio de la desintegración considerando la aplicación de tratamientos preventivos. Este factor puede tomar un valor máximo de hasta 3 según recomendaciones de la bibliografía [14].

- CDB (Indicador de defectos para la base)

Este parámetro varía entre 0 (sin defectos constructivos) y 1.5 (algunos defectos) de acuerdo con la bibliografía. El valor por defecto para este parámetro será igual a 0, considerando que no existen defectos [14].

- Ppt (Porcentaje de baches a ser parchados)

El porcentaje de baches a ser parchados variará de 0 al 100%.

- Fpat (Frecuencia de parcheo de baches, en días)

Para definir la frecuencia de parcheo de baches en días, se establece un rango de variación de 0 a 365 días [14]. Para este estudio se considera que el mayor tiempo en que se va a parchar un bache será de 1 año.

## 3.3 Funciones utilizadas en la programación de los modelos de deterioro

### 3.3.1 Función ini\_agr\_estr

La función ini\_agr\_estr contiene el modelo correspondiente al denominado inicio todo agrietamiento estructural, que corresponde a grietas desde 1 mm hasta mayores de 3 mm de ancho, sin y con descascaramiento.

Como información de entrada, en la función se asignan valores a los parámetros de los que depende el modelo de deterioro. Así mismo, en la función se usan dos variables auxiliares. La primera la variable denominada 'tipo' que de tener el valor de 1 indica que el modelo se analizará para una mezcla asfáltica, caso contrario, si la variable tipo tiene el valor de 2, el modelo corresponderá al análisis de un tratamiento superficial. También, se tiene la variable 'aux' que permitirá definir los coeficientes en función de la superficie a analizarse, donde aux=0 abarca a todos los tipos de materiales excepto CM (mezcla fría), SL (Lechada bituminosa) y CAPE (Sello de capa), y aux=1 los materiales excluidos.

La ecuación que modela el inicio de este deterioro depende de la existencia de capas superficiales subyacentes anteriores (HSOLD). Así se establece el criterio si HSOLD=0 o si HSOLD>0. Es decir, si el análisis se hará para la superficie original o en sobrecapas.

Los valores para los parámetros que influyen en este modelo de deterioro se definen de acuerdo a los siguientes criterios.

- PCRW (Área de agrietamiento ancho antes del proceso de recapeo o sobrecarpeta, en porcentaje)

El porcentaje de área de agrietamiento ancho antes del último proceso de sellado o recapeo puede variar entre el 0% y 100% [14].

- PCRA (Área de todo el agrietamiento antes del último recapeo o sobrecarpeta, en porcentaje)

El porcentaje de área de todo agrietamiento antes del último proceso de sellado o recapeo puede variar entre el 0% y 100% [14].

- $K_{cia}$  (Factor de calibración para el inicio de todo el agrietamiento estructural)

Los factores de calibración deben ajustarse a las tasas de deterioro para lugares y pavimentos específicos. Sin embargo, para los casos de estudio que se presentan en este trabajo y ante la falta de más información, se tomará el valor de 1 para  $K_{cia}$ , considerando que este es el valor recomendado por defecto para los modelos [14].

Los valores de los parámetros usados en el modelo se muestran a continuación.

Tabla 3.1: Rangos de los parámetros para el inicio de todo agrietamiento estructural.

Parámetro	Unidad	Valores Mezcla Asfáltica (AM)	Valores Tratamiento Superficial (ST)
$K_{cia}$	[ ]	1	1
HSOLD	[mm]	0-100	0-50
CDS	[ ]	0.5-1.0-1.5	0.5-1.0-1.5
SNP	[ ]	2-4-6-8	2-4-6-8
YE4	[millones/año]	1 a 10	1 a 10
CRT	[ ]	0	0
PCRW	[%]	<30	<20
PCRA	[%]	<20	<20
HSNEW	[mm]	100-200-300-400	25-50-75-100

Tabla 3.2: Valores para el caso base de análisis para el modelo de inicio de todo agrietamiento estructural.

Parámetro	Unidad	Valor a adoptar AM	Valor a adoptar ST
$K_{cia}$	[ ]	1	1
HSOLD	[mm]	100	50
CDS	[ ]	1.0	1.0

<b>SNP</b>	[ ]	6	5
<b>YE4</b>	[millones/año]	1 a 10	1 a 10
<b>CRT</b>	[ ]	0	0
<b>PCRW</b>	[%]	15	10
<b>PCRA</b>	[%]	10	10
<b>HSNEW</b>	[mm]	100	50

Tabla 3.3: Coeficientes para el modelo de inicio de todo agrietamiento estructural [14].

Tipo de Pavimento	Material de la superficie	Valor de HSOLD	a0	a1	a2	a3	a4
<b>AMGB</b>	Todas	0	4.21	0.14	-17.1	-	-
	Todas excepto CM	>0	4.21	0.14	-17.1	30	0.025
	CM	>0	13.2	0	-20.7	20	1.4
<b>STGB</b>	Todas	0	13.2	0	-20.7	-	-
	Todas excepto SL, CAPE	>0	13.2	0	-20.7	20	0.22
	SL, CAPE	>0	13.2	0	-20.7	20	1.4

### 3.3.2 Función pgr\_agr\_estr

La función pgr\_agr\_estr contiene el modelo correspondiente a la progresión de todo agrietamiento estructural. En la programación del modelo se han utilizado dos variables auxiliares. La variable 'tipo' que definirá el tipo superficie bituminosa a analizar. Si 'tipo' tiene el valor de 1 se analizará una mezcla asfáltica, mientras que, de tener el valor de 2 se analizará un tratamiento superficial. También, se incluye la variable 'aux' que permitirá utilizar los coeficientes establecidos para cada tipo de material. Cuando 'aux' sea igual a 0 se analizará todos los tipos de materiales en la superficie asfáltica a excepción de CM (Mezcla fría), mientras que cuando 'aux' tenga el valor de 1 se analizará el material (CM).

- $ACA_a$  (Área de agrietamiento estructural total al inicio del año de análisis, en porcentaje).

El área de agrietamiento estructural total al inicio del año de análisis variará en un rango entre el 0% y el 100% [14].

- $\delta t_A$  (Fracción del año de análisis en el cual la progresión del agrietamiento total aplica).

La fracción del año de análisis en la que aplica la progresión del agrietamiento puede analizarse en días o meses. Este parámetro se definirá en función de los parámetros del modelo. El valor máximo que puede llegar a tener este parámetro es 1 [14].

- $K_{cpa}$  (Factor de calibración para la progresión del agrietamiento estructural total).

El factor de calibración  $K_{cpa}$  tendrá un valor de 1, debido a la falta de información y considerando que ese es el valor recomendado por defecto. [14]

Los valores de los parámetros para este modelo son los siguientes.

Tabla 3.4: Rangos de los parámetros para el progreso de todo agrietamiento estructural.

Parámetro	Unidad	Valores Mezcla Asfáltica (AM)	Valores Tratamiento Superficial (ST)
<b>HSOLD</b>	[mm]	0-100	0-50
<b>Kcpa</b>	[ ]	1	1
<b>ACAa</b>	[ %]	0-100	0-100
<b>AGE2</b>	[ ]	10	5
<b>ICA</b>	[años]	3	3
<b>CRT</b>	[ ]	0	0
<b>CDS</b>	[%]	0.5-1.0-1.5	0.5-1.0-1.5

Tabla 3.5: Valores para el caso base de análisis para el modelo de progresión de todo agrietamiento estructural.

Parámetro	Unidad	Valores Mezcla Asfáltica (AM)	Valores Tratamiento Superficial (ST)
<b>HSOLD</b>	[mm]	0-100	0-50
<b>Kcpa</b>	[ ]	1	1
<b>ACAa</b>	[%]	0-100	0-100
<b>AGE2</b>	[ ]	10	10
<b>ICA</b>	[años]	3	3
<b>CRT</b>	[ ]	0	0
<b>CDS</b>	[%]	1.0	1.0

Tabla 3.6: Coeficientes para el modelo de progreso de todo agrietamiento estructural [14].

Tipo de Pavimento	Material de la superficie	Valor de HSOLD	a0	a1
<b>AMGB</b>	Todas	0	1.84	0.45
	Todas excepto CM	>0	1.07	0.28
	CM	>0	2.41	0.34

<b>STGB</b>	Todas	0	1.76	0.32
		>0	2.41	0.34

### 3.3.3 Función ini\_agr\_trans\_temp

La función ini\_agr\_trans\_temp contiene el modelo para el inicio del agrietamiento transversal por temperatura. Las ecuaciones que modelan este deterioro dependen de la existencia de sobrecapas o sellos, por lo que se establece las condicionales para HSOLD=0 (superficie original) o HSOLD>0 (sellado o sobrecapas).

- CCT (Coeficiente de agrietamiento por temperatura).

El coeficiente de agrietamiento por temperatura se presenta como una variable que permite predecir el inicio de agrietamiento por temperatura. Sin embargo, para los modelos que se presentan en este estudio, el agrietamiento transversal por temperatura únicamente aplica a zonas calientes sub-tropicales (áridas y semi-áridas) y zonas con climas templados congelados. Por lo que el valor de CCT queda restringido a valores diferentes a 100 de acuerdo a la tabla de coeficientes [14].

- $K_{cit}$  (Factor de calibración para el inicio del agrietamiento transversal por temperatura).

El factor de calibración para el inicio del agrietamiento transversal por temperatura tomará el valor recomendado por defecto de 1 debido a la falta de información que sustente el uso de otro valor [14].

Tabla 3.7: Rangos parámetros para el inicio del agrietamiento transversal por temperatura.

Parámetro	Unidad	Valores todos los pavimentos
<b>HSOLD</b>	[mm]	0-100
<b>Kcit</b>	[ ]	1
<b>CDS</b>	[ ]	0.5-1.0-1.5
<b>CCT</b>	[ ]	5-8-2-1
<b>HSNEW</b>	[ mm]	0-300

Tabla 3.8: Valores para el caso base de análisis para el modelo de inicio del agrietamiento transversal por temperatura.

Parámetro	Unidad	Valores todos los pavimentos
<b>HSOLD</b>	[mm]	0-100
<b>Kcit</b>	[ ]	1
<b>CDS</b>	[ ]	1.0



<b>CCT</b>	[ ]	5-8-2-1
<b>HSNEW</b>	[ mm]	0-300

Tabla 3.9: Coeficientes para el modelo de inicio del agrietamiento transversal por temperatura [14].

Tipo de Pavimento	Valor de HSOLD	a0	a1
Todo tipo de pavimento	>0	-1.0	0.02

### 3.3.4 Función pgr\_agr\_trans\_temp

La función pgr\_agr\_trans\_temp contiene el modelo para la progresión de agrietamiento transversal por temperatura. El modelo hace una distinción de la tasa de progresión del deterioro dependiendo si se analiza la progresión en la superficie original o en sellados y sobrecapas, para esto se considera HSOLD=0 y HSOLD>0.

El rango de valores en el cual variarán los parámetros para el análisis de este modelo se ha seleccionado según el libro “Volume 6. Modelling Road Deterioration and Works Effects in HDM-4” [14]. A continuación, se presentan dichos parámetros.

- $ACT_a$  (Área de agrietamiento por temperatura total al inicio del año de análisis, en porcentaje).

El área de agrietamiento por temperatura varía en el rango de 0% a 100%.

- $Kc_{pt}$  (Factor de calibración para la progresión del agrietamiento transversal por temperatura).

El factor de calibración para la progresión del agrietamiento transversal por temperatura tendrá un valor de 1, por ser considerado el calor por defecto.

- $NCT_{eq}$  (Máximo número de grietas por temperatura en, número/km).

El valor del máximo número de grietas por temperatura se define en función de zonas climáticas y el modelo se aplica únicamente para zonas sub-tropicales áridas y semiáridas y para climas templados congelados.

- $NCT_a$  (Número de grietas transversales por temperatura (reflejadas) al inicio del año de análisis en número/km).

# UCUENCA

El número de grietas transversales por temperatura no es un dato conocido debido a la falta de información; sin embargo, se establece que este parámetro variará entre 0 y 120, refiriéndose a valores presentados en el manual.

- ICT(Tiempo para el inicio del agrietamiento transversal en años).

El parámetro del tiempo para el inicio de agrietamiento transversal por temperatura puede definirse en función de los resultados obtenidos del modelo para el inicio de este deterioro.

- Teq (Tiempo desde el inicio del agrietamiento hasta alcanzar el número máximo de grietas por temperatura, en años).

El tiempo desde el inicio de agrietamiento hasta alcanzar el número máximo de grietas por temperatura se define de acuerdo a zonas climáticas y cómo se ha mencionado en parámetros anteriores, este modelo y este parámetro aplica únicamente para zonas sub-tropicales áridas y semiáridas y para climas templados congelados

- dtT (Fracción del año de análisis en el cual aplica la progresión de agrietamiento transversal por temperatura).

Para definir el valor de este parámetro se desarrollarán los condicionales del modelo. El máximo valor que puede tomar este parámetro es de 1.

- PNCT (Número de grietas transversales por temperatura antes de la última sobrecapa o sellado, en número/km).

El número de grietas transversales antes de la última sobrecapa o sellado se definirá de acuerdo a valores determinados en una investigación existente. Estos valores variarán de 0 a 120.

Los valores para los parámetros son los siguientes.

Tabla 3.10: Rangos parámetros para el progreso del agrietamiento transversal por temperatura.

Parámetro	Unidad	Valores todos los pavimentos
HSOLD	[mm]	0-100
ACTa	[%]	0 y 20
AGE2	[años]	10
ICT	[años]	3
Kcpt	[ ]	1.0
CDS	[ ]	0.5-1.0-1.5

<b>NCTeq</b>	[%]	100 y 20
<b>NCTa</b>	[%]	25-50-75
<b>AGE3</b>	[años]	0-20
<b>Teq</b>	[ ]	7
<b>PNCT</b>	[%]	0-60-120

Tabla 3.11: Valores para el caso base de análisis para el modelo de inicio del agrietamiento transversal por temperatura.

<b>Parámetro</b>	<b>Unidad</b>	<b>Valores todos los pavimentos</b>
<b>HSOLD</b>	[mm]	0-100
<b>ACTa</b>	[%]	0
<b>AGE2</b>	[años]	10
<b>ICT</b>	[años]	3
<b>Kcpt</b>	[ ]	1.0
<b>CDS</b>	[ ]	1.0
<b>NCTeq</b>	[%]	20
<b>NCTa</b>	[%]	10
<b>AGE3</b>	[años]	0-20
<b>Teq</b>	[ ]	7
<b>PNCT</b>	[%]	0

Tabla 3.12: Coeficientes para el modelo de inicio del agrietamiento transversal por temperatura [14].

<b>Tipo de Pavimento</b>	<b>Valor de HSOLD</b>	<b>a0</b>
<b>Todo tipo de pavimento</b>	>0	0.25

### 3.3.5 Función ini\_desintegracion

La función ini\_desintegracion contiene el modelo para el inicio del deterioro del pavimento por desintegración. En la programación del modelo se utilizan la variable auxiliar 'aux' que permite establecer los coeficientes del modelo en función del tipo de material de la superficie. Donde, 'aux=1' aplica a todos los materiales excepto mezcla fría, 'aux=2' para mezclas frías, 'aux=3' aplica para todos los materiales excepto SL o CAPE y 'aux=4' para los materiales excluidos. Estos dos últimos considerarse cuando se analice un tratamiento superficial.

- $K_{vi}$  (Factor de calibración para el inicio de la desintegración).

El factor de calibración toma el valor de 1 de acuerdo a las recomendaciones de la bibliografía de referencia [14].

Los valores de los parámetros se muestran a continuación.

Tabla 3.13: Rangos parámetros para el inicio de la desintegración del pavimento.

Parámetro	Unidad	Valores todos los pavimentos
<b>Kiv</b>	[ ]	1.0
<b>CDS</b>	[ ]	0.5-1.0-1.5
<b>RRF</b>	[ ]	0.5-1.0-2.0
<b>YAX</b>	[millones/año]	0 a 1

Tabla 3.14: Valores para el caso base de análisis para el modelo de inicio del deterioro del pavimento.

Parámetro	Unidad	Valores todos los pavimentos
<b>Kiv</b>	[ ]	1.0
<b>CDS</b>	[ ]	1.0
<b>RRF</b>	[ ]	1.0
<b>YAX</b>	[millones/año]	0 a 1

Tabla 3.15: Coeficientes para el modelo de inicio de la desintegración del pavimento [14].

Tipo de Pavimento	Material de la superficie	a0	a1
<b>AM</b>	Todas excepto CM	100.00	-0.156
	CM	8.0	-0.156
<b>ST</b>	Todas excepto SL,CAPE	10.5	-0.156
	SL,CAPE	14.1	-0.156

### 3.3.6 Función pgr\_desintegracion

En la función pgr\_desintegracion se presenta el modelo de la desintegración del deterioro del pavimento. En este modelo los coeficientes son los mismos para el caso de estudio de una mezcla asfáltica y un tratamiento superficial. Los valores de los parámetros se establecen de acuerdo a la bibliografía [14].

- $ARV_a$  (Área de desintegración al inicio del año de análisis, en porcentaje).

El parámetro para el área de desintegración al inicio del año de análisis variará en un rango de 0% a 100%.

- $\delta t_v$  (Fracción del año de análisis en el que aplica el progreso de la desintegración del pavimento).

Para el análisis, la fracción del año en la que aplica el progreso de desintegración del pavimento de acuerdo a la bibliografía y al modelo este tendrá un valor máximo de 1.

- $K_{vp}$  (Factor de calibración para el progreso de la desintegración del pavimento).

El factor de calibración para el programó de la desintegración del pavimento tendrá el valor por defecto de 1, recomendado por la bibliografía.

Los valores de los parámetros para el modelo se presentan a continuación.

Tabla 3.16: Rangos parámetros para el progreso de la desintegración del pavimento.

Parámetro	Unidad	Valores todos los pavimentos
<b>ARVa</b>	[%]	0-25-50-75-90
<b>AGE2</b>	[años]	10
<b>IRV</b>	[años]	8
<b>YAX</b>	[millones/año]	1 a 10
<b>Kvp</b>	[ ]	1.0
<b>CDS</b>	[ ]	0.5-1.0-1.5
<b>RRF</b>	[ ]	0.5-1.0-2.0

Tabla 3.17: Valores para el caso base de análisis para el modelo de progreso del deterioro del pavimento.

Parámetro	Unidad	Valores todos los pavimentos
<b>ARVa</b>	[%]	25
<b>AGE2</b>	[años]	10
<b>IRV</b>	[años]	8
<b>YAX</b>	[millones/año]	1 a 10
<b>Kvp</b>	[ ]	1.0
<b>CDS</b>	[ ]	1.0
<b>RRF</b>	[ ]	1.0

Tabla 3.18: Coeficientes para el modelo de progreso de la desintegración del pavimento [14].

Tipo de Pavimento	a0	a1	a2
-------------------	----	----	----

Todo tipo de pavimento	0.3	1.5	0.352
------------------------	-----	-----	-------

### 3.3.7 Función ini\_baches

La función ini\_baches presenta el modelo para el inicio de baches. La programación se realiza de manera sencilla sin necesidad de uso de variables auxiliares ya que para los coeficientes se usa los mismos valores para las dos causales del inicio de baches, agrietamiento y desintegración.

- $K_{pi}$  (Factor de calibración para el inicio de baches).

El factor de calibración para el inicio de baches tendrá el valor de 1, siendo este el valor por defecto recomendado por la bibliografía [14].

Los valores para los parámetros de este modelo se presentan a continuación.

Tabla 3.19: Rangos parámetros para el inicio de baches.

Parámetro	Unidad	Valores todos los pavimentos
<b>Kpi</b>	[ ]	1
<b>HS</b>	[mm]	50-100-200-300
<b>CDB</b>	[ ]	0-0.5-1.0-1.5
<b>YAX</b>	[millones/año]	1 a 10
<b>MMP</b>	[mm/mes]	50-100-150-200

Tabla 3.20: Valores para el caso base de análisis para el modelo de inicio de baches.

Parámetro	Unidad	Valores todos los pavimentos
<b>Kpi</b>	[ ]	1
<b>HS</b>	[mm]	100
<b>CDB</b>	[ ]	0
<b>YAX</b>	[millones/año]	1 a 10
<b>MMP</b>	[mm/mes]	100

Tabla 3.21: Coeficientes para el modelo de inicio de baches [14].

Causa del inicio de baches	Tipo de Pavimento	a0	a1	a2	a3	a4
<b>Cracking</b>	AMGB,STGB	2.0	0.05	1.0	0.5	0.01
<b>Raveling</b>	AMGB,STGB	20	0.05	1.0	0.5	0.01

## 3.3.8 Función pgr\_baches

La función ini\_pgr\_baches contiene el modelo para la progresión de los baches. Los coeficientes aplican para ambos casos de análisis, mezcla asfáltica y tratamiento superficial.

- $ADIS_i$  (Porcentaje de agrietamiento ancho al inicio del año de análisis, o número existente de baches por km al inicio del año de análisis).

Para el análisis, se considerará el parámetro  $ADIS_i$  como el porcentaje de agrietamiento ancho al inicio del año de análisis, y variará entre 0% y 100%.

- $ACW_{pi}$  (Área mínima de agrietamiento ancho antes que los baches puedan ocurrir. Especificado por el usuario).

Para el parámetro de área mínima de agrietamiento ancho antes que los baches ocurran se trabajará con el valor recomendado por defecto en la bibliografía de 20 m<sup>2</sup> [14].

- $ARV_{pi}$  (Área mínima de desintegración antes que los baches puedan ocurrir. Especificado por el usuario).

Para el parámetro de área mínima de desintegración antes que los baches ocurran se trabajará con el valor recomendado por defecto en la bibliografía de 30 m<sup>2</sup> [14].

- ELANES (Número efectivo de carriles para la sección de la carretera).

Para este parámetro se establecen los valores de 2, 4 y 6 carriles para las secciones de carretera analizadas.

- $K_{pp}$  (Factor de calibración para la progresión de los baches y demás variables definidas para el inicio de baches).

Este factor de calibración tendrá un valor de 1 por recomendación de la bibliografía y por falta de información [14].

Los valores de los parámetros para este modelo se muestran a continuación.

Tabla 3.22: Rangos parámetros para el progreso de baches.

Parámetro	Unidad	Valores todos los pavimentos
Fpat	[días ]	0-365

<b>Kpp</b>	[ ]	1
<b>ADISi</b>	[%]	20-30-50-75
<b>PEFF</b>	[ ]	1
<b>ELANES</b>	[ no]	2-4-6
<b>CDB</b>	[ ]	0-0.5-1.0-1.5
<b>YAX</b>	[millones/año]	1 a 10
<b>MMP</b>	[mm/mes]	50-100-150-200
<b>HS</b>	[mm]	50-100-200-300

Tabla 3.23: Valores para el caso base de análisis para el modelo de progreso de baches.

<b>Parámetro</b>	<b>Unidad</b>	<b>Valores todos los pavimentos</b>
<b>Kpp</b>	[ ]	1
<b>ADISi</b>	[%]	20
<b>PEFF</b>	[ ]	1
<b>ELANES</b>	[ no]	4
<b>CDB</b>	[ ]	0
<b>YAX</b>	[millones/año]	1 a 10
<b>MMP</b>	[mm/mes]	100
<b>HS</b>	[mm]	100

Tabla 3.24: Coeficientes para el modelo de progreso de baches [14].

<b>Causa del inicio de baches</b>	<b>Tipo de Pavimento</b>	<b>a0</b>	<b>a1</b>	<b>a2</b>	<b>a3</b>	<b>a4</b>
<b>Cracking</b>	AMGB,STGB	1.0	1.0	10	0.005	0.08
<b>Raveling</b>	AMGB,STGB	0.2	1.0	10	0.005	0.08
<b>Alargamiento</b>	AMGB,STGB	0.07	1.0	10	0.005	0.08

### 3.3.9 Función ini\_ahu\_den\_ini

La función ini\_ahu\_den\_ini se presenta el modelo para el inicio de ahuellamiento por densificación inicial. Este modelo aplica únicamente para un análisis del pavimento en el primer año. En la función se calcula el valor de la deflexión con la fórmula presentada en la bibliografía dado que es un valor que depende el número estructural ajustado (SNP) y no puede ser un valor que se ingrese a criterio del usuario. Los coeficientes son los mismos para los casos de análisis de mezcla asfáltica y tratamiento superficial.

- $K_{rid}$  (Factor de calibración para la densificación inicial).

El factor de calibración para la densificación inicial se establece en 1 por ser el valor por defecto recomendado por la bibliografía.



Los rangos de los parámetros para este modelo son:

Tabla 3.25: Rangos parámetros para el inicio de ahuellamiento por densificación inicial.

Parámetro	Unidad	Valores todos los pavimentos
<b>Krid</b>	[ ]	1
<b>YE4</b>	[millones/año]	1 a 10
<b>SNP</b>	[ ]	2-4-6-8
<b>COMP</b>	[ ]	85-90-95-100

Tabla 3.26: Valores para el caso base de análisis para el inicio de ahuellamiento por densificación inicial.

Parámetro	Unidad	Valores todos los pavimentos
<b>Krid</b>	[ ]	1
<b>YE4</b>	[millones/año]	1 a 10
<b>SNP</b>	[ ]	6
<b>COMP</b>	[ ]	100

Tabla 3.27: Coeficientes para el modelo de inicio de ahuellamiento por densificación inicial [14].

Tipo de Pavimento	a0	a1	a2	a3	a4
<b>AMGB,STGB</b>	51740	0.09	0.0384	-0.502	-2.30

### 3.3.10 Función ini\_ahue\_def\_estr

La función ini\_ahue\_def\_estr contiene el modelo del componente de ahuellamiento por deformación estructural. En la programación en función de la variable ACRA (Cambio incremental en el área total de agrietamiento durante el año de análisis). Se define si el inicio del ahuellamiento por deformación estructural se produce sin la presencia de agrietamiento (ACRA=0) o después del agrietamiento (ACRA>0).

- $ACX_a$  (Área de agrietamiento indexado al principio del año de análisis, en porcentaje).  
Él área de agrietamiento indexado al inicio del año de análisis varía entre 0% y 100%.
- $K_{rst}$  (Factor de calibración para deformación estructural).

El factor de calibración para la deformación estructural tendrá el valor de 1 considerando el valor pro defecto recomendado en la bibliografía [14].

Los valores de los parámetros para este modelo se presentan a continuación.

Tabla 3.28: Rangos parámetros para el inicio del ahuellamiento por densificación inicial.

Parámetro	Unidad	Valores todos los pavimentos
<b>ACRA</b>	[%]	0-25
<b>Krst</b>	[ ]	1
<b>YE4</b>	[millones/año]	1 a 10
<b>SNP</b>	[ ]	2-4-6-8
<b>COMP</b>	[ ]	85-90-95-100
<b>MMP</b>	[mm/mes]	50-100-150-200
<b>ACXa</b>	[%]	25

Tabla 3.29: Valores para el caso base de análisis para el inicio del ahuellamiento por densificación inicial.

Parámetro	Unidad	Valores todos los pavimentos
<b>ACRA</b>	[%]	0-25
<b>Krst</b>	[ ]	1
<b>YE4</b>	[millones/año]	1 a 10
<b>SNP</b>	[ ]	6
<b>COMP</b>	[ ]	100
<b>MMP</b>	[mm/mes]	100
<b>ACAa</b>	[%]	0-25

Tabla 3.30: Coeficientes para el modelo de inicio del ahuellamiento por densificación inicial [14].

	Tipo de Pavimento	a0	a1	a2	a3	a4
<b>Sin Agrietamiento</b>	Todo tipo de pavimento	44950	-1.14	0.11	-2.3	-
<b>Con Agrietamiento</b>	Todo tipo de pavimento	0.0000248	-0.84	0.14	1.07	1.11

### 3.3.11 Función ini\_ahue\_def\_plas

La función ini\_ahue\_def\_plas contiene el modelo del componente de ahuellamiento por deformación plástica. En la programación se usa una variable auxiliar para definir los valores de los coeficientes para el modelo dependiendo del tipo de superficie analizada. La variable auxiliar 'tipo' cuando toma el valor de 0, indica que el modelo se analizará una

mezcla asfáltica; mientras que, cuando la variable tenga un valor de 1 el análisis se realizará para un tratamiento superficial.

- $K_{rpd}$  (Factor de calibración para deformación plástica).

El factor de calibración para la deformación plástica tiene el valor de 1 de acuerdo a sugerencias de la bibliografía [14].

Los valores para los parámetros de este modelo se presentan a continuación.

Tabla 3.31: Rangos parámetros para el progreso del ahuellamiento por deformación plástica.

Parámetro	Unidad	Valores todos los pavimentos
<b>Krpd</b>	[ ]	1
<b>CDS</b>	[ ]	0.5-1.0-1.5
<b>YE4</b>	[millones/año]	1 a 10
<b>Sh</b>	[km/h]	30-50-80-100
<b>HS</b>	[mm]	50-100-200-300

Tabla 3.32: Valores para el caso base de análisis para el progreso del ahuellamiento por deformación plástica.

Parámetro	Unidad	Valores todos los pavimentos
<b>Krpd</b>	[ ]	1
<b>CDS</b>	[ ]	1.0
<b>YE4</b>	[millones/año]	1 a 10
<b>Sh</b>	[km/h]	50
<b>HS</b>	[mm]	100

Tabla 3.33: Coeficientes para el progreso del ahuellamiento por deformación plástica [14].

Tipo de Superficie	a0	a1	a2	a3
<b>AM</b>	0.3	3.27	-0.78	0.71
<b>ST</b>	0	3.27	-0.78	0.71

### 3.3.12 Función pgr\_ahuellamiento

La función pgr\_ahuellamiento contiene el modelo relacionado a la progresión del ahuellamiento. En este modelo el parámetro AGE4 establece un condicional para determinar el progreso del ahuellamiento según la suma de distintos componentes de este

deterioro. Para el análisis del progreso se relacionarán los componentes del mismo según el YE4 (Número anual de ejes estándar equivalentes, en millones por carril).

El progreso del ahuellamiento se determina por la suma de sus componentes iniciales. Para evaluar el progreso de este deterioro se consideraron los componentes según su caso estándar. Para el análisis se ha definido AGE4 (Tiempo en número de años desde la última reconstrucción o nueva construcción de la capa de base) con los valores de 1 y 5 para considerar las dos posibilidades que presenta este modelo.

### 3.3.13 Función ini\_rugosidad\_comp\_est

La función ini\_rugosidad\_comp\_est presenta el modelo para el inicio de deterioro de la rugosidad del pavimento considerando su componente estructural. En este modelo, los coeficientes serán los mismos para los casos de análisis de mezcla asfáltica y tratamiento superficial.

- $ACX_a$  (Área de agrietamiento indexado al inicio del año de análisis, en porcentaje).

El parámetro de área de agrietamiento indexado al inicio del año de análisis varía en un rango del 0 al 100%.

- $PACX$  (Área de agrietamiento indexado previo en la superficie antigua, en porcentaje).

El área de agrietamiento indexado previo en la superficie existente variará de 0 a 100%.

- $m$  (Coeficiente ambiental).

El valor del coeficiente ambiental se definirá de acuerdo a los valores establecidos por el manual de donde se han obtenido los modelos aquí presentados. El coeficiente varía de 0.005 a 0.060. estos valores se muestran en la Tabla 3.37.

- $K_{gm}$  (Factor de calibración para el coeficiente ambiental),  $K_{snpk}$  (Factor de calibración para SNPK),  $K_{gs}$  (Factor de calibración para el componente estructural de la rugosidad).

El factor de calibración para el coeficiente ambiental, para SNPK y para el componente estructural de la rugosidad tendrá el valor el 1, valor por defecto recomendado por la bibliografía [14].

Los valores de los parámetros se muestran a continuación.

Tabla 3.34: Rangos parámetros para el análisis de rugosidad en su componente estructural.

Parámetro	Unidad	Valores todos los pavimentos
<b>Kgs</b>	[ ]	1
<b>Kgm</b>	[ ]	1
<b>Ksnpk</b>	[ ]	1
<b>YE4</b>	[millones/año]	1 a 10
<b>m</b>	[ ]	0.005-0.01-0.02-0.03-0.04-0.05-0.06
<b>AGE3</b>	[años]	0-20
<b>SNP</b>	[ ]	2-4-6-8
<b>ACXa</b>	[%]	25-50-75
<b>HSNEW</b>	[mm]	100
<b>PCAX</b>	[%]	25-50-75
<b>HSOLD</b>	[mm]	0-100

Tabla 3.35: Valores para el caso base de análisis para el análisis de rugosidad en su componente estructural.

Parámetro	Unidad	Valores todos los pavimentos
<b>Kgs</b>	[ ]	1
<b>Kgm</b>	[ ]	1
<b>Ksnpk</b>	[ ]	1
<b>YE4</b>	[millones/año]	1 a 10
<b>m</b>	[ ]	0.030
<b>AGE3</b>	[años]	10
<b>SNP</b>	[ ]	6
<b>ACXa</b>	[%]	25
<b>HSNEW</b>	[mm]	100
<b>PCAX</b>	[%]	50
<b>HSOLD</b>	[mm]	100

Tabla 3.36: Coeficientes para el análisis de rugosidad en su componente estructural [14].

Tipo de pavimento	Componente de rugosidad	a0	a1	a2
<b>Todo tipo de pavimento</b>	Estructural	134	-	-
	dSNPK	0.0000758	64	40

Tabla 3.37: Coeficiente ambiental 'm' [14].

Clasificación por humedad	Clasificación de temperatura				
	Tropical	Sub-tropical caliente	Sub-tropical frío	Templado frío	Templado congelado

<b>Árido</b>	0.005	0.010	0.015	0.020	0.030
<b>Semi-árido</b>	0.010	0.015	0.020	0.030	0.040
<b>Sub-húmedo</b>	0.020	0.025	0.030	0.040	0.050
<b>Húmedo</b>	0.025	0.030	0.040	0.050	0.060
<b>Per-húmedo</b>	0.030	0.040	0.050	-	-

### 3.3.14 Función ini\_rugosidad\_comp\_agrietamiento

La función ini\_rugosidad\_comp\_agrietamiento presenta el modelo para el deterioro de la rugosidad del pavimento debido a su componente estructural. Los coeficientes son los mismos para la mezcla asfáltica y el tratamiento superficial.

- $\Delta$ ACRA (Cambio incremental en el área total de agrietamiento durante el año de análisis, en porcentaje).

El parámetro de cambio incremental en el área total de agrietamiento durante el año de análisis, variará de 0% a 100%.

- $K_{gc}$  (Factor de calibración para el componente de agrietamiento de rugosidad).

El factor de calibración para el componente de agrietamiento de rugosidad tendrá el valor de 1, recomendado por la bibliografía como valor a usarse por defecto [14].

Para este modelo por ser un caso sencillo solo se establece solo un caso de análisis.

Tabla 3.38: Valores de parámetros y coeficientes para el análisis de rugosidad en su componente de agrietamiento [14].

Parámetro	Unidad	Valores todos los pavimentos
<b><math>K_{gc}</math></b>	[ ]	1
<b>AACRA</b>	[% ]	0-100
<b>a0</b>	[ ]	0.0066

### 3.3.15 Función ini\_rugosidad\_comp\_ahuellamiento

La función ini\_rugosidad\_comp\_ahuellamiento presenta el modelo para el deterioro de la rugosidad del pavimento debido a su componente de ahuellamiento. El desarrollo de este modelo depende a la vez de la función que contiene el modelo de la desviación estándar

de la profundidad de la rodera. Los coeficientes para este modelo serán los mismos para mezcla asfáltica y tratamiento superficial.

- $\Delta RDS$  (Cambio incremental en la desviación estándar de la profundidad del ahuellamiento en el año de análisis, en mm).

Los valores para el cambio incremental en la desviación estándar de la profundidad del ahuellamiento se establecen que variarán en el rango de 0% a 100%.

- $K_{gr}$  (Factor de calibración para el componente de ahuellamiento de rugosidad).

El factor de calibración para el componente de ahuellamiento de rugosidad tendrá el valor de 1, recomendado como valor por defecto por la bibliografía [14].

Al igual que el modelo anterior se establece un solo caso de análisis.

Tabla 3.39: Valores de parámetros y coeficientes para el análisis de rugosidad en su componente de ahuellamiento [14].

Parámetro	Unidad	Valores todos los pavimentos
<b>Kgr</b>	[ ]	1
<b>ARDS</b>	[mm ]	0-10
<b>a0</b>	[ ]	0.088

### 3.3.16 Función ini\_rugosidad\_comp\_baches

La función ini\_rugosidad\_comp\_baches contiene el modelo para el deterioro de la rugosidad del pavimento por su componente ambiental. El modelo es el mismo independiente del tipo de pavimento flexible. Los coeficientes para este modelo son los siguientes.

- $NPT_a$  (Número de unidades de baches por km al inicio del año de análisis).

Para el análisis, el número de unidades de baches por km al inicio del año de análisis se establece variará de 0% a 100%.

- $NPT_b$  (Número de unidades de baches por km al final del año de análisis).

El número de unidades de baches por km al final de año de análisis variará de 0 a 200, con el fin de tener un rango apropiado para el análisis.

- FM (Índice de libertad de maniobra).

# UCUENCA

El índice de libertad de maniobra se establece en función del ancho del carril. El valor del FM toma el valor de 0 cuando no existe libertad de maniobra (ancho del carril=3 m) y 1 cuando existe total libertad de maniobra (ancho del carril=7 m); porque se analizarán

- $K_{gp}$  (Factor de calibración para el componente de baches de rugosidad).

El factor de calibración para el componente de baches tendrá el valor de 1 por ser el valor recomendado por defecto en la bibliografía [14].

Tabla 3.40: Valores para parámetros para el análisis de rugosidad en su componente de baches

Parámetro	Unidad	Valores todos los pavimentos
FM	[ ]	0-0.5-1.0
Ppt	[ %]	0-25-50-75-100
Fpat	[días ]	90-180-270-365
Kgp	[ ]	1
NPTa	[no ]	0-20-40-60-80-100
NPTb	[no]	0 a 300

Tabla 3.41: Valores para el caso base de análisis para el análisis de rugosidad en su componente de baches

Parámetro	Unidad	Valores todos los pavimentos
FM	[ ]	0
Ppt	[ %]	50
Fpat	[días ]	180
Kgp	[ ]	1
NPTa	[no ]	20
NPTb	[no]	0-300

Tabla 3.42: Coeficientes para el análisis de rugosidad en su componente de baches[14].

Tipo de pavimento	a0	a1	a2
Todo tipo de pavimentos	0.00019	2	1.5

### 3.3.17 Función ini\_rugosidad\_comp\_ambiental

La función ini\_rugosidad\_comp\_ambiental contiene el modelo para el deterioro de la rugosidad del pavimento por su componente ambiental.

- $RI_a$  (Rugosidad al inicio del año de análisis)



# UCUENCA

Para definir el rango de variación para la rugosidad al inicio del año de análisis se establece un rango de 0 a 10 m/km considerando los valores presentados en las gráficas mostradas en la bibliografía.

- $K_{gm}$  (Factor de calibración para el componente ambiental)

El factor de calibración para el componente ambiental tendrá el valor predeterminado de 1 dadas las recomendaciones de la bibliografía [14].

Tabla 3.43: Valores de parámetros y coeficientes para el análisis de rugosidad en su componente ambiental.

Parámetro	Unidad	Valores todos los pavimentos
<b>Kgr</b>	[ ]	1
<b>m</b>	[ ]	0.005-0.010-0.020-0.030-0.040-0.050-0.060
<b>Rla</b>	[m/km IRI ]	0-10

### 3.3.18 Función cambio\_rugosidad

La función cambio\_rugosidad contiene el modelo para el cambio en la rugosidad como la suma de todos sus componentes. La función contiene los distintos modelos para cada uno de los componentes de la rugosidad y la suma de estos al final, analizando la variación de todos estos con respecto a un mismo parámetro, la edad de la superficie del pavimento (AGE2).

En los modelos, los componentes de la rugosidad no dependen de la edad del pavimento, sin embargo, es lógico asumir que a medida que el pavimento envejece, la rugosidad del pavimento presentará más cambios, permitiendo evaluar el modelo según este parámetro.

Para el análisis, cada uno de los componentes se analizará de acuerdo a los valores estándar de cada caso, verificándose la variación de todos los componentes según un mismo criterio. Los valores estándar de cada componente de rugosidad pueden revisarse en tablas anteriores.

## CAPÍTULO IV: ANÁLISIS DE RESULTADOS

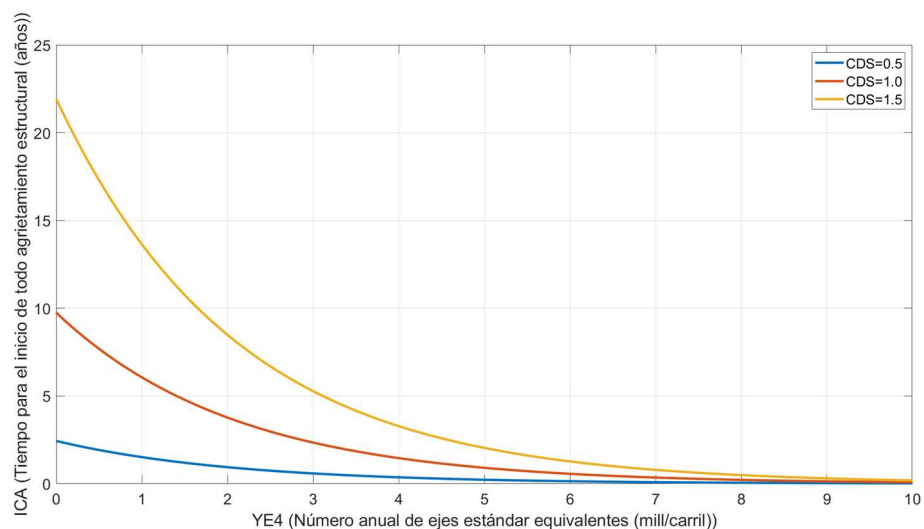
En este capítulo se presentan los resultados obtenidos para los distintos modelos de deterioro y su análisis respectivo. Los resultados se presentan de manera gráfica ya que se busca evaluar la influencia de los parámetros sobre los distintos modelos. No se cuenta con datos para el análisis de una vía específica por lo que el análisis será en base a valores recomendados por distintas bibliografías, por lo que se considera que un análisis numérico de los resultados no tendría mayor relevancia.

### 4.1 Inicio de todo agrietamiento estructural

#### 4.1.1 Análisis para una mezcla asfáltica sobre la superficie original (HSOLD=0)

Analizando los resultados obtenidos se puede observar que a medida que el tráfico aumenta, el tiempo en el que inicia el agrietamiento estructural será menor, existiendo una relación inversamente proporcional. Considerando la variación del modelo con respecto al indicador de defectos en la construcción de superficies bituminosas (CDS), se concluye que, a menor contenido de ligante en la mezcla, el inicio del agrietamiento ocurrirá más temprano. (Ver Figura 4.1)

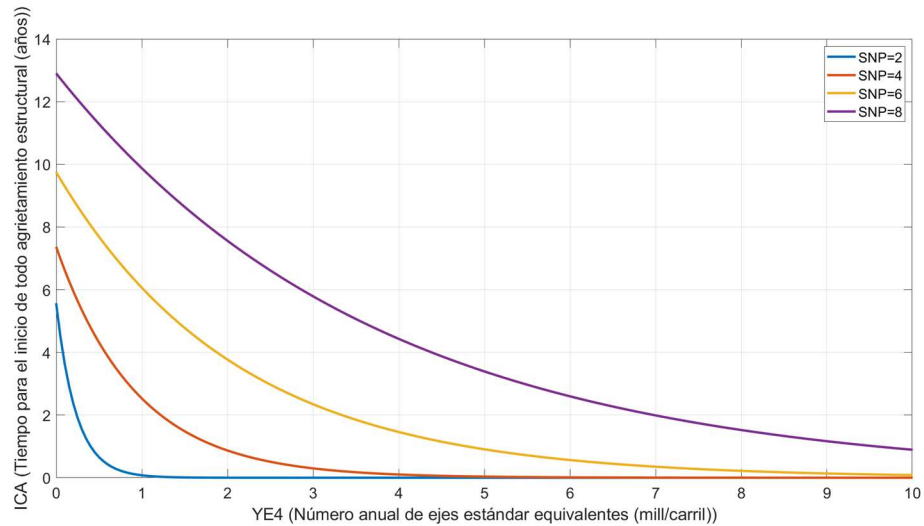
Figura 4.1: Inicio de todo agrietamiento estructural para HSOLD=0 en MA (CDS)



Así también, en la variación del modelo con respecto al número estructural (Ver Figura 4.2), se observa que mientras mayor sea el número estructural mayor será el tiempo que le tome

al pavimento comenzar su proceso de agrietamiento lo cual es lógico sabiendo que el número estructural representa la capacidad estructural del pavimento.

Figura 4.2: Inicio de todo agrietamiento estructural para HSOLD=0 en MA (SNP)

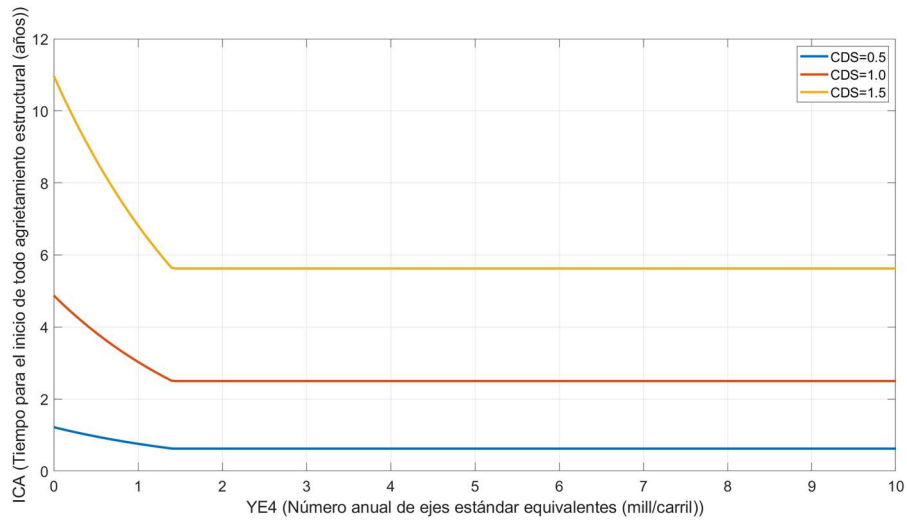


#### 4.1.2 Análisis para una mezcla asfáltica de una sobrecapa o sello (HSOLD>0)

Al analizar el modelo para el inicio del agrietamiento estructural se puede observar que, a diferencia del caso de análisis para la superficie original, cuando se considera una superficie de sobrecapa o sellado el inicio del agrietamiento depende del tráfico solo cuando las vías son de tráfico liviano, ya que cuando el tráfico crece llega un punto en el que el deterioro se vuelve independiente del tráfico.

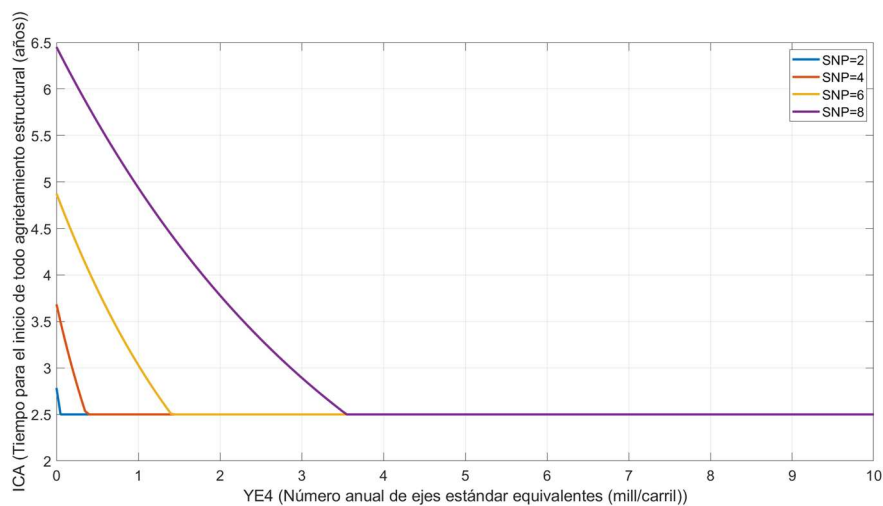
El análisis del parámetro indicador de defectos en el pavimento (CDS) indica que mientras este valor es mayor, el tiempo para el inicio del agrietamiento también es mayor. Sin embargo, llega un punto en el que el inicio del agrietamiento se vuelve independiente del tráfico volviéndose constante. (Ver Figura 4.3).

Figura 4.3: Inicio de todo agrietamiento estructural para HSOLD>0 en MA, para todos los materiales excepto CM, SL y CAPE (CDS)



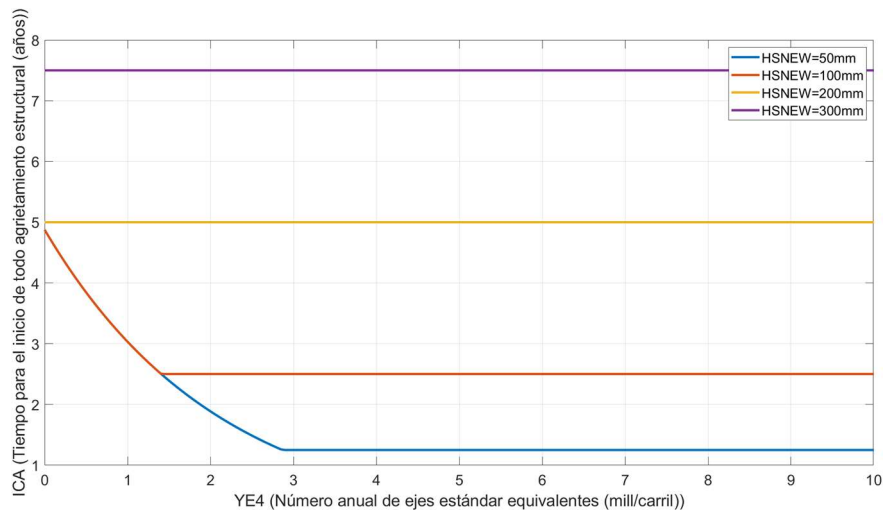
Con respecto al parámetro del número estructural (SNP) se observa que a medida que el pavimento tiene mayor resistencia estructural, mayor es el tiempo que le toma al pavimento comenzar su proceso de agrietamiento. Llegando también a un punto en el que es inicio de este deterioro se vuelve independiente del tráfico y únicamente a mayor número estructural, mayor será el tráfico en el cual se estabilice el tiempo para el inicio del agrietamiento. (Ver Figura 4.4).

Figura 4.4: Inicio de todo agrietamiento estructural para HSOLD>0 en MA, para todos los materiales excepto CM, SL y CAPE (SNP)



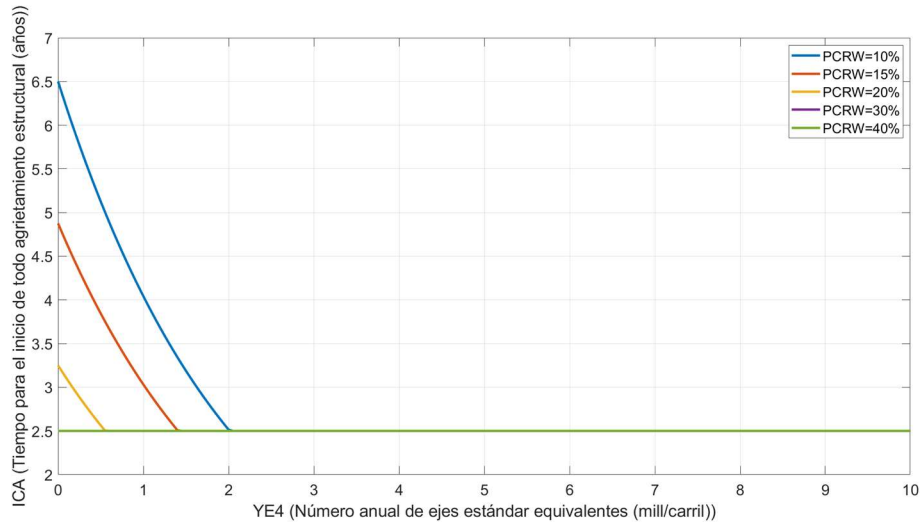
Observando cómo influye el espesor de la nueva capa de recapeo o sellado (HSNEW) se puede indicar que mientras menor sea el espesor de la sobrecapa el pavimento será más propenso a un inicio temprano del agrietamiento del pavimento. Así mismo, llega un punto en el que el inicio del deterioro se vuelve independiente del tráfico que circula por el pavimento, siendo el espesor de la sobrecapa el único parámetro del que dependa el inicio del agrietamiento. (Ver Figura 4.5).

Figura 4.5: Inicio de todo agrietamiento estructural para HSOLD>0 en MA, para todos los materiales excepto CM, SL y CAPE (HSNEW)



Si se analiza el área de agrietamiento antes del proceso de recapeo (PCRW), se observa que mientras mayor sea el valor de este parámetro el inicio del agrietamiento ya no depende de este y el inicio del agrietamiento iniciará en un tiempo específico independiente del área agrietada. (Ver Figura 4.6). Si bien, en la gráfica se observa que el agrietamiento iniciará a los 2.5 años cuando el área de agrietamiento sea mayor al 20%, no se puede concluir que eso sucederá siempre ya que el resultado se basa en el caso de análisis estándar que está basado en suposiciones.

Figura 4.6: Inicio de todo agrietamiento estructural para HSOLD>0 en MA, para todos los materiales excepto CM, SL y CAPE (PCRW)



### 4.1.3 Análisis para un tratamiento superficial sobre la superficie original (HSOLD=0)

Analizando un tratamiento superficial se observa que a mayor tráfico menor es el tiempo para el inicio del agrietamiento. De igual forma, se aprecia que los para los parámetros CDS y SNP, el inicio del agrietamiento es directamente proporcional ya que a medida que estos aumentan el tiempo para el inicio de este deterioro también (Ver Figura 4.7 y 4.8).

Figura 4.7: Inicio de todo agrietamiento estructural para HSOLD=0 en ST (CDS)

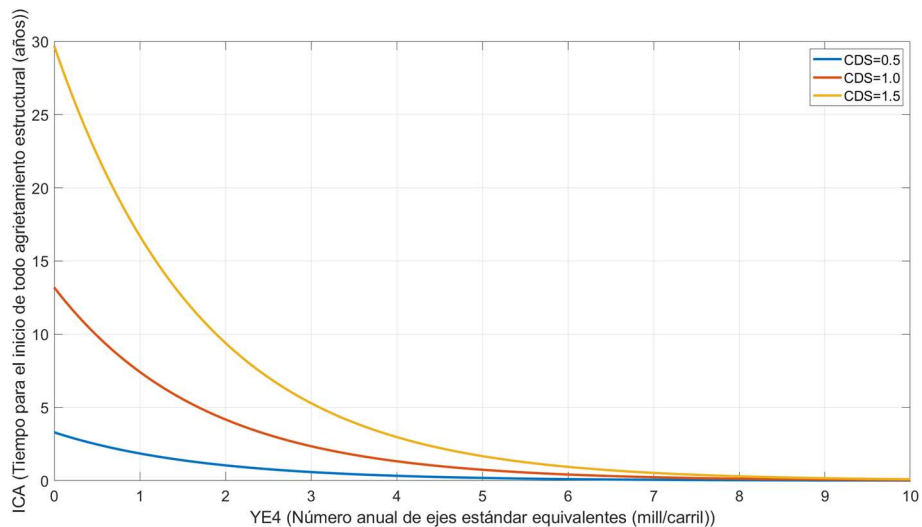
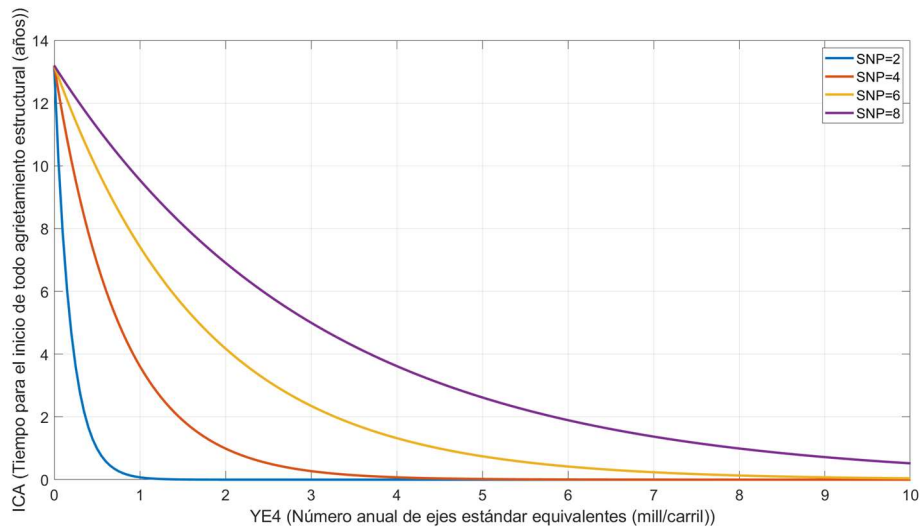


Figura 4.8: Inicio de todo agrietamiento estructural para HSOLD=0 en ST (SNP)



Se observa que para el caso del número estructural (Ver Figura 4.7), el punto inicial del deterioro es el mismo, a diferencia del caso de las mezclas asfálticas (Ver Figura 4.2) donde a menor número estructural el tiempo de inicio también es menor. Del análisis también se observa que el comportamiento del agrietamiento estructural es similar en tratamientos superficiales y mezclas asfálticas, pero el tiempo de inicio de agrietamiento es mayor cuando se analizan tratamientos superficiales.

#### 4.1.4 Análisis para un tratamiento superficial de una sobrecapa o sello (HSOLD>0).

Para el caso cuando se tiene una sobrecapa de tratamiento superficial se observa que, para todos los parámetros de análisis el tráfico no tiene mayor influencia en el inicio del agrietamiento (ICA) ya que es constante respecto al tráfico en todos los casos. De los resultados obtenidos se observa que para el factor de indicador de defectos en el pavimento (CDS) y el espesor (HSNEW), (Ver Figura 4.9 y 4.10), el tiempo para el inicio del agrietamiento es directamente proporcional.

Figura 4.9: Inicio de todo agrietamiento estructural para HSOLD>0 en ST, para todos los materiales excepto CM, SL y CAPE (CDS)

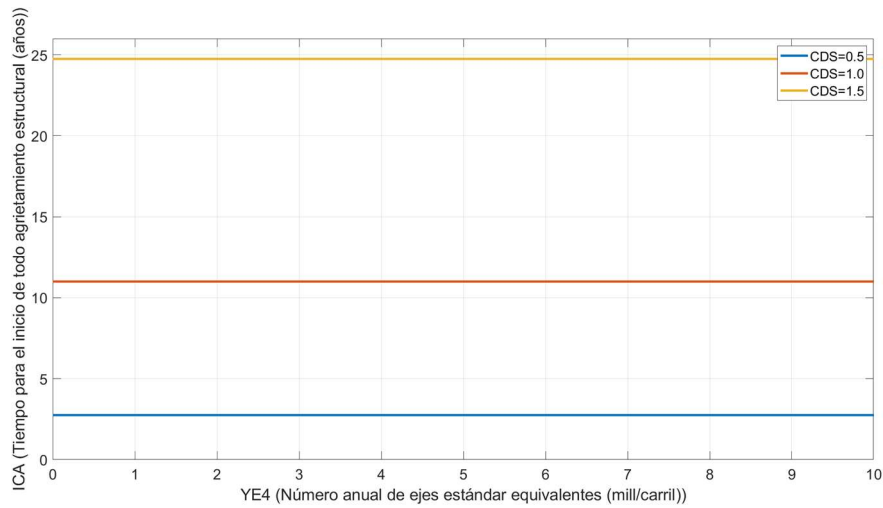
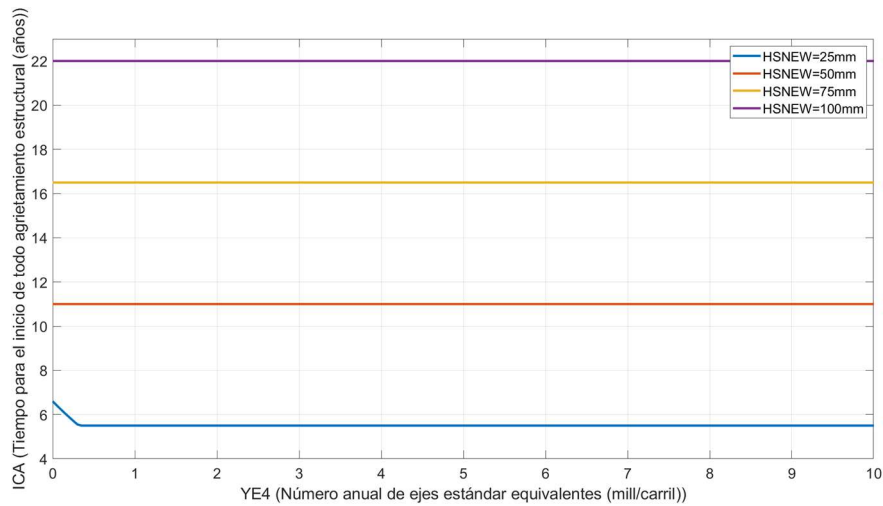


Figura 4.10: Inicio de todo agrietamiento estructural para HSOLD>0 en ST, para todos los materiales excepto CM, SL y CAPE (HSNEW)



Mientras que para los parámetros de número estructural (SNP) y área de agrietamiento (PCRW) el inicio del agrietamiento no depende de la variación de estos parámetros (Ver Figura 4.11 y 4.12).



Figura 4.11: Inicio de todo agrietamiento estructural para HSOLD>0 en ST, para todos los materiales excepto CM, SL y CAPE (SNP)

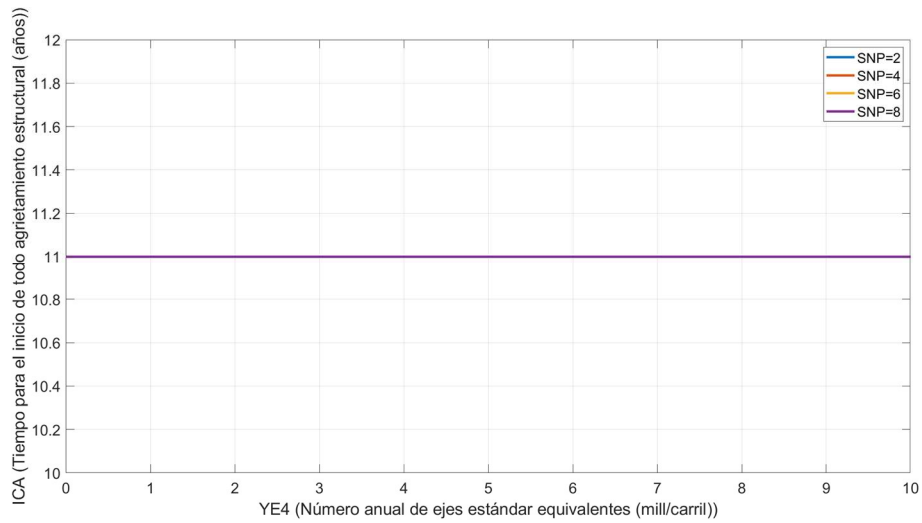
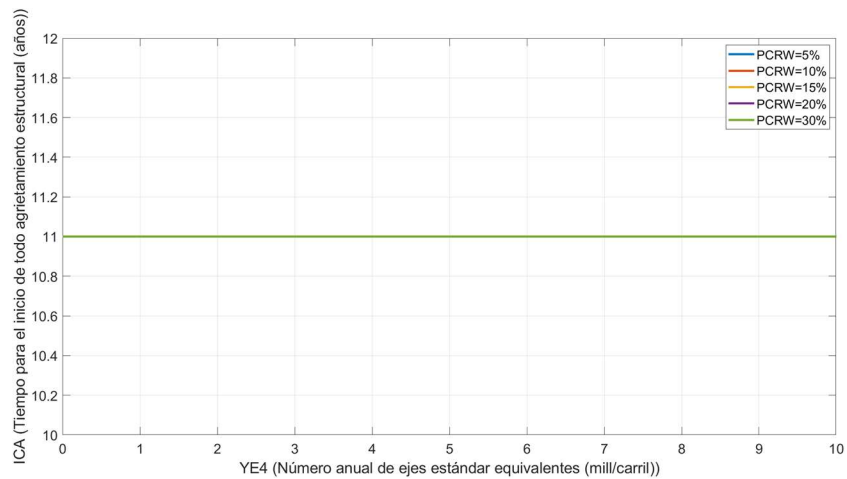


Figura 4.22: Inicio de todo agrietamiento estructural para HSOLD>0 en ST, para todos los materiales excepto CM, SL y CAPE (PCRW)



Debido a los resultados obtenidos para todos los materiales excepto CM, SL y CAPE, se ha decidido analizar el caso más específico cuando los materiales de la superficie son los excluidos en el análisis anterior. De los resultados obtenidos se observa que el comportamiento es bastante similar al caso de la mezcla asfáltica para superficies de sobrecapas o sellos (HSOLD>0). Al analizar el modelo respecto al área de agrietamiento previa y al indicador de defectos en la construcción (Ver Figura 4.13 y 4.14), se establece

que el tiempo para el inicio de todo agrietamiento tiende a ser mayor en los tratamientos superficiales.

Figura 4.33: Inicio de todo agrietamiento estructural para HSOLD>0 en ST, para los materiales CM, SL y CAPE (PCRA)

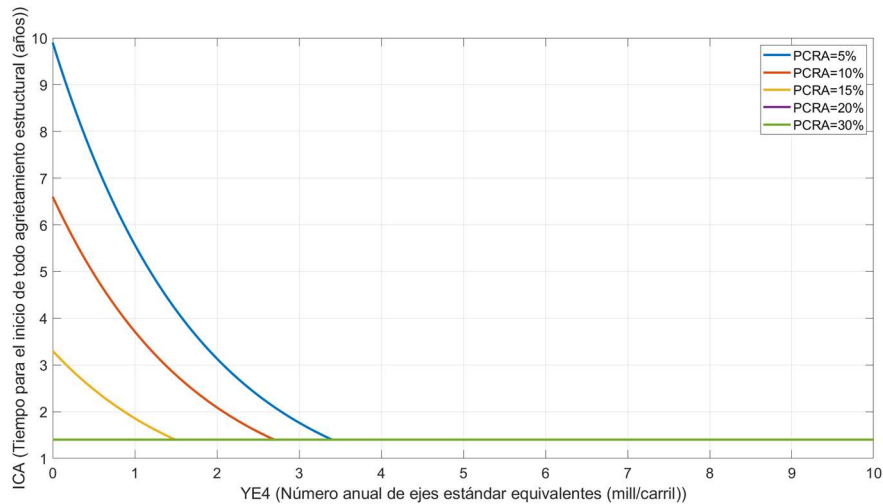
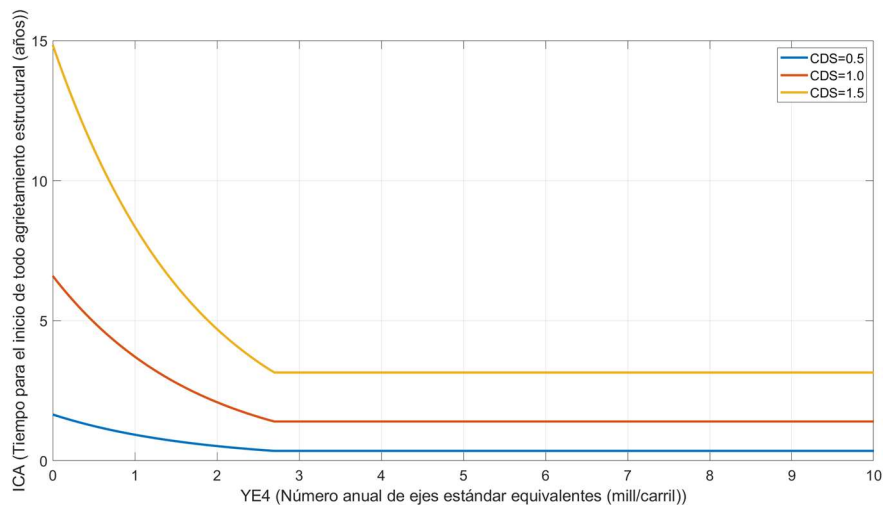
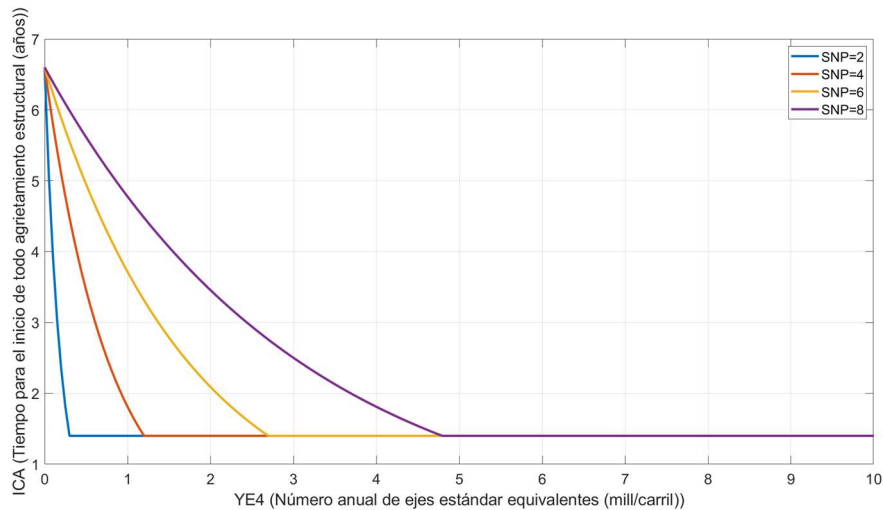


Figura 4.14: Inicio de todo agrietamiento estructural para HSOLD>0 en ST, para los materiales CM, SL y CAPE (CDS)



Mientras que, al estudiar la variación de los modelos respecto al número estructural del pavimento (Ver Figura 4.15), se determina que en los tratamientos superficiales el punto inicio del agrietamiento será el mismo independiente de la capacidad estructural del pavimento, siendo diferente al caso de las mezclas asfálticas, donde a mayor número estructural, mayor será el inicio del tiempo para el inicio de todo agrietamiento es diferente.

Figura 4.15: Inicio de todo agrietamiento estructural para HSOLD>0 en ST, para los materiales CM, SL y CAPE (SNP)



## 4.2 Progresión de todo agrietamiento estructural

De los resultados obtenidos se observa que, para todos los casos de análisis tanto para mezclas asfálticas como para tratamiento superficiales, el modelo se comporta de la misma manera. Dado que el modelo no depende del tráfico, la variación del mismo se ha realizado según el área de agrietamiento estructural al inicio del año de análisis (ACAa).

En los resultados se observa que el progreso de agrietamiento crece hasta que alcanza un valor máximo cuando el área agrietada alcanza el 50% y luego decrece, esto debido a la naturaleza del modelo. Para este caso, el único parámetro a analizar es el indicador de defectos en el pavimento y en todos los casos de análisis se observa que mientras el indicador de defectos en el pavimento es mayor (más ligante sobre el contenido óptimo), mayor será el progreso del agrietamiento.

Analizando las Figuras 4.16 y 4.17 se observa que, el agrietamiento es menor cuando los pavimentos son de mezclas asfálticas. También se identifica que los pavimentos de sobrecapas o sellos son más propensos al progreso del agrietamiento estructural en comparación a las superficies originales.

Figura 4.46: Progreso de todo agrietamiento estructural para HSOLD=0 en AM

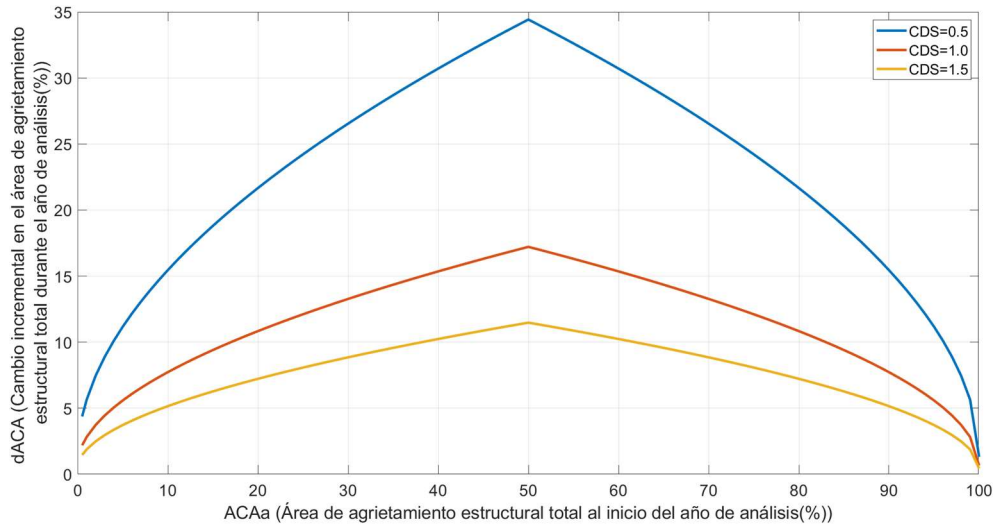
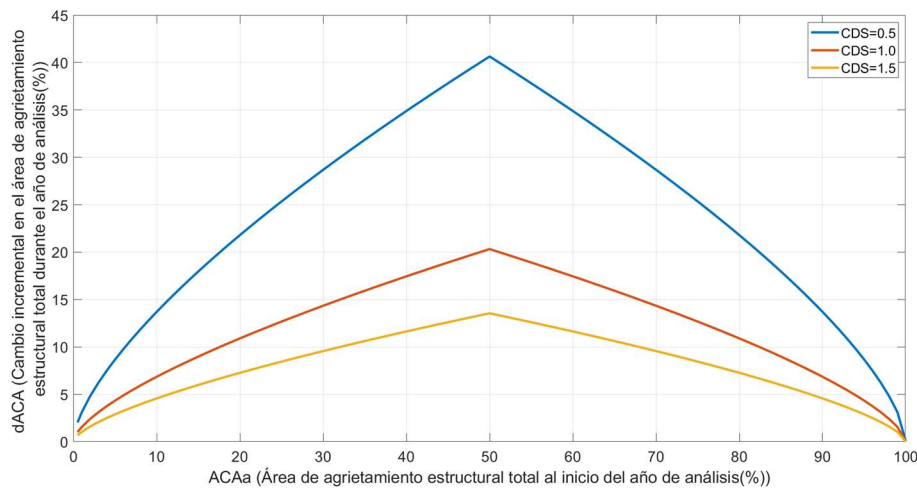


Figura 4.57: Progreso de todo agrietamiento estructural para HSOLD>0 en AM, para todos los materiales excepto CM.



De las figuras 4.18 y 4.19, se puede indicar que el progreso del agrietamiento estructural en tratamientos superficiales presenta un comportamiento similar a las mezclas asfálticas al analizar superficies nuevas o existentes; sin embargo, se observa que este deterioro tiene mayor severidad en los tratamientos superficiales.

Figura 4.68: Progreso de todo agrietamiento estructural para HSOLD=0 en ST

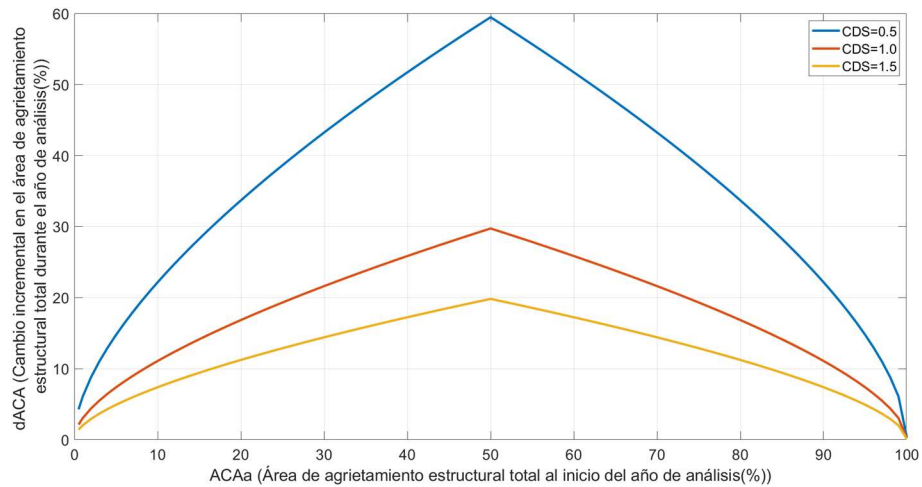
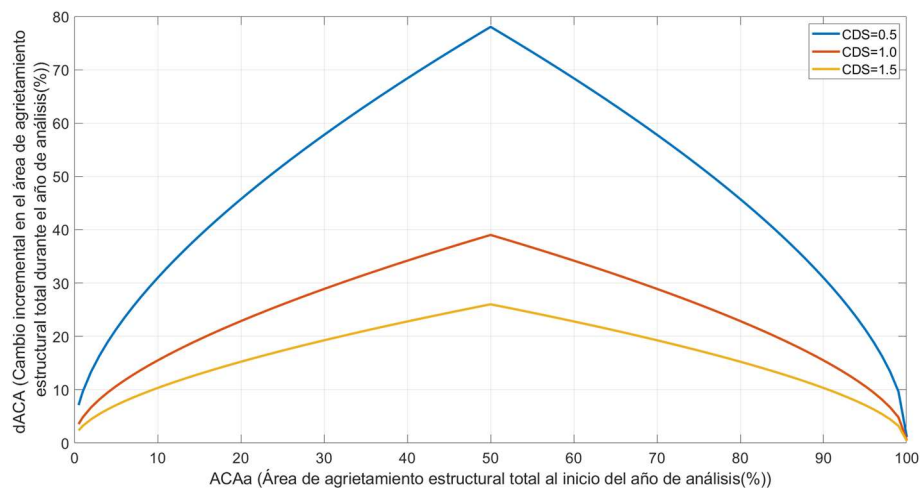


Figura 4.79: Progreso de todo agrietamiento estructural para HSOLD>0 en ST, para todos los materiales excepto CM.



## 4.3 Inicio de agrietamiento transversal por temperatura

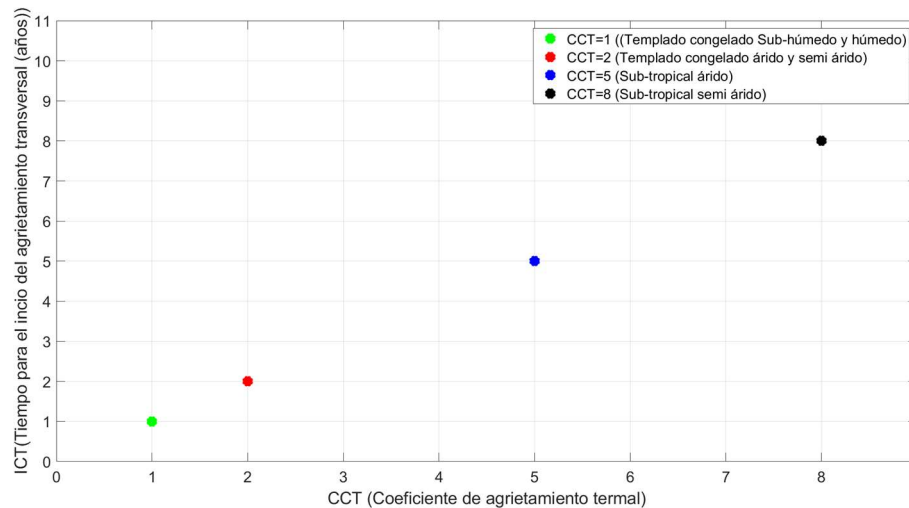
### 4.3.1 Análisis en la superficie original (HSOLD=0).

Para el inicio de agrietamiento transversal por temperatura sobre la superficie original (HSOLD=0), se determina que el modelo depende únicamente de los parámetros: indicador de defectos en la construcción para superficies bituminosas y del coeficiente de

agrietamiento transversal por temperatura. Entonces, para este caso se analiza el inicio del agrietamiento transversal por temperatura en función del coeficiente térmico.

De los resultados obtenidos se observa que, a mayor coeficiente de agrietamiento, mayor es el tiempo en que iniciará el agrietamiento transversal, permitiendo establecer una relación directamente proporcional entre estos factores (Ver Figura 4.20).

Figura 4.20: Inicio de agrietamiento transversal por temperatura en la superficie original (HSOLD=0)

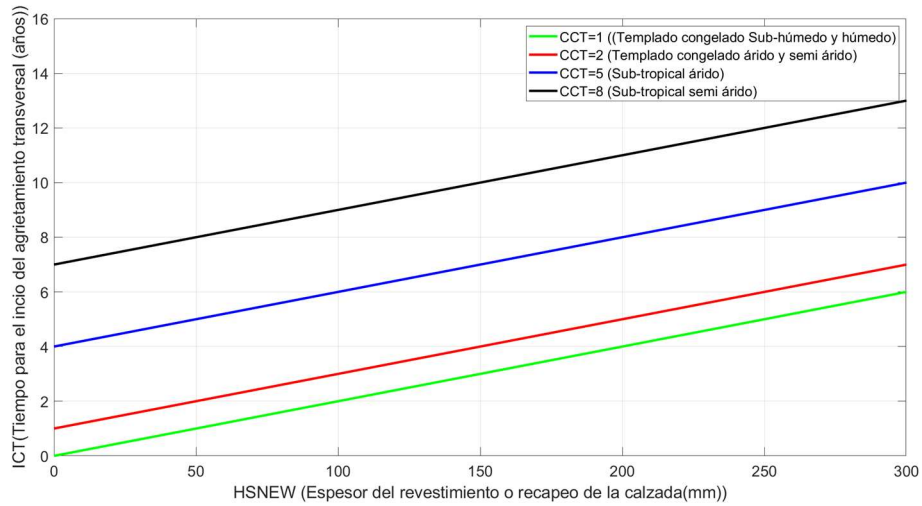


Se concluye que el inicio del agrietamiento transversal por temperatura también es directamente proporcional al indicador de defectos en el pavimento. Indicando que mientras mayor sea el contenido de ligante, mayor será el tiempo necesario para que las grietas transversales por temperatura comiencen a generarse.

### 4.3.2 Análisis en una sobrecapa o sello (HSOLD>0).

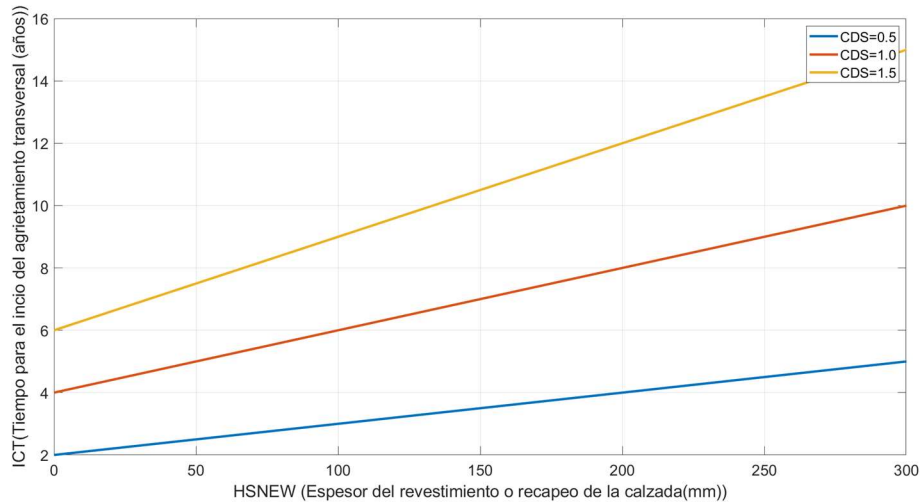
El análisis para el inicio del agrietamiento transversal por temperatura en una superficie de recapeo o sellado (HSOLD>0) se analiza en función del espesor de la nueva capa. Para los distintos coeficientes de temperatura se observa que, el tiempo de inicio del agrietamiento trasversal es directamente proporcional al espesor del revestimiento por lo que, a mayor espesor mayor será el tiempo en que se presente este deterioro (Ver Figura 4.21).

Figura 4.81: Inicio de agrietamiento transversal por temperatura en sobrecapas o sellos(HSOLD>), (CCT)



Para analizar la influencia del parámetro indicador de deficiencias en la construcción en la superficie bituminosa (CDS) se ha analizado el caso de una zona sub-tropical árida. De los resultados, se observa que a mayor contenido de ligante (>CDS), mayor será es tiempo para el inicio del agrietamiento transversal por temperatura. (Ver Figura 4.22).

Figura 4.92: Inicio de agrietamiento transversal por temperatura en sobrecapas o sellos(HSOLD>0), para CCT=5. (CDS)



## 4.4 Progresión de agrietamiento transversal por temperatura

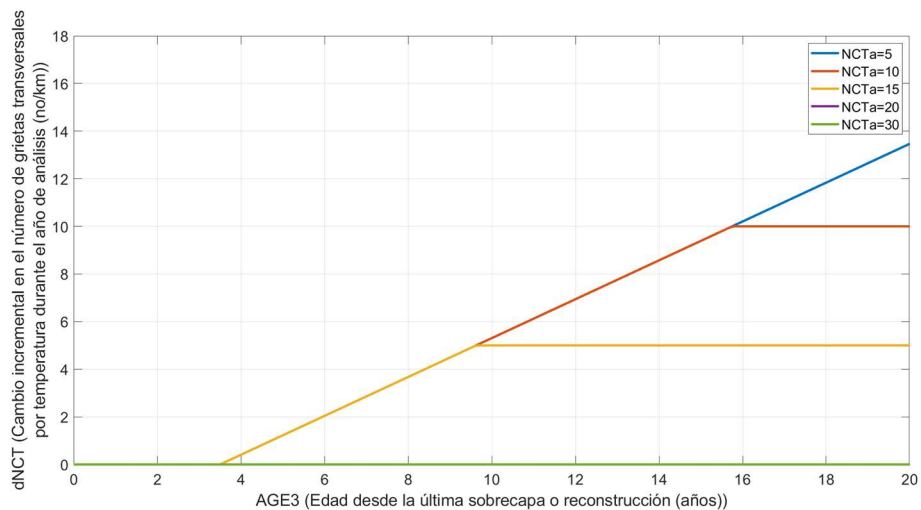
### 4.4.1 Análisis en la superficie original (HSOLD=0).

El análisis de este modelo de deterioro se analizó para un clima templado congelado, considerando que es la zona donde el agrietamiento por temperatura es más crítico.

Se observa de los resultados que a mayor edad del pavimento el cambio incremental en el número de grietas transversales por temperatura es mayor. Así mismo, se observa que a partir de cierta edad el cambio en el número de grietas será independiente de la edad del pavimento volviéndose constante respecto a ese parámetro.

Se conoce que el número de grietas por temperatura (NCT<sub>eq</sub>) es de 20, por lo que se analiza la variación del modelo para valores menores en grietas reflejadas al inicio del año de análisis (NCT<sub>a</sub>). De los resultados se concluye que mientras menor sea el número de grietas por temperatura al inicio del año de análisis, el cambio incremental de deterioro será mayor a medida que pasen los años hasta que se establezca en un valor constante, guardando una relación inversamente proporcional (Ver Figura 4.23).

Figura 4.103: Progreso de agrietamiento transversal por temperatura en la superficie original (HSOLD=0), (NCT<sub>a</sub>)

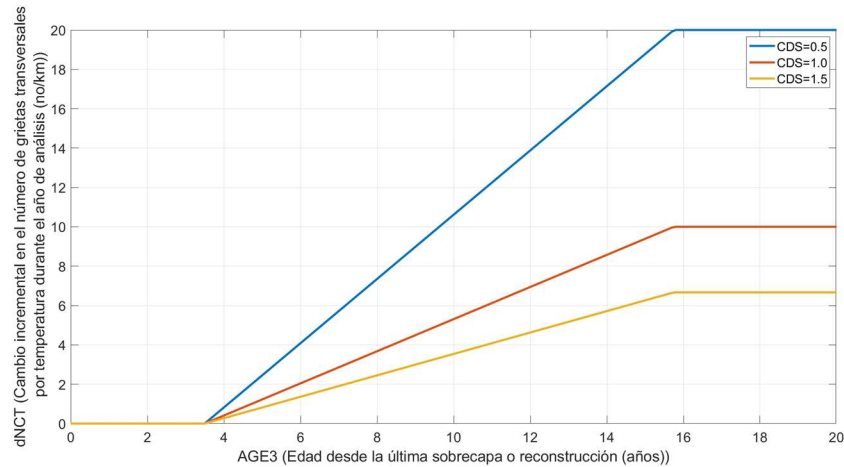


Analizando los resultados con respecto al indicador de defectos en la construcción en superficies asfálticas (CDS), se determina que, mientras menor sea este valor (menor contenido de ligante en la mezcla), el cambio incremental en el número de grietas será



mayor (Ver Figura 4.24). El comportamiento respecto a la edad del pavimento es igual al mencionado anteriormente.

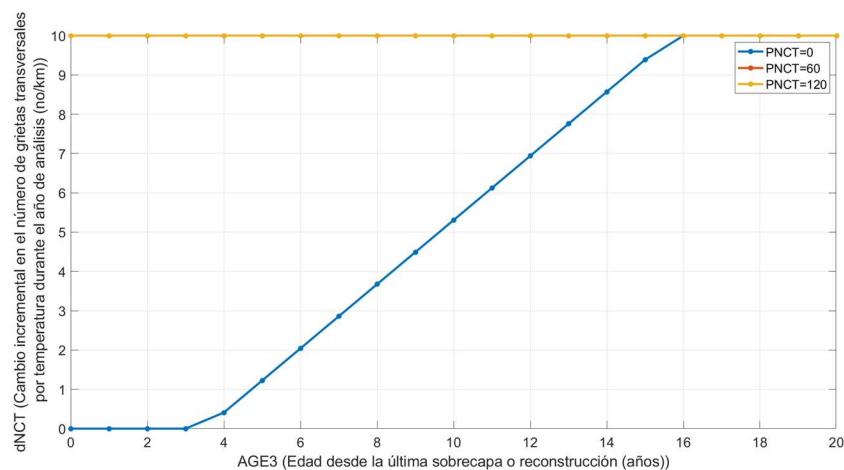
Figura 4.114: Progreso de agrietamiento transversal por temperatura en la superficie original (HSOLD=0), (CDS)



#### 4.4.2 Análisis en una sobrecapa o sello (HSOLD>0).

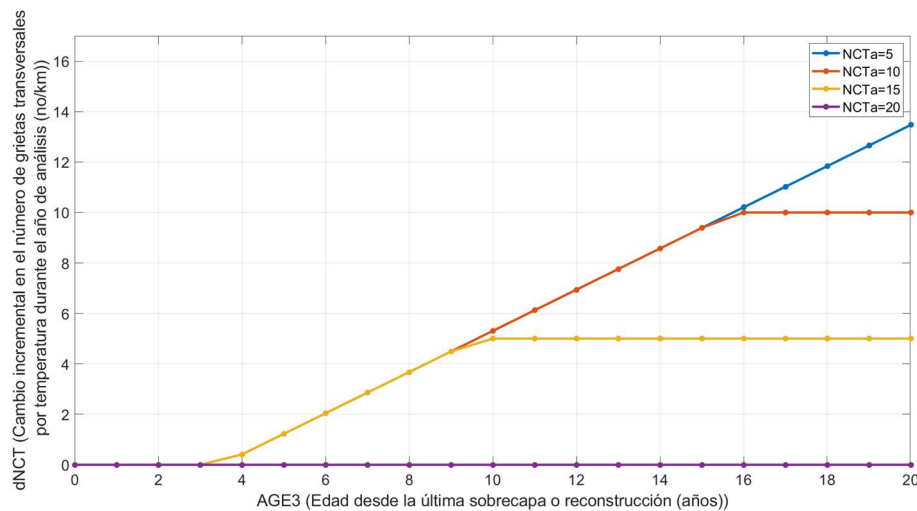
De los resultados obtenidos se puede observar que para el modelo de progresión de agrietamiento transversal por temperatura depende de la edad desde la última sobrecapa o reconstrucción (AGE3), solo cuando el número de grietas transversales por temperatura antes de la última sobrecapa o sellado (PNCT) es igual a cero. Para valores mayores el modelo será independiente de la edad de la sobrecapa (Ver Figura 4.25).

Figura 4.125: Progreso de agrietamiento transversal por temperatura en una sobrecapa o sello (HSOLD>0), (PNCT)



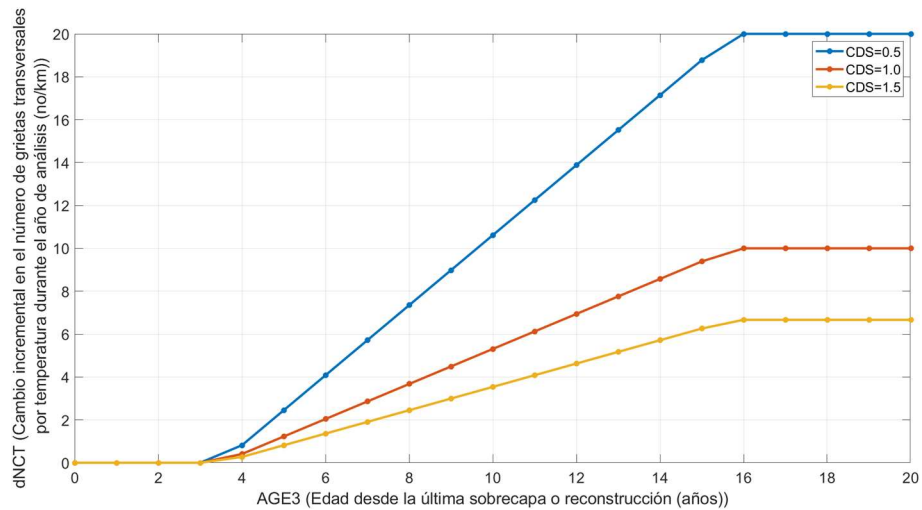
Asimismo, analizando la variación del modelo respecto a (NCTa), se concluye que a menor número de grietas al inicio del año de análisis mayor será el cambio incremental en el número de grietas transversales por temperatura (Ver Figura 4.26). Al igual que en el caso cuando HSOLD=0, llega un punto en el que el progreso del deterioro se vuelve independiente de la edad, y de acuerdo con el valor de NCTa, el tiempo en que se establezca el progreso del deterioro será mayor mientras menor sea el número de grietas existentes. Para este modelo cuando se usan valores de NCTa>20 se obtienen valores negativos, por tal motivo en este caso no se presentan los resultados para este caso.

Figura 4.136: Progreso de agrietamiento transversal por temperatura en una sobrecapa o sello (HSOLD>0), (NCTa)



Igualmente, al estudiar el comportamiento del modelo según el indicador de defectos en la construcción de la superficie bituminosa (CDS), se define que mientras mayor sea este parámetro, menor será el cambio incremental en el número de grietas transversales por temperatura, existiendo una relación inversamente proporcional (Ver Figura 4.247). Asimismo, se evidencia que la edad a la que el progreso del deterioro se vuelve constante es independiente del CDS.

Figura 4.147: Progreso de agrietamiento transversal por temperatura en una sobrecapa o sello (HSOLD>0), (CDS)

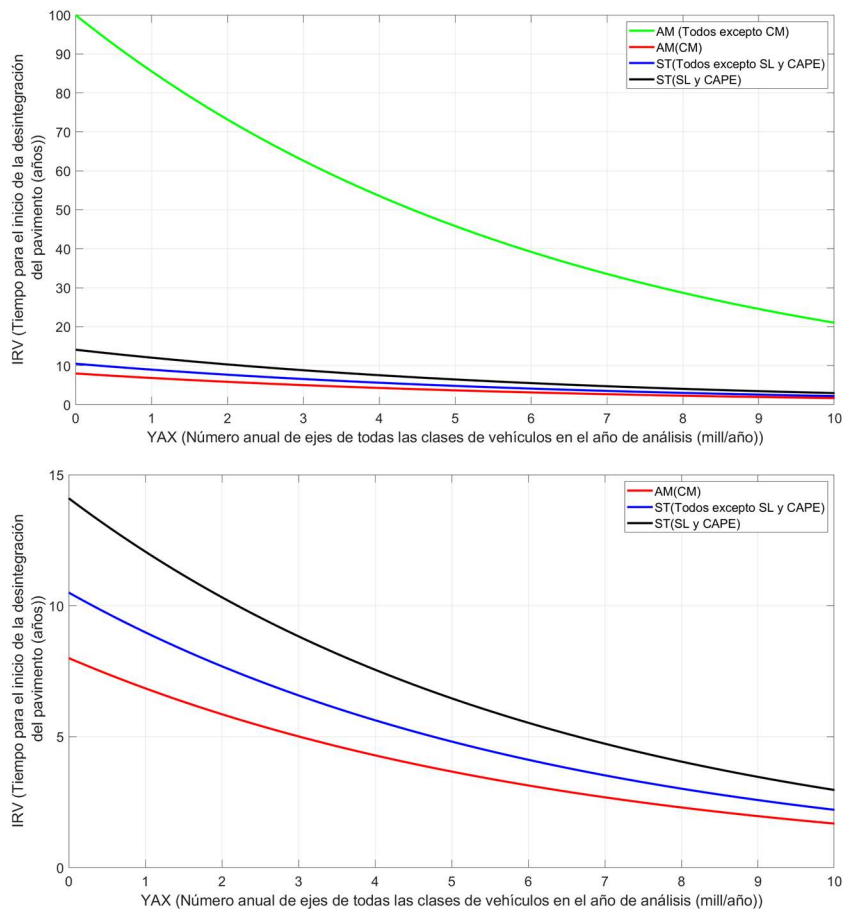


## 4.5 Inicio de la desintegración del pavimento

### 4.5.1 Análisis general

En la Figura 4.28 se presenta el análisis de inicio de la desintegración, se analiza el caso estándar para todos los materiales que considera el modelo. Se observa que para el caso de una mezcla asfáltica cuando los materiales usados son todos excepto una mezcla fría (CM), los años necesarios para que se presente desintegración el pavimento son altos, por lo que se concluye que este modelo no presenta resultados reales para este tipo de pavimentos asfálticos. Entonces, las variaciones de los demás parámetros se realizan para el caso de una mezcla asfáltica con mezcla fría y para un tratamiento superficial para todos los materiales excepto SL y CAPE.

Figura 4.158: Inicio de la desintegración para los distintos tipos de pavimentos y materiales.



## 4.5.2 Análisis para una mezcla asfáltica para materiales de una mezcla fría (CM)

Con respecto al indicador para los defectos en la construcción de superficies bituminosas (CDS), se observa que, para ambos tipos de superficies (Ver Figura 4.29 y 4.31), mientras mayor sea este parámetro, mayor será el tiempo para el inicio de la desintegración del pavimento, manteniendo una relación directamente proporcional. Comparando los dos casos, el tiempo para el inicio de la desintegración será mayor en un tratamiento superficial que en una mezcla asfáltica.

Figura 4.169: Inicio de la desintegración para una mezcla asfáltica (AM) de material mezcla fría (CM), (CDS)

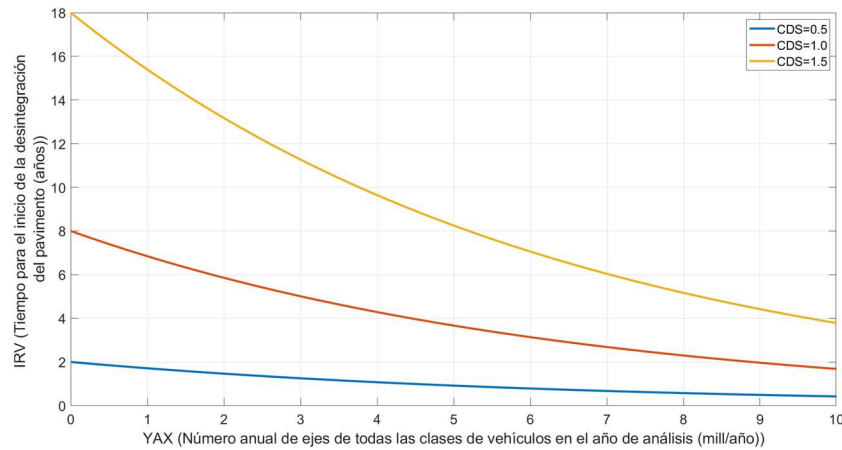
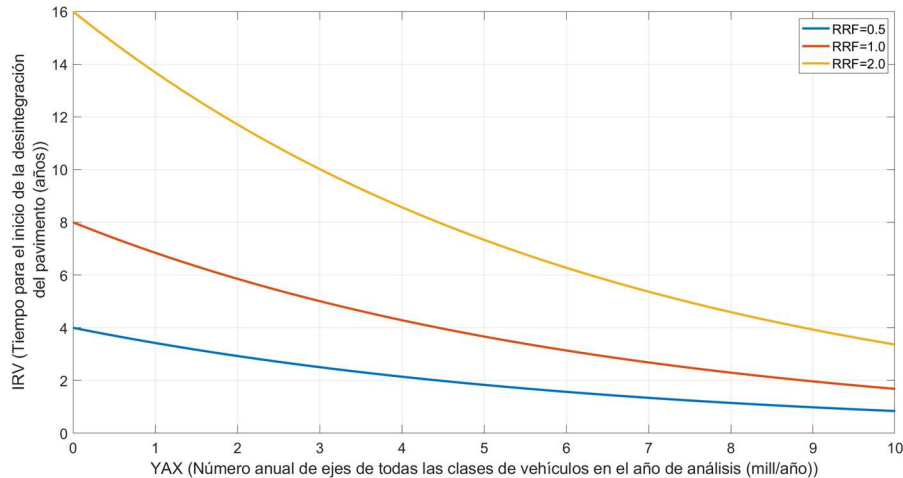


Figura 4.30: Inicio de la desintegración para una mezcla asfáltica (AM) de material mezcla fría (CM), (RRF)



### 4.5.3 Análisis en un tratamiento superficial para todos los materiales excepto (SL y CAPE)

Ahora, analizando el factor de retraso para la desintegración (RRF), se verifica que a medida que este parámetro es menor, también será menor el tiempo para el inicio de la desintegración del pavimento; guardando una relación directamente proporcional (Ver Figura 4.30 y 4.32). Igualmente se determina que para un mismo valor de RRF una mezcla asfáltica presentará desintegración en un tiempo menor al de un tratamiento superficial.

Figura 4.171: Inicio de la desintegración para un tratamiento superficial (ST) para todos los materiales excepto SL y CAPE, (CDS)

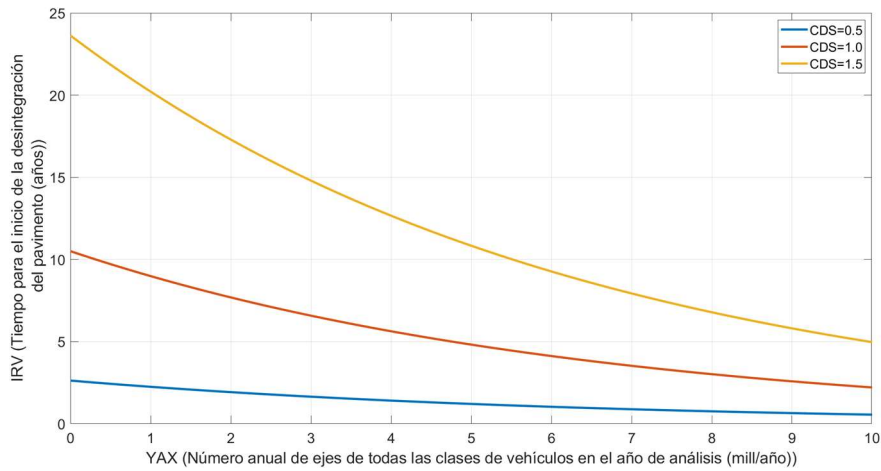
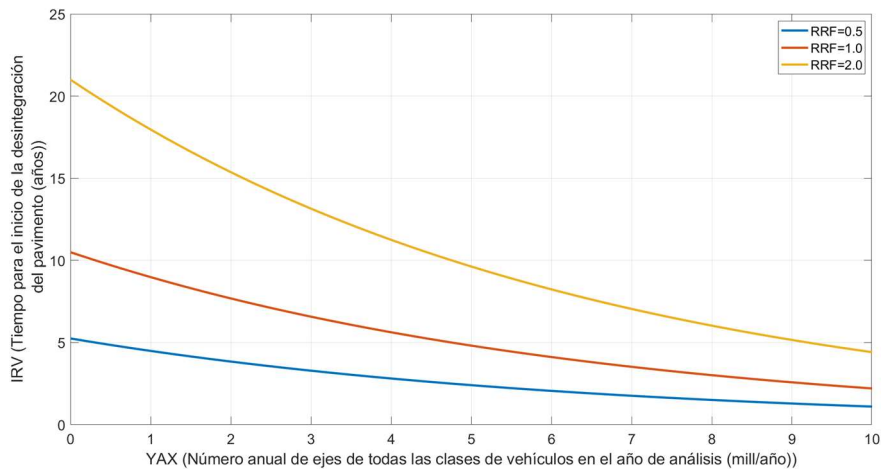


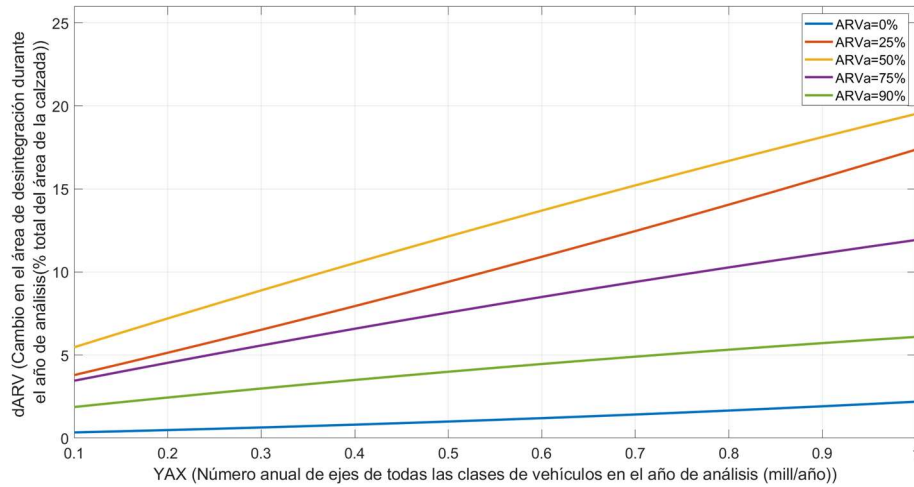
Figura 4.182: Inicio de la desintegración para un tratamiento superficial (ST) para todos los materiales excepto SL y CAPE, (RRF)



## 4.6 Progresión de la desintegración del pavimento

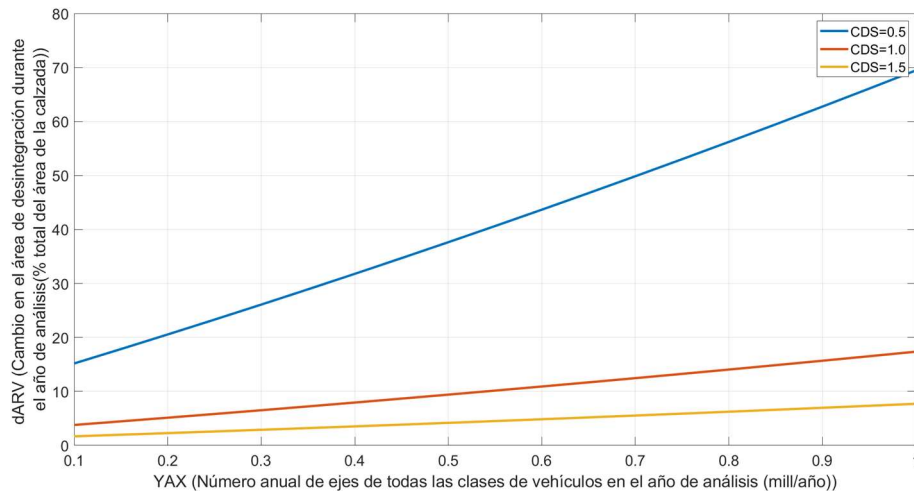
Al considerar la variación del modelo con respecto al área de desintegración al inicio del año de análisis (ARVa), se verifica que a medida que este parámetro aumenta el cambio en el área de desintegración también lo hace (Ver Figura 4.33). Sin embargo, cuando el valor del área de desintegración inicial supera el 50% el cambio en el área de desintegración tiende a disminuir, por lo que cuando el área de desintegración inicial alcance el 50% de la calzada, el cambio del área de desintegración alcanzará el valor más crítico.

Figura 4.193: Progreso de la desintegración de pavimento para todos los tipos de pavimentos y materiales, (ARVa)



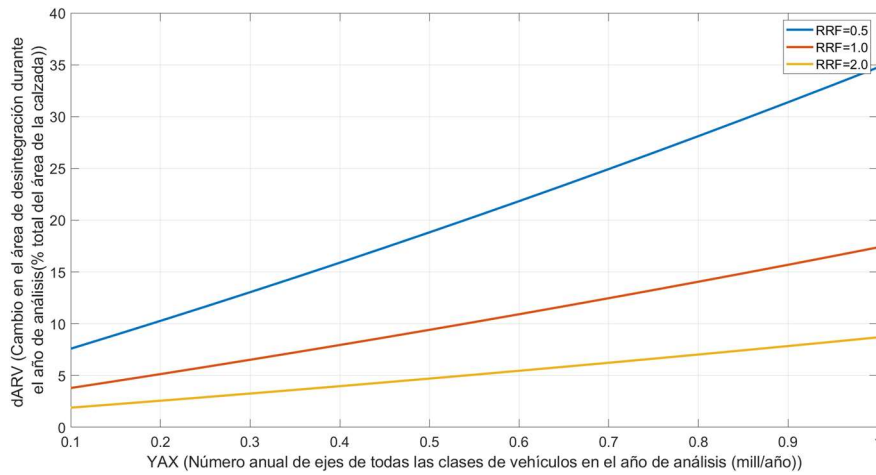
Así también, al analizar la influencia del indicador de defectos en la construcción en superficies bituminosas (CDS), se observa que mientras menor sea ese valor mayor será el cambio en el área de desintegración en la calzada, guardando una relación inversamente proporcional (Ver Figura 4.34).

Figura 4.204: Progreso de la desintegración de pavimento para todos los tipos de pavimentos y materiales, (CDS)



El mismo comportamiento se presenta en el modelo al analizar el factor de retraso para la desintegración (RRF) (Ver Figura 4.35).

Figura 4.215: Progreso de la desintegración de pavimento para todos los tipos de pavimentos y materiales, (RRF)

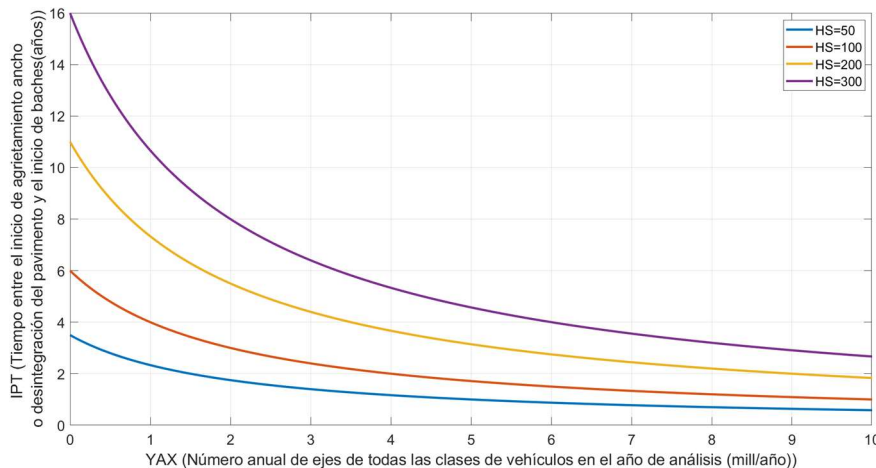


Estudiando el modelo para el proceso de desintegración del pavimento se observa que a medida que el tráfico (YAX) aumenta el progreso de desintegración también lo hace.

## 4.7 Inicio de baches

Al estudiar la variación del modelo con respecto al espesor total de las capas bituminosas (HS), se determina que mientras mayor sea este valor, el tiempo para el inicio de los baches se retardará, guardando una relación directamente proporcional (Ver Figura 4.36).

Figura 4.226: Inicio de baches para todos los tipos de pavimentos y materiales, (HS)

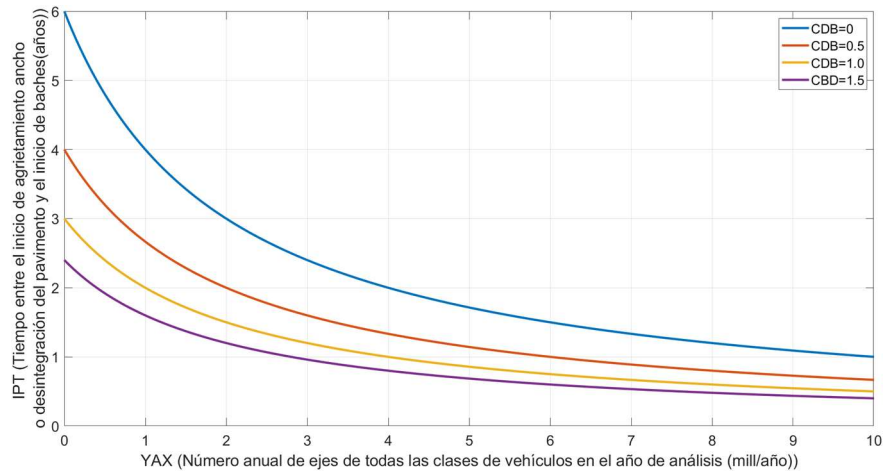


El comportamiento del modelo según la variación del indicador de defectos de construcción en la base (CDB) muestra que, mientras mayor sea el valor de este parámetro menor será



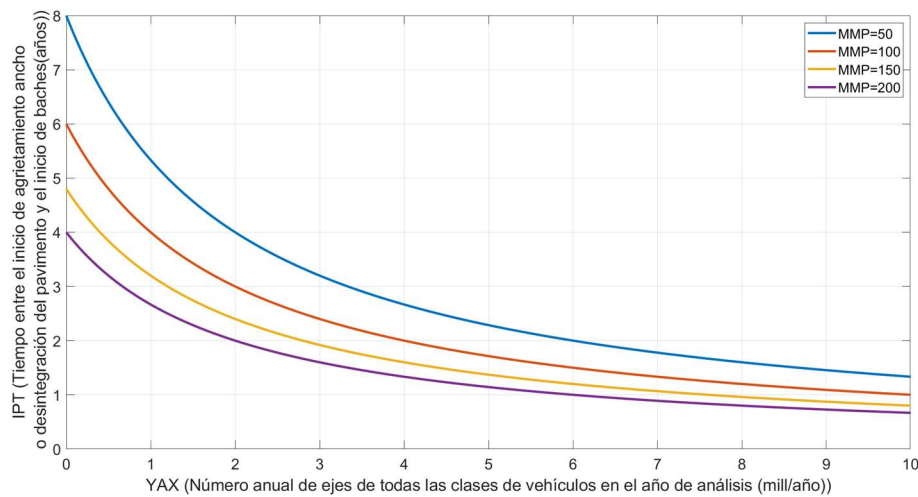
el tiempo para el inicio de baches estableciéndose así una relación inversamente proporcional (Ver Figura 4.37).

Figura 4.237: Inicio de baches para todos los tipos de pavimentos y materiales, (CDB)



El mismo comportamiento directamente proporcional se identifica en el modelo con respecto al parámetro de precipitación media mensual (MMP), (Ver Figura 4.38).

Figura 4.248: Inicio de baches para todos los tipos de pavimentos y materiales, (MMP)



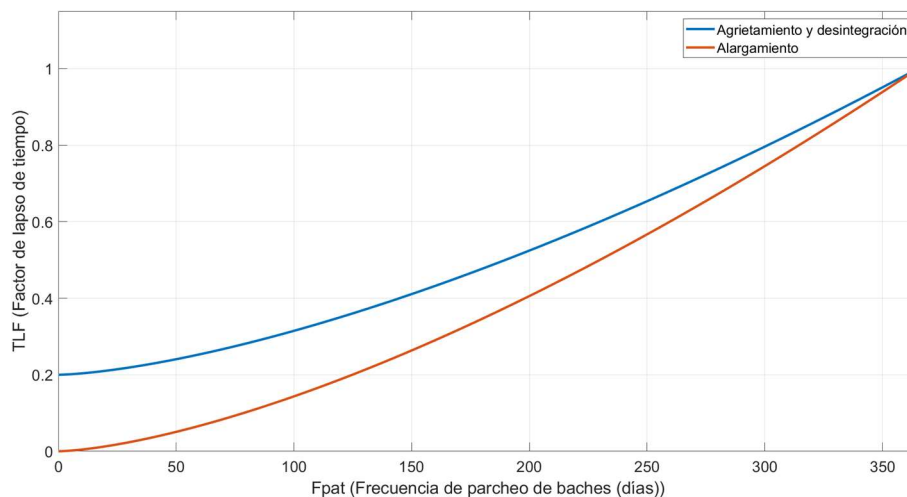
Para el modelo de inicio de baches se observa que, a mayor tráfico, menor es el tiempo para el inicio de baches. Este comportamiento se presenta para todos los parámetros de análisis por lo que se puede concluir que la relación entre el tráfico y el tiempo para el inicio de baches es inversamente proporcional.

## 4.8 Progresión de baches

### 4.8.1 Análisis de variación del factor de lapso de tiempo (TLF)

Para el análisis del progreso de los baches se establecen parámetros como el factor de lapso de tiempo (TLF) que depende de la frecuencia de parcheo de baches (Fpat). En el comportamiento de estos parámetros se observa que, el factor TLF tiende a alcanzar el valor de 1 cuando la frecuencia de parcheo se acerca al año (365 días). Los resultados se muestran para las dos posibles causales de baches, siendo estas el agrietamiento y desintegración y el alargamiento. Se observa también que los factores de TLF son mayores cuando se considera el inicio de baches por agrietamiento y desintegración (Ver Figura 4.39).

Figura 4.259: Variación de Fpat VS. TLF



### 4.8.2 Análisis de variación del factor de política de parcheo (PEFF)

Por otra parte, existe el factor de política de parcheo (PEFF) que es función del factor de lapso de tiempo (TLF) y del porcentaje de baches parchado (Ppt). De las gráficas obtenidas (Ver Figura 4.40 y 4.41), se observa que el valor límite para el parámetro (PEFF) es 1.

Figura 4.40: PEFF VS. Fpat para el inicio de baches por agrietamiento y desintegración

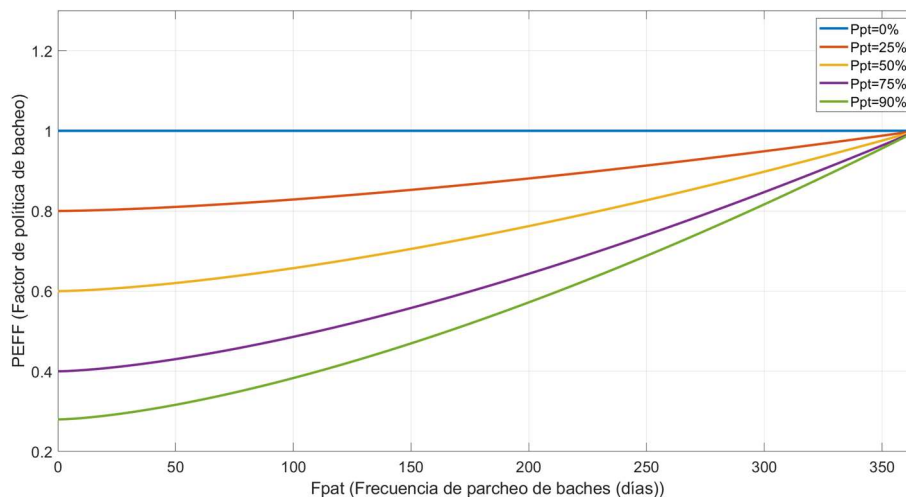
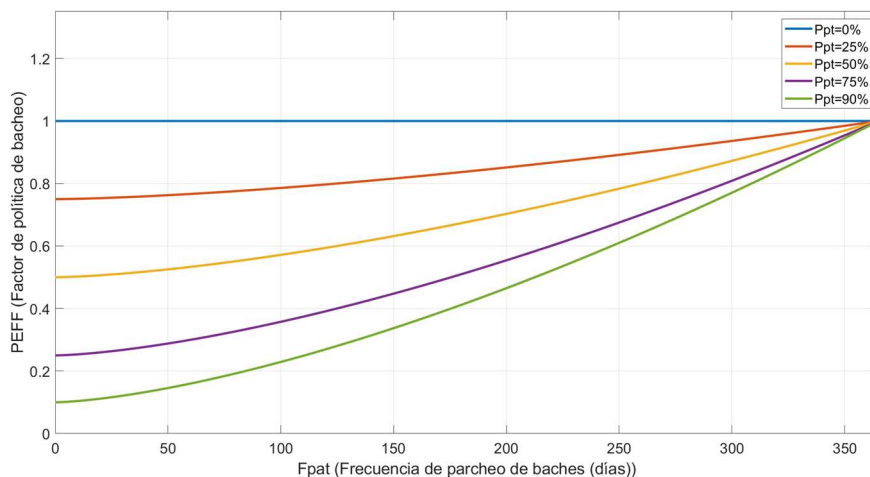


Figura 4.41: PEFF VS. Fpat para el inicio de baches por alargamiento



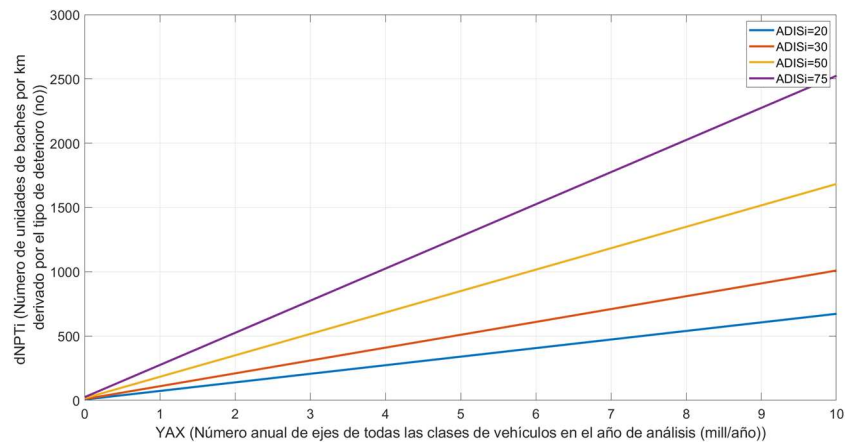
Para las gráficas de causales de baches por agrietamiento y desintegración, como para la de alargamiento, se concluye que, a mayor porcentaje de bacheo, menor será el factor de política de bacheo, siendo mayores los valores para cuando la causa de los baches es el agrietamiento y la desintegración del pavimento.

### 4.8.3 Análisis para todos los tipos de pavimentos cuando los baches comienzan por el deterioro de agrietamiento.

Para el análisis de los resultados se considera únicamente la causa de progresión de agrietamiento correspondiente al agrietamiento ya que este presentará los resultados más críticos considerando que los valores de los coeficientes para el modelo son los mayores.

Al analizar la variación del modelo de progresión con respecto al parámetro de porcentaje de área de agrietamiento ancho al inicio del año de análisis (ADISi), se observa un comportamiento lineal donde a mayor área de agrietamiento mayor será el número de baches por km que se deriven del deterioro existente, estableciéndose una relación directamente proporcional (Ver Figura 4.42).

Figura 4.262: Progresión de baches para todos los pavimentos cuando el deterioro causante es el agrietamiento, (ADISi)



Este comportamiento es similar para varios parámetros analizados en este modelo (Ver Figura 4.43, 4.44 y 4.45), estos son: indicador de defectos de construcción en la base (CDB), número efectivo de carriles para la sección de la carretera (ELANES) y precipitación media mensual (MMP).

Figura 4.273: Progresión de baches para todos los pavimentos cuando el deterioro causante es el agrietamiento, (CDS)

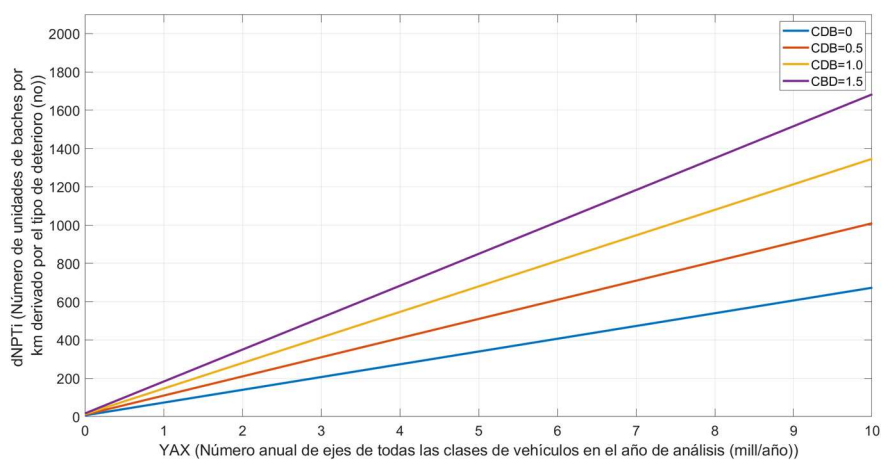


Figura 4.284: Progresión de baches para todos los pavimentos cuando el deterioro causante es el agrietamiento, (ELANES)

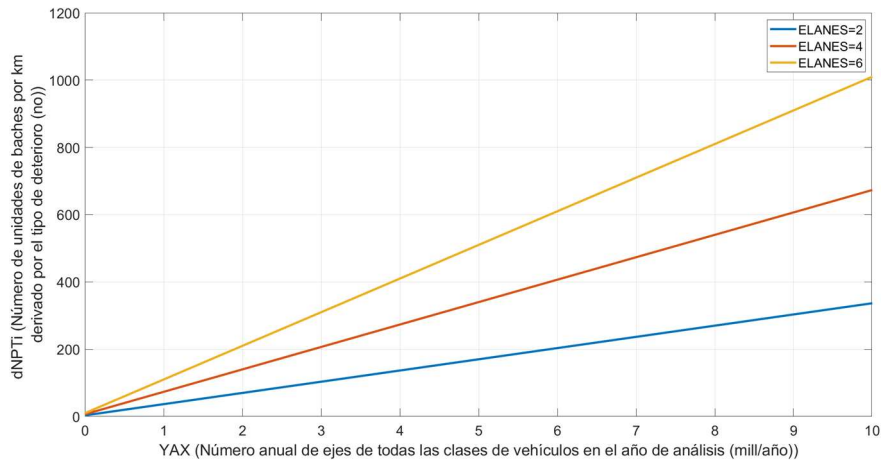
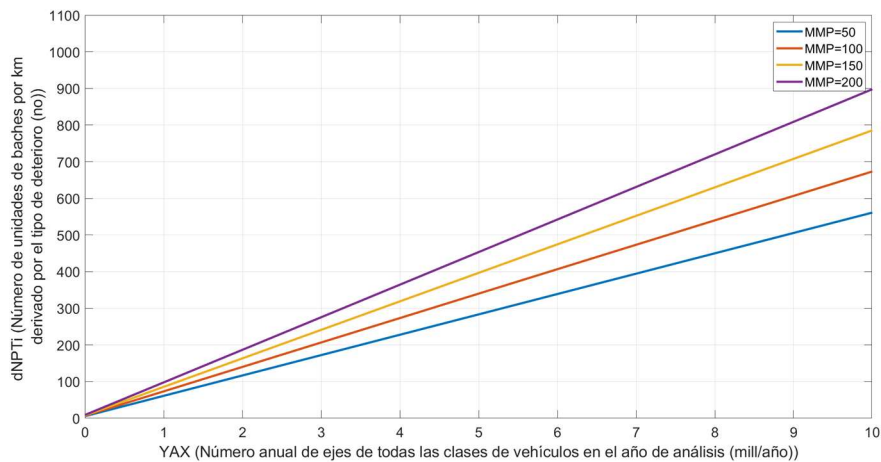
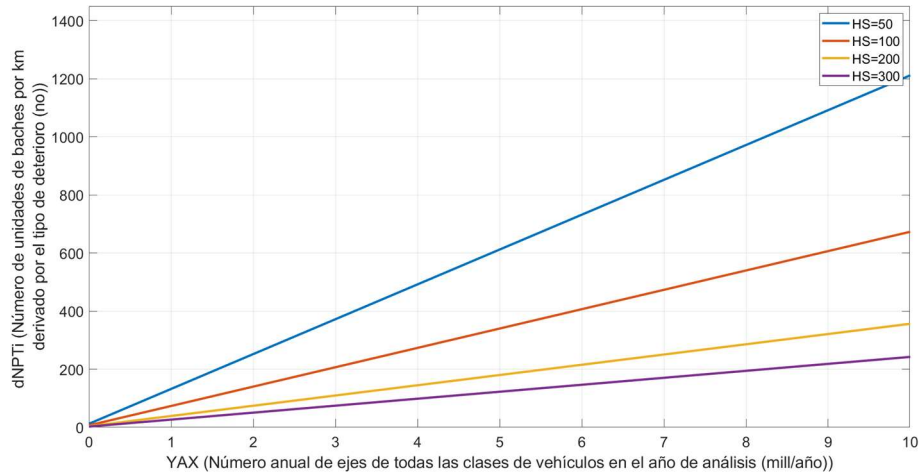


Figura 4.295: Progresión de baches para todos los pavimentos cuando el deterioro causante es el agrietamiento, (MMP)



Por otra parte, al analizar el parámetro de espesor total de las capas bituminosas (HS) se concluye que, a mayor espesor de las capas bituminosas, el número de unidades de baches derivado por el deterioro de análisis será menor. Así, para este parámetro, la relación que guarda con el modelo es inversamente proporcional (Ver Figura 4.46).

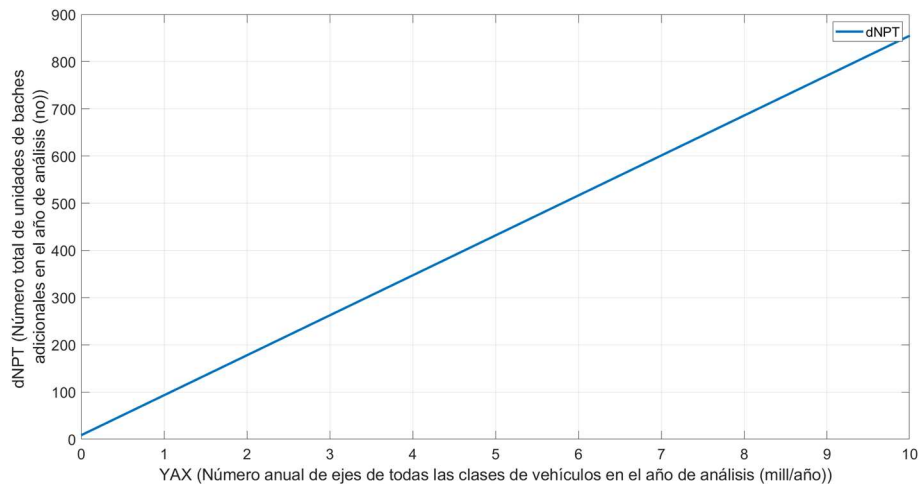
Figura 4.306: Progresión de baches para todos los pavimentos cuando el deterioro causante es el agrietamiento, (HS)



#### 4.8.4 Progreso de baches como la suma de baches causados por los distintos deterioros causantes

El progreso total de baches en el pavimento será igual a la suma de los baches producidos como consecuencia de los distintos deterioros analizados. Considerando la suma de los causantes de los baches de acuerdo a los datos del caso estándar de análisis y estudiando la variación del mismo con respecto al tráfico, se observa que la relación para el modelo es directamente proporcional, ya que el número de baches siempre tenderá a aumentar conforme aumenta el tráfico de la vía (Ver Figura 4.47).

Figura 4.317: Suma de baches para los distintos tipos de deterioros causantes

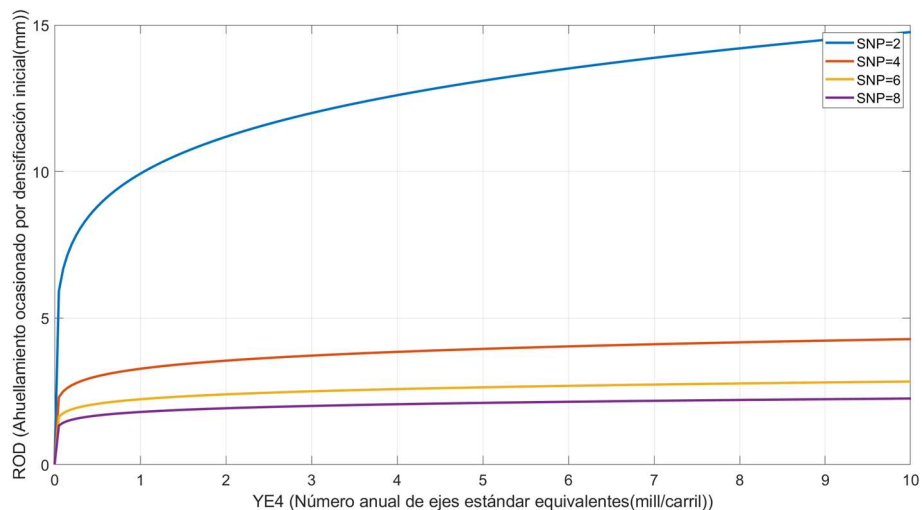


## 4.9 Inicio del ahuellamiento (Densificación inicial)

En el modelo para el inicio del ahuellamiento por su componente de densificación inicial se observa que, conforme el tráfico aumenta, el ahuellamiento por densificación inicial también lo hace, estableciéndose una relación directamente proporcional.

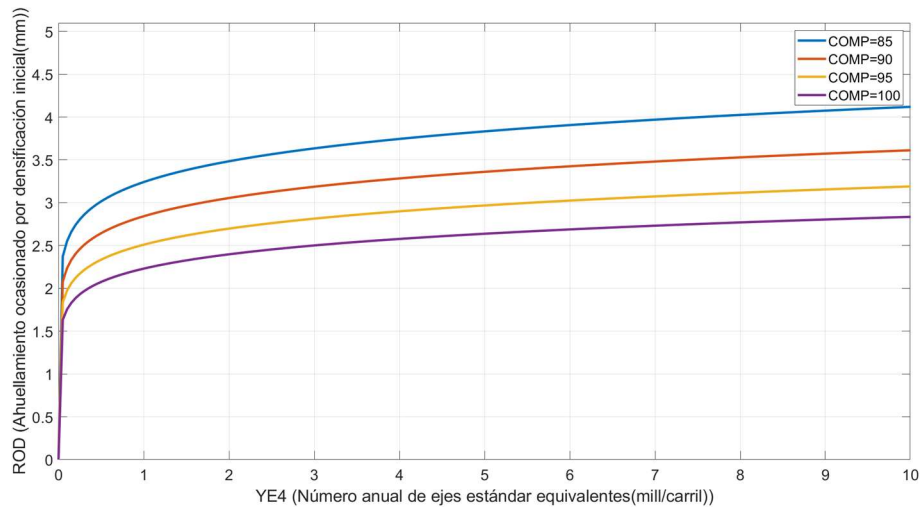
Por otra parte, al analizar el número estructural del pavimento (SNP), se concluye que a medida que el número estructural aumenta el ahuellamiento disminuye, esto debido a que a mayor resistencia estructural del pavimento menor el deterioro al que está expuesto, siendo el número estructural inversamente proporcional al ahuellamiento del pavimento por densificación inicial (Ver Figura 4.48).

Figura 4.328: Inicio del ahuellamiento por su componente de densificación inicial para todos los tipos de pavimentos, (SNP)



El comportamiento es el mismo al analizar el factor de compactación relativa de las distintas capas (COMP) ya que el ahuellamiento disminuye conforme el factor de compactación aumenta (Ver Figura 4.49).

Figura 4.339: Inicio del ahuellamiento por su componente de densificación inicial para todos los tipos de pavimentos, (COMP)



## 4.10 Inicio del ahuellamiento (Deformación estructural)

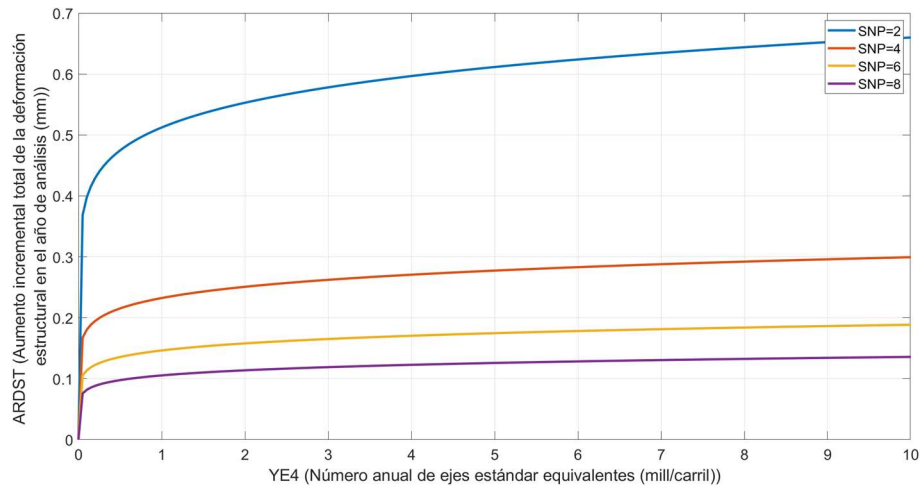
### 4.10.1 Análisis de la deformación estructural sin agrietamiento

En el modelo para el inicio del ahuellamiento por deformación estructural se analizan dos casos: cuando se produce deformación estructural sin agrietamiento y cuando se produce deformación estructural después del agrietamiento. Para ambos casos de estudio al analizar la variación del modelo con respecto al tráfico, se observa que a medida que este aumenta, el deterioro por ahuellamiento también lo hace, evidenciándose una relación directamente proporcional.

Para analizar el caso de ahuellamiento por deformación estructural sin agrietamiento se establece que el cambio incremental en el área total de agrietamiento durante el año de análisis (ACRA) sea igual a cero. Bajo estas condiciones se observa que, para el modelo, a menor número estructural de pavimento (SNP), el aumento incremental total de deformación estructural en el año de análisis (ARDST) es mayor, por lo que la relación entre estos es inversamente proporcional (Ver Figura 4.50).

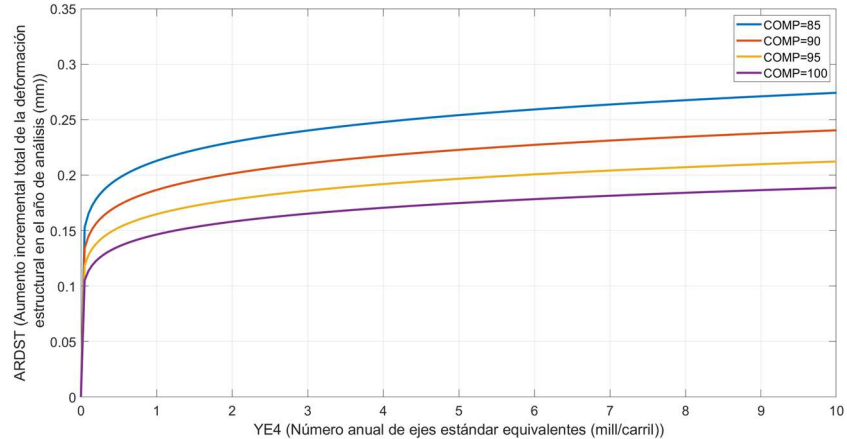


Figura 4.50: Inicio del ahuellamiento por su componente de deformación estructural cuando no hay agrietamiento, para todos los tipos de pavimentos, (SNP)



El comportamiento es el mismo en el modelo al analizar el parámetro de compactación relativa en las capas (COMP), (Ver Figura 4.51).

Figura 4.341: Inicio del ahuellamiento por su componente de deformación estructural cuando no hay agrietamiento, para todos los tipos de pavimentos, (COMP)

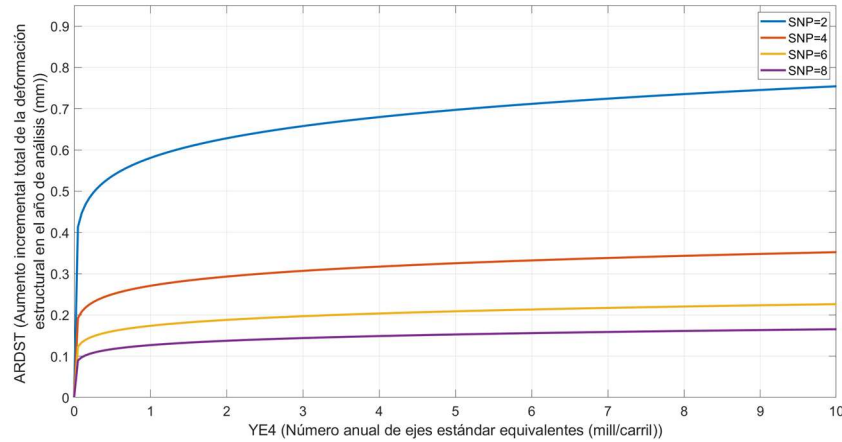


## 4.10.2 Análisis de la deformación estructural con agrietamiento

Para el caso cuando ya existe agrietamiento ( $ACRA > 0$ ), se observa que el incremento total en el ahuellamiento por deformación estructural (ARDST), es mayor conforme aumenta el tráfico, estableciéndose una relación directamente proporcional entre estos. Analizando la variación del modelo con respecto al número estructural del pavimento (SNP), se determina

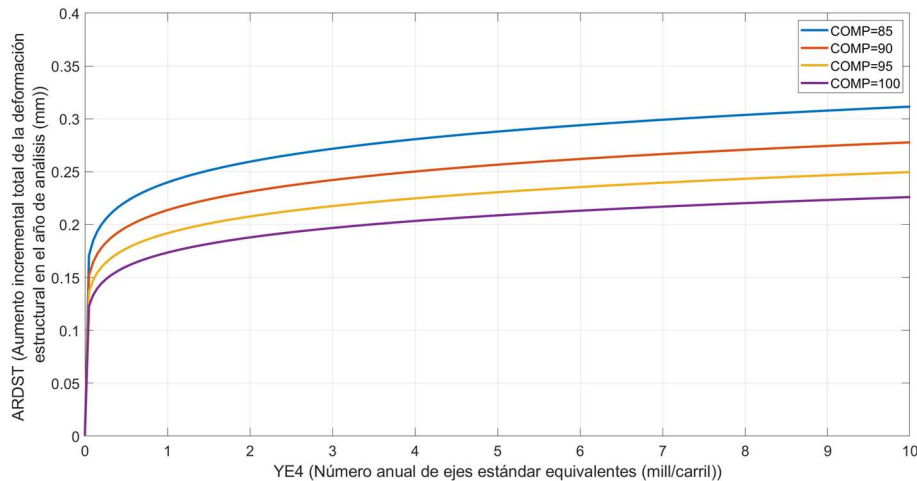
que, a menor resistencia estructural del pavimento, mayor será el incremento en la deformación estructural (Ver Figura 4.52).

Figura 4.352: Inicio del ahuellamiento por su componente de deformación estructural cuando hay agrietamiento, para todos los tipos de pavimentos, (SNP)



Este comportamiento también se observa con respecto al parámetro de la compactación de las capas (COMP), ya que, a menor grado de compactación, mayor incremento total de la deformación estructural (Ver Figura 4.53). Por ende, se define que estos parámetros guardan una relación inversamente proporcional respecto al modelo para el aumento de la deformación estructural.

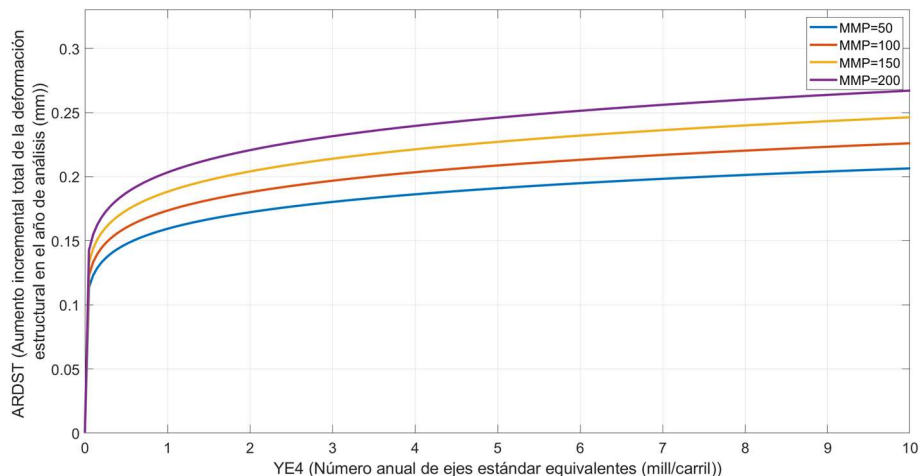
Figura 4.363: Inicio del ahuellamiento por su componente de deformación estructural cuando hay agrietamiento, para todos los tipos de pavimentos, (COMP)



Por otra parte, al estudiar el comportamiento del modelo respecto a la precipitación media anual (MMP), se observa que la relación es directamente proporcional ya que, a mayores

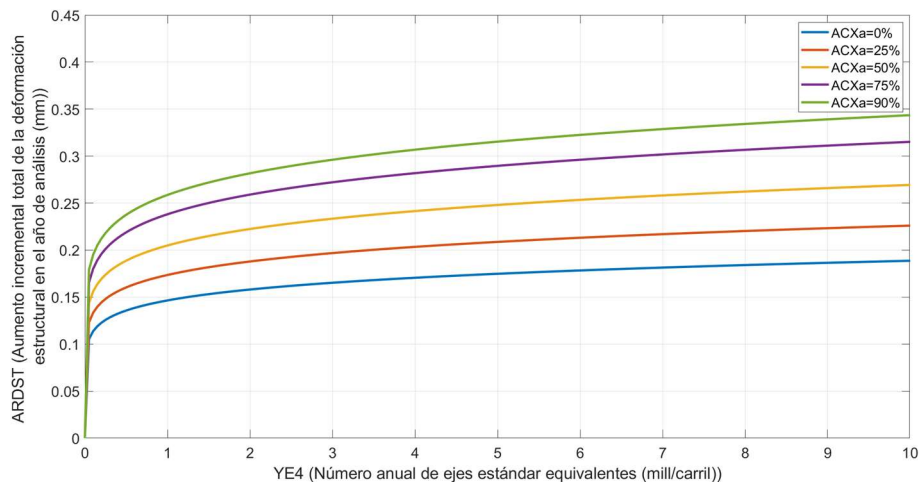
precipitaciones, mayor es el incremento del ahuellamiento en el pavimento debido a la deformación estructural (Ver Figura 4.54).

Figura 4.374: Inicio del ahuellamiento por su componente de deformación estructural cuando hay agrietamiento, para todos los tipos de pavimentos, (MMP)



El mismo comportamiento del parámetro anterior se observa al analizar el área de agrietamiento indexado al inicio del año de análisis (ACXa), (Ver Figura 4.55).

Figura 4.385: Inicio del ahuellamiento por su componente de deformación estructural cuando hay agrietamiento, para todos los tipos de pavimentos, (ACXa)

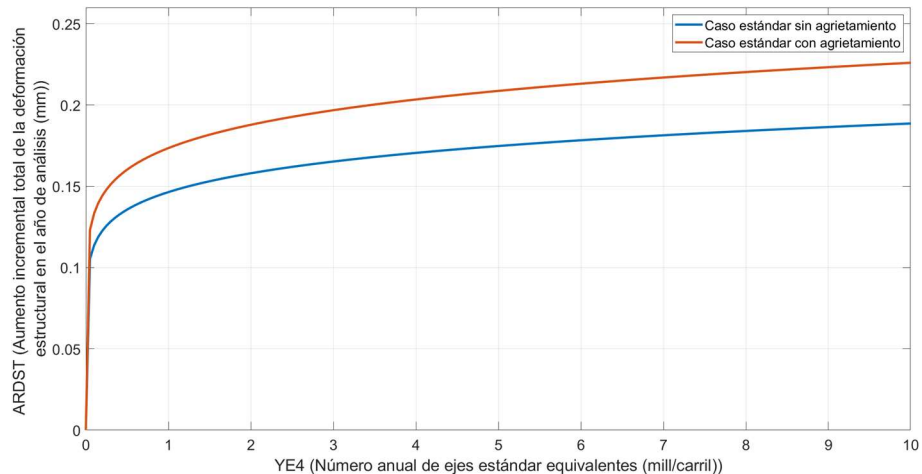


### 4.10.3 Análisis de la deformación estructural caso estándar

Para evaluar los resultados en el inicio del ahuellamiento en los casos sin y con agrietamiento, se presenta una gráfica para ambos casos de estudio. Se observa que, cuando el análisis es en ausencia de agrietamiento el aumento incremental en la

deformación estructural es menor en comparación a cuando el análisis considera agrietamiento (Ver Figura 4.56).

Figura 4.396: Inicio del ahuellamiento por su componente de deformación estructural analizado para el caso estándar



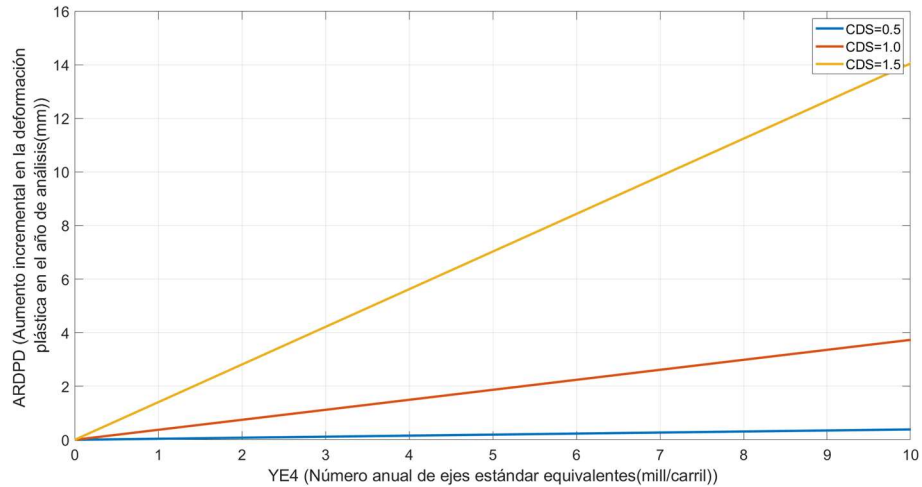
## 4.11 Inicio del ahuellamiento (Deformación plástica)

El análisis de este deterioro aplica únicamente a pavimentos de mezclas asfálticas, ya que, de acuerdo a los coeficientes establecidos para cada tipo de pavimento, para el caso de un tratamiento superficial los coeficientes establecen que para cualquier caso de estudio la deformación plástica en tratamientos superficiales no aplica porque toma un valor de cero.

Para el caso de pavimentos de mezclas asfálticas el análisis del modelo para el inicio del ahuellamiento por su componente de deformación plástica muestra que mientras mayor es el tráfico, mayor es el aumento incremental de la deformación plástica (ARDPD), manteniendo una relación directamente proporcional.

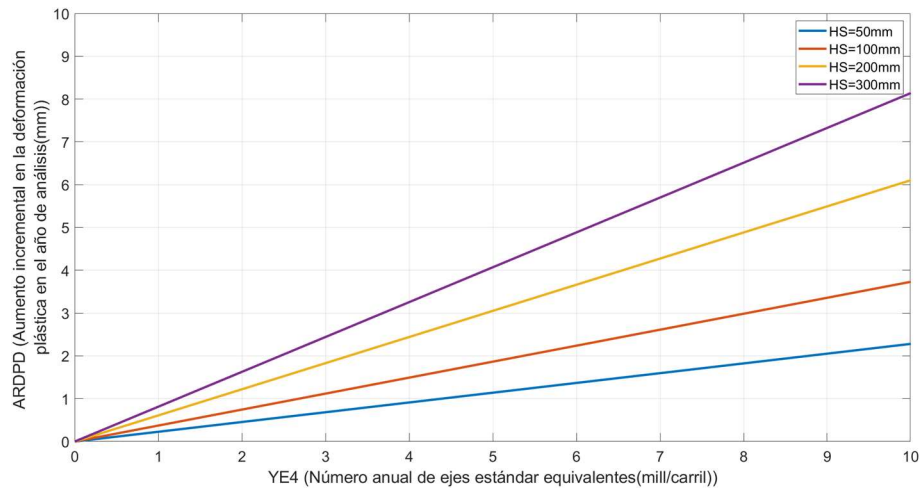
Considerando la variación del modelo con respecto al indicador de defectos en la construcción de superficies bituminosas (CDS) se observa que existe una relación directamente proporcional entre estos ya que, a mayor CDS, mayor es el aumento incremental de la deformación plástica (Ver Figura 4.57).

Figura 4.407: Inicio del ahuellamiento por su componente de deformación plástica para mezclas asfálticas, (CDS)



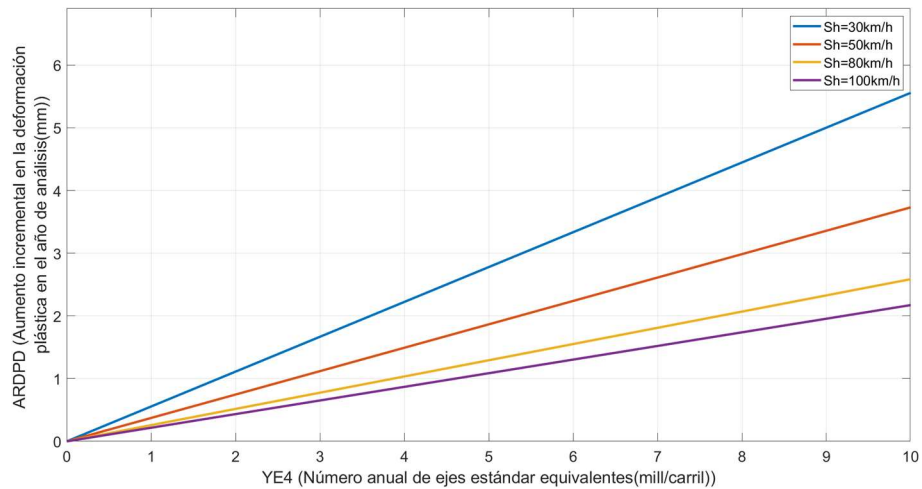
El comportamiento del modelo es similar al analizar el parámetro de espesor total de la superficie bituminosa (HS) ya que el deterioro también aumenta conforme lo hace el parámetro (Ver Figura 4.58).

Figura 4.418: Inicio del ahuellamiento por su componente de deformación plástica para mezclas asfálticas, (HS)



Por otra parte, al analizar el parámetro de la velocidad de los vehículos pesados (Sh) el comportamiento del modelo es lo opuesto, ya que a menores velocidades se producirán mayores incrementos en la deformación plástica (Ver Figura 4.59), esto debido a que el pavimento tendrá que soportar el peso del vehículo por un tiempo ligeramente mayor. La relación con respecto a este parámetro es inversamente proporcional al aumento incremental de la deformación plástica en el pavimento.

Figura 4.429: Inicio del ahuellamiento por su componente de deformación plástica para mezclas asfálticas, (Sh)

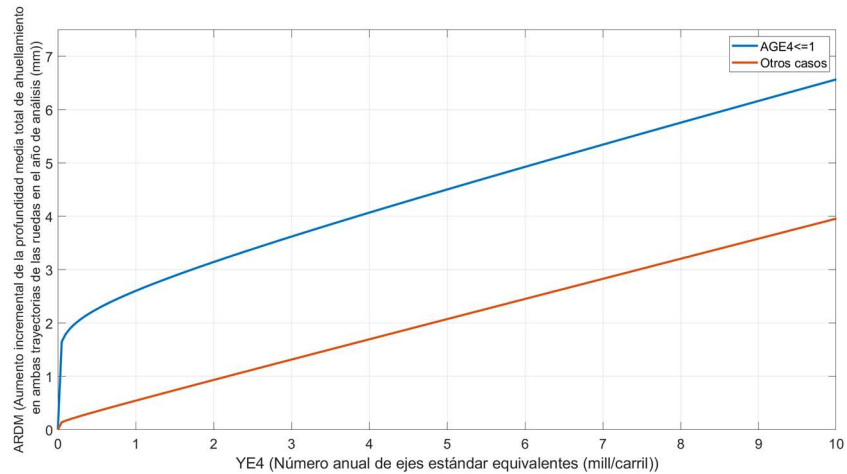


## 4.12 Progresión del ahuellamiento

El modelo para la progresión del ahuellamiento establece que cuando la edad de la construcción de la capa de base (AGE4) es mayor a 1, el proceso del agrietamiento será la suma de su componente de densificación inicial y deformación plástica en el año de análisis. Mientras que cuando AGE4 sea diferente de 1 el progreso del deterioro será la suma de la deformación estructural y la deformación plástica.

De la Figura 4.60, se puede indicar que los resultados obtenidos son los correspondientes para el caso de estudio estándar. Del modelo se puede observar que a medida que el tráfico es mayor, el aumento incremental en la profundidad total del ahuellamiento también es mayor, definiéndose una relación directamente proporcional. Así también se observa que para el primero año de construcción de la capa de base el proceso del ahuellamiento es más crítico que en los años siguientes.

Figura 4.60: Progreso del ahuellamiento considerando el caso de análisis estándar.

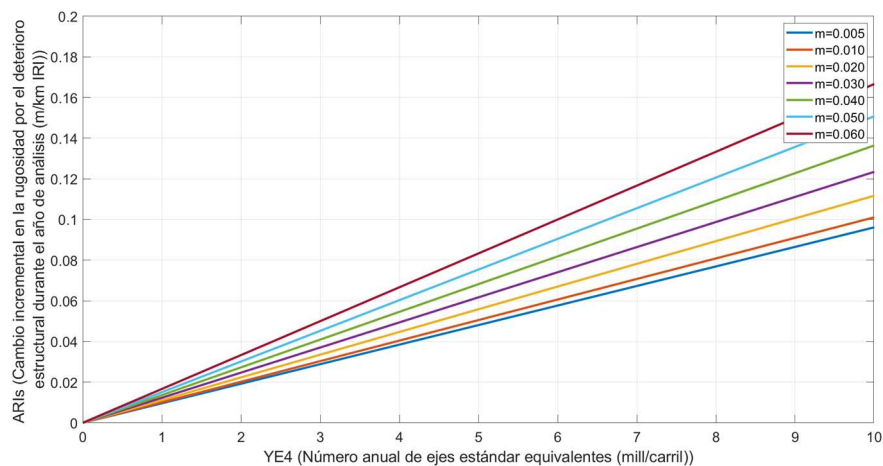


### 4.13 Rugosidad (Componente estructural)

Al analizar el modelo para el componente estructural de la rugosidad con respecto al tráfico (YE4) se concluye que a medida que este parámetro aumenta el deterioro también es mayor; por lo que es posible establecer entre estos una relación directamente proporcional.

Estudiando la variación del modelo para el componente estructural de la rugosidad respecto al coeficiente ambiental ( $m$ ), se determina que, a mayor coeficiente ambiental mayor será el cambio incremental de la rugosidad, entonces, con respecto a este parámetro la variación del modelo presenta una relación directamente proporcional (Ver Figura 4.61).

Figura 4.431: Cambio en la rugosidad por el componente estructural en todos los tipos de pavimentos, ( $m$ )



Esta relación directamente proporcional se mantiene en el modelo para los parámetros de edad del pavimento desde el último proceso de reconstrucción (AGE3), área de agrietamiento indexado al funjo del año de análisis (ACXa) y espesor del recapeo más reciente (HSNEW). (Ver figuras 4.62, 4.63 y 4.64).

Figura 4.442: Cambio en la rugosidad por el componente estructural en todos los tipos de pavimentos, (AGE3)

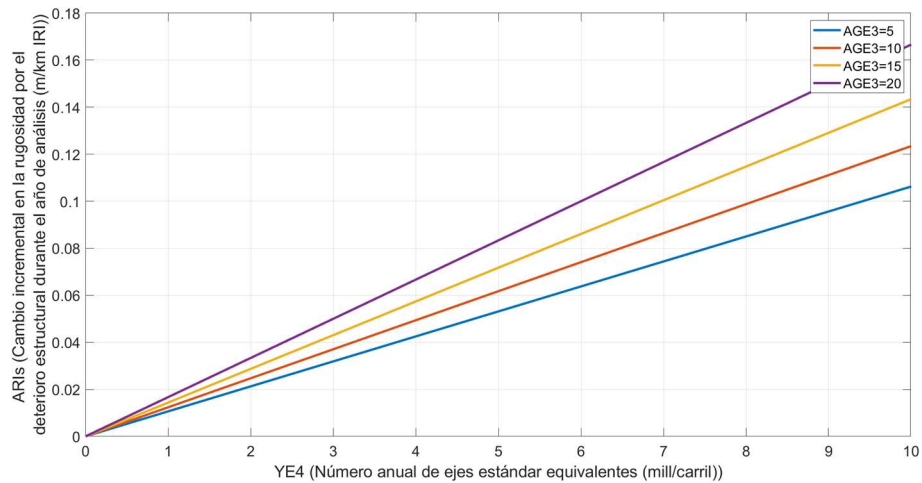


Figura 4.453: Cambio en la rugosidad por el componente estructural en todos los tipos de pavimentos, (ACXa)

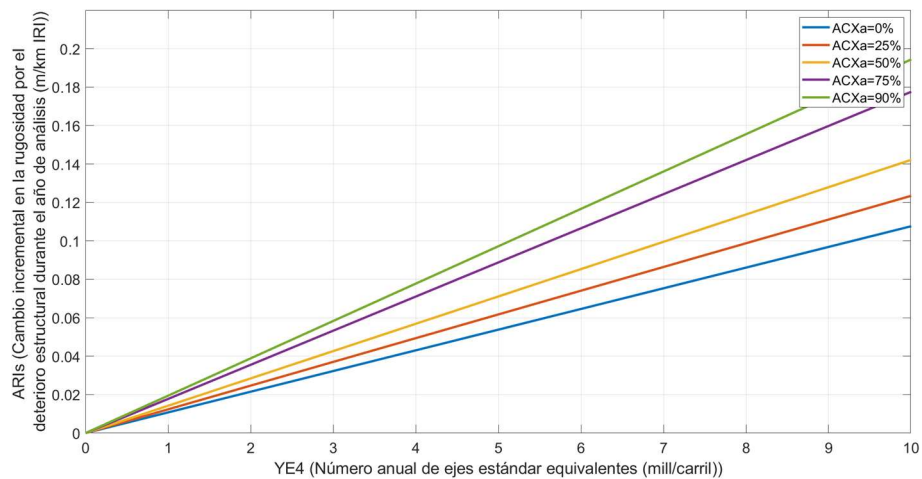
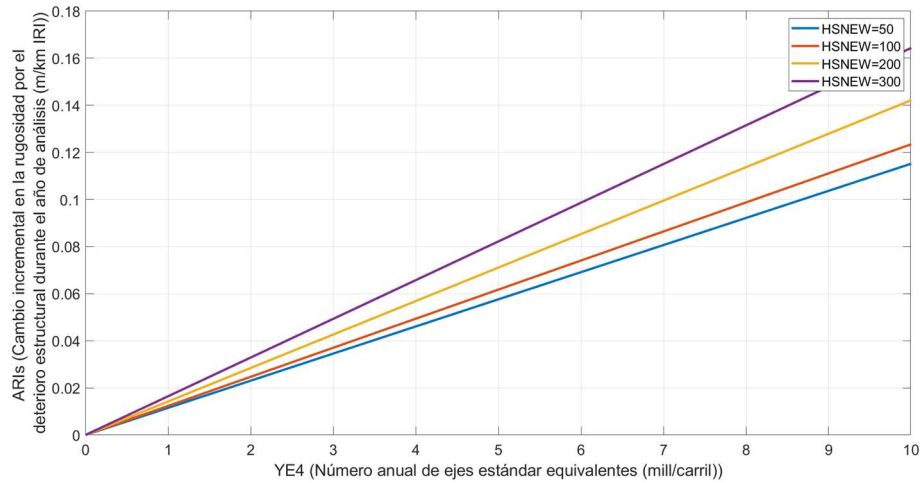


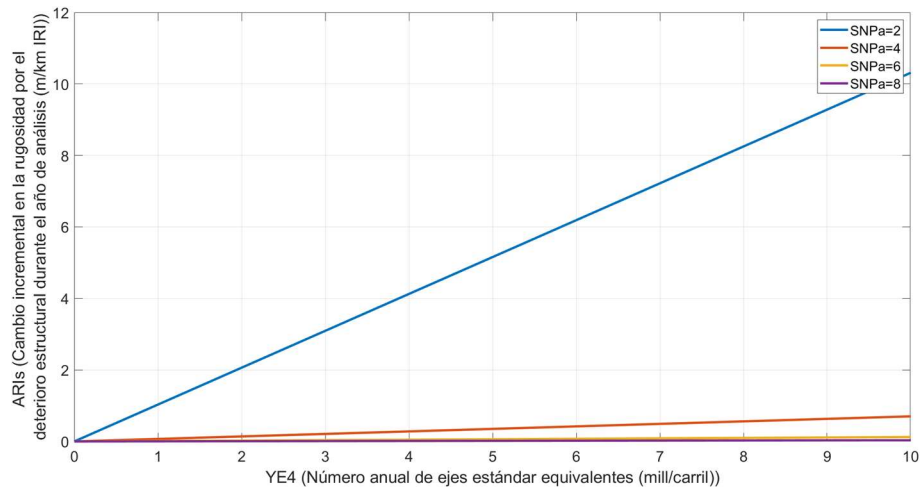


Figura 4.464: Cambio en la rugosidad por el componente estructural en todos los tipos de pavimentos, (HSNEW)



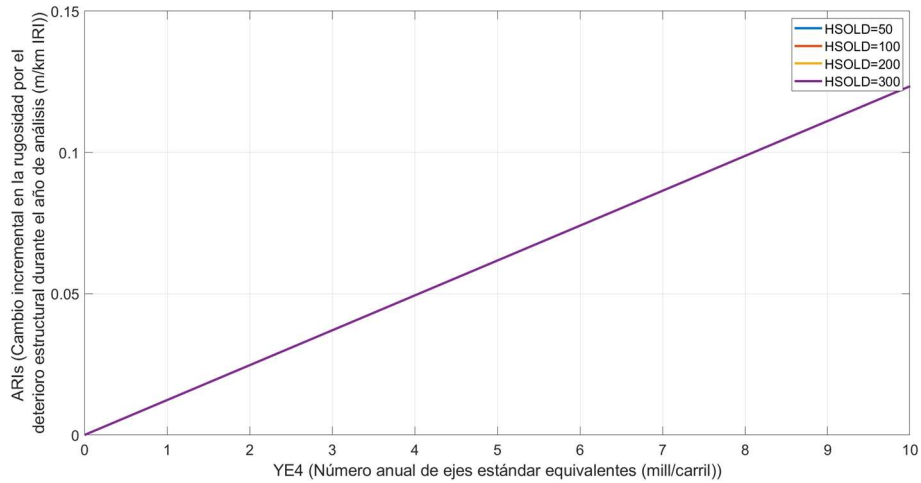
Para la variación del modelo respecto al número estructural (Ver figura 4.65), se observa que mientras menor sea la resistencia estructural del pavimento mayor será el cambio incremental en la rugosidad del pavimento, definiéndose una relación inversamente proporcional del modelo respecto a este parámetro.

Figura 4.475: Cambio en la rugosidad por el componente estructural en todos los tipos de pavimentos, (SNP)



Evaluando el modelo de deterioro según el espesor de capas existentes (HSOLD) se determina que, este parámetro no tiene influencia sobre el cambio incremental de la rugosidad ya que para todos los valores de HSOLD el deterioro es el mismo. (Ver Figura 4.65).

Figura 4.486: Cambio en la rugosidad por el componente estructural en todos los tipos de pavimentos, (HSOLD)



Finalmente, la variación del modelo respecto al área previa de agrietamiento indexado en la superficie antigua (PACX), se han analizado dos casos con el fin de asegurar el comportamiento observado. Los casos de análisis fueron para  $ACXa=25\%$  (Ver Figura 4.67) y para  $ACXa=75\%$  (Ver Figura 4.68). De los resultados se observa que, el aumento incremental en la rugosidad será mayor para áreas de agrietamiento indexado menores. Así también, se concluye que dependiendo del valor de  $ACXa$ , el modelo llega a ser independiente del valor de  $PACX$  ya que en el modelo del deterioro a partir de un valor dado de  $PACX$ , el deterioro se vuelve independiente de este parámetro.

Figura 4.497: Cambio en la rugosidad por el componente estructural en todos los tipos de pavimentos para  $ACXa=25\%$ , (PACX)

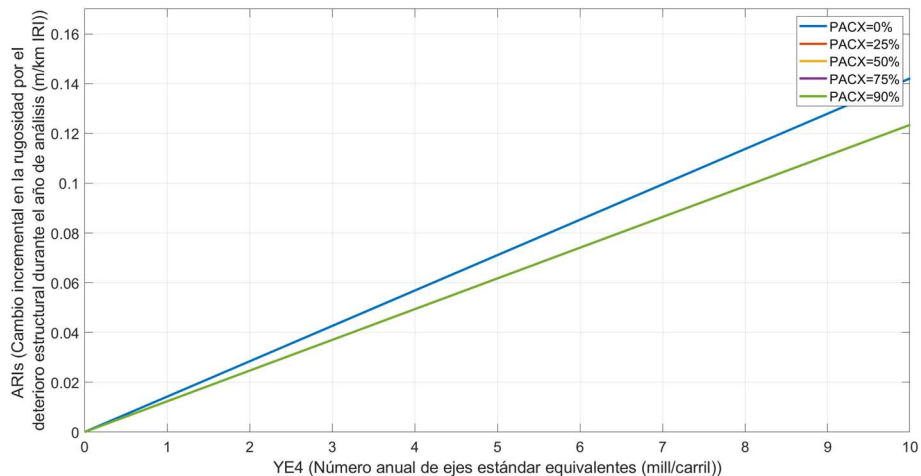
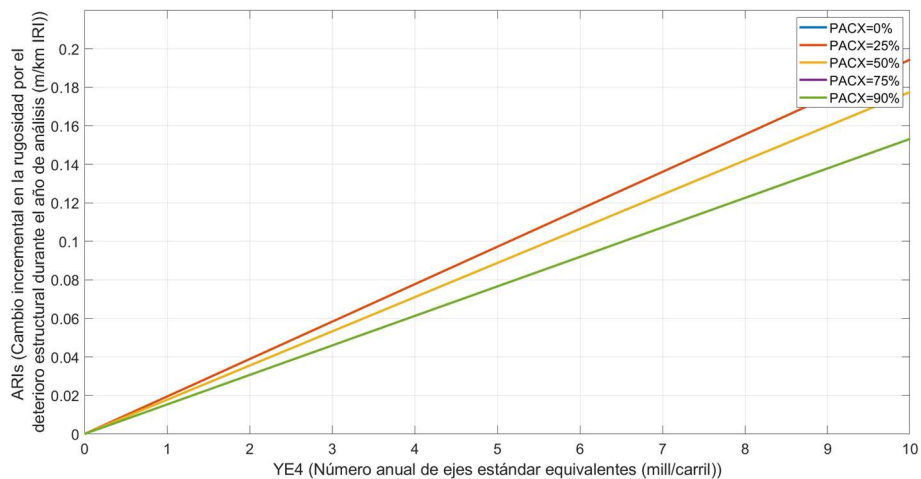


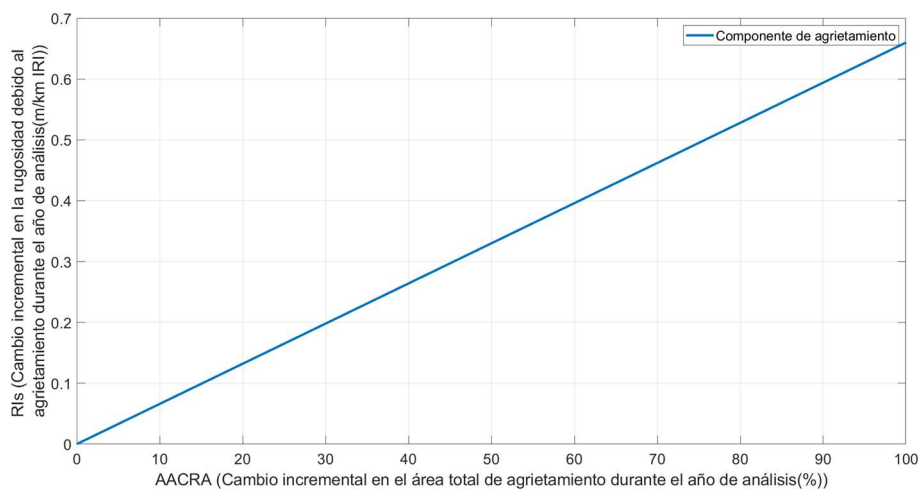
Figura 4.508: Cambio en la rugosidad por el componente estructural en todos los tipos de pavimentos para ACXa=75%, (PACX)



## 4.14 Rugosidad (Componente de agrietamiento)

La Figura 4.69 muestra que el modelo para el cambio de la rugosidad en su componente de agrietamiento, varía únicamente según el cambio incremental en el área total de agrietamiento durante el año de análisis. De los resultados obtenidos se observa que el modelo es directamente proporcional al valor de este parámetro ya que de aumentar el cambio incremental en el área de agrietamiento el cambio en la rugosidad también será mayor.

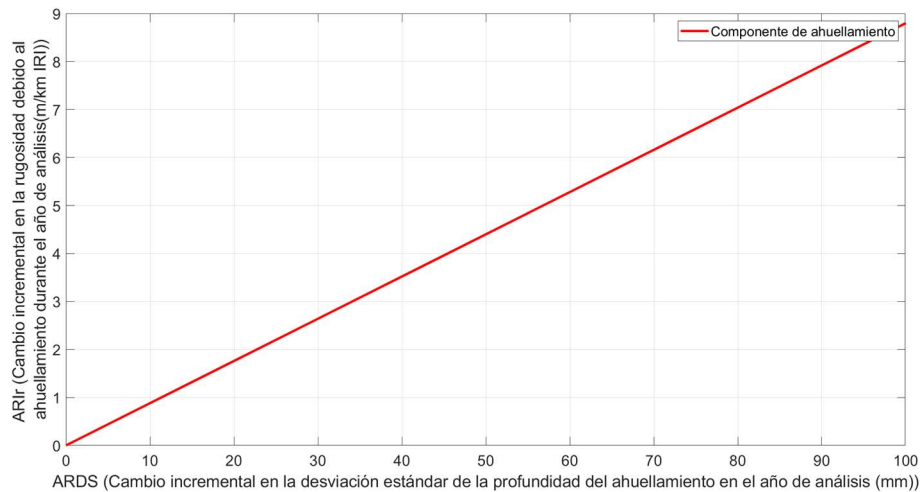
Figura 4.519: Cambio en la rugosidad por el componente de agrietamiento para todos los tipos de pavimentos



## 4.15 Rugosidad (Componente de ahuellamiento)

En la Figura 4.70 se observa que para el modelo que analiza el cambio incremental en la rugosidad debido al ahuellamiento (ARIr), a mayor cambio incremental en la desviación estándar de la profundidad de la rodera (ARDS) el deterioro es mayor, por lo que la relación es directamente proporcional.

Figura 4.70: Cambio en la rugosidad por el componente de ahuellamiento para todos los tipos de pavimentos



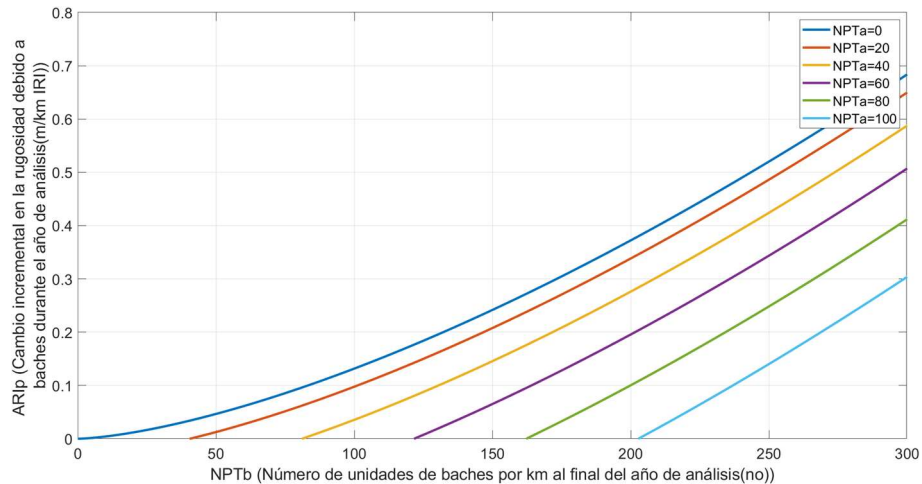
## 4.16 Rugosidad (Componente de baches)

Analizando el modelo de deterioro para el cambio incremental de la rugosidad por la presencia de baches, se concluye que cambio en la rugosidad no depende del tráfico, entonces, se ha analizado este deterioro respecto al número de unidades de baches al final del año de análisis (NPTb). Se observa que, con respecto a este parámetro, el modelo guarda una relación directamente proporcional, ya que a mayor número de baches mayor será el cambio incremental en la rugosidad por este componente.

Considerando la variación del modelo respecto al número de baches al inicio del año de análisis (NPTa), se observa que, a un número menor de baches al inicio del año de análisis, el cambio incremental en la rugosidad (ARIp) es mayor. Sin embargo, se concluye que a mayor (NPTa) la influencia de los baches para sobre el cambio de la rugosidad ocurrirá cuando el número de baches al final del año de análisis sea mayor. Entonces, es correcto

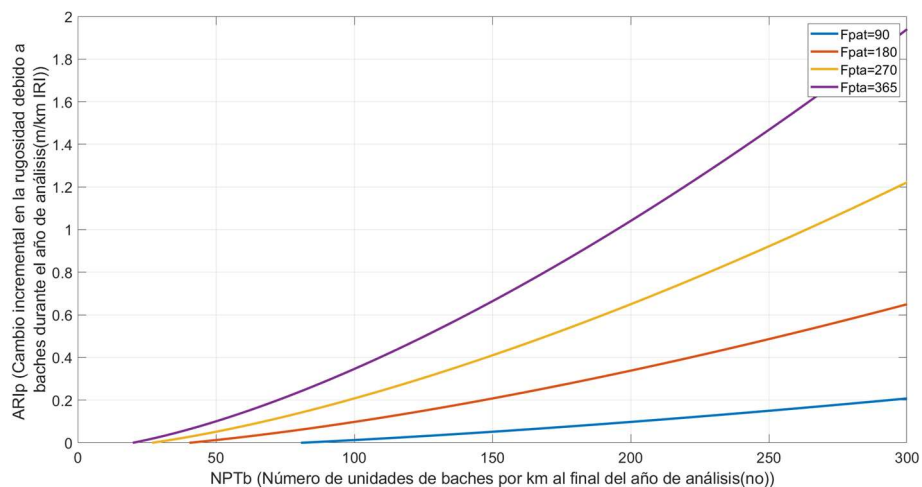
decir que, a menor número de baches al inicio del año de análisis la influencia de los baches sobre el cambio incremental de la rugosidad será mayor (Ver Figura 4.71).

Figura 4.71: Cambio en la rugosidad por el componente de baches para todos los tipos de pavimentos, (NPTa)



Por otra parte, el cambio incremental de la rugosidad debido a los baches es mayor a medida que el tiempo de bacheo (Fpat) es mayor, estableciéndose una relación directamente proporcional (Ver Figura 4.72).

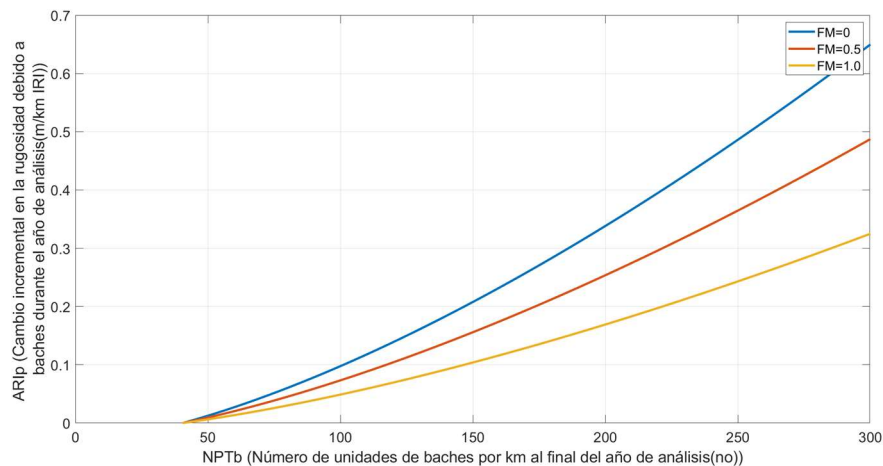
Figura 4.522: Cambio en la rugosidad por el componente de baches para todos los tipos de pavimentos, (Fpat)



El mismo comportamiento se identifica para el parámetro de índice de libertad de maniobra (FM), ya que, a menor facilidad de maniobra los vehículos no tendrán más opción que

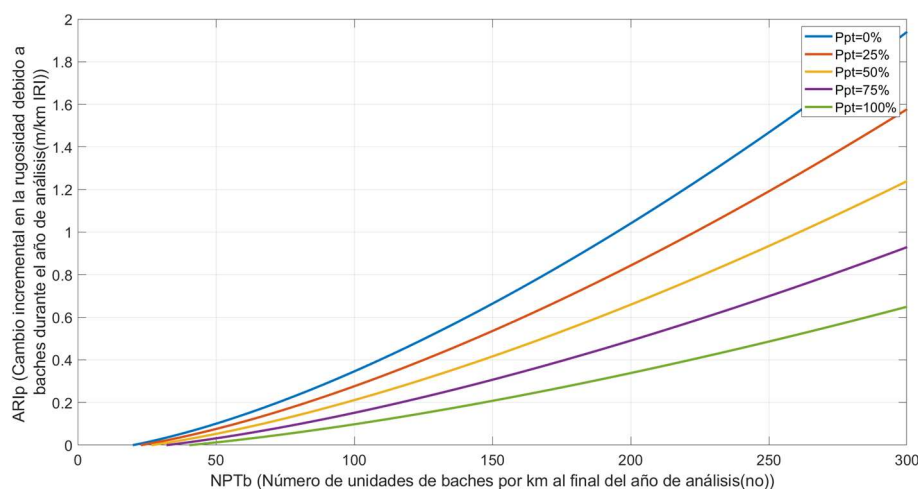
circular por donde se encuentran los baches, pudiendo provocar mayor severidad de este deterioro, causando en consecuencia, un mayor cambio en la rugosidad del pavimento (Ver Figura 4.73).

Figura 4.533: Cambio en la rugosidad por el componente de baches para todos los tipos de pavimentos, (FM)



Finalmente, analizando la influencia del porcentaje de baches bacheados (Ppt) sobre el deterioro se concluye que mientras menos baches se parchen mayor será el incremento en el cambio de la rugosidad causada por los baches. Así, para este parámetro se establece una relación inversamente proporcional (Ver Figura 4.74).

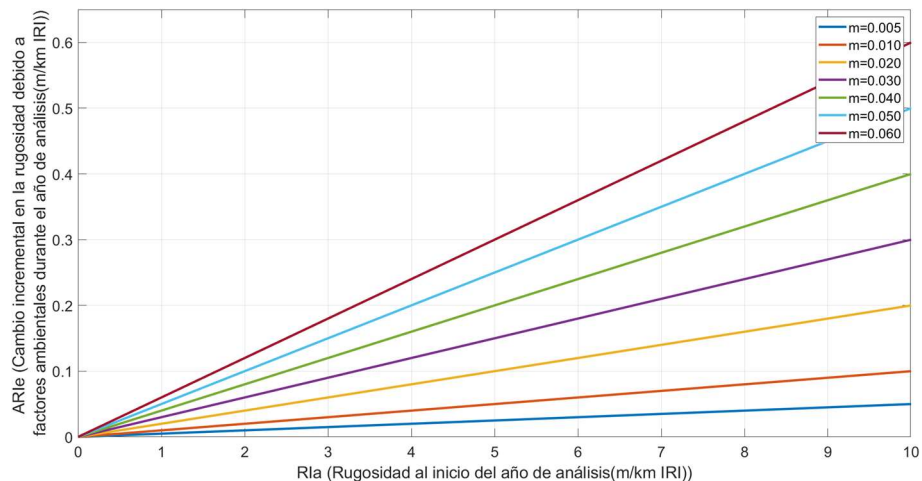
Figura 4.544: Cambio en la rugosidad por el componente de baches para todos los tipos de pavimentos, (Ppt)



## 4.17 Rugosidad (Componente ambiental)

Para el cambio incremental de la rugosidad debido a factores ambientales en el año de análisis (ARle) respecto a la rugosidad al inicio del año de análisis (RIa), se observa que, la relación es directamente proporcional ya que a medida que el parámetro aumenta el deterioro en el pavimento también lo hace. Considerando el análisis respecto al coeficiente ambiental se observa que mientras mayor sea este valor el cambio en la rugosidad también será mayor, lo que indicaría que las zonas más críticas serían aquellas con coeficientes ambientales altos (Ver Figura 4.75).

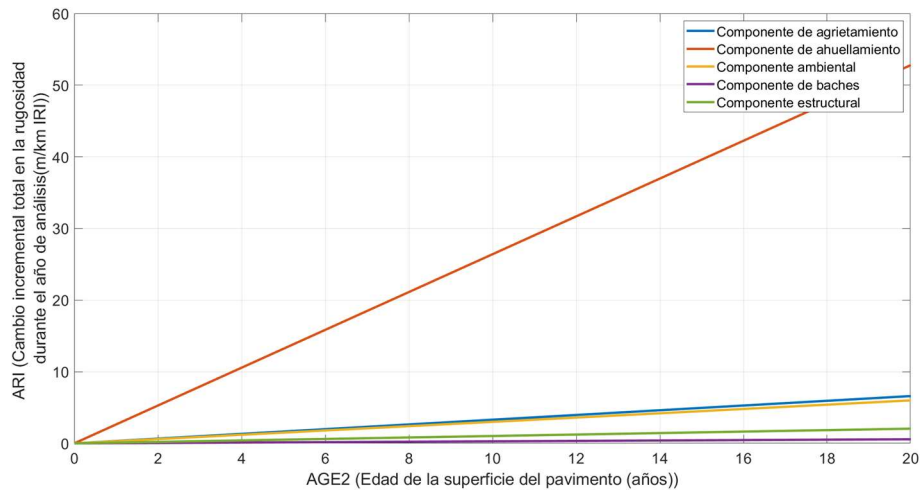
Figura 4.555: Cambio en la rugosidad por el componente ambiental para todos los tipos de pavimentos



## 4.18 Cambio total en la rugosidad

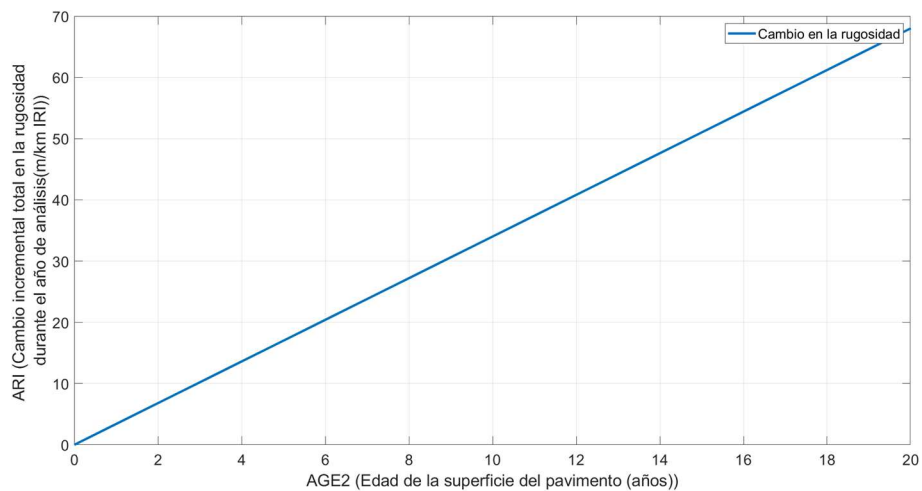
Al analizar el cambio total en la rugosidad como la suma de todos sus componentes, se establece que el cambio en la rugosidad será directamente proporcional a la edad del pavimento, con el fin de analizar todos los componentes para un mismo parámetro. Se observa que a más edad del pavimento mayor es el cambio en la rugosidad de todos sus componentes, siendo el ahuellamiento el componente más crítico. (Ver Figura 4.76).

Figura 4.566 Cambio en la rugosidad del pavimento para cada componente



Para visualizar el cambio en la rugosidad como la suma de sus componentes se ha analizado cada uno de los componentes con los valores estándar definidos para sus parámetros. Igualmente se observa que q mayor edad mayor es el cambio en la rugosidad. (Ver Figura 4.77).

Figura 4.577: Cambio total en la rugosidad para todos los tipos de pavimentos





## CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En este capítulo se presentan las conclusiones y recomendaciones a las que ha llevado este trabajo de investigación, en función de los objetivos planteados. También se recomiendan futuras líneas de investigación a partir de la temática desarrollada en este trabajo de titulación.

### 5.1. Conclusiones y recomendaciones

En este trabajo investigativo se describieron los tipos de pavimentos existentes y se realizó énfasis en los pavimentos asfálticos para conocer más a fondo las características principales que definen a este tipo de pavimento, los parámetros que influyen en su diseño y los tipos de deterioro que comúnmente se pueden observar en este tipo de pavimentos. Todo esto, con el fin de contar con información suficiente que permita comprender los modelos de deterioro que se evalúan en este trabajo de investigación.

Más adelante, se presentan las ecuaciones que definen cada tipo de deterioro y en base a un análisis de estas se definieron los parámetros a variar para cada modelo. Así también, se analizó de acuerdo a qué parámetro sería más correcto analizar la variación de cada tipo de deterioro. Los modelos de manera general varían de acuerdo a dos parámetros típicos que influyen tanto en el diseño como en el deterioro de los pavimentos asfálticos, siendo estos el tráfico y la edad del pavimento. Sin embargo, considerando la naturaleza de cada modelo para algunos tipos de deterioro, los parámetros de variación fueron distintos a los mencionados anteriormente debido a que los parámetros del tráfico y edad no influían ya sea en el inicio o progreso del deterioro y existían parámetros más relevantes para el análisis. Cabe mencionar que para cada modelo de deterioro se analizaron parámetros adicionales al tráfico y a la edad del pavimento, considerando que son parámetros interesantes para la evaluación de los diferentes tipos de deterioro.

Para obtener las gráficas sobre las que se ha realizado la evaluación de los modelos y la influencia de cada uno de los parámetros para cada tipo de deterioro, se utilizó la herramienta computacional MATLAB. En esta herramienta se programó funciones para cada tipo de deterioro donde, de manera sencilla en los parámetros de entrada de cada función se definen los rangos de variación para cada parámetro. El programa devuelve resultados de manera gráfica para que sea más sencillo observar el comportamiento de los

# UCUENCA

parámetros sobre el tipo de deterioro analizado. Los resultados no se muestran de manera numérica ya que, al ser un análisis general y basado en valores numéricos impuestos por recomendaciones en la bibliografía, los datos numéricos obtenidos no tienen mayor relevancia para este estudio.

Del análisis de los resultados se determina que el deterioro de todo agrietamiento estructural es más crítico en tratamientos superficiales que en mezclas asfálticas, siendo los tratamientos superficiales más propensos a presentar agrietamientos estructurales. En cuanto a los parámetros, el más crítico para todo agrietamiento estructural es el indicador de defectos en la construcción (CDS), ya que para este parámetro los valores de deterioro son mayores. Por lo tanto, se establece que un contenido de ligante bituminoso ligeramente superior al óptimo puede ayudar a disminuir tanto el tiempo para el inicio del agrietamiento como su progreso.

Para el deterioro de agrietamiento transversal por temperatura se concluye que las zonas donde este deterioro debe preverse y se debe tener mayor cuidado es en zonas con climas templados congelados. Se determina que el factor más crítico para este deterioro es el indicador de defectos en la construcción de superficies bituminosas (CDS), por lo que se recomienda que en los diseños de pavimentos asfálticos para zonas de climas templados congelados se considere el uso de mezclas con un porcentaje de ligante un poco mayor al óptimo para manejar de una manera más eficiente el deterioro por agrietamiento transversal por temperatura. Es importante mencionar que, si bien el análisis no se realizó para todas las zonas climáticas, la zona templadas-congeladas es la que tiene mayores restricciones y las tolerancias más bajas al analizar los coeficientes del modelo, es por tal motivo que es posible sacar estas conclusiones. También, se determina que es necesario el sellado de grietas existentes en el pavimento ya que este también es un parámetro desencadenante en el progreso del deterioro.

Para el deterioro del pavimento por desintegración también se establece que el parámetro más crítico es el contenido de ligante en la superficie bituminosa (CDS) por lo que se sugiere tener en cuenta las recomendaciones mencionadas anteriormente. Asimismo, se identifica que la existencia previa de desintegración no es un factor determinante para la progresión de este deterioro, sin embargo, se recomendaría tener control sobre este parámetro.

En el caso de los baches, se recomienda que en zonas que se conozca sean propensas a la aparición de baches, en medida de lo posible, se consideren espesores un poco mayores

# UCUENCA

en los diseños de pavimentos considerándolo como un factor de seguridad para prevenir el deterioro por baches ya que este parámetro resulta ser el más influyente según el modelo para el inicio de los baches. También, se establece que el factor más crítico para la progresión de baches es la existencia de agrietamiento ancho por lo que se recomienda el sellado de estas grietas cuando se observen en el pavimento con el fin de evitar un mayor deterioro de las vías. De igual manera, se considera importante manejar buenos métodos de drenaje ya que la presencia de agua e influencia de la lluvia juega un papel importante en el deterioro por baches.

Para el deterioro por ahuellamiento se sugiere, asegurar en las vías buenas condiciones estructurales en el pavimento, es decir, que los pavimentos tengan números estructurales altos ya que este es el factor más crítico para este deterioro. También, se recomienda prestar especial atención al progreso del ahuellamiento en el primer año del pavimento ya que en este periodo se observará el mayor deterioro.

Con respecto a la rugosidad del pavimento se establece que el componente más crítico es el ahuellamiento, por lo que se sugiere prevenir el deterioro por ahuellamiento en las vías ya que, de acuerdo a los resultados, una vez que se presente este deterioro una consecuencia segura será el deterioro en la rugosidad del pavimento. Se recomienda prestar atención al agrietamiento si se busca mantener la rugosidad adecuada en los pavimentos.

Finalmente, habiendo analizado y evaluado los distintos tipos de deterioro se concluye sobre la importancia de este trabajo de investigación, ya que, ha permitido definir cuáles son los parámetros más críticos para cada tipo de deterioro según los modelos estudiados, y este conocimiento adquirido permite prever acciones que ayuden a frenar el deterioro atacando a los factores causantes.

## **5.2 Futuras líneas de investigación**

Culminado este trabajo de investigación se abre la puerta para la realización de varias investigaciones que pueden aportar mucho a la ingeniería de pavimentos y a las entidades encargadas de la gestión de pavimentos. Algunas líneas de investigación que pudieran realizarse a partir de este trabajo son las siguientes.

# UCUENCA

En este trabajo de investigación se ha optado por definir todos los factores de calibración con el valor de 1 tal y como lo recomienda el manual de donde se han obtenido los modelos. Sin embargo, sería un trabajo de investigación interesante analizar casos específicos en una zona de estudio determinada y definir con exactitud los valores de los factores de calibración.

En la realización de este trabajo se identificó la relación existente entre parámetros, por ejemplo, entre la deflexión de la Viga Benkelman y el número estructural ajustado. Por lo que se sugiere como tema de investigación el análisis de variación entre estos parámetros, así como de muchas otras relaciones.

También, resulta atractiva la posibilidad de analizar estos modelos de deterioro en nuestra provincia o ciudad y conocer cuando iniciará o como progresará un tipo de deterioro específico. Esta información pudiera ser de gran valor para las entidades encargadas de la gestión de pavimentos ya que se conocería de mejor manera cómo se presenta en el deterioro en los pavimentos, permitiendo definir acciones para actuar de manera eficaz en contra del deterioro de las vías.

Por otra parte, sería interesante comparar distintos modelos para un mismo tipo de deterioro, en este trabajo de investigación se mostraron los modelos usados en el HDM4; sin embargo, existen varios modelos desarrollados para distintos tipos de deterioro y sería interesante comparar el comportamiento que indica cada uno y los parámetros considerados por cada modelo.

Finalmente, pudiera realizarse el análisis de este trabajo de investigación para modelos de deterioro en otros tipos de pavimentos.

## REFERENCIAS

- [1] P. Turrado, "Análisis de los modelos de deterioro de firmes en la gestión de la conservación de redes de carreteras," UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID ESCUELA, 2016.
- [2] J. E. Montoya, "Implementación del sistema de gestión de pavimentos con herramienta HDM-4 para la red vial N°5 tramo Ancón-Huacho-Pativilca," Universidad Ricardo Palma, 2007.
- [3] G. Salazar, "Sistema institucional de gestión de las carreteras de segundo orden del Ecuador, para disminuir costos de mantenimiento vial y de operación de vehículos," Universidad Técnica de Ambato, 2008.
- [4] R. J. Silva, L. Quaresma, and R. Micaelo, "Maintenance and rehabilitation programming of the Portuguese road network: Development of a cracking prediction model," *Int. J. Pavement Res. Technol.*, vol. 8, no. 6, pp. 383–394, 2015, doi: 10.6135/ijprt.org.tw/2015.8(6).383.
- [5] J. Argueta and E. Castro, "Metodología para la calibración de los modelos de Deterioro de pavimentos generados por el programa HDM4," Universidad de El Salvador, 2009.
- [6] M. Y. Shahin, M. M. Nunez, M. R. Broten, S. H. Carpenter, and A. Sameh, "New Techniques for Modeling Pavement Deterioration.," *Transp. Res. Rec.*, pp. 40–46, 1987.
- [7] El Mercurio, "El corredor hacia los cantones orientales del Azuay está en deterioro - Diario El Mercurio," Nov. 01, 2021. <https://elmercurio.com.ec/2021/11/09/el-corredor-hacia-los-cantones-orientales-del-azuay-esta-en-deterioro/> (accessed Mar. 15, 2022).
- [8] El Comercio, "67% de vías están óptimas para viajar," Cuenca, Feb. 27, 2022.
- [9] R. Solorio, R. Hernández, and J. Gómez, "Análisis de sensibilidad de los modelos de deterioro del hdm-4 los para pavimentos asfálticos," Sanfandila, 2004.
- [10] A. Montejo Fonseca, *Ingeniería de pavimentos*. 2006.
- [11] Y. H. Huang, "Pavement Analysis and Design, Second Edition," Up. Saddle River,

NJ07458 Prentice Hall., 2004.

- [12] E. J. Yoder and M. W. Witczak, Principles of Pavement Design. 1975.
- [13] American Association of State Highway and Transportation Officials, AASHTO Guide for Design of Pavement Structures. 1993.
- [14] G. Morosiuk, M. Riley, and J. Odoki, Volume 6. Modelling Road Deterioration and Works Effects in HDM-4. 2004.
- [15] J. S. Miller and W. Y. Bellinger, "FHWA, Distress Identification manual for the Long-Term Pavement Performance Program. Report FHWA-HRT-13-092," Fed. Highw. Adm., no. May, 2014.

## ANEXOS

### Líneas de código en MATLAB para las funciones que contienen los modelos de deterioro

#### - Función inicio todo agrietamiento estructural

```
function [ICA]= ini_agr_estr(Kcia,tipo,HSOLD,CDS,SNP,YE4,CRT,aux,
PCRW,PCRA,HSNEW)

% Esta función presenta el modelo del inicio de todo agrietamiento
% estructural. Se establecen condiciones dependiendo del tipo de base de la
% estructura del pavimento, que para el caso actual se trata de bases no
% estabilizadas.

% Para los modelos de desintegración del pavimento se presenta un
% condicional si se trata de una Mezcla Asfáltica o de un Tratamiento
% Superficial, y también si en la superficie existe CM, SL o CAPE entonces
% se usan las siguientes variables auxiliares.
%
% tipo=1= Mezcla Asfáltica
% tipo=2= Tratamiento Superficial
%
% De igual manera se usa una variable auxiliar aux para definir el tipo de
% tratamiento superficial
%
%aux=0= Todos los materiales excepto CM, SL y CAPE
%aux=1= Los materiales CM,SL y CAPE

%Se presentan los coeficientes y ecuaciones para mezcla asfáltica
if tipo==1
    if HSOLD==0
        a0=4.21; a1=0.14; a2=-17.1;
        ICA=Kcia*(CDS.^2*a0*exp(a1.*SNP+a2*(YE4/SNP.^2))+CRT);
    elseif HSOLD>0
        % La variable aux,indica si se trata para materiales CM, SL y CAPE, u
        % otro tipo de materiales
        if aux==0
            a0=4.21; a1=0.14; a2=-17.1; a3=30; a4=0.025;
            ICA=Kcia*((CDS.^2).*(max(a0*exp(a1*SNP+a2*(YE4/(SNP.^2)))*max(1-
PCRW/a3,0),(a4*HSNEW)))+CRT);
        elseif aux==1
            a0=13.2; a1=0; a2=-20.7; a3=20; a4=1.4;
            ICA=Kcia*((CDS.^2).*(max(a0*exp(a1*SNP+a2*(YE4/(SNP.^2)))*max(1-
PCRA/a3,0),a4))+CRT);
        end
    end
end

% Se presentan los coeficientes y ecuaciones para tratamiento superficial
```

# UCUENCA

```
elseif tipo==2
  if HSOLD==0
    a0=13.2; a1=0; a2=-20.7;
    ICA=Kcia*(CDS.^2*a0*exp(a1.*SNP+a2*(YE4/SNP.^2))+CRT);
  elseif HSOLD>0
    if aux==0
      a0=13.2; a1=0; a2=-20.7; a3=20; a4=0.22;
      ICA=Kcia*((CDS.^2).*(max(a0*exp(a1*SNP+a2*(YE4/(SNP.^2))))*max(1-
PCRW/a3,0),(a4*HSNEW)))+CRT);
    elseif aux==1
      a0=13.2; a1=0; a2=-20.7; a3=20; a4=1.4;
      ICA=Kcia*((CDS.^2).*(max(a0*exp(a1*SNP+a2*(YE4/(SNP.^2))))*max(1-
PCRA/a3,0),a4))+CRT);
    end
  end
end
```

% Se grafica los resultados

```
plot (YE4,ICA, 'Linewidth',2.5);grid on; hold on;
set(gca,'FontSize',(16))
xlabel ('YE4 (Número anual de ejes estándar equivalentes (mill/carril))')
ylabel ('ICA (Tiempo para el inicio de todo agrietamiento estructural (años))')
```

%Leyendas usadas en las variaciones de parámetros

```
legend ("CDS=0.5", "CDS=1.0", "CDS=1.5" )
%legend ("SNP=2", "SNP=4", "SNP=6", "SNP=8")
%legend ("PCRW=5%", "PCRW=10%", "PCRW=15%", "PCRW=20%", "PCRW=30%")
%legend ("HSNEW=25mm", "HSNEW=50mm", "HSNEW=75mm", "HSNEW=100mm")
%legend ("PCRA=5%", "PCRA=10%", "PCRA=15%", "PCRA=20%", "PCRA=30%" )
```

- **Función progreso todo agrietamiento estructural**

```
Function[dACA]=pgr_agr_estr(HSOLD,Kcpa,ACAa,AGE2,ICA,tipo,aux,CRT,CDS)
```

% Se utiliza una variable auxiliar (aux) para entrar al condicional if para ciertas condiciones.

%

% El valor de CRP responde a la siguiente expresión

%

% Se utilizan dos variables auxiliares, la primera, la variable tipo, que

% permite definir si el modelo aplica para una Mezcla Asfáltica o para un

% Tratamiento Superficial, donde:

%

%tipo=1= Mezcla Asfáltica

%tipo=2= Tratamiento Superficial

%

% Por otra parte la variable aux: indica si el material de la superficie es:



# UCUENCA

```
% aux=0= Todos los materiales excepto CM  
% aux=1= CM
```

```
CRP=1-0.12*CRT;
```

```
%Se presentan los coeficientes y ecuaciones para mezcla asfáltica  
if tipo==1
```

```
if HSOLD==0  
    a0=1.84;a1=0.45;  
elseif HSOLD>0  
    if aux==0  
        a0=1.07; a1=0.28;  
    elseif aux==1  
        a0=2.41;a1=0.34;  
    end  
end
```

```
if ACAa>0  
    dtA=1;  
else  
    dtA=max(0,min(AGE2-ICA,1));  
end
```

```
if ACAa>=50  
    ZA=-1;  
else  
    ZA=1;  
end
```

```
ACAa=max(ACAa,0.5);  
SCA=min(ACAa,100-ACAa);  
Y=a0*a1*ZA*dtA+(SCA.^a1);
```

```
if Y<0  
    dACA=Kcpa*(CRP/CDS)*(100-ACAa);  
elseif Y>=0  
    dACA=Kcpa*(CRP/CDS)*ZA*((Y.^(1/a1))-SCA);  
end
```

```
if ACAa<=50 & ACAa+dACA>50  
    c1=max((2*(50^a1)-(SCA.^a1)-a0*a1*dtA),0);  
    dACA=Kcpa*((CRP/CDS)*(100-(c1.^(1/a1))-ACAa));  
end
```

```
% Se presentan los coeficientes y ecuaciones para tratamiento superficial  
elseif tipo==2
```

```
if HSOLD==0  
    a0=1.76;a1=0.32;  
elseif HSOLD>0
```

# UCUENCA

```
a0=2.41;a1=0.34;  
end
```

```
if ACAa>0  
    dtA=1;  
else  
    dtA=max(0,min(AGE2-ICA,1));  
end
```

```
if ACAa>=50  
    ZA=-1;  
else  
    ZA=1;  
end
```

```
ACAa=max(ACAa,0.5);  
SCA=min(ACAa,100-ACAa);  
Y=a0*a1*ZA*dtA+(SCA.^a1);
```

```
if Y<0  
    dACA=Kcpa*(CRP/CDS)*(100-ACAa);  
elseif Y>=0  
    dACA=Kcpa*(CRP/CDS)*ZA*((Y.^(1/a1))-SCA);  
end
```

```
if ACAa<=50 & ACAa+dACA>50  
    c1=max((2*(50^a1)-(SCA.^a1)-a0*a1*dtA),0);  
    dACA=Kcpa*((CRP/CDS)*(100-(c1.^(1/a1))-ACAa));  
end  
end
```

```
% Se grafican los resultados  
plot(ACAa,dACA,'Linewidth',2.5);grid;hold on  
set(gca,'FontSize',(16))  
xlabel ('ACAa (Área de agrietamiento estructural total al inicio del año de análisis(%))')  
ylabel ('dACA (Cambio incremental en el área de agrietamiento estructural total durante el  
año de análisis(%))')  
legend ("CDS=0.5","CDS=1.0","CDS=1.5")
```

## - Función inicio agrietamiento transversal por temperatura

```
function[ICT]=ini_agr_trans_temp(HSOLD,Kcit,CDS,CCT,HSNEW)
```

```
% Esta función presenta el modelo de deterioro del inicio del agrietamiento transversal por temperatura.
```

```
% La primera condición cuando HSOLD=0 indica que se esta considera la condición inicial, mientras que a condición de HSOLD>0
```

```
% indica el análisis sobre un sobrecapa o sellado
```

```
%Coeficientes necesarios para en el modelo
```

# UCUENCA

```
a0=-1;a1=0.02;
```

```
if HSOLD==0
```

```
    ICT=Kcit.*max(1,CDS.*CCT);
```

```
    % Se grafican los resultados
```

```
    plot(CCT,ICT,'*k','Linewidth',10),grid on,hold on
```

```
    set(gca,'FontSize',(16))
```

```
    xlabel 'CCT (Coeficiente de agrietamiento termal)'
```

```
    ylabel 'ICT(Tiempo para el inicio del agrietamiento transversal (años))'
```

```
    legend ('CCT=1 ((Templado congelado Sub-húmedo y húmedo)', 'CCT=2 (Templado congelado árido y semi árido)', 'CCT=5 (Sub-tropical árido)', 'CCT=8 (Sub-tropical semi árido)')
```

```
elseif HSOLD>0
```

```
    ICT=Kcit.*CDS.*(CCT+a0+a1.*HSNEW);
```

```
    % Se grafican los resultados
```

```
    plot(HSNEW,ICT,'Linewidth',2.5),grid on,hold on
```

```
    set(gca,'FontSize',(16))
```

```
    xlabel 'HSNEW (Espesor del revestimiento o recapeo de la calzada(mm))'
```

```
    ylabel 'ICT(Tiempo para el inicio del agrietamiento transversal (años))'
```

```
    legend ("CDS=0.5", "CDS=1.0", "CDS=1.5" )
```

```
    %legend ('CCT=1 ((Templado congelado Sub-húmedo y húmedo)', 'CCT=2 (Templado congelado árido y semi árido)', 'CCT=5 (Sub-tropical árido)', 'CCT=8 (Sub-tropical semi árido)')
```

```
end
```

## - Función progreso agrietamiento transversal por temperatura

```
function[dNCT]=pgr_agr_trans_temp(ACTa,AGE2,ICT,HSOLD,Kcpt,CDS,NCTeq,NCTa,AGE3,Teq,PNCT)
```

```
% Esta función presenta el modelo de deterioro de la progresión del agrietamiento transversal por temperatura.
```

```
% Se indica que la progresión del deterioro comienza solo cuando  $dtT>0$  para lo cual se usa una variable auxiliar que
```

```
% ayudará a que se verifique que dicha condición se cumpla siempre antes de modelar.
```

```
%
```

```
% La primera condición cuando HSOLD=0 indica que se esta considera la condición inicial, mientras que a condición de HSOLD>0
```

```
% indica el análisis sobre un sobrecapa o sellado
```

```
a3=0.25;
```

```
if ACTa>0
```

```
    dtT=1;
```

# UCUENCA

```
else
    dtT=max(0,min(AGE2-ICT,1));
end

if HSOLD==0
    dNCT=Kcpt.*(1/CDS).*max(0,(min((NCTeq-NCTa),((2.*NCTeq.*(AGE3-ICT-0.5))/(Teq.^2))))).*dtT;

    % Se grafican los resultados
    plot (AGE3,dNCT,'Linewidth',2.5),grid on,hold on
    xlabel 'AGE3 (Edad desde la última sobrecapa o reconstrucción (años))'
    ylabel 'dNCT (Cambio incremental en el número de grietas transversales por temperatura durante el año de análisis (no/km))'
    %legend ('NCTa=5','NCTa=10','NCTa=15','NCTa=20','NCTa=30')
    legend ("CDS=0.5","CDS=1.0","CDS=1.5" )
    set(gca,'FontSize',(16))

elseif HSOLD>0
    % Se usan variable auxiliares para poder graficar con respecto a AGE3
    % por la naturaleza de la ecuación.
    n=0;
    y=[];
    x=[];

    while n<=AGE3

        a=(min((a3.*PNCT),(PNCT-NCTa)));
        b=2.*NCTeq.*(n-ICT-0.5)/(Teq.^2);
        c=0;

        aux=[a,b,c];
        dNCT=Kcpt*(1/CDS)*min((NCTeq-NCTa),(max(aux)))*dtT;

        y(n+1)= dNCT;
        x(n+1)= n;
        n=n+1;
    end

    % Se grafican los resultados, para este caso por como esta programado
    % el sistema el parámetro AGE3 se coloca solo como un número entero, no
    % como rango.

    plot (x,y,'-','Linewidth',2.5),grid on,hold on
    xlabel 'AGE3 (Edad desde la última sobrecapa o reconstrucción (años))'
    ylabel 'dNCT (Cambio incremental en el número de grietas transversales por temperatura durante el año de análisis (no/km))'
    set(gca,'FontSize',(16))
    legend ("CDS=0.5","CDS=1.0","CDS=1.5" )
    %legend ('NCTa=5','NCTa=10','NCTa=15','NCTa=20')
    %legend ('PNCT=0','PNCT=60','PNCT=120')
```

# UCUENCA

end

## - Función inicio desintegración del pavimento

```
function [IRV]=ini_desintegracion(aux,Kvi,CDS,RRF,YAX)
% Para los modelos de desintegración del pavimento se presenta un
% condicional sobre la superficie del material si es CM, CAPE o SL. Para
% representar estas condiciones se utilizará el condicional aux, donde":

% aux=1= Todos excepto CM
% aux=2= CM
% aux=3= Todos excepto SL,CAPE en Tratamiento Superficial
% aux=4= SL,CAPE en Tratamiento Superficial

% Se establece cada casos según el valor del auxiliar
switch aux
case 1
    a0=100;
    a1=-.156;
case 2
    a0=8;
    a1=-0.156;
case 3
    a0=10.5;
    a1=-0.156;
otherwise
    a0=14.1;
    a1=-0.156;
end

%Ecuación del modelo
IRV= Kvi.*(CDS.^2).*a0.*RRF.*exp(a1*YAX);

% Se grafican los resultados
plot (YAX,IRV,'Linewidth',2.5),grid on, hold on
set(gca,'FontSize',(16))
xlabel 'YAX (Número anual de ejes de todas las clases de vehículos en el año de análisis
(mill/año))'
ylabel 'IRV (Tiempo para el inicio de la desintegración del pavimento (años))'
legend ('AM (Todos excepto CM)','AM(CM)','ST(Todos excepto SL y CAPE)','ST(SL y
CAPE)')
%legend ('CDS=0.5','CDS=1.0','CDS=1.5')
%legend('RRF=0.5', 'RRF=1.0', 'RRF=2.0')
```

## - Función progreso desintegración del pavimento

```
function [dARV]=pgr_desintegracion(ARVa,AGE2,IRV,YAX,Kvp,CDS,RRF)
```

# UCUENCA

% En esta función se presenta el modelo de la progresión de la desintegración de pavimentos asfálticos

% Coeficientes para el modelo de deterioro

a0=0.3;a1=1.5;a2=0.352;

% Ecuaciones del modelo

if ARVa>0

    dtv=1;

else

    dtv=max(0,min((AGE2-IRV),1));

end

if ARVa>=50

    z=-1;

else

    z=1;

end

ARVa=max(ARVa,0.5);

SRV= min(ARVa,(100-ARVa));

YAX=max(min(YAX,1),0.1);

Y=((a0+a1.\*YAX).\*a2.\*z.\*dtv+(SRV.^a2));

if Y<0

    dARV=(Kvp/RRF).\*(1/(CDS.^2))\*(100-ARVa);

elseif Y>=0

    dARV=(Kvp/RRF).\*(1/(CDS.^2)).\*z.\*((Y.^(1/a2))-SRV);

end

if ARVa<=50 & ARVa+dARV>50

    c1=max((2.\*(50.^a2)-(SRV.^a2)-(a0+a1.\*YAX).\*a2.\*dtv),0);

    dARV=(Kvp/RRF).\*(1/(CDS.^2)).\*(100-(c1.^(1/a2))-ARVa);

end

% Se grafican los resultados

plot(YAX,dARV,'Linewidth',2.5),grid on,hold on

set(gca,'FontSize',(16))

xlabel 'YAX (Número anual de ejes de todas las clases de vehículos en el año de análisis (mill/año))'

ylabel 'dARV (Cambio en el área de desintegración durante el año de análisis(% total del área de la calzada))'

legend('CDS=0.5','CDS=1.0','CDS=1.5');

%legend('RRF=0.5', 'RRF=1.0', 'RRF=2.0')

%legend('ARVa=0%', 'ARVa=25%', 'ARVa=50%', 'ARVa=75%', 'ARVa=90%')

- **Función inicio baches**

function [IPT]= ini\_baches(Kpi,HS,CDB,YAX,MMP)

# UCUENCA

```
% En este modelo se utiliza un condicional ya que los baches pueden comenzar  
% ya sea por agrietamiento o por desintegración del pavimento, por tal  
% motivo se utilizará una variable auxiliar para la defición de los  
% coeficientes:
```

```
% aux=0= Indica inicio de baches por agrietamiento  
% aux=1= Indica inicio de baches por desintegración
```

```
% Los coeficientes del modelo son los mismos para ambos deterioros, para el  
% caso de estudio
```

```
a0=2;a1=0.05;a2=1;a3=0.5;a4=0.01;
```

```
% Ecuaciones del modelo
```

```
IPT= Kpi.*a0.*((1+a1.*HS)./((1+a2.*CDB)*(1+a3.*YAX)*(1+a4.*MMP)));
```

```
% Se grafican los resultados
```

```
plot(YAX,IPT,'Linewidth',2.5), grid on, hold on
```

```
set(gca,'FontSize',(16))
```

```
xlabel 'YAX (Número anual de ejes de todas las clases de vehículos en el año de análisis  
(mill/año))'
```

```
ylabel 'IPT (Tiempo entre el inicio de agrietamiento ancho o desintegración del pavimento y  
el inicio de baches(años))'
```

```
legend('HS=50','HS=100','HS=200','HS=300')
```

```
%legend('MMP=50','MMP=100','MMP=150','MMP=200')
```

```
%legend('CDB=0','CDB=0.5','CDB=1.0','CBD=1.5')
```

## - Función progreso baches

```
function [TLF,PEFF,dNPTi]=pgr_baches_TLF_PEFF(aux,Fpat,Ppt)
```

```
% En este modelo se presentan la variación de los parámetros del modelo  
% para la progresión de baches correspondiente a TLF, PEFF
```

```
%Se utiliza una variable auxiliar para cuando se trate de baches por  
%por agrietamiento y desintegración (aux=1) y por alargamineto (aux=2)
```

```
if aux==1
```

```
    a0i=0.2;a1i=1.5;
```

```
elseif aux==2
```

```
    a0i=0;a1i=1.5;
```

```
end
```

```
% Ecuaciones del modelo
```

```
TLF=(a0i)+((1-a0i).*((Fpat./365).^(a1i)));
```

```
PEFF=1-(Ppt./100).*(1-TLF);
```

```
% Se grafican los resultados para TLF
```

# UCUENCA

```
%plot(Fpat,TLF,'Linewidth',2.5);grid on;hold on
%set(gca,'FontSize',(16))
%xlabel ('Fpat (Frecuencia de parcheo de baches (días))')
%ylabel ('TLF (Factor de lapso de tiempo)')
%legend ('Agrietamiento y desintegración','Alargamiento')
```

% Se grafican los resultados para PEFF

```
plot(Fpat,PEFF,'Linewidth',2.5);grid on;hold on
set(gca,'FontSize',(16))
xlabel ('Fpat (Frecuencia de parcheo de baches (días))')
ylabel ('PEFF (Factor de política de bacheo)')
legend('Ppt=0%','Ppt=25%','Ppt=50%','Ppt=75%','Ppt=90%')
```

```
function[dNPTi]=pgr_baches(suma,aux,Kpp,ADISi,PEFF,ELANES,CDB,YAX,MMP,HS)
```

```
% Este modelo presenta la progresión del deterioro por baches.
% Para el modelo de progresión de baches, el avance del deterioro puede
% deberse a agrietamiento, desintegración o ensanchamiento.
% Para los coeficientes se utiliza una variable auxiliar 'aux', donde:
% coef=1=Agrietamiento
% coef=2=Desintegración
% coef=3=Ensanchamiento
```

```
% La variable suma indica si en el programa si se desea analizar el número
% de baches para cada tipo de deterioro o, en su defecto analizar la suma
% de todos los baches producidos por los diferentes deterioros.
```

```
if suma==false
```

```
switch aux
```

```
case 1
```

```
a0=1.0;a1=1.0;a2=10;a3=0.005;a4=0.08;
```

```
dNPTi=Kpp.*a0.*ADISi.*(PEFF).*(ELANES./2).*(((1+a1.*CDB).*(1+a2.*YAX).*(1+a3.*MMP
))./(1+a4.*HS));
```

```
case 2
```

```
a0=0.2;a1=1.0;a2=10;a3=0.005;a4=0.08;
```

```
dNPTi=Kpp.*a0.*ADISi.*(PEFF).*(ELANES./2).*(((1+a1.*CDB).*(1+a2.*YAX).*(1+a3.*MMP
))./(1+a4.*HS));
```

```
case 3
```

```
a0=0.07;a1=1.0;a2=10;a3=0.005;a4=0.08;
```

```
dNPTi=Kpp.*a0.*ADISi.*(PEFF).*(ELANES./2).*(((1+a1.*CDB).*(1+a2.*YAX).*(1+a3.*MMP
))./(1+a4.*HS));
```

```
end
```

% Se grafican los resultados



# UCUENCA

```
plot(YAX,dNPTi,'Linewidth',2.5);grid on;hold on
set(gca,'FontSize',(16))
xlabel 'YAX (Número anual de ejes de todas las clases de vehículos en el año de análisis
(mill/año))'
ylabel 'dNPTi (Número total de unidades de baches por km derivado por el tipo de deterioro
(no))'
legend ('ADISi=20','ADISi=30','ADISi=50','ADISi=75')
%legend('HS=50','HS=100','HS=200','HS=300')
%legend('MMP=50','MMP=100','MMP=150','MMP=200')
%legend('CDB=0','CDB=0.5','CDB=1.0','CDB=1.5')
%legend('ELANES=2','ELANES=4','ELANES=6')
```

```
% En esta parte de la programación se determina el deterioro total como la
% suma de los baches por las tres posibles causas de su aparición.
```

```
elseif suma==true
```

```
    n=1;
    dNPT=[];
    aux=1;
```

```
    while n<=3
```

```
        switch aux
```

```
            case 1
```

```
                a0=1.0;a1=1.0;a2=10;a3=0.005;a4=0.08;
```

```
                dNPT1=Kpp.*a0.*ADISi.*(PEFF).*(ELANES./2).*(((1+a1.*CDB).*(1+a2.*YAX).*(1+a3.*MM
P))./(1+a4.*HS))
```

```
            case 2
```

```
                a0=0.2;a1=1.0;a2=10;a3=0.005;a4=0.08;
```

```
                dNPT2=Kpp.*a0.*ADISi.*(PEFF).*(ELANES./2).*(((1+a1.*CDB).*(1+a2.*YAX).*(1+a3.*MM
P))./(1+a4.*HS))
```

```
            case 3
```

```
                a0=0.07;a1=1.0;a2=10;a3=0.005;a4=0.08;
```

```
                dNPT3=Kpp.*a0.*ADISi.*(PEFF).*(ELANES./2).*(((1+a1.*CDB).*(1+a2.*YAX).*(1+a3.*MM
P))./(1+a4.*HS))
```

```
            end
```

```
                aux=aux+1;
```

```
                n=n+1;
```

```
        end
```

```
        dNPT=dNPT1+dNPT2+dNPT3;
```

```
    end
```

```
% Se grafican los resultados
```

```
plot(YAX,dNPT,'Linewidth',2.5);grid on;hold on
```

# UCUENCA

```
set(gca,'FontSize',(16))
xlabel 'YAX (Número anual de ejes de todas las clases de vehículos en el año de análisis (mill/año))'
ylabel 'dNPT (Número total de unidades de baches adicionales en el año de análisis (no))'
legend ('dNPT')
```

## - Función inicio ahuellamiento (Componente densificación inicial)

```
function [RDO]=ini_ahue_den_ini(Krid,YE4,SNP,COMP)

% Este modelo se presenta el modelo de deterioro para el inicio del ahuellamiento en la
% primera de sus fases
% la desificación inicial

% Los valores de los coeficientes son:
a0=51740; a1=0.09; a2=0.0384; a3=-0.502; a4=-2.30;

%Según el manual en los modelos donde aplique el uso de la deflexión de la
%viga Benkelman este valor se calcula en función del valor de SNP

DEF=6.5.*(SNP^(-1.6));

% Ecuaciones del modelo

RDO=Krid.*(a0.*((YE4.*10.^6).^a1+a2.*DEF)).*(SNP.^a3)*(COMP.^a4;

% Se grafican los resultados

plot(YE4,RDO,'Linewidth',2.5), grid on, hold on
set(gca,'FontSize',(16))
xlabel('YE4 (Número anual de ejes estándar equivalentes(mill/carril))')
ylabel('ROD (Ahuellamiento ocasionado por densificación inicial(mm))')
legend ('COMP=85','COMP=90','COMP=95','COMP=100')
%legend ('SNP=2','SNP=4','SNP=6','SNP=8')
```

## - Función inicio ahuellamiento (Componente deformación estructural)

```
function[ARDST]=ini_ahue_def_estr (ACRA,Krst,SNP,YE4,COMP,MMP,ACXa)

% Este modelo se presenta el modelo de deterioro para el inicio del ahuellamiento en la
% segunda de sus fases
% la deformación estructural.
% Para este deterioro se identifican dos casos y en el modelo se los
% identificará por medio de una variable auxiliar

% ARDSTuc= Componente por Deformación estructural sin agrietamiento
```

# UCUENCA

% ARDSTucrk= Componente por Deformación estructural después del agrietamiento

% Se presentan los coeficientes y ecuaciones para el modelo

if ACRA==0

a0=44950;a1=-1.14;a2=0.11;a3=-2.3;

ARDSTuc=Krst.\*(a0.\*(SNP.^a1).\*(YE4.^a2)\*(COMP.^a3));

ARDST=ARDSTuc;

elseif ACRA>0

a0i=44950;a1i=-1.14;a2i=0.11;a3i=-2.3;

ARDSTuc=Krst.\*(a0i.\*(SNP.^a1i).\*(YE4.^a2i)\*(COMP.^a3i));

a0=0.0000248;a1=-0.84;a2=0.14;a3=1.07;a4=1.11;

ARDSTcrk=Krst.\*(a0.\*(SNP.^a1).\*(YE4.^a2)\*(MMP.^a3)\*(ACXa.^a4));

ARDST=ARDSTuc+ARDSTcrk;

end

% Se grafican los resultados

plot(YE4,ARDST,'Linewidth',2.5);grid on;hold on;

set(gca,'FontSize',(16))

xlabel('YE4 (Número anual de ejes estándar equivalentes (mill/carril))')

ylabel('ARDST (Aumento incremental total de la deformación estructural en el año de análisis (mm))')

%legend('SNP=2','SNP=4','SNP=6','SNP=8')

%legend('COMP=85','COMP=90','COMP=95','COMP=100')

%legend('ACXa=0%','ACXa=25%','ACXa=50%','ACXa=75%','ACXa=90%')

%legend('MMP=50','MMP=100','MMP=150','MMP=200')

legend('Caso estándar sin agrietamiento','Caso estándar con agrietamiento')

## - Función inicio ahuellamiento (Componente deformación plástica)

function [ARDPD]=ini\_ahue\_def\_plas(tipo,Krpd,CDS,YE4,Sh,HS)

% Este modelo se presenta el modelo de deterioro para el inicio del ahuellamiento en la tercera de sus fases

% la defromación plástica

%

% Para este modelo se presentan distintos coeficientes dependiendo se si se

% trata de una mezcla asfáltica o un tratamiento superficial, por lo que se

% usará una variable auxiliar según el caso que se desee analizar

%

% tipo= 0 = Mezcla Asfáltica

% tipo= 1 = Tratamiento Superficial

% Ecuaciones del modelo

if tipo==0

a0=0.3;a1=3.27;a2=-0.78;a3=0.71;

ARDPD=Krpd.\*a0.\*(CDS.^a1).\*(YE4).\*(Sh.^a2).\*(HS.^a3);

# UCUENCA

```
elseif tipo==1
    a0=0;a1=3.27;a2=-0.78;a3=0.71;
    ARDPD=Krpd.*a0.*(CDS.^a1).*(YE4).*(Sh.^a2).*(HS.^a3);
end

% Se grafican los resultados

plot(YE4,ARDPD,'Linewidth',2.5), grid on , hold on
set(gca,'FontSize',(16))
xlabel('YE4 (Número anual de ejes estándar equivalentes(mill/carril))')
ylabel('ARDPD (Aumento incremental en la deformación plástica en el año de análisis(mm))')
%legend ('Mezcla Asfáltica(AM)', 'Tratamiento Superficial(ST)')
%legend ("CDS=0.5", "CDS=1.0", "CDS=1.5" )
%legend ('Sh=30km/h', 'Sh=50km/h', 'Sh=80km/h', 'Sh=100km/h')
legend ('HS=50mm', 'HS=100mm', 'HS=200mm', 'HS=300mm')
```

## - Función progreso ahuellamiento

```
function[ARDM]=pgr_ahuellamiento(AGE4,SNP,YE4,COMP,MMP,ACXa,Sh,HS,CDS,Krst,
Krpd,Krid)
```

```
% Este modelo se presenta el modelo de deterioro para la progresión del
% ahuellamiento El progreso de este deterioro es la suma de todos sus
% componentes.
```

```
% Ecuaciones del modelo (Ahuellamiento por deformación estructural)
ARDSTuc=Krst.*(44950.*(SNP.^(-1.14)).*(YE4.^0.11)*(COMP.^(-2.3)));
ARDSTcrk=Krst.*(0.0000248.*(SNP.^(-0.84)).*(YE4.^0.14)*(MMP.^1.07)*(ACXa.^1.11));
ARDST=ARDSTuc+ARDSTcrk;
```

```
% Ecuaciones del modelo (Ahuellamiento por deformación plástica)
ARDPD=Krpd.*0.3.*(CDS.^3.27).*(YE4).*(Sh.^(-0.78)).*(HS.^0.71);
```

```
% Ecuaciones del modelo (Ahuellamiento por densificación inicial)
DEF=6.5.*(SNP.^(-1.6));%Revisar pg B2-8
RDO=Krid.*(51740.*((YE4.*10.^6).^(0.09+0.0384.*DEF)).*(SNP.^(-0.502)).*(COMP.^(-2.30)));
```

```
% Ecuaciones del modelo de progresión
```

```
if AGE4<=1
    ARDM=RDO+ARDPD;
else
    ARDM=ARDST+ARDPD;
end
```

```
% Se grafican los resultados
```

```
plot (YE4,ARDM,'Linewidth',2.5), grid on, hold on
```

# UCUENCA

```
set(gca,'FontSize',(16))
xlabel('YE4 (Número anual de ejes estándar equivalentes (mill/carril))')
ylabel('ARDM (Aumento incremental de la profundidad media total de ahuellamiento en ambas trayectorias de las ruedas en el año de análisis (mm))')
legend ('AGE4<=1','Otros casos')
```

## - Función inicio rugosidad (Componente de agrietamiento)

```
function[ARlc]=ini_rugosidad_comp_agrietamiento(Kgc,AACRA)
% Se presenta el modelo para el inicio de deterioro de la rugosidad del pavimento,

% Ecuación para el modelo y su coeficiente
a0=0.0066;
ARlc=Kgc*a0*AACRA

% Se grafican los resultados
plot(AACRA,ARlc,'Linewidth',2.5), grid on, hold on
set(gca,'FontSize',(16))
ylabel('RIs (Cambio incremental en la rugosidad debido al agrietamiento durante el año de análisis(m/km IRI))')
xlabel('AACRA (Cambio incremental en el área total de agrietamiento durante el año de análisis(%))')
legend 'Componente de agrietamiento'
```

## - Función inicio rugosidad (Componente de ahuellamiento)

```
function[ARlr]=ini_rugosidad_comp_ahuellamiento(Kgr,ARDS)

% Se presenta el modelo para el inicio de deterioro de la rugosidad del pavimento,
% considerando el componente de ahuellamiento

% Ecuación para el modelo y su coeficiente
a0=0.088;
ARlr=Kgr*a0*ARDS;

% Se grafican los resultados
plot(ARDS,ARlr,'r','Linewidth',2.5), grid, hold on
set(gca,'FontSize',(16))
xlabel('ARDS (Cambio incremental en la desviación estándar de la profundidad del ahuellamiento en el año de análisis (mm))')
ylabel ('ARlr (Cambio incremental en la rugosidad debido al ahuellamiento durante el año de análisis(m/km IRI))')
legend 'Componente de ahuellamiento'
```

# UCUENCA

## - Función inicio rugosidad (Componente ambiental)

```
function [ARle]=ini_rugosidad_comp_ambiental(Kgm,m,Rla)
```

```
% Se presenta el modelo para el inicio de deterioro de la rugosidad del pavimento,  
% considerando el componente ambiental
```

```
% Ecuación para el modelo  
ARle=Kgm*m*Rla;
```

```
% Se grafican los resultados  
plot(Rla,ARle,'Linewidth',2.5), grid on, hold on  
set(gca,'FontSize',(16))  
xlabel('Rla (Rugosidad al inicio del año de análisis(m/km IRI))')  
ylabel ('ARle (Cambio incremental en la rugosidad debido a factores ambientales durante  
el año de análisis(m/km IRI))')  
legend('m=0.005','m=0.010','m=0.020','m=0.030','m=0.040','m=0.050','m=0.060')
```

## - Función inicio rugosidad (Componente baches)

```
function[ARlp]=ini_rugosidad_comp_baches(FM,Ppt,Fpat,Kgp,NPTa,NPTb)
```

```
% Se presenta el modelo para el inicio de deterioro de la rugosidad del pavimento,  
% considerando el componente referente a baches
```

```
% Los coeficientes para este modelo son:
```

```
a0=0.00019;a1=2;a2= 1.5;
```

```
% Ecuación para calcular el número de baches por km al  
% final del año de análisis como percepción del usuario  
NPTbu=NPTb.*(1-(Ppt./100).*(1-(Fpat./365)));
```

```
% Ecuación para el incremento en la rugosidad por el componente de baches  
ARlp=Kgp.*a0.*(a1-FM).*((NPTbu.^a2)-(NPTa.^a2));
```

```
% Se grafican los resultados  
plot (NPTb,ARlp,'Linewidth',2.5), grid on, hold on  
set(gca,'FontSize',(16))  
xlabel 'NPTb (Número de unidades de baches por km al final del año de análisis(no))'  
ylabel 'ARlp (Cambio incremental en la rugosidad debido a baches durante el año de  
análisis(m/km IRI))'  
legend ('NPTa=0','NPTa=20','NPTa=40','NPTa=60','NPTa=80','NPTa=100')  
%legend ('Fpat=90','Fpat=180','Fpta=270','Fpta=365')  
%legend ('Ppt=0%','Ppt=25%','Ppt=50%','Ppt=75%','Ppt=100%')  
%legend ('FM=0','FM=0.5','FM=1.0')
```

# UCUENCA

## - Función inicio rugosidad (Componente estructural)

```
function[ARIs]=ini_rugosidad_comp_est(Kgs,Kgm,m,AGE3,YE4,SNPa,Ksnpk,ACXa,HSNEW,PACX,HSOLD)
```

```
% Se presenta el modelo para el inicio del deterioro por rugosidad  
% considerando el componente estructural
```

```
% Para el componente estructural se tiene ciertos valores de los  
% coeficientes y para dSNPK otros valores
```

```
% Ecuación para la reducción en el número estructural ajustado por  
% agrietamiento
```

```
a0=0.0000758;a1=63;a2=40;  
dSNPK=Ksnpk.*a0.*(min(a1,ACXa).*HSNEW+ max(min(ACXa-PACX,a2),0).*HSOLD);
```

```
% Ecuación para el modelo
```

```
SNPKb=max((SNPa-dSNPK),1.5);
```

```
a00=134;
```

```
ARIs=Kgs.*a00.*exp(Kgm.*(m).*(AGE3)).*((1+SNPKb).^-5).*YE4;
```

```
% Se grafican los resultados
```

```
plot(YE4, ARIs,'Linewidth',2.5), grid on, hold on
```

```
set(gca,'FontSize',(16))
```

```
xlabel('YE4 (Número anual de ejes estándar equivalentes (mill/carril))')
```

```
ylabel('ARIs (Cambio incremental en la rugosidad por el deterioro estructural durante el año  
de análisis (m/km IRI))')
```

```
legend('m=0.005','m=0.010','m=0.020','m=0.030','m=0.040','m=0.050','m=0.060')
```

```
%legend('AGE3=5','AGE3=10','AGE3=15','AGE3=20')
```

```
%legend('SNPa=2','SNPa=4','SNPa=6','SNPa=8')
```

```
%legend('ACXa=0%','ACXa=25%','ACXa=50%','ACXa=75%','ACXa=90%')
```

```
%legend('HSNEW=50','HSNEW=100','HSNEW=200','HSNEW=300')
```

```
%legend('HSOLD=50','HSOLD=100','HSOLD=200','HSOLD=300')
```

```
%legend('PACX=0%','PACX=25%','PACX=50%','PACX=75%','PACX=90%')
```

## - Función inicio cambio total de la rugosidad

```
function[ARI]=cambio_rugosidad(AGE2,Kgc,AACRA,Kgr,ARDS,NPTb,Ppt,Fpat,Kgp,FM,NPTa,Ksnpk,ACXa,HSNEW,PACX,HSOLD,Kgs,Kgm,AGE3,YE4,RIa,SNPa,m)
```

```
% Se presenta el modelo para el cambio de la rugosidad del pavimento,  
% considerando todos sus componentes
```

```
%cambio_rugosidad(0:1:20,1,50,1,30,30,0,365,1,0,20,1,20,100,0,100,1,1,1,10,10,6,0.030)
```

```
% Ecuación para el componente de agrietamiento
```

```
ARlc=Kgc*0.0066*AACRA*AGE2
```

```
% Ecuación para el componente de ahuellamiento
```

```
ARlr=Kgr*0.088*ARDS*AGE2
```

# UCUENCA

% Ecuación para el componente ambiental

$ARle = Kgm * 0.030 * Rla * AGE2$

% Ecuación para el componente de baches

$NPTbu = NPTb * (1 - (Ppt./100) * (1 - (Fpat./365)))$ ;

$ARlp = Kgp * 0.00019 * (2 - FM) * ((NPTbu.^{1.5}) - (NPTa.^{1.5})) * AGE2$ ;

% Ecuación para el componente de estructural

$dSNPK = Ksnpk * 0.0000758 * (\min(63, ACXa) * HSNEW +$

$\max(\min(ACXa -$

$PACX, 40), 0) * HSOLD$ );

$SNPKb = \max((SNPa - dSNPK), 1.5)$ ;

$ARIs = Kgs * 134 * \exp(Kgm * (m) * (AGE3)) * ((1 + SNPKb)^{-5}) * YE4 * AGE2$ ;

% Ecuación para el cambio de la rugosidad

$ARI = ARIs + ARIc + ARIr + ARlp + ARle$

% Se grafican los resultados

`plot(AGE2,ARI,'Linewidth',2.5), grid on, hold on`

`set(gca,'FontSize',(16))`

`ylabel('ARI (Cambio incremental total en la rugosidad durante el año de análisis(m/km IRI))')`

`xlabel('AGE2 (Edad de la superficie del pavimento (años))')`

`legend ('Componente de agrietamiento', 'Componente de ahuellamiento', 'Componente ambiental', 'Componente de baches', 'Componente estructural')`

`%legend 'Cambio en la rugosidad'`