



Universidad Autónoma de Querétaro

Facultad de Ingeniería

Maestría en Ciencias (Estructuras)

**SISTEMATIZACIÓN DEL ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE PUENTES
CARRETEROS DE ACERO ANTE ESCENARIOS DE TRÁFICO PESADO**

TESIS

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de
Maestro en Ciencias (Estructuras)

Presenta:

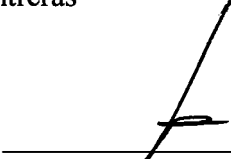
Juan de Dios Herrada Hernández

Dirigido por:


Dr. Guadalupe Moisés Arroyo Contreras

SINODALES

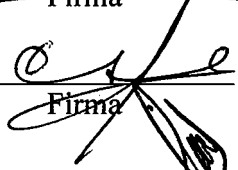
Dr. Guadalupe Moisés Arroyo Contreras
Presidente


Firma


Dr. Miguel Ángel Pérez Lara y Hernández
Secretario


Firma

Dr. Carlos Santiago López Cajún
Vocal



Firma

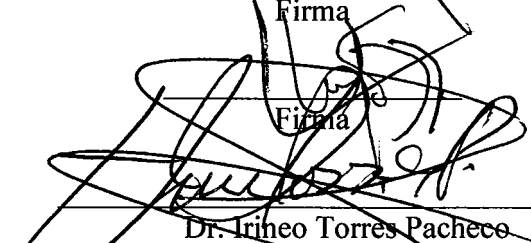
Dr. José Antonio Romero Navarrete
Suplente


Firma

Dr. Eduardo Betanzo Quezada
Suplente


Firma


Dr. Aurelio Domínguez González
Director de la Facultad de Ingeniería


Dr. Irineo Torres Pacheco
Director de Investigación y posgrado UAQ

Centro Universitario
Querétaro, Qro.
Agosto de 2013
México



RESUMEN

En la actualidad, el interés en el estudio del comportamiento de los puentes se ha incrementado de manera importante debido al hecho del crecimiento pronunciado tanto en la densidad como en la capacidad de carga del tráfico pesado, aunado al envejecimiento y deterioro de la infraestructura vial, así como, a los costos de mantenimiento o reparación que con ello se generan. Uno de los aspectos que determinan el estado actual de los puentes carreteros es el fenómeno de fatiga y efectos extremos, producidos por tráfico pesado; por tanto, es necesario realizar una evaluación y prevención temprana, para evitar daños estructurales. En este trabajo de tesis se retoma la metodología para el análisis estadístico de cargas de vehículos pesados, pronóstico de valores extremos de cargas y efectos de fatiga en puentes carreteros de acero, específicamente, el programa de cómputo que lleva por nombre “DEFP - Diagnostico Estadístico y de Fatiga en Puentes” desarrollado en la División de Investigación y Posgrado DIP-UAQ (Bárceñas V., 2011); en particular, se propone la actualización, revisión y mejora de dicho software, principalmente, a través de la generalización de su aplicación, es decir resaltando el efecto del tráfico pesado de varios carriles sobre el puente, sistematizando la metodología con un enfoque moderno que implica el desarrollo de una herramienta de cómputo, interactiva y amigable. La nueva versión del programa, revisado y actualizado, lleva por nombre “DEEFEP - Diagnostico Estadístico. Efectos de Fatiga y Extremos en Puentes ante cargas de tráfico pesado”, estructurado por módulos y algoritmos programados en lenguaje C++ del compilador Visual Studio. Las aplicaciones mostradas en este trabajo se sustentan en datos de pesaje dinámico de vehículos (weight in motion, WIM), realizados en vialidades de Francia, e información de puentes proporcionados por el Laboratorio Central de Puentes y Caminos (LCPC), esperando generar registros WIM en carreteras mexicanas.

Palabras clave: Puentes carreteros de acero, tráfico vehicular pesado, análisis de líneas y superficies de influencia, efectos de fatiga y extremos, WIM.



SUMMARY

Recently, the interest in the study about the behavior of bridges has been increased in an important manner due to the density growth as well as the load capacity and heavy traffic in addition to the generated roads infrastructure, aging and tear and ware, maintenance and repairs costs. One of the aspects that determine the present state of the road's bridges is the fatigue and extreme effects caused by heavy traffic; therefore, it is necessary to carry out an early preventive evaluation in order to avoid structural damages. Within this thesis work the methodology is retaken for the statistical study of the heavy load vehicles, the extreme load values and the fatigue effects of the steel road's bridges, specifically the computer program called in its Spanish initials "DEFP" Statistical Diagnostic of Bridges Fatigue which was developed in the Graduate Research Division (DIP/UAQ) (Bárceñas V., 2011). In particular, the thesis proposes an update, review and betterment of such Software, mainly through its application generalization. That is to say, emphasizing the various lanes of heavy traffic's effect upon the bridge, systematizing the methodology with modern focusing which implies the development of a computer tool, interactive and friendly. The new reviewed and updated program's version is called in Spanish: "DEEFEP Diagnóstico Estadístico. Efectos de Fatiga y Extremos en Puentes ante cargas de tráfico pesado", (Statistical Diagnostic. Fatigue Extreme Effects in Bridges under heavy load traffic), structured through modules and programmed algorithms in C++ language of the Visual Study compiling element. The contribution of this analysis systematization tool of bridges diagnostic subjected to heavy load traffic shall be mainly to facilitate the massive review work of existing steel bridges before the new heavy traffic demands, nationally and at a world's level. The demonstrated applications of this work are supported by the vehicle dynamic passage (weight in motion, WIM), carried out on roads in France, and the information of bridges provided by the "Central de Puentes y Caminos" (LCPC), Central Laboratory of Bridges and Roads (LCPC), hoping to generate the WIM within Mexican roads.

Key words: Roads steel bridges, vehicle heavy traffic, lane analysis, flow surfaces, fatigue extremes and effects, WIM.



DEDICATORIA

A mi familia que a pesar de la distancia me han apoyado incondicionalmente. A mi madre, que continuamente me ha alentado a cumplir mis metas y sobretodo que en todo momento me ha demostrado su amor. A mi padre, por su gran ejemplo de trabajo y dedicación, y a mis hermanos que siempre me desearon lo mejor, y por la gran familia que somos.



AGRADECIMIENTOS

A Dios, que me dio fortaleza espiritual y física para permitirme llegar a este momento tan especial en mi vida.

A los profesores de la UAQ, que tuve el gusto de conocer, que con sus enseñanzas y guía, se han involucrado en mi formación profesional. A mi asesor, Dr. Guadalupe Moisés Arroyo Contreras por su tiempo y apoyo dedicado a esta investigación.

Se agradece la aportación de información WIM-A64 del LCPC-Francia, sin la cual no se podría validar la metodología estudiada, por otro lado, se reconoce el apoyo del PNP-Conacyt, que ha permitido financiar parcialmente este trabajo.



ÍNDICE

PÁG.

RESUMEN I

SUMMARY II

DEDICATORIA III

AGRADECIMIENTOS..... IV

ÍNDICE DE TABLAS VIII

ÍNDICE DE FIGURAS IX

I. INTRODUCCIÓN 1

 1.1. Descripción del problema..... 2

 1.2. Justificación 4

 1.3. Hipótesis y objetivos 5

 1.4 Alcances y limitaciones..... 7

 1.4.1. Alcances..... 7

 1.4.2. Limitaciones..... 8

II. ESTADO DEL ARTE..... 9

 2.1. Marco teórico 10

 2.2. Sistemas de pesaje en movimiento en puentes..... 11

 2.3. Análisis estadístico y de valores extremos 12

 2.4. Determinación de esfuerzos 16

 2.5. Análisis de fatiga..... 19

III. METODOLOGÍA..... 22

 3.1. Análisis estadístico de cargas vehiculares (Módulo 1) 28

 3.1.A. Distribuciones probabilistas de un escenario de tráfico..... 29

 3.1.B. Análisis paramétrico de escenarios de tráfico 29

 3.2. Línea de influencia del modelo de interacción tráfico – puente (Módulo 2)..... 30

 3.3. Superficies de influencia del modelo de interacción tráfico – puente (Módulo 2)..... 33

 3.4. Análisis de fatiga en puentes carreteros (Módulo 3) 36

 3.4.1. Módulo de estimación de daño acumulado y vida a fatiga 36

IV. SISTEMATIZACIÓN DE LA METODOLOGÍA..... 37

 4.1. Análisis estadístico de cargas vehiculares (Módulo 1) 37



4.1.A. Distribuciones probabilistas de un escenario de tráfico.....	38
4.1.B. Módulo de análisis paramétricos de 2 y hasta 3 archivos de registros WIM.....	38
4.2. Modelo de interacción tráfico–puente. Líneas de influencia.....	44
4.3 Modelo de interacción tráfico-puente. Superficies de influencia.....	44
4.4. Análisis de fatiga en puentes carreteros	48
V. EJEMPLOS DE APLICACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS: ANÁLISIS DE FATIGA DEL PUENTE KERVITOUS ANTE DOS ESCENARIOS DE TRÁFICO	49
5.1. Puente kervitous: Análisis por método de líneas de influencia	50
5.1.1. Sección del puente localizada a 39 m del inicio (centro de claro del segundo claro), para análisis de fatiga	54
5.1.2 Sección del puente localizada a 41.5 m del inicio (sección crítica), para análisis de fatiga	61
5.2 Puente kervitous: por método de superficies de influencia, un carril de registro WIM.....	66
5.2.1 Sección del puente localizada a 41.5m del inicio (sección crítica), para análisis de fatiga	70
5.2.2 Sección del puente localizada a 39 m del inicio (centro de claro del segundo claro), para análisis de fatiga	78
5.3 Puente kervitous: por método de superficies de influencia, dos carriles de registro WIM.....	81
5.3.1 Sección del puente localizada a 41.5m del inicio (sección crítica), para análisis de fatiga	82
5.3.2 Sección del puente localizada a 39 m del inicio (centro de claro del segundo claro), para análisis de fatiga	86
5.4 Resultados	89
5.4.1 Análisis de los resultados y discusión.....	92
VI. CONCLUSIONES	97
VII. BIBLIOGRAFÍA.....	98
APÉNDICES.....	102
APÉNDICE A. Registros de pesaje en movimiento “weight in motion, WIM”	103
A.1. Aspectos generales de los sistemas WIM	103
A.2. Procesador de los sistemas	104
A.3. Formato de datos de salida.....	104
APÉNDICE B. Metodología de los módulos estadístico y de análisis.....	109
B.1 Análisis estadístico de cargas vehiculares (Módulo 1).....	109
B.2. Modelo de interacción Tráfico – Puente. (Análisis estructural tipo puente sometido a tráfico pesado, líneas y superficies de influencia). (Módulo 2)	114
B.2.1. Modelo de interacción tráfico – puente. Líneas de influencia.....	114



B.2.2. Modelo de interacción tráfico-puente. Superficies de influencia.....	120
APÉNDICE C. Sistematización de la metodología integral.....	127
C.1. Pantalla de inicio, presentación y estructura.....	127
C.2. Tratamiento de archivos y depuración de datos.....	128
C.3. Módulo de análisis estadísticos.....	128
C.4. Módulo de predicción de valores extremos.....	129
C.5. Módulo de interacción Tráfico-Puente (análisis estructural tipo puente sometido a tráfico pesado, líneas y superficies de influencia).....	130
C.5.1. Conteo de ciclos de esfuerzos con el método de rainflow	130
C.6. Análisis de fatiga en puentes carreteros de acero	131
C.6.1. Módulo de estimación de daño acumulado y vida a fatiga	131
C.7. Menú de ayuda.....	131
APÉNDICE D. Ejemplos tutoriales de aplicación del programa DEEFEP para análisis de fatiga	132
D.1 Análisis de fatiga del puente Auxerre de Francia. Líneas de influencia.....	132
D.2 Análisis de fatiga del puente Auxerre de Francia. Superficies de influencia. Un sólo registro WIM	136
D.3 Análisis de fatiga del puente Auxerre de Francia. Superficies de influencia. Dos carriles con registro WIM	140
ANEXOS	143



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla		Página
5.1	Características geométricas principales del puente Kervitous.	50
5.2	Período de vida a fatiga de cada puente ante el registro de tráfico A6 de 1986.	89
5.3	Análisis estadístico y paramétrico del registro de tráfico RN4 de 2007-2008.	90
5.4	Período de vida a fatiga del puente Kervitous ante el registro de tráfico RN4 de 2007-2008.	91
A.1	Formato de los registros de WIM.	105
D.1	Características geométricas principales de los puentes considerados para el análisis de fatiga.	133

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura		Página
2.1	Icono de DEFP-Diagnóstico Estadístico y de Fatiga en Puentes.	10
3.1	Metodología integral para el análisis y evaluación de puentes carreteros del programa DEFP.	23
3.2	Principales módulos que integran la metodología del programa DEEFEP.	24
3.3	Metodología integral y estructura para el análisis y evaluación de puentes carreteros del programa DEEFEP.	25
3.4	Módulo 1 “Análisis estadístico de cargas vehiculares” que integra la metodología del programa DEEFEP.	26
3.5	Módulo 2 “Determinación de esfuerzos” que integra la metodología del programa DEEFEP.	27
4.1	Diagrama de flujo del módulo de análisis paramétrico de escenarios de tráfico.	39-40
4.2	Diagrama de flujo del módulo de determinación de esfuerzos (Análisis por superficies de influencia).	47
5.1	Características geométricas principales del puente Kervitous.	50
5.2	Inicialización del módulo de modelo de interacción tráfico-puente. Análisis de líneas de influencia.	51
5.3	Panel inicial del módulo de análisis por líneas de influencia.	51
5.4	Carpeta de almacenamiento de datos generados en el análisis por superficies de influencia.	52
5.5	Selección de los archivos para el análisis de superficies de influencia.	52
5.6	Asignación del número de claros para el puente Kervitous.	53

Figura		Página
5.7	Generación de la línea de influencia unitaria del puente Kervitous. Sección de análisis a centro de claro (CL) del segundo claro.	54
5.8	Asignación del módulo de sección (S) del puente Kervitous.	55
5.9	Cuadro de información de las líneas de influencia de esfuerzos por eje vehicular.	55
5.10	Opciones de animación gráfica del flujo vehicular.	56
5.11	Simulación animada del tráfico vehicular registrado (puente Kervitous).	56
5.12	Inicialización del conteo de ciclos de esfuerzos con el método de rainflow.	57
5.13	Serie de historia de esfuerzos mediante líneas de influencia. Sección 39m. Kervitous.	57
5.14	Generación del histograma de rainflow. Esfuerzos mediante líneas de influencia. Sección 39m. Kervitous.	58
5.15	Inicialización de la evaluación de daño acumulado con la regla de Miner.	59
5.16	Curvas S-N del manual AASHTO.	59
5.17	Asignación de parámetros para la evaluación de daño acumulado.	60
5.18	Asignación del histograma de rainflow.	61
5.19	Valor de Miner y estimación de vida a fatiga. Esfuerzos mediante líneas de influencia. Sección 39m. Kervitous.	61
5.20	Determinación de la sección crítica del puente Kervitous a través del análisis de líneas de influencia envolventes.	62
5.21	Generación de la línea de influencia unitaria del puente Kervitous. Sección de análisis a centro de claro (CL) del segundo claro.	62
5.22	Cuadro de información de las líneas de influencia de esfuerzos por eje vehicular.	63
5.23	Serie de historia de esfuerzos mediante líneas de influencia. Sección 41.5m (crítica). Kervitous.	63



Figura		Página
5.24	Generación del histograma de rainflow. Esfuerzos mediante líneas de influencia. Sección 41.5m Kervitous.	64
5.25	Valor de Miner y estimación de Vida a Fatiga. Esfuerzos mediante líneas de influencia. Sección 41.5m Kervitous.	64
5.26	Serie de historia de esfuerzos mediante líneas de influencia. Sección 41.5m (sección crítica). Registro WIM RN4, puente Kervitous.	65
5.27	Generación del histograma de rainflow. Esfuerzos mediante líneas de influencia. Sección 41.5m. Registro WIM RN4, puente Kervitous.	65
5.28	Valor de Miner y estimación de Vida a Fatiga. Esfuerzos mediante líneas de influencia. Sección 41.5m. Registro WIM RN4, puente Kervitous.	66
5.29	Inicialización del módulo de modelo de interacción tráfico-puente. Análisis de superficies de influencia.	66
5.30	Panel inicial del módulo de análisis por superficies de influencia.	67
5.31	Carpeta de almacenamiento de datos generados en el análisis por superficies de influencia.	67
5.32	Selección de los archivos para el análisis de superficies de influencia.	68
5.33	Asignación del número de claros para el puente Kervitous.	68
5.34	Asignación de las características de la sección transversal del puente Kervitous.	69
5.35	Sección transversal del puente Kervitous generada por el programa DEEFEP.	69
5.36	Determinación de la sección crítica del puente Kervitous, por medio de análisis de superficie de influencia envolventes.	70
5.37	Generación de la superficie de influencia unitaria del puente Kervitous en 3D. Sección de análisis a 415 dm (sección crítica).	71



Figura		Página
5.38	Generación de superficie de influencia unitaria resultante del puente Kervitous. Sección de análisis a 415 dm (sección crítica).	71
5.39	Asignación del módulo de sección (S) del puente Kervitous.	72
5.40	Cuadro de información de las superficies de influencia de esfuerzos por eje vehicular.	73
5.41	Opciones de animación gráfica del flujo vehicular.	73
5.42	Simulación animada del tráfico vehicular registrado (puente Kervitous).	74
5.43	Inicialización del conteo de ciclos de esfuerzos con el método de rainflow. Módulo de Superficies de influencia. DEEFEP.	74
5.44	Serie de historia de esfuerzos mediante superficies de influencia. Sección 41.5m (sección crítica). Kervitous.	75
5.45	Generación del histograma de rainflow. Esfuerzos mediante superficies de influencia. Sección 41.5m (crítica). Kervitous.	75
5.46	Asignación de parámetros para la evaluación de daño acumulado.	76
5.47	Valor de Miner y estimación de vida a fatiga. Esfuerzos mediante superficies de influencia. Sección 41.5m. Kervitous.	76
5.48	Serie de historia de esfuerzos mediante superficies de influencia. Sección 41.5m (sección crítica). Registro WIM RN4, puente Kervitous.	77
5.49	Generación del histograma de rainflow. Esfuerzos mediante superficies de influencia. Sección 41.5m. Registro WIM RN4, puente Kervitous.	77
5.50	Valor de Miner y estimación de Vida a Fatiga. Esfuerzos mediante superficies de influencia. Sección 41.5m. Registro WIM RN4, puente Kervitous.	78



Figura		Página
5.51	Características geométricas del puente Kervitous y asignación de la sección (Pto. de referencia) para análisis de fatiga.	78
5.52	Generación de la superficie de influencia unitaria del puente Kervitous en 3D (sección de análisis a 390 dm).	79
5.53	Generación de Superficie de influencia unitaria Resultante del puente Kervitous (Sección de análisis a 390 dm).	79
5.54	Serie de historia de esfuerzos mediante superficies de influencia. Sección 39m. Kervitous.	80
5.55	Generación del histograma de rainflow. Esfuerzos mediante superficies de influencia. Sección 39m. Kervitous.	80
5.56	Asignación de parámetros para la evaluación de daño acumulado. Puente Kervitous. Sección a 390 dm del inicio del puente.	81
5.57	Asignación de las características geométricas del puente Kervitous.	82
5.58	Cuadro de información de las superficies de influencia de esfuerzos por eje vehicular.	82
5.59	Serie de historia de esfuerzos mediante superficies de influencia. Sección 415 dm (sección crítica). Kervitous.	83
5.60	Generación del histograma de rainflow. Esfuerzos mediante superficies de influencia. Sección 415 dm (sección crítica). Kervitous.	84
5.61	Valor de Miner y estimación de vida a fatiga. Esfuerzos mediante superficies de influencia. Sección 415 dm (sección crítica). Kervitous.	84
5.62	Serie de historia de esfuerzos mediante superficies de influencia. Sección 41.5m (sección crítica). Registro WIM RN4 Vía 1 y 2, puente Kervitous.	85
5.63	Generación del histograma de rainflow. Esfuerzos mediante superficies de influencia. Sección 41.5m. Registro WIM RN4 Vía 1 y 2, puente Kervitous.	85



Figura		Página
5.64	Valor de Miner y estimación de Vida a Fatiga. Esfuerzos mediante superficies de influencia. Sección 41.5m. Registro WIM RN4 Vía 1 y 2, puente Kervitous.	86
5.65	Serie de historia de esfuerzos mediante superficies de influencia. Sección 390 dm (centro de claro de segundo claro). Kervitous.	87
5.66	Generación del histograma de rainflow. Esfuerzos mediante superficies de influencia. Sección 390 dm (centro de claro de segundo claro). Kervitous.	87
5.67	Asignación de parámetros para la evaluación de daño acumulado. Puente Kervitous. Sección 390 dm del inicio del puente.	88
A.1	Formato del archivo de registros de WIM, para su utilización dentro del programa R-Estadística.	106
A.2	Formato del archivo de registros de WIM, para su utilización dentro del programa CASTOR.	106
A.3	Formato raro de archivo de registros de WIM.	107
A.4	Módulo de tratamiento de archivos desarrollado dentro del programa DEEFEP.	107
A.5	Archivo de registros de WIM, para su utilización dentro del programa DEEFEP.	108
B.1	Distribución de probabilidad bimodal que genera el programa DEEFEP.	110
B.2	Pantalla del módulo de análisis paramétrico para 2 archivos de registro WIM en el programa DEEFEP.	111
B.3.a	Pantalla del módulo de análisis paramétrico para 3 archivos de registro WIM en el programa DEEFEP, resultados numéricos.	112
B.3.b	Pantalla del módulo de análisis paramétrico para 3 archivos de registro WIM en el programa DEEFEP, resultados gráficos.	113
B.4	Ejemplos de líneas de influencia unitarias generadas por el programa DEEFEP.	115



Figura		Página
B.5	Líneas de influencia envolventes, para la determinación de la ubicación de la sección crítica en un puente de 2 claros. Programa DEEFEP.	116
B.6	Consideraciones para el análisis de líneas de influencia de la posición transversal de la viga de apoyo y la posición del vehículo dentro del carril de circulación.	117
B.7	Contribución de efectos por carril determinado por línea de influencia transversal considerando la posición de la viga de apoyo y la posición del vehículo al centro del carril de circulación.	118
B.8	Contribución de efectos por carril (superficie de influencia) determinado por línea de influencia transversal considerando la variación en la posición transversal de la viga de apoyo y la posición del vehículo al centro del carril de circulación.	119
B.9	Animación de la relación que une el efecto y cargas por eje de los vehículos determinados por líneas de influencia de momento flexionante. Programa DEEFEP.	119
B.10	Línea de influencia transversal para la determinación del factor de atenuación/amplificación de efectos por carril en puentes con más de dos apoyos.	120
B.11	Representación gráfica de la sección transversal del puente. DEEFEP.	121
B.12	Superficie de influencia unitaria, puente de 3 claros con 3 carriles de circulación. Programa DEEFEP.	121
B.13	Gráfico de resultados de superficie de influencia unitaria respecto al centro del eje del apoyo crítico. Programa DEEFEP.	122
B.14	Simulación animada del tráfico vehicular de registros WIM. DEEFEP.	126
C.1	Pantalla de inicio y presentación de la nueva versión del programa DEEFEP	127
C.2	Pantalla de módulo de depuración de datos.	129



Figura		Página
D.1	Modelo del Puente Auxerre.	132
D.2	Sección del puente Auxerre.	132
D.3	Determinación de la sección crítica del puente Auxerre a través del análisis de líneas de influencia envolventes.	133
D.4	Generación de la línea de influencia unitaria del puente Auxerre. Sección de análisis a centro de claro (sección crítica).	134
D.5	Cuadro de información de las líneas de influencia de esfuerzos por eje vehicular. Auxerre.	134
D.6	Serie de historia de esfuerzos obtenidos mediante líneas de influencia.	135
D.7	Generación del histograma de rainflow. Esfuerzos mediante líneas de influencia.	135
D.8	Valor de Miner y estimación de vida a fatiga. Esfuerzos mediante líneas de influencia. Puente Auxerre.	136
D.9	Asignación de las características geométricas del puente Auxerre.	137
D.10	Generación de la superficie de influencia unitaria del puente Auxerre de tres carriles. Sección de análisis a 200 dm (sección crítica).	137
D.11	Generación de superficie de influencia unitaria resultante del puente Auxerre. Sección de análisis a 200 dm (sección crítica).	138
D.12	Cuadro de información de las superficies de influencia de esfuerzos por eje vehicular.	138
D.13	Serie de historia de esfuerzos mediante superficies de influencia. Utilizando registró WIM en un sólo carril.	139
D.14	Generación del histograma de rainflow. Obtención de esfuerzos mediante superficies de influencia. Utilizando registro WIM en un sólo carril.	139



Figura		Página
D.15	Valor de Miner y estimación de vida a fatiga. Obtención de esfuerzos mediante superficies de influencia. Utilizando registro WIM en un sólo carril.	140
D.16	Cuadro de información de las superficies de influencia de esfuerzos por eje vehicular.	141
D.17	Serie de historia de esfuerzos mediante superficies de influencia. Utilizando registros WIM en dos carriles.	141
D.18	Generación del histograma de rainflow. Obtención de esfuerzos mediante superficies de influencia. Utilizando registros WIM en dos carriles.	142
D.19	Valor de Miner y estimación de vida a fatiga. Obtención de esfuerzos mediante superficies de influencia. Utilizando registros WIM en dos carriles.	142



I. INTRODUCCIÓN

El desarrollo tecnológico y social ha logrado que en las últimas décadas los vehículos pesados mejoren tanto en velocidad de circulación, como en capacidad de carga, asimismo, actualmente se presenta un incremento pronunciado en densidad del tráfico vehicular tanto a nivel nacional como mundial. Por otro lado, la infraestructura vial va agotando su período de vida útil, lo que conlleva a la necesidad prioritaria de estudiar el comportamiento de la interacción entre el tráfico pesado y dicha infraestructura, en particular a la necesidad de revisar los puentes. Además, gran parte de la infraestructura y puentes han sido diseñados con criterios y reglamentos previos a su construcción, por lo que dependiendo de su antigüedad será su vulnerabilidad ante las nuevas demandas.

Este trabajo de tesis, forma parte de una línea de investigación en proceso del cuerpo académico de Estructuras-Construcción-Transporte de la Universidad Autónoma de Querétaro, CA-ECT-UAQ: “Modelación analítica de sistemas físicos y experimentales”. Por lo anterior, se retomaron los trabajos realizados por Bárcenas (2011) en su tesis de maestría, donde la metodología propuesta de dicha investigación, como el programa desarrollado “Diagnóstico Estadístico y de Fatiga en Puentes, DEFP”, se mejoraron a través de la generalización de su aplicación, es decir, tomando en cuenta el efecto del tráfico pesado de varios carriles sobre el puente.

Asimismo, se creó un nuevo módulo de análisis paramétrico de escenarios de tráfico, tal que permita por un lado, realizar comparativas entre las leyes de distribución de las cargas y entre leyes de predicción de valores extremos de cargas esperadas de diseño, por otro lado, determinar las nuevas demandas, con datos de tráfico de peso medido en movimiento (weight in motion, WIM), a las que están siendo sometidos dichos puentes, asegurando mejores diagnósticos y pronósticos del comportamiento de los puentes.

También, dentro del módulo de determinación de momentos máximos en secciones críticas se ampliará el alcance, tomando en cuenta no sólo los efectos calculados por líneas de influencia de un carril sino tomando en cuenta efectos por superficies de influencia del tráfico pesado sobre varios carriles, que permitan determinar los esfuerzos y realizar los análisis de efectos de fatiga y extremos en puentes de acero de claro corto.



Finalmente, el programa DEFP (versión anterior) fue revisado en todos sus algoritmos para la validación de los métodos y procesos, será actualizado y mejorado, dándole presentación y un enfoque más amigable para el usuario, principalmente:

- Crear la pantalla de presentación al inicio del programa.
- Mejorar la estructura de la pantalla de trabajo, con una barra de menús que diferencie los diferentes tipos de análisis (tratamiento de datos, análisis estadístico, generación del líneas de influencia, análisis de fatiga, efectos extremos, ayuda, entre otros), por otro lado, hacer independientes cada una de las tareas a necesidad del usuario, esto también permitirá potencializar la interacción con las diferentes tareas y darle mayor claridad a dichas tareas.
- Un enfoque más amigable, creando un campo de trabajo donde se puede manipular y visualizar todos los módulos, sin necesidad de crear nuevas ventanas.
- Facilitar la presentación de los gráficos pudiendo seleccionar las gráficas de interés a discreción del usuario y de la tarea.

La nueva versión del programa, revisado y actualizado, lleva por nombre “**Diagnóstico Estadístico, Efectos de Fatiga y Extremos, en Puentes, DEEFEP**”, único en su tipo, ya que aún no se han recientemente desarrollado programas de este tipo, para fines comerciales y/o no se tiene conocimiento de su existencia. La contribución de esta herramienta de sistematización del análisis de diagnóstico de puentes sometidos a carga de tráfico pesado, será principalmente en facilitar la tarea de revisión masiva de puentes de acero existentes ante las nuevas demandas de tráfico pesado, tanto a nivel nacional como mundial.

1.1. Descripción del problema

Con el paso del tiempo, las estructuras se van degradando, acumulando deformaciones, entre otros efectos, causadas por las cargas a las que están sometidas, cuando estas deformaciones rebasan el límite elástico, o elasto-plástico de los materiales, surgen fracturas que en ocasiones llegan a provocar daño estructural (Hibbeler, 1997).

Alrededor del mundo, se pueden ver construcciones antiguas que siguen siendo funcionales. Los puentes son una de las estructuras más comunes que existen desde hace varios siglos. Los puentes de acero y concreto reforzado se construyeron por primera vez a principios



del siglo XX, con técnicas que para ese entonces eran las adecuadas. Como consecuencia, actualmente muchas de estas construcciones presentan daños estructurales importantes, debido al incremento del tráfico vehicular.

Es normal que estas estructuras ya no sean aptas para su finalidad. Por otra parte, el envejecimiento de las estructuras es inevitable y su remplazo tiene grandes dificultades físicas y económicas. Aunado a la falta de recursos, no existe suficiente información de las vialidades, lo que complica su estudio.

En nuestro país, la necesidad de conservar el inventario de puentes de la Red Federal de Carreteras ha llevado a proponer un sistema de administración de puentes, que no sólo contenga información relevante de los puentes, sino que incorpore módulos de capacidad de carga y vida útil, además de módulos económicos en la estimación de costos de rehabilitación y un modelo de asignación de prioridades de conservación, basándose en información objetiva, actualizada y completa del estado de las estructuras (Carrión et al, 2006).

A partir de lo anterior, el interés del tema se ha incrementado, dada la necesidad de seguir operando a los puentes en las condiciones existentes y a la escasez de recursos económicos para mantenerlos, rehabilitarlos, o en el peor de los casos, realizar su reposición.

Gran parte del deterioro de los puentes, durante su vida útil, se debe al fenómeno de fatiga. La fatiga se presenta en elementos de acero y concreto reforzado sometidos a cargas cíclicas, pero en elementos de concreto presforzado, los cambios de tensión bajo cargas repetitivas no son críticos. Con la evolución de nuevas técnicas de construcción, ahora es común encontrar elementos parcialmente presforzados, en los cuales la fatiga debe considerarse (Gutiérrez et al, 1991).

Estudios recientes (Bangoura A., 2007; Crespo S., 2011) sobre los efectos de fatiga en puentes dependen de simulaciones de cargas, como aquellas obtenidas por la simulación Monte Carlo. Sin embargo, los efectos determinados a partir de escenarios de cargas de tráfico real, pueden ser más representativos que aquellos determinados a partir de escenarios de tráfico generados artificialmente (Getachew, 2003), razón por la cual, en este trabajo de investigación se utilizan registros con datos reales de tráfico vehicular tanto para el proceso de cálculo de la vida a fatiga, como para el tratamiento en los diferentes módulos del software desarrollado.



Desafortunadamente el registro de pesaje en movimiento WIM en las carreteras mexicanas es prácticamente nulo. Por lo tanto, es urgente que las autoridades gubernamentales responsables de la red carretera tomen la iniciativa para realizar la instrumentación WIM en las vialidades de mayor demanda de tráfico pesado.

1.2. Justificación

Los puentes son estructuras que forman parte de la infraestructura vial que permiten librar obstáculos topográficos o intersecciones con otras vialidades.

Actualmente, se presenta a nivel mundial un incremento pronunciado tanto en densidad como en la capacidad de carga del tráfico pesado, aunado al hecho inevitable del envejecimiento y deterioro de la infraestructura existente del transporte pesado, provocándose de esta manera una aceleración en el proceso de deterioro y un aumento en los costos de mantenimiento y rehabilitación de éstas estructuras.

Con el paso del tiempo, los puentes van acumulando deformaciones debido a las demandas a las que están sometidos, cuando estas deformaciones rebasan los límites elásticos o elasto-plásticos de los materiales surgen fracturas que pueden llegar a provocar daño estructural. Por lo anterior, existe una necesidad prioritaria de revisar los puentes ante las demandas actuales.

Actualmente se puede disponer de métodos visuales y experimentales para la detección de daño, pero estos métodos son poco viables debido al hecho de que se tiene que tener acceso a todas las partes del puente para poder realizar la evaluación, además de requerir de personal técnico calificado.

Dada la necesidad de evaluar la vida remanente ante fatiga con las nuevas demandas de los puentes carreteros de acero, sería de gran ayuda contar con una herramienta alternativa que integre la metodología que permita realizar este tipo de evaluaciones, sin necesidad de realizar instrumentaciones, pruebas destructivas, ni de requerir de personal técnico calificado como en el caso de inspecciones visuales. Además de que facilite el trabajo y permita ahorro de tiempo al sistematizar los procesos.



En la mayoría de los estudios de cargas vehiculares y sus efectos en puentes que se han realizado, se utilizan diversos programas para tratar los diferentes aspectos que implica el estudio (programas de análisis estadístico, de cálculo de líneas y superficies de influencia, de interacción carga-estructura, entre otros), además de extender el tiempo de trabajo por el hecho de no sistematizar los procesos.

El objeto del programa DEEFEP es utilizarse como una herramienta que permita hacer el análisis estadístico de cargas, identificar y realizar comparativas de las leyes de distribución de las variables, pronosticar valores extremos de pesos, realizar el cálculo de líneas y superficies de influencia y estimar la vida a fatiga, siendo de gran ayuda para realizar la evaluación del comportamiento de puentes de acero ante tráfico pesado.

El conocer las características de flujo vehicular determinadas a partir de un análisis comparativo entre las leyes de distribución y de valores extremos bajo diferentes escenarios de tráfico, y los efectos de fatiga en puentes, nos permite realizar intervenciones tempranas, así como tener información que puede servir como punto de partida para regular el tráfico vehicular y de esta manera prevenir daños estructurales causados por la sobrecarga vial que llevarían a gastos excesivos.

Por otro lado, el determinar los efectos de fatiga a través de la determinación de esfuerzos por superficies de influencia es una estimación más real y precisa que los determinados por medio de líneas de influencia, ya que en dicho análisis se toma en cuenta al puente modelado no sólo como una viga, sino como una superficie plana, además de, una representación del flujo de tráfico acorde con la realidad.

1.3. Hipótesis y objetivos

Hipótesis General:

El comportamiento de puentes existentes puede ser tratado utilizando métodos convencionales de análisis, diseño y estadística, así como, sustentado en reglamentos existentes, por mencionar el Eurocode, AASHTO y SCT. Además, estos procedimientos pueden ser sistematizados de manera integral, dado que en la actualidad se resuelven los problemas



aplicando diferentes programas. En particular, es posible realizar una actualización y mejora al paquete de cómputo DEFP (Diagnóstico Estadístico y de Fatiga en Puentes, desarrollado en la DIP-UAQ) tal que integre la metodología que facilite el pronóstico de dicho comportamiento de los puentes ante cargas vehiculares pesadas.

Objetivo General:

Estudiar el comportamiento de puentes de acero de claros cortos (hasta 40 m) sistematizando los procesos donde se determine principalmente los efectos producto del tráfico pesado sobre varios carriles, por medio de superficies de influencia, y con ello estimar el comportamiento de la estructura ante efectos de fatiga y extremos en puentes de acero de uno, dos y tres claros, teniendo como variables los datos de escenarios de tráfico real de Weight In Motion (WIM) de vialidades francesas, además de revisar, actualizar, corregir y mejorar el programa DEFP, integrando la metodología mediante módulos donde se sistematicen los procesos de análisis paramétricos de escenarios de tráfico vehicular, así como, los de determinación de esfuerzos por superficies de influencia.

Objetivos particulares:

Para cumplir con el objetivo general, es necesario cumplir los siguientes objetivos particulares que de él se derivan:

- **Objetivo 1:** Realizar una revisión de los algoritmos del programa DEFP, con el objeto de validar tanto algoritmos como procesos.
- **Objetivo 2:** Integrar un módulo de tratamiento de archivos donde se pueda manipular los registros de escenarios de tráfico vehiculares para adecuar al formato que se utiliza en el programa creado DEEFEP.
- **Objetivo 3:** Desarrollar un módulo de análisis comparativo entre leyes de distribución de cargas y/o esfuerzos con escenarios de tráfico real con diferentes fechas de registro en una misma vialidad y entre diferentes vialidades, para conocer las nuevas demandas a las que están sometidas las estructuras, así como ver la manera en la que ha ido evolucionando el tráfico con el objeto de realizar mejores predicciones.



- **Objetivo 4:** Obtener los esfuerzos máximos a través del método de línea y superficie de influencia en secciones críticas de puentes de acero de uno, de dos claros (iguales o diferentes) y de tres claros (iguales los extremos y diferente el central), modelados como vigas continuas (líneas de influencia) y/o planos de superficie (superficies de influencia), haciendo uso de métodos y principios de comportamiento elástico-lineal. Lo anterior con la finalidad de realizar representaciones de interacción tráfico-puente, más acordes con la realidad.
- **Objetivo 5:** Sistematizar y validar la metodología propuesta, con el objeto de hacer una herramienta práctica que permita ahorrar tiempo y facilite los cálculos.
- **Objetivo 6:** Desarrollar un Manual de Operación para el manejo del programa DEEFEP DIP-UAQ, y algunos ejemplos ilustrativos.

1.4 Alcances y limitaciones

El programa actualizado DEEFEP proporciona resultados de manera numérica y gráfica, con lo cual se facilita el estudio de los puentes y se genera la información necesaria para la evaluación de los mismos. A continuación se describen los alcances y limitaciones de esta investigación, que a su vez, se consideraron dentro del desarrollo del programa.

1.4.1. Alcances

Los alcances engloban tanto el análisis paramétrico de cargas, determinación de esfuerzos máximos y secciones críticas a través de superficies de influencia de puentes carreteros de acero, así como la revisión, actualización, corrección (en su caso) y mejora del software DEFP, estructurando el programa por medio de módulos, dándole presentación y creando representaciones gráficas interactivas de resultados, haciéndolo de uso más amigable para el usuario.

En particular, se realiza la sistematización y aplicación del módulo de análisis paramétricos de diferentes escenarios de cargas vehiculares de WIM con la finalidad de conocer y poder realizar una comparativa tanto numérica como gráfica de las distribuciones probabilísticas y los rangos de demanda que presentan algunos puentes carreteros de Francia.



Así mismo, se realiza el análisis de superficies de influencia, para determinar los momentos flexionantes máximos en las secciones críticas de la estructura, ya que el análisis por medio de superficies de influencia nos permite modelar al puente como un plano, lo cual nos garantiza una determinación más precisa de los efectos producto de las cargas vehiculares sobre varios carriles que los realizados por medio de análisis de líneas de influencia.

1.4.2. Limitaciones

Este trabajo de tesis se limita a integrar y sistematizar una metodología propuesta, principalmente, de análisis paramétricos utilizando diversos escenarios reales de tráfico WIM, así como, análisis de superficies de influencia para la determinación de momentos flexionantes máximos en las secciones críticas en la cual sólo se considera hasta 3 carriles de circulación y que en el flujo de tráfico, el vehículo que ingresa permanecerá en el mismo carril dentro del puente, por lo cual no se toman en cuenta situaciones atípicas de flujo de tráfico, como el cambio de carril dentro del puente y posibles obstrucciones de carriles por cuestiones de mantenimiento o a causa de accidentes.

En general, por cuestión de limitación en el tiempo de desarrollo de esta tesis, dentro de la metodología que se sustenta el programa actualizado DEEFEP, no se toman en cuenta el peso propio del puente, las vibraciones, efectos dinámicos, fenómeno de corrosión, fractura, intemperismo y comportamiento estructural no lineal, entre otros fenómenos, sin embargo, se sugiere que en estudios posteriores se vayan tomando en cuenta dichos fenómenos e integrando dentro de la metodología del programa.

II. ESTADO DEL ARTE

Desde los años ochenta, en el “Laboratorio Central de Puentes y Caminos, LCPC” se han realizado trabajos encaminados al estudio de la demanda de tráfico pesado en puentes de Francia (Jacob et al, 1989). O'Connor (1991) y O'Brien et al (2001) continuaron realizando análisis de cargas de tráfico y sus efectos, utilizando simulaciones basadas en datos estadísticos. A partir de estos trabajos y otros estudios recientes (Arroyo, 2009), el interés del tema se ha incrementado, dada la necesidad de seguir operando a los puentes en las condiciones existentes y a la escasez de recursos económicos para mantenerlos, rehabilitarlos, o en el peor de los casos, realizar su reposición.

Por otro lado, es necesario conocer los efectos de fatiga en puentes para poder realizar intervenciones tempranas y evitar fallas estructurales que llevarían a gastos excesivos. Actualmente, podemos disponer de programas como el CASTOR (Jacob et al, 1989) y la interfaz POLUX (LCPC, 2008), que permiten hacer la evaluación de puentes ante escenarios de tráfico. Sin embargo, estos programas tienen ciertas limitantes que aumentan el tiempo de cálculo, como el hecho de tener que introducir manualmente las líneas de influencia, el no contar con un interfaz gráfico, entre otras, lo que conlleva a usar programas alternos para poder interpretar y visualizar los resultados. El programa CASTOR fue desarrollado en Francia, con sistemas operativos de los años ochenta y su actualización se ha atrasado. POLUX es de reciente creación, pero éste es sólo un interfaz para manipular la información de los registros de WIM, y utiliza el algoritmo de CASTOR para la evaluación de vida a fatiga.

Con el fin de dar una aportación para el estudio del tema planteado, V. Bárcenas en el 2011, en su tesis de Maestría de la División de Investigación y Posgrado de la Universidad Autónoma de Querétaro (DIP-UAQ), desarrolla una metodología para el análisis estadístico de cargas y efectos de fatiga en puentes carreteros de acero. Sistematizando dicha metodología creando un programa de cómputo que lleva por nombre “DEFP- Diagnóstico Estadístico y de Fatiga en Puentes” desarrollado con algoritmos en lenguaje C++ en el compilador Microsoft Visual Studio (Figura 2.1), donde todo el trabajo se sustenta primordialmente en la medición y manejo de datos de pesaje dinámico WIM.



Figura 2.1. Icono de DEFP-Diagnóstico Estadístico y de Fatiga en Puentes (Imagen tomada del mismo programa).

El paquete de cómputo DEFP, realiza un proceso similar a CASTOR, con la ventaja de que presenta los resultados en forma gráfica, calcula las líneas de influencia y hace el análisis estadístico de los registros de cargas vehiculares para conocer y pronosticar los pesos máximos.

Sin embargo, el paquete de computo DEFP requiere de un módulo de análisis paramétrico ante diferentes escenarios de tráfico que permita realizar una comparativa entre las leyes de distribución y de valores extremos para asegurar un pronóstico sustentable del comportamiento del puente, además de un módulo donde para el análisis de fatiga, la determinación de esfuerzos se realice por medio de superficies de influencia para garantizar una estimación más precisa de los efectos producidos por el tráfico vehicular real. La sistematización de esta metodología propuesta servirá de gran ayuda para la enorme tarea de revisión masiva de puentes.

2.1. Marco teórico

El presente análisis del comportamiento de los puentes ante escenarios de tráfico pesado, se enmarca en un entorno de riesgo probabilista, con variables de cargas aleatorias, y predicciones de comportamiento futuro de los puentes ante el fenómeno de fatiga y los efectos extremos esperados. Además, con el afán de facilitar el cálculo, en este trabajo se retoma el programa DEFP, de interfaz gráfico, elaborado en el lenguaje C++, con el compilador Microsoft Visual Studio, la metodología que sustenta a dicho programa, se complementa con un módulo de análisis paramétrico ante diferentes escenarios de tráfico y un módulo de determinación de momentos máximos en secciones críticas por medio de análisis de superficies de influencia para a



partir de ello determinar esfuerzos y realizar análisis de efectos de fatiga y extremos de tráfico pesado en puentes de acero.

En particular, se realiza la sistematización y aplicación del módulo de análisis paramétricos de diferentes escenarios de cargas vehiculares de WIM con la finalidad de conocer y poder realizar una comparativa tanto numérica como gráfica de las distribuciones probabilísticas y los rangos de demanda que presentan algunos puentes carreteros de Francia. Así mismo, con un nuevo módulo de análisis de superficies de influencia, es posible determinar los momentos flexionantes máximos en las secciones críticas de la estructura, ya que el análisis por medio de superficies de influencia nos permite modelar al puente como un plano, lo cual nos garantiza una determinación más precisa de los efectos producto de las cargas vehiculares que los realizados por medio de análisis de líneas de influencia.

2.2. Sistemas de pesaje en movimiento en puentes

Las estaciones de pesaje estático son la forma más común de medir la carga de los vehículos, por lo que han estado en funcionamiento durante muchos años en la mayoría de las carreteras federales de varios países con el fin de garantizar que los camiones de carga no sobrepasen los pesos jurídicamente permitidos en las localidades correspondientes. Desafortunadamente, las estaciones existentes no son suficientes ante el aumento del tráfico vehicular de transporte pesado, lo que provoca que aumente la longitud de las colas durante el pesaje. Como consecuencia, se ven transitando ilegalmente camiones con sobrecarga a través de las redes viales (Katz, 2001).

Liljencrantz et al, (2007) mencionan que dentro de la comunidad de ingeniería de puentes, existe un interés considerable en el problema de medir las cargas de tráfico, así como también los efectos que éstas producen sobre la estructura.

Europa es el lugar donde la implementación del pesaje en movimiento ha tenido mayor impacto, por ejemplo, en la publicación de O'Brien et al. (2001) se menciona el proyecto denominado WAVE (Weighing-in-motion of Axles and Vehicles for Europe), donde se realiza el estudio de pesaje dinámico en carreteras y puentes Europeos, con el fin de hacer frente a los requisitos de las investigaciones actuales.



Caprani et al. (2008), realizaron un estudio teórico de los efectos del tráfico vehicular ante algunos eventos de carga, registrados en puentes de claro corto y mediano. Mencionan la importancia de la evaluación de los puentes carreteros ante la demanda vehicular, lo cual ha sido reconocido como un área con la que se puede ahorrar y evitar rehabilitaciones o reemplazos estructurales. Además, desarrollan un enfoque alternativo con métodos estadísticos para encontrar los efectos ante fatiga típicos. Dentro del desarrollo muestran la aplicación de métodos de valores extremos, para el cálculo de pesos máximos probables, y se utilizan datos reales para mostrar la diferencia entre las técnicas estadísticas convencionales y el enfoque que han planteado.

En México, uno de los trabajos realizados en el Instituto Mexicano del Transporte (IMT) es el publicado por Hernández et al (2004) donde se describe el desarrollo de un dispositivo prototipo para estimar el peso de vehículos ligeros desplazándose a bajas velocidades. El diseño se basa en el concepto de flexión de placas en voladizo y en la aplicación de la técnica de extensometría. Los sensores de deformación, comúnmente conocidos como galgas extensométricas, se disponen en un arreglo denominado puente de Wheatstone. El trabajo incluye pruebas con un prototipo preliminar simplificado de laboratorio y un prototipo con mayor capacidad de carga y mayor alcance de la instrumentación. Los resultados con el prototipo preliminar mostraron un buen comportamiento estático del diseño y de la instrumentación empleada, validando los principios aplicados. El prototipo final mostró un buen comportamiento en condiciones de pesaje estático, así como dinámico con vehículos pequeños circulando a velocidades menores a 10 km/h, independiente de la trayectoria del paso de las llantas sobre el dispositivo. Velocidades mayores, así como el paso de vehículos de mayor peso y dimensiones, produjeron un funcionamiento inadecuado del prototipo de pesaje.

2.3. Análisis estadístico y de valores extremos

En México, la Secretaría de Comunicaciones y Transporte (SCT) y el Instituto Mexicano del Transporte (IMT) son los encargados de realizar la mayor parte de los estudios sobre las redes viales. Existen aproximadamente 9 mil puentes dentro de la red federal de carreteras de México (Carrión et al, 2006). Con respecto a la base de datos que se tiene en México, la SCT y el IMT utilizan dos sistemas de gestión vial desde 1992, uno llamado SISTER (Simulación de Estrategias



de Mantenimiento Carretero, por sus siglas en francés) y el SIPUMEX (Sistema de Puentes de México), que les permite determinar de manera sistemática, los trabajos de conservación requeridos en las carreteras federales libres de peaje.

Sistema de Puentes de México (SIPUMEX) permite contar con un inventario de la totalidad de los puentes de la Red Federal de Carreteras, en el que se incluyen las características, ubicación y estado físico. Ello permite efectuar una priorización de las necesidades de mantenimiento y rehabilitación.

Mendoza et al. (1991) realizaron para el Instituto Mexicano del Transporte (IMT) una serie de análisis estadísticos de pesos y dimensiones de los vehículos que circulan sobre las carreteras mexicanas para conformar un entorno de operación de los vehículos pesados, en materia de pesos y dimensiones, permitiendo proteger a los pavimentos y puentes de un excesivo deterioro y eventual colapso. Los análisis en este informe se basaron en los valores reglamentados en 1980. La carencia de un sistema adecuado de control de pesos y dimensiones ha traído como consecuencia que se observen muchas violaciones a la reglamentación. Parte de este estudio consistió en implementar, sobre las carreteras troncales más importantes de la República, una serie de estaciones para la medición de pesos y dimensiones de los vehículos de carga.

Dentro del análisis estadístico se pueden realizar análisis de diferentes variables, como puede ser el caso de velocidades, cargas, distancias entre ejes, etc., y en estos análisis se presentan curvas de ajuste con las que la distribución de los datos puede ser descrita.

Dentro de estas curvas de distribución la más conocida es la Distribución Normal o campana de Gauss, y este tipo de distribución es el que mejor se ajusta en datos de velocidades debido a que se considera una variable continua que tiene su punto de inflexión dentro de un rango intermedio de magnitud.

La distribución normal es una distribución de variable continua que queda especificada por dos parámetros de los que depende su función de densidad y que resultan ser la media y la varianza de la distribución. Su estudio teórico suele introducirse directamente a partir de su función de densidad.



$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \tag{2.1}$$

donde:

μ , es la media aritmética.

σ^2 , es la varianza.

x , es la variable aleatoria de velocidades de tráfico vehicular.

σ , es la desviación estándar.

La gráfica de su función de densidad tiene una forma acampanada y es simétrica respecto de un determinado parámetro estadístico.

Dentro del estudio estadístico de cargas, dada a la forma que tienen la mayoría de los histogramas de frecuencia relativa de las cargas de vehículos pesados, se ha llegado a la conclusión que la distribución de probabilidad bimodal es la que mejor se ajusta, debido a que se presentan una tendencia bien definida de dos modas (Arroyo, 2009).

Esta distribución es descrita de la forma:

$$F(x) = \sum_{i=1}^n p_i \Phi\left(\frac{x-\mu_i}{\sigma_i}\right) \tag{2.2}$$

donde:

Φ , es la función que se ajusta a la curva de distribución (normalmente exponencial).

p_i , es la constante de proporcionalidad que divide a las poblaciones de datos.

μ_i , es la media aritmética de la población i .

σ_i , es la desviación estándar de la población i .

x , es la variable aleatoria de carga de tráfico vehicular.

Para la distribución de probabilidad de todos los datos, descrita por la ecuación (2.2), son válidas las siguientes ecuaciones:

$$\sum_{i=1}^n p_i = 1 \tag{2.3}$$

$$\mu = \sum_{i=1}^n p_i \mu_i \tag{2.4}$$



$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^n p_i \sigma_i^2 + \sum_{i=1}^n p_i (\mu - \mu_i)^2} \tag{2.5}$$

El conocer la distribución multimodal de los histogramas de frecuencia relativa, permite determinar los parámetros de ésta, necesarios para el estudio de valores extremos de los Métodos de Poisson y Gumbel (Arroyo, 2009).

Por lo anterior, La distribución bimodal se expresa de la forma:

$$f(x) = \frac{p}{\sqrt{2\pi}\sigma_1} \exp\left(-\frac{(x - \mu_1)^2}{2\sigma_1^2}\right) + \frac{1-p}{\sqrt{2\pi}\sigma_2} \exp\left(-\frac{(x - \mu_2)^2}{2\sigma_2^2}\right) \tag{2.6}$$

donde:

p , es la constante de proporcionalidad para la primera población de datos.

μ_i , es la media aritmética de la población i .

σ_i , es la desviación estándar de la población i .

x , son las variables aleatorias.

Una vez obteniendo el parámetro p , se pueden deducir los demás parámetros de la distribución para cada población de datos (m_1, m_2, σ_1 y σ_2).

Las características de la curva bimodal serán determinantes en el análisis de valores extremos de cargas vehiculares. La teoría de valores extremos proporciona técnicas simples para la estimación de probabilidades de ocurrencia de niveles extremos en registros de datos históricos. Para la evaluación del estado de deterioro de los puentes, es necesario conocer la frecuencia y el período de retorno de intervalos de registros de cargas.

Arroyo et al. (2009) mencionan la importancia de los valores extremos para la predicción de pesos máximos esperados y el impacto que esto tiene con respecto a la vida remanente de los puentes. A su vez, hacen la comparación de varios métodos como el de Valores Extremos Generalizado (General Extreme Value, GEV), el Modelo de Gumbel Asintótico (Gumbel Asymptotic Model), el Proceso de Poisson Suavizado (Thinned Poisson Process) y un

método empírico de máximos diarios-anual. Para la aplicación de estos métodos, se utilizaron registros de tráfico vehicular de autopistas y carreteras francesas, proporcionados por el LCPC.

2.4. Determinación de esfuerzos

El envejecimiento de los puentes carreteros es inevitable, aunado al hecho del incremento en densidad y carga de los vehículos pesados. Por lo tanto, la evaluación de la vida remanente de los puentes es prioritaria para estar en condiciones de realizar una prevención temprana y así evitar accidentes relacionados con posibles fallas estructurales. Dentro de esta evaluación, la determinación de esfuerzos es de suma importancia para el análisis de fatiga.

Es común que los ingenieros analicen como una primera aproximación las estructuras considerándolas sometidas sólo a cargas fijas o estáticas equivalentes, sin embargo, en la práctica también es necesario considerar que las estructuras están sujetas a cargas dinámicas o móviles. Un ejemplo típico son los puentes, que están sujetos al constante y cambiante tráfico vehicular (Hibbeler, 1997).

Los elementos estructurales deben diseñarse para las condiciones más severas o críticas que puedan presentarse o desarrollarse en ellos. En un puente comúnmente es posible determinar por inspección donde colocar las cargas para obtener los efectos críticos, pero cuando esto no sea tan evidente, es necesario recurrir a criterios y diagramas que permitan encontrar sus localidades (Mc Cormac, 2002). El más útil de esos recursos es a través de la determinación de las *líneas de influencia*. Estas se definen como diagramas que representan la variación de las reacciones, momentos o cortantes en un punto específico de un miembro estructural, a medida que una fuerza concentrada se desplaza a lo largo del elemento (Hibbeler, 1997).

El cálculo de un efecto elemental está determinado por el conocimiento de su línea de influencia (o superficie de influencia si los efectos transversales son significativos). Si asumimos que los efectos varían linealmente con respecto a las cargas, el efecto total producido por varias cargas es obtenido por la adición de efectos elementales. (Gorse, 1989).

El sistema de WIM proporciona la información de cargas en movimiento que puede ser utilizada para determinar teóricamente los esfuerzos, haciendo uso del cálculo de líneas de



influencia y teorías de comportamiento elástico (Jacob et al, 1989). Los esfuerzos también pueden obtenerse por medio de galgas extensométricas, sensores de deformación u otros instrumentos.

Otra manera de obtener teóricamente los esfuerzos en las secciones críticas de un puente, o en sus elementos, es a partir del cálculo de superficies de influencia, realizando simulaciones utilizando registros de tráfico real y aplicando métodos teóricos de análisis estructural, los efectos son calculados con principios elástico-lineales y la teoría de superposición de cargas, determinando primeramente una superficie de influencia unitaria, variando una carga unitaria por carril a lo largo del puente, modelado primeramente como viga continua, y posteriormente considerar la influencia de amplificación o atenuación de efectos producto por carga vehicular en carriles adyacentes, dependiendo enormemente del ancho de los carriles y de la cantidad y posición transversal de los apoyos, generándose una línea de influencia transversal para poder determinar la contribución de los efectos por carril.

Posteriormente, se hace circular el flujo de tráfico real sobre el puente, a medida que el programa mueve los registros de pesaje vehicular a lo largo de la estructura del puente, carril por carril, preservando los pesos y espacios de cada eje, así como la distancia entre los vehículos registrados, se calculan los efectos multiplicando los pesos de los vehículos por su influencia de efecto de acuerdo a su posición y aplicando la teoría de superposición de cargas. Con lo anterior, se genera la historia de esfuerzos máximos para un punto específico (Patín inferior de la viga crítica en la sección crítica).

Un software desarrollado para la estimación de efectos de tráfico vehicular es el desarrollado por Gorse J. F. (1989), TRAFMULTI, el cual se basa en una primera versión de un software denominado TRAFMUL, el cual simula los efectos en el tiempo en un puente a partir de la generación de líneas de influencia de escenarios de tráfico real; la nueva versión TRAFMULTI, no sólo genera las líneas de influencia, sino que permite la consideración del flujo vehicular en posiciones transversales (con varios carriles de circulación), lo que en base a estudios comparativos, permite un modelado más realista, así como una mayor flexibilidad de uso.



Este enfoque es distinto de la simulación estocástica de tráfico: realmente se puede estimar la distribución de valores de efectos suponiendo la composición y la ley de flujo de tráfico combinado con las líneas de influencia. También es menos caro e infinitamente más flexible que la grabación experimental directa de los efectos deseados en las estructuras.

TRAFMULTI determina para un carril, la relación que une el efecto $E(t)$ y cargas por eje de N vehículos en la zona de influencia, por medio de:

$$E(t) = \sum_{\substack{n \in [1, N] \\ k \in [1, N_n]}} P_{kn} L_{\sigma}(v_n(t - t_n) - x_{kn}) \quad (2.7)$$

donde:

$E(t)$: Efecto causado por cargas por eje, respecto al tiempo de registro, dado en términos de momento flexionante KN-m.

L_{σ} : línea de influencia unitaria de momento flexionante, respecto a la sección σ , (KN-m/KN, normalizada a una carga de KN);

V_n : Velocidad del vehículo n (m/s);

t_n : la hora de llegada del primer eje del vehículo n (seg.);

X_{kn} : distancia del eje k al primer eje del vehículo n (m);

P_{kn} : Peso sobre el eje k del vehículo n (KN);

N_n : número de eje de un vehículo n ;

N : registro WIM con datos entre unos pocos miles y decenas de miles de vehículos.

Dicha ecuación expresa el efecto total producido por el tráfico vehicular real WIM en todo momento, como una combinación lineal de efectos elementales $L_{\sigma}(v_n(t - t_n) - x_{kn})$ ponderada por el peso de los ejes P_{kn} de N vehículos ubicada en la dentro de la zona de influencia.

De la misma manera TRAFMULTI determina para varios carriles, la relación que une el efecto $E(t)$ y cargas por eje de N vehículos en la zona de influencia, por medio de:

$$E(t) = \sum_{\substack{n \in [1, N] \\ k \in [1, N_n]}} P_{kn} S_{\pi}(v_n(t - t_n) - x_{kn}, y_n) \quad (2.8)$$

donde:

$E(t)$: Efecto causado por cargas por eje, respecto al tiempo de registro, dado en términos de momento flexionante KN-m.

y_n : Posición transversal de un eje (m), todos los ejes n tienen la misma posición.

S_π : Superficie de influencia unitaria en términos de momento flexionante (KN-m), respecto a la sección σ ;

V_n : velocidad del vehículo n (m/s);

t_n : la hora de llegada del primer eje del vehículo n (seg.);

X_{kn} : distancia del eje k al primer eje del vehículo n (m);

P_{kn} : Peso sobre el eje k del vehículo n (KN);

N_n : número de eje de un vehículo n ;

N : registro WIM con datos entre unos pocos miles y decenas de miles de vehículos.

La ecuación (2.8) muestra las variables descriptivas de tráfico útil, y los tipos de operaciones necesarias para calcular los efectos.

Determinación de esfuerzos a partir de los momentos máximos de las líneas de influencia

De acuerdo a la teoría elástica, para la determinación de los esfuerzos σ (KN/m²), producto del paso vehicular sobre el puente, se requieren obtener los momentos flexionantes M (KN-m) y conocer el módulo de sección S (m³):

$$\sigma_{\max} = \frac{M}{S} \quad (2.9)$$

2.5. Análisis de fatiga

Por otra parte, una de las acciones a las que se atribuyen la falla en diversas estructuras es la fatiga, ésta se define como el daño de un material resultante de la aplicación de esfuerzos repetitivos (carga cíclica).

Jacob et al. (1989) y O'Connor (1991), presentan en sus publicaciones un programa llamado CASTOR, elaborado por el Road and Motorway Technical Studies Department-SETRA para el LCPC en Paris, Francia. Este programa hace simulaciones utilizando registros de tráfico

real y aplicando métodos teóricos de análisis estructural, realizando así la evaluación de puentes. En el programa CASTOR es necesario generar e ingresar los datos de las líneas o superficies de influencia para poder hacer el análisis de fatiga. Los efectos son calculados con principios elástico-lineales y la teoría de superposición de cargas, a medida que el programa mueve los registros de pesaje vehicular a lo largo de la estructura del puente, carril por carril, preservando los pesos y espacios de cada eje, así como la distancia entre los vehículos registrados. Finalmente, CASTOR hace la evaluación de fatiga a través del conteo de ciclos de esfuerzos, utilizando el método de rainflow y la aplicación de la regla de Miner, con lo cual se estima la vida remanente del puente.

Crespo (2011), en su trabajo de tesis de la Universidad Autónoma de Querétaro en conjunto con el IMT, desarrolló una investigación donde analiza la confiabilidad estructural de piezas de la superestructura de puentes de concreto reforzado sujetas a efectos de fatiga generando escenarios de carga mediante simulación Montecarlo con datos obtenidos de estudios de pesos de vehículos en las carreteras más transitadas de México.

Dentro de la metodología desarrollada por Bárcenas (2011) se encuentra el módulo de cálculo de momentos y esfuerzos a través de líneas de influencia, donde fue necesario determinar las expresiones de las variaciones de dichas líneas de influencia. Para esto utilizó métodos de análisis estructural, basados en principios de comportamiento elástico-lineal, como el método de los Tres Momentos, equilibrio estático y el principio de causas y efectos en la superposición de cargas. Además, corroboró los resultados con el método de análisis matricial de rigideces.

Con el método de *rainflow* y los *histogramas de rainflow* correspondientes, se obtiene el número de ciclos de esfuerzos y sus magnitudes, posteriormente se puede evaluar teóricamente la vida a fatiga usando la *regla de Palmgren-Miner*, que proporciona *índices de daño*, finalmente, con esto se estima la vida remanente de la estructura (Jacob et al, 1989).

La caracterización de la fatiga en puentes carreteros mediante el análisis de alto número de ciclos de esfuerzos es lo más adecuado cuando la estructura está sometida a una constante variación de cargas, como ocurre con el tráfico vehicular.



Los fundamentos para la predicción de *vida a fatiga* se basan en las propiedades de los materiales obtenidas en laboratorio, ensayando con pequeños especímenes, sujetos a cargas dinámicas hasta la falla o aparece la primera grieta, generando así, gráficas de esfuerzos contra número de ciclos, también conocidas como *curvas S-N*. El método de historia de esfuerzos asume que la vida del espécimen en el laboratorio se puede relacionar con la vida de la estructura real (Lindorf et al, 2010, Castillo et al, 1985). Es más, se asume que las cargas utilizadas en la estimación de vida a fatiga de la estructura son tensiones o deformaciones locales en posiciones críticas.

En esta investigación se retoman los trabajos realizados por Bárcenas (2011), tanto la metodología propuesta como el programa DEFP, dicha metodología se complementará con un módulo de análisis paramétrico ante diferentes escenarios de tráfico, y un módulo de determinación de momentos máximos en secciones críticas por medio de análisis superficies de influencia para a partir de ello determinar esfuerzos y realizar análisis de efectos de fatiga y extremos de tráfico pesado en puentes de acero. El programa DEFP será revisado en sus algoritmos para la validación de métodos y procesos, será actualizado, complementado y mejorado, dándole presentación y un enfoque más amigable para el usuario, dando origen así al programa que lleva por nombre “**Diagnóstico Estadístico, Efectos de Fatiga y Extremos en Puentes, DEEFEP**”.

III. METODOLOGÍA

En este trabajo de tesis, se retomó el programa DEFP, de interfaz gráfico, elaborado en el lenguaje C++, con el compilador Microsoft Visual Studio, la metodología que sustenta a dicho programa se complementó con un módulo de análisis paramétrico ante diferentes escenarios de tráfico y un módulo de determinación de momentos máximos en secciones críticas por medio de análisis de superficies de influencia para a partir de ello determinar esfuerzos y realizar análisis de efectos de fatiga y extremos de tráfico pesado en puentes de acero.

El programa DEFP fue revisado en sus algoritmos para la validación de métodos y procesos, se actualizó y mejoró, estructurando el programa por medio de módulos, dándole presentación y creando representaciones gráficas interactivas de resultados, haciéndolo de uso más amigable para el usuario.

En general, la metodología que se retoma y la que se desarrolla en este trabajo de tesis, engloba procesos estadísticos, de valores extremos y de análisis de fatiga y efectos extremos, tomando en cuenta un conjunto de criterios que permiten dar un mejor enfoque a la problemática de deterioro de los puentes, producto del tráfico vehicular pesado.

En la Figura 3.1 se muestra el esquema general de la metodología que sigue el programa que se retoma DEFP, desarrollado por Bárcenas (2011) donde se puntualizan los procesos a seguir y se observa de forma general el diagrama de flujo.

En la figura 3.3 se muestra el esquema general del programa actualizado que lleva por nombre **DEEFEP** “**D**iagnostico **E**stadístico. **E**fectos de **F**atiga y **E**xtremos en **P**uentes” desarrollado en éste trabajo de tesis. DEEFEP proporciona resultados de manera numérica y gráfica, con lo cual se facilita el estudio de los puentes y se genera la información necesaria para la evaluación de los mismos.

En las siguientes figuras se observa de manera global el esquema de la metodología del programa DEFP (bordes simples y sin fondo) y la nueva metodología que se integró a dicho programa dando origen a DEEFEP (bordes resaltados y fondo azul) desarrollados en este trabajo de tesis.

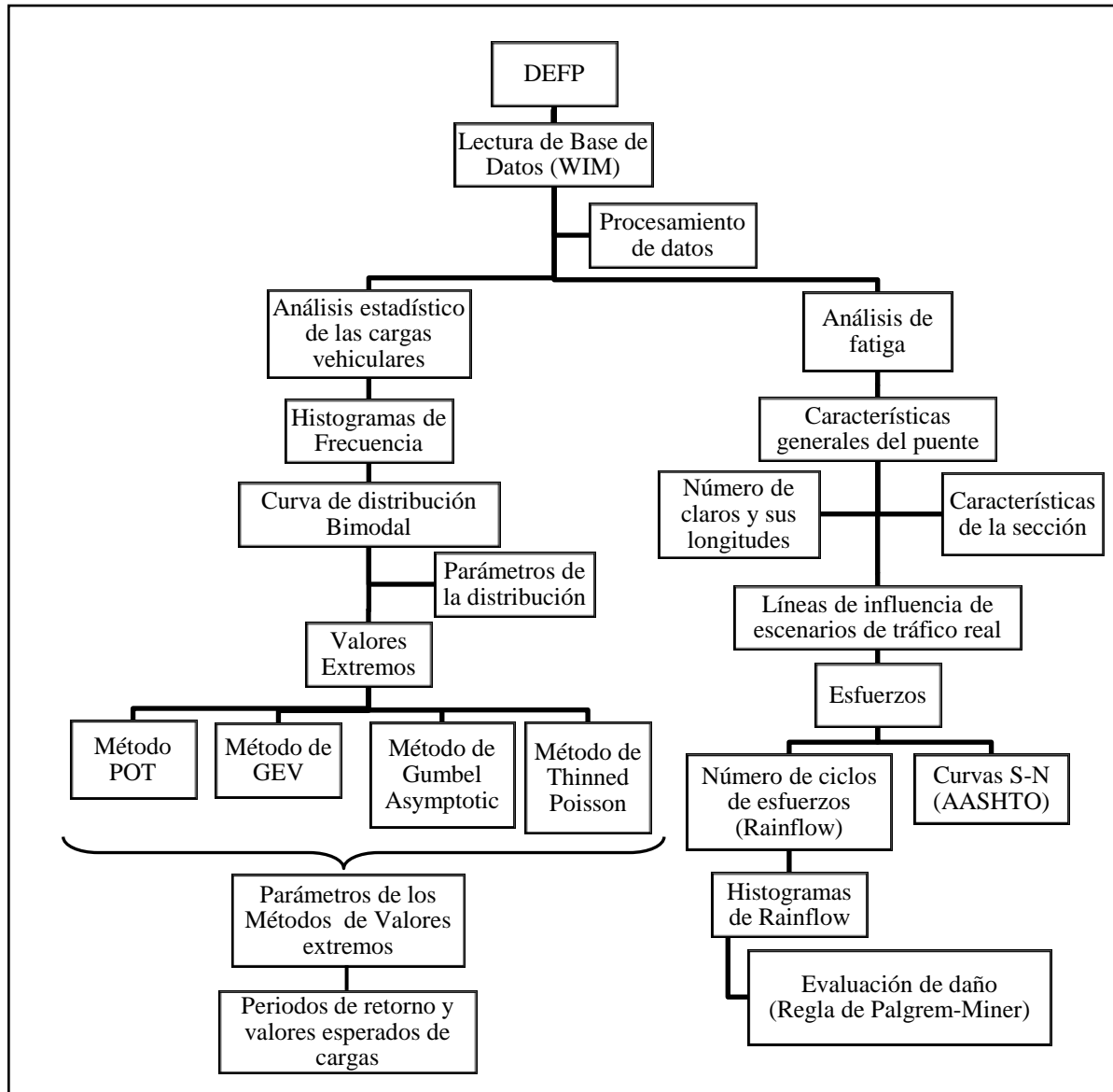


Figura 3.1. Metodología integral para el análisis y evaluación de puentes carreteros del programa DEFP, Bárcenas 2011.

En la Figura 3.2, se muestra el esquema de los principales módulos que integran la metodología re-estructurada del programa DEEFEP, los cuales a su vez se conforman por una serie de subprocesos.

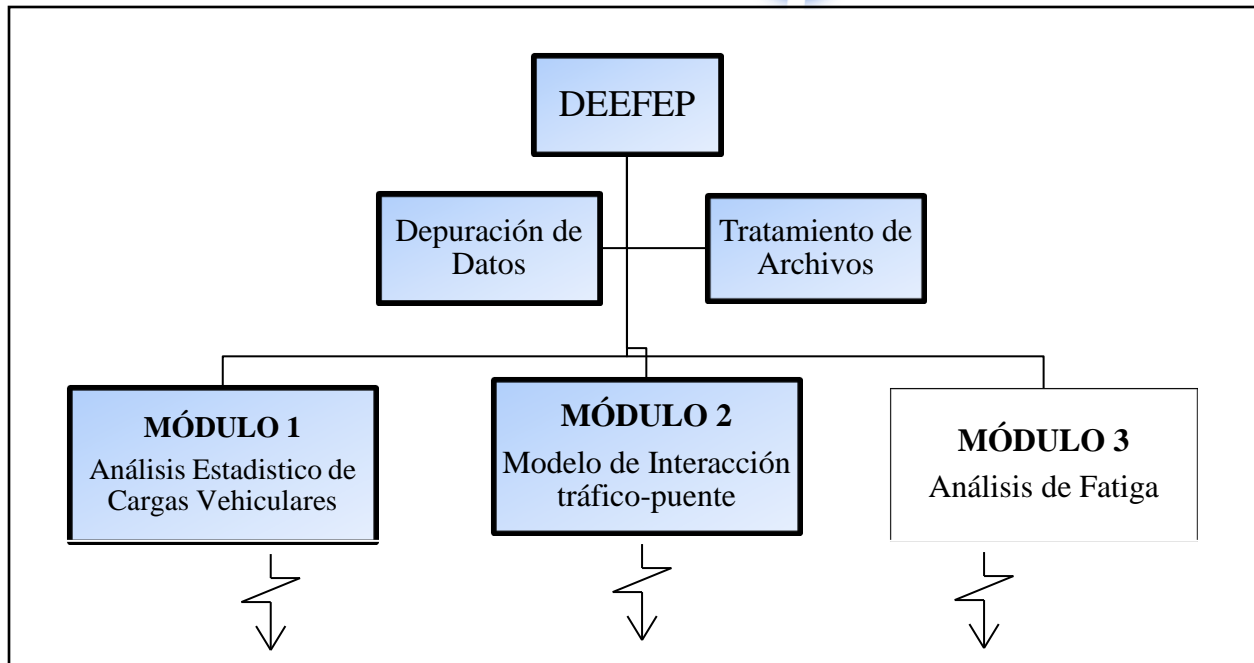


Figura 3.2. Principales módulos que integran la metodología del programa DEEFEP.

En la Figura 3.3 se muestra la re-estructuración general de la metodología del programa actualizado DEEFEP. Se puede observar que la nueva metodología (específicamente el módulo de modelo de interacción tráfico-puente), se integra a la existente, completándola con nueva metodología (desarrollada en éste trabajo de tesis) y continuando a partir de ella con metodología existente.

En la Figura 3.4, se muestra el esquema de los procesos que integran el **Módulo 1** “Análisis Estadístico de Cargas Vehiculares”. Dentro de este módulo es donde se creó el módulo de Análisis Paramétrico, para realizar comparativas de distribuciones probabilistas de cargas vehiculares entre diversas vialidades o la misma vialidad con diferentes fechas de registro de tráfico.

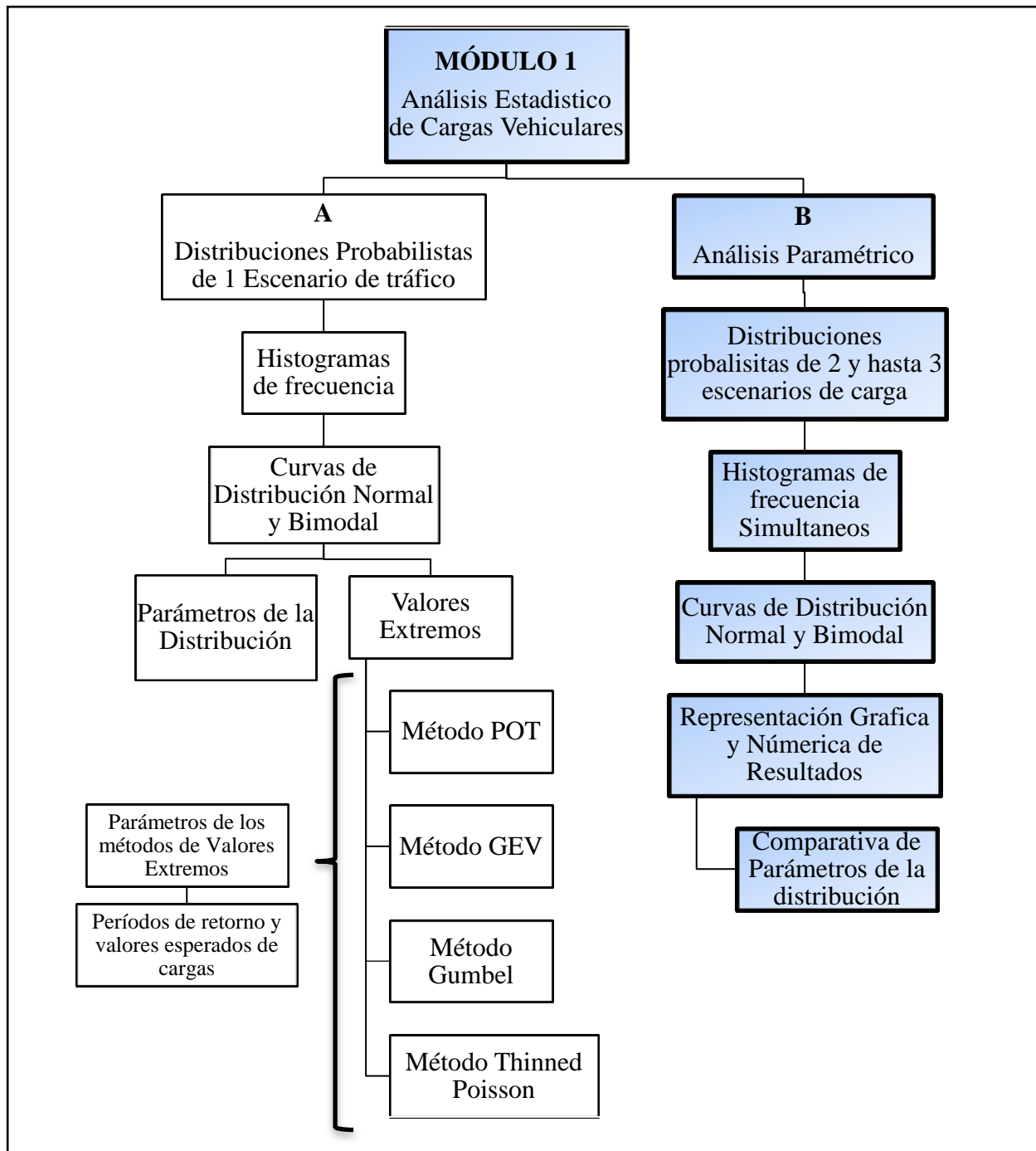


Figura 3.4. Módulo 1 “Análisis Estadístico de Cargas Vehiculares” que integra la Metodología del programa DEEFEP.

En la Figura 3.5, se muestra el esquema de los procesos que integran otro de los módulos principales **Módulo 2** “*Modelo de interacción tráfico-puente*”. Dentro de este módulo es donde se encuentra el nuevo módulo de “*Análisis por Superficies de Influencia*”.

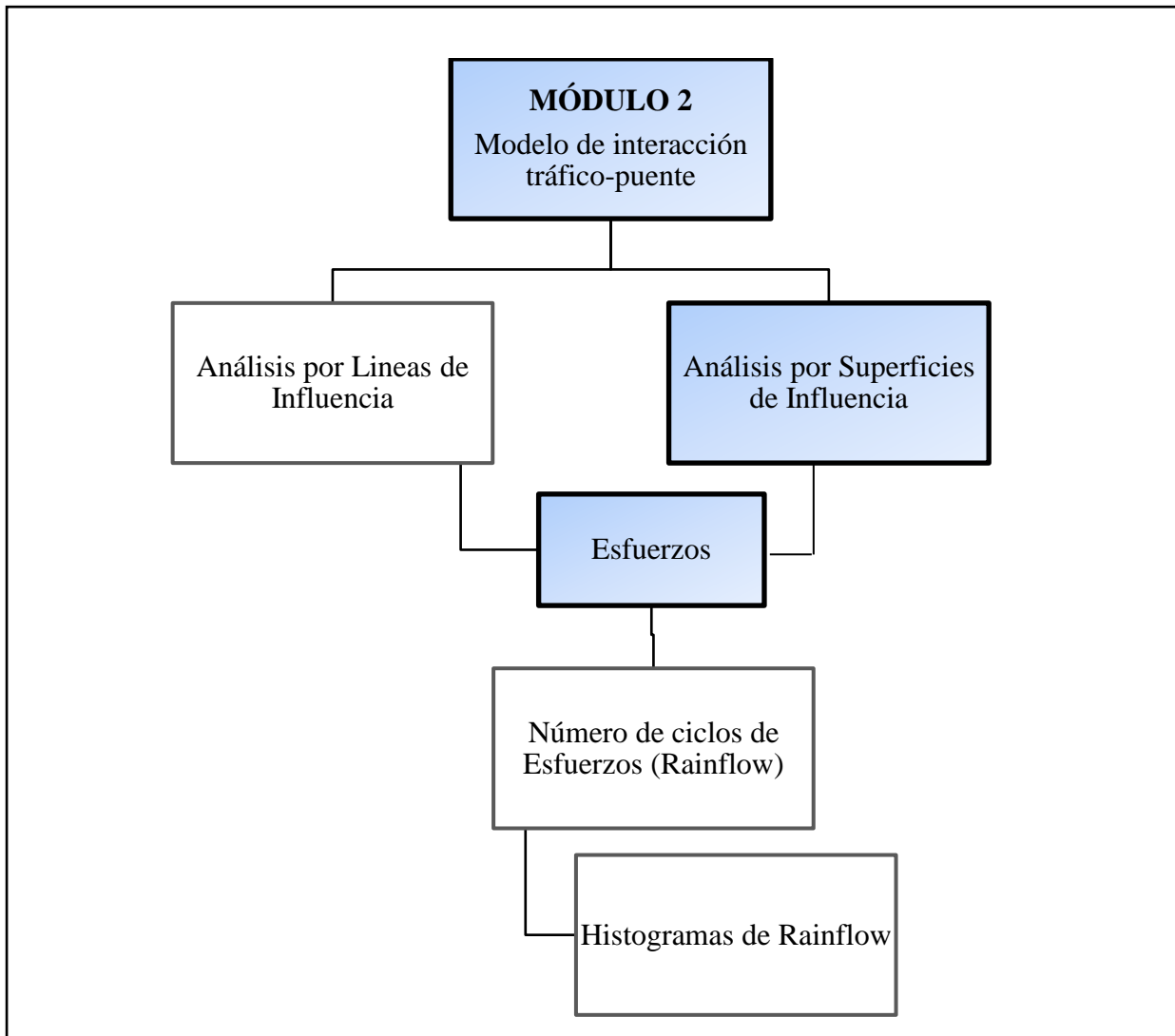


Figura 3.5. Módulo 2 “Modelo de interacción tráfico-puente” que integra la Metodología del programa DEEFEP.

En los sub-capítulos siguientes se describe la metodología que sustenta a este trabajo de investigación, utilizando un conjunto de procedimientos y principios lógicos que permiten alcanzar los objetivos establecidos. La metodología nace a partir de una posición teórica y conlleva a una selección de técnicas y métodos concretos para su realización.



3.1. Análisis estadístico de cargas vehiculares (Módulo 1)

Con el fin de acelerar el proceso de pesaje de los vehículos, los sistemas de *Weight In Motion* (WIM) se han instalado en muchos lugares principalmente de Europa y Norteamérica. Los registros de WIM de carreteras de Francia son la base principal de esta investigación, ya que a partir de estos se han realizado todos los trabajos descritos, para el desarrollo, manejo y validación de los mismos. Los registros de pesaje en movimiento que se utilizaron en este trabajo de tesis, fueron proporcionados por el Laboratorio Central de Puentes y Caminos (LCPC) de Francia.

La metodología presentada en este trabajo inicia con el análisis estadístico de cargas vehiculares con base en los registros de WIM, con lo cual se identifican las distribuciones probabilistas y se determinarán los parámetros necesarios para el análisis de valores extremos.

Es importante que los registros de WIM tengan la forma adecuada en formato de texto para su utilización dentro del programa DEEFEP, pues sólo así se puede tener confiabilidad en los resultados. *El Apéndice A “Registros de pesaje en movimiento weight in motion WIM”* establece una visión general de la tecnología de pesaje dinámico WIM y la forma en que se obtienen dichos registros, además, describe los distintos formatos de salida que pueden llegar a tener dichos registros y la forma en que podemos convertirlos a un formato adecuado para su uso y manejo en el software DEEFEP, entre otros.

En primera instancia, el análisis estadístico de cargas conlleva a la generación de histogramas de frecuencia, los cuales son gráficas de barras que describen la distribución de las variables aleatorias para diferentes rangos de magnitud. El programa DEEFEP, desarrollado en este trabajo de investigación, genera este tipo de gráficos con tan sólo buscar el archivo de registro de WIM en formato de texto, el cual debe tener la configuración mencionada en el *Sub-apéndice A.3*. Enseguida, se le tiene que asignar el parámetro de rango y se selecciona la columna de los datos que se desea analizar. El programa genera los histogramas de frecuencia y de frecuencia relativa según la variable dada por el usuario al seleccionar la columna del archivo de registro WIM. El programa DEEFEP muestra gráficamente los histogramas con sus respectivas curvas de ajustes. En el siguiente capítulo se muestra de manera global el proceso y



diagrama de flujo que sigue dicha metodología, el algoritmo que sustenta este proceso viene descrito dentro del CD anexo.

3.1.A. Distribuciones probabilistas de un escenario de tráfico

El Módulo 1 “Análisis Estadístico de cargas vehiculares” a su vez está dividido en dos sub-módulos principales, a los que llamaremos sub-módulo A “distribuciones probabilistas de un escenario de tráfico” y sub-módulo B “Análisis Paramétrico” (Figura 3.4.). Este sub-capítulo hace referencia al sub-módulo A, el cual integra la metodología principal que sigue el módulo de “Análisis Estadístico” del programa DEFP. Por lo anterior, sólo se hace mención de que dicha metodología fue revisada, tanto en sus métodos como en procesos, y fue adecuada acorde a la nueva estructura de la versión actualizada DEEFEP.

3.1.B. Análisis paramétrico de escenarios de tráfico

Este sub-capítulo hace referencia al **sub-módulo B** “*Análisis Paramétrico*” del que se deriva el **Módulo 1** “*Análisis Estadístico de Cargas Vehiculares*” del programa DEEFEP (Figura 3.4.) y el cual es parte principal del desarrollo de este trabajo de tesis, donde es posible realizar análisis de 2 y hasta 3 registros de datos WIM al mismo tiempo, generándose numérica y gráficamente los resultados. Al igual que dentro del análisis estadístico, en primera instancia, se generan los histogramas de frecuencia y a partir de ellos se realizan las curvas de distribuciones de probabilidad de datos tanto distribución normal como bimodal. Con los resultados numéricos generados se obtiene los parámetros característicos de dicha distribución, necesarios para el estudio de valores extremos utilizando el Método Gumbel y Poisson, (Jacob et al, 1989).

El programa DEEFEP muestra de manera interactiva los gráficos, permitiendo al usuario seleccionar a discreción el tipo de distribución o el histograma de frecuencia del registro WIM deseado, para ser visualizado. Con lo anterior, es posible realizar análisis de tráfico que pueden ser de distintas vialidades y realizar su comparativa, o realizar análisis de registros de una misma vialidad con diferentes fechas de registro de datos WIM. Al superponer las distribuciones de probabilidad de manera gráfica, es posible visualizar, la forma en que ha ido evolucionando el tráfico, tanto en densidad como en capacidad de carga. Lo anterior, conlleva a la mejora y ayuda de la toma de decisiones.

Tomando como referencia el histograma de frecuencia relativa que se haya generado, el programa DEEFEP realiza de manera numérica el proceso de cálculo de los parámetros de la distribución normal y bimodal, además, expresa los resultados imprimiendo la gráfica correspondiente.

En el algoritmo desarrollado para el cálculo de la distribución bi-modal dentro del programa DEEFEP, el parámetro p se determina mediante un proceso de iteración entre las variables aleatorias, donde se propone un valor inicial de p (empezando de cero) se calcula q (igual a $1 - p$). El valor de p se va incrementando hasta llegar al valor máximo de carga registrado. En cada interacción, se van obteniendo los parámetros y se miden las distancias entre los puntos de la curva de distribución y las barras del histograma. La curva de distribución final será aquella que se tenga la menor diferencia de distancias, es decir, la que más de ajusta.

Una vez obteniendo el parámetro p , se pueden deducir los demás parámetros de la distribución para cada población de datos (m_1, m_2, σ_1 y σ_2). Las características de la curva bimodal serán determinantes en el análisis de valores extremos de cargas vehiculares.

La metodología para el análisis de valores extremos es la misma que se utiliza en el programa DEFP, haciendo solamente revisión de algoritmos y procesos y la adaptación a la nueva estructura del programa DEEFEP.

Dentro del *Apéndice B “Metodología de los módulos estadístico y de análisis”* se muestra como complemento a esta metodología, los supuestos de modelado, los gráficos y capturas de pantalla que se generan dentro del programa DEEFEP, para cada uno de los módulos desarrollados en esta investigación.

3.2. Línea de influencia del modelo de interacción tráfico – puente (Módulo 2)

Entre los objetivos de este trabajo es revisar los antecedentes, algoritmos y procesos y aplicar la metodología de determinación de esfuerzos a partir de la generación de momentos máximos por medio de líneas de influencia, así como, la sistematización de un nuevo módulo de determinación de esfuerzos a través de superficies de influencia, para a partir de ello realizar la



predicción de vida a fatiga mediante el análisis de alto número de ciclos, producto de escenarios de tráfico real en puentes carreteros de acero de Francia.

El programa DEEFEP, realiza la determinación de esfuerzos para análisis de fatiga en puentes carreteros de acero de uno, dos y tres claros, modelados como vigas continuas para un sólo carril (líneas de influencia), o como un plano de superficie (superficies de influencia). Los algoritmos de este módulo de DEEFEP tienen como base la teoría que sustenta al Eurocode, el cual analiza la fatiga por medio del modelo de historia de esfuerzos. DEEFEP realiza todos sus procesos mediante un interfaz visual simple, proporcionando gráficas y resultados necesarios para este trabajo de tesis.

En el programa DEEFEP se desarrollan algoritmos que permiten realizar la interacción tráfico-puente generando líneas y superficies de influencia, tal como se describe en *el Apéndice B*.

DEEFEP obtiene teóricamente los esfuerzos en las secciones críticas de un puente, o en sus elementos, a partir del cálculo de líneas de influencia, considerando comportamiento elástico y una carga unitaria que se desplaza a lo largo de la viga. Con lo anterior, se genera la historia de esfuerzos para un punto específico.

La metodología y sistematización del módulo de cálculo de líneas de influencia fue desarrollado dentro del programa DEFP. Dentro de este trabajo de investigación se revisaron y adecuaron los algoritmos para el cálculo de líneas de influencia, conforme a la nueva estructura del programa. En esta sección se retoman las ecuaciones y métodos que determinan las líneas de influencia debido al hecho de que son la base para el cálculo de superficies de influencia (sección siguiente y nuevo módulo).

DEEFEP fue desarrollado para realizar análisis de determinación de momentos máximos por líneas de influencia para puentes continuos, simplemente apoyados, y de uno hasta tres claros. Las ecuaciones y métodos detallados que permiten obtener los momentos, reacciones y líneas de influencia, en que se sustentan el algoritmo del programa DEEFEP, son las mismas desarrolladas por Bárcenas (2011), en dicha referencia se puede ver como anexo la deducción de las ecuaciones y los diagramas correspondientes para su mejor entendimiento.



Con estas ecuaciones, en el programa DEEFEP, primeramente se obtienen gráficas de líneas de influencia de envolventes (**nuevo en la metodología**) para determinar la ubicación de la sección crítica del puente (*Apéndice B “Metodología de los módulos estadístico y de análisis”*), esto se hace recorriendo la carga unitaria en cada posición del puente (a cada unidad) y calculando su línea de influencia internamente. Gráficamente se muestra una línea de influencia por cada 20 dm del claro del puente, de esta forma se determina la sección crítica, aquella sección en donde los momentos calculados son máximos, los cuales se usan para la determinación de los esfuerzos.

Al igual que en el análisis estadístico, la generación de líneas de influencia con DEEFEP se realiza con tan sólo abrir el archivo de WIM en formato de texto “.txt” correcto, además de proporcionar las características geométricas de puente, como lo es su número de claros, longitud del claro (dm), y el módulo de sección S para la determinación de esfuerzos.

DEEFEP es capaz de realizar una simulación animada del tráfico vehicular real que se haya seleccionado para su análisis, relacionando además el efecto que se va produciendo por cada eje vehicular al pasar por el puente.

DEEFEP sigue las hipótesis de modelado del flujo de tráfico para un carril y la determinación de línea de influencia afectada por la posición de las vigas en la sección transversal del puente, de acuerdo a lo estipulado en el *Apéndice B “Metodología de los módulos estadístico y de análisis”* y *sub-apéndice B.2.1 “Modelo de interacción tráfico-puente. Líneas de influencia”*.

Para obtener la relación que une el efecto $E(t)$ y cargas por eje de N vehículos en la zona de influencia DEEFEP utiliza la misma expresión desarrollada en el software TRAFMULTI (ecuación 1.7; Capítulo 2.4), por Gorse 1989.

Una vez determinados los momentos máximos se procede a determinar los esfuerzos, producto del paso vehicular sobre el puente, utilizando las ecuaciones (2.9) de la teoría elástica. Con estos esfuerzos se genera una gráfica de serie de historia de esfuerzos, que depende de la cantidad de datos y se hallan almacenados en el archivo de WIM. Los resultados son almacenados en archivos de formato de texto.

DEEFEP muestra gráficamente las líneas de influencia que generan las cargas por eje de los vehículos pesados (*Apéndice B “Metodología de los módulos estadístico y de análisis”*), limitado a un rango máximo de 5, así mismo, calcula los momentos máximos y mínimos, como los esfuerzos correspondientes de todos los registros del archivo de escenario de tráfico real. Con estos esfuerzos se genera una gráfica de serie de historia de esfuerzos, que depende de la cantidad de datos y se hallan almacenados en el archivo de WIM. Los resultados son almacenados en archivos de formato de texto.

3.3. Superficies de influencia del modelo de interacción tráfico – puente (Módulo 2)

Otra manera de obtener teóricamente los esfuerzos en las secciones críticas de un puente, o en sus elementos, es a partir del cálculo de superficies de influencia.

La primera versión del software DEFP únicamente puede simular efectos en el tiempo en un puente a través del conocimiento de su línea de influencia con datos de tráfico real. El proceso de actualización y mejora de la DIP-FI-UAQ, ha dado lugar a la nueva versión de DEFP, “DEEFEP”. Esta nueva versión permite la consideración de flujos de posiciones transversales de vehículos en un puente (con hasta 3 carriles de circulación y zonas de influencia), considerando la posición de cada vehículo en su carril y el efecto que induce al carril crítico. Con estas mejoras se permite un modelado más realista, así como mayor flexibilidad de uso.

El cálculo de los efectos en un puente, producto del tráfico vehicular, de este nuevo módulo de análisis por superficies de influencia tiene como base los supuestos del software TRAFMULTI, desarrollado por Gorse (1989) para el LCPC de Francia, el cual realiza el cálculo de los efectos producidos por varias rutas de tráfico en un puente, a través de las características mismas del tráfico con registros reales WIM y modelando el movimiento de vehículos en base a supuestos de flujo de tráfico.

El módulo de análisis por superficies de influencia desarrollado en el programa DEEFEP comienza al seleccionar el usuario un puente de dos o tres carriles de circulación y abrir sus correspondientes archivos de tráfico real WIM, en formato de texto adecuado (**como se menciona en el Apéndice A**), seleccionando un archivo por cada carril de circulación. Al leer los registros de WIM por carril, el programa DEEFEP internamente realiza la operación de

separar cada una de las variables de interés (tiempo de llegada del vehículo, número de ejes, velocidad, carga por eje, distancia entre ejes, etc.) y crear nuevos archivos, mismos que posteriormente utiliza el mismo programa DEEFEP para realizar operaciones internas que permitan determinar la interacción de los vehículos en varios carriles de circulación y los efectos asociados.

Posteriormente, el usuario debe introducir las características geométricas y sección transversal del puente: número de claros, longitud de los claros, módulo de sección, ancho de carril, número de apoyos, ubicación de los apoyos. DEEFEP permite el análisis de superficies de influencia para puentes de 2 y hasta 3 carriles de circulación con un claro, dos claros (iguales o distintos en longitud) y tres claros (iguales, o primer y tercer claro iguales y central diferente en longitud) los cuales no deben tener más de dos apoyos.

DEEFEP es capaz de realizar una representación gráfica de la sección transversal del puente, al momento en que el usuario ingresa los datos de ancho de carril así como la ubicación de los apoyos (*Ver Apéndice B “Metodología de los módulos estadístico y de análisis”*), lo que permite al usuario visualizar y corroborar la geometría del puente.

Para la sistematización del cálculo de Superficie de influencia unitaria en el programa DEEFEP (Capítulo IV), se utilizan las mismas expresiones de las variaciones de las líneas de influencia por carril, sin embargo, se determina una zona de influencia completa, representada por la totalidad o líneas longitudinales paralelas que corresponden al supuesto de una posición de referencia (centro de cada carril), estas líneas de influencia son afectadas por un factor C de atenuación/amplificación de efectos (*Ver Apéndice B “Metodología de los módulos estadístico y de análisis”*) que depende enormemente de la posición transversal en el puente del vehículo (carril de circulación) y de la ubicación de los apoyos en el ancho del carril (**ver figura B.7, B.8**).

Posteriormente se realizó la sistematización de la composición de una muestra de tráfico la cual consta del orden cronológico de los vehículos por carril y sus características para poder calcular los efectos de una carga en cualquier punto en la zona de influencia del puente.

En el programa DEEFEP, primeramente se obtienen gráficas de líneas de influencia de envolventes para determinar la ubicación de la sección crítica del puente (de la misma manera



que se realiza en el módulo de líneas de influencia, **Apéndice B “Metodología de los módulos estadístico y de análisis”**), y posteriormente determinar los momentos máximos en dicha sección (pudiéndose realizar para 2 y hasta 3 carriles de circulación), los cuales se usan para la determinación de los esfuerzos. Al igual que en el análisis estadístico y en la determinación de líneas de influencia, la generación de superficies de influencia con DEEFEP se realiza con tan sólo abrir el archivo de WIM en formato y/o extensión “.txt”, además de proporcionar las características del tipo de puente.

DEEFEP sigue las hipótesis de modelado del flujo de tráfico en varios carriles (hasta tres) y la determinación de superficie de influencia afectada por la posición de las vigas en la sección transversal del puente, de acuerdo a lo estipulado en el **Apéndice B “Metodología de los módulos estadístico y de análisis” y sub-apéndice B.2.2 “Modelo de interacción tráfico-puente. Superficies de influencia”**.

Para obtener la relación que une el efecto $E(t)$ y cargas por eje de N vehículos en la zona de influencia, DEEFEP utiliza la misma expresión desarrollada en el software TRAFMULTI (ecuación 1.8; Capítulo 2.4), por Gorse (1989).

Determinación de esfuerzos

Una vez determinados los momentos máximos se procede a determinar los esfuerzos, producto del paso vehicular sobre el puente, utilizando las ecuaciones (2.9) de la teoría elástica. Con estos esfuerzos se genera una gráfica de serie de historia de esfuerzos, que depende de la cantidad de datos y se hallan almacenados en el archivo de WIM. Los resultados son almacenados en archivos de formato de texto.

DEEFEP es capaz de realizar una simulación animada del tráfico vehicular acorde a los registros de WIM seleccionados (**figura B.14, Apéndice B.2.2 “Modelo de interacción tráfico-puente. Superficies de influencia”**).

El siguiente paso de la metodología, consiste en realizar el conteo de Número de ciclos de Esfuerzos por el método de rainflow y con los resultados obtenidos generar los correspondientes histogramas. Dentro de este trabajo se revisaron los algoritmos y métodos de



“conteo de ciclos de esfuerzos e histogramas de rainflow” y se adecuaron a la nueva estructura de DEEFEP.

3.4. Análisis de fatiga en puentes carreteros (Módulo 3)

Este módulo es el principal dentro de la metodología del programa DEFP, teniendo como base la teoría que sustenta al reglamento Eurocode para la generación de los algoritmos. Esta teoría se basa en la obtención de las series de esfuerzos para la evaluación del daño acumulado y predicción de vida a fatiga con la regla de Miner.

3.4.1. Módulo de estimación de daño acumulado y vida a fatiga

Teniendo los histogramas de rainflow, entonces se puede ahora habilitar la opción de “regla de Miner” la cual tiene un algoritmo basado en los principios de dicho proceso. El programa DEEFEP da como resultado el valor de daño acumulado o número de Miner (M) y una aproximación teórica del período de vida que le falta al puente para que se presenten daños estructurales (primeras grietas o deformaciones excesivas).

La metodología para la estimación de daño acumulado y predicción de vida a fatiga, así como la descripción de detallada de la metodología de este módulo se describen en la referencia de Bárcenas (2011), Capítulo 2.



IV. SISTEMATIZACIÓN DE LA METODOLOGÍA

La revisión de algoritmos, métodos y procesos del programa de cómputo DEFP, así como, la integración de la metodología descrita en el Capítulo III y la re-estructuración y presentación del programa dando origen a DEEFEP, es una parte esencial de este trabajo de tesis. Con los fundamentos teóricos ya expuestos, se han generado algoritmos computacionales que realizan el proceso de análisis estadístico de cargas, tratamiento y depuración de datos, calculan valores extremos de cargas, determinan los esfuerzos a través de líneas y/o superficies de influencias y evalúan los efectos de fatiga en puentes carreteros de acero. Se continuó utilizando el lenguaje C++ para realizar esta sistematización, debido a que es el lenguaje de mayor uso en los desarrollos de programas de ingeniería. De esta manera, cualquier persona que conozca dicho lenguaje computacional podrá seguir detalladamente el proceso de los algoritmos que integra a DEEFEP, los cuales se incluyen dentro del disco anexo.

En el Apéndice C “Sistematización de la Metodología Integral” se describe la forma completa en que se re-estructuro el programa DEFP, así como, la forma en que se desarrolló e integró la nueva metodología, desglosando por los módulos que lo integran. En este capítulo sólo se hace mención de los nuevos módulos principales que se desarrollaron y se explicaron en el capítulo anterior, describiendo tanto su diagrama de flujo como su proceso.

4.1. Análisis estadístico de cargas vehiculares (Módulo 1)

El análisis estadístico es importante para cualquier investigación donde se manejan series de datos. A partir de esta necesidad, se requiere de herramientas de cómputo que faciliten este proceso. Sin embargo, cuando se hace un estudio específico de análisis de fatiga en puentes ante efectos de cargas vehiculares pesadas, el manejo de datos sigue siendo complicado, al no contar con una sola herramienta que realice todo el proceso de análisis. Por esta razón, se creó el módulo estadístico dentro del programa DEFP y se retoma en la nueva versión DEEFEP.

El módulo de análisis estadístico se encuentra dentro de la barra de menú principal, y a su vez se divide en distribuciones probabilistas y en distribuciones extremas. Dentro de las distribuciones probabilistas tenemos tres sub-módulos, uno de análisis para un registro WIM, y dos de análisis paramétricos tanto de 2 como de 3 archivos de registro WIM. El primer requisito,

al seleccionar cualquier sub-módulo, para que el programa pueda procesar los registros de cargas vehiculares es que los datos tengan el formato estándar (*Apéndice A*), y que estén almacenados en un archivo de texto.

4.1.A. Distribuciones probabilistas de un escenario de tráfico

Éste primer sub-módulo (análisis de un sólo registro WIM), ya se tenía integrado dentro de DEFP, únicamente fue revisado y adecuado a la nueva estructura del programa DEEFEP.

4.1.B. Módulo de análisis paramétricos de 2 y hasta 3 archivos de registros WIM

Una vez que los registro de pesaje se han adecuado al formato DEEFEP, y en su caso filtrado los datos, puede iniciarse el análisis paramétrico, ya sea para uno o varios archivos de WIM (hasta tres registros WIM). Dentro de los sub-módulos de análisis paramétricos, DEEFEP cuenta con un interfaz sencillo para dicho análisis, el cual empieza con la generación de los histogramas de frecuencia (uno por cada registro WIM), donde el primer paso es especificar la columna del archivo que se desea analizar, así como también el rango o intervalo que tendrán las barras del histograma (ver el Manual de Usuario en Anexos). Enseguida se seleccionan los archivos de registros de WIM que se analizarán, posteriormente el programa calcula los valores de frecuencia de los histogramas y hace las gráficas correspondientes de los histogramas de frecuencias. Todos los datos que se generan durante el proceso se almacenan en la carpeta asignada previamente (ver el Manual de Usuario en Anexos).

Después del proceso anterior, DEEFEP permite deducir las curvas de distribución tanto Normal como Bimodal de los registros e histogramas de frecuencias, activando la opción correspondiente, ajustando los histogramas a una misma escala con relación al registro WIM que contenga la frecuencia mayor, y de esta forma, imprime los histogramas de cada archivo WIM superponiéndolos y ajustados a la misma escala para de esta manera poder realizar comparativas. Además, DEEFEP muestra en su interfaz gráfica las curvas de distribución sobre los histogramas, de esta manera, se observa la aproximación del ajuste de curvas.

En la figura 4.1 se muestra el diagrama de flujo que describe el proceso del análisis paramétrico de escenarios de tráfico.



El programa también almacena los resultados de las curvas de distribución Normal y Bimodal en formato de texto. Los parámetros de la distribución bi-modal (media, desviación estándar, porcentaje de población, etc.) serán el punto de partida para un primer análisis de valores extremos, aplicando los métodos de Gumbel y Proceso de Poisson.

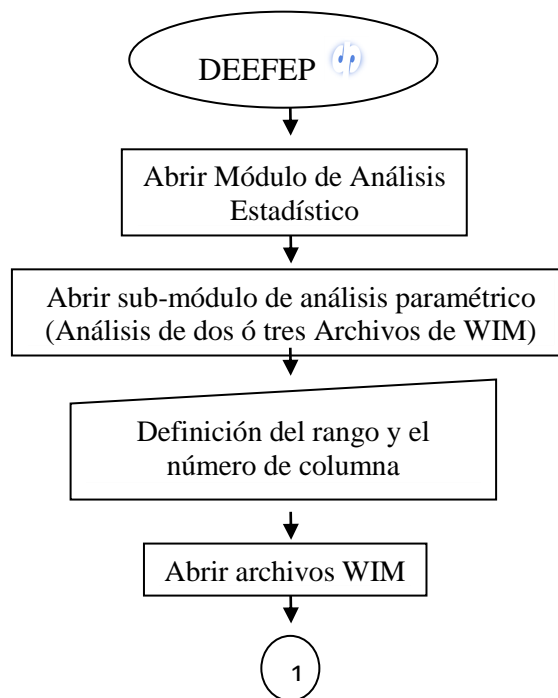


Figura 4.1. Diagrama de flujo del módulo de análisis paramétrico de escenarios de tráfico.

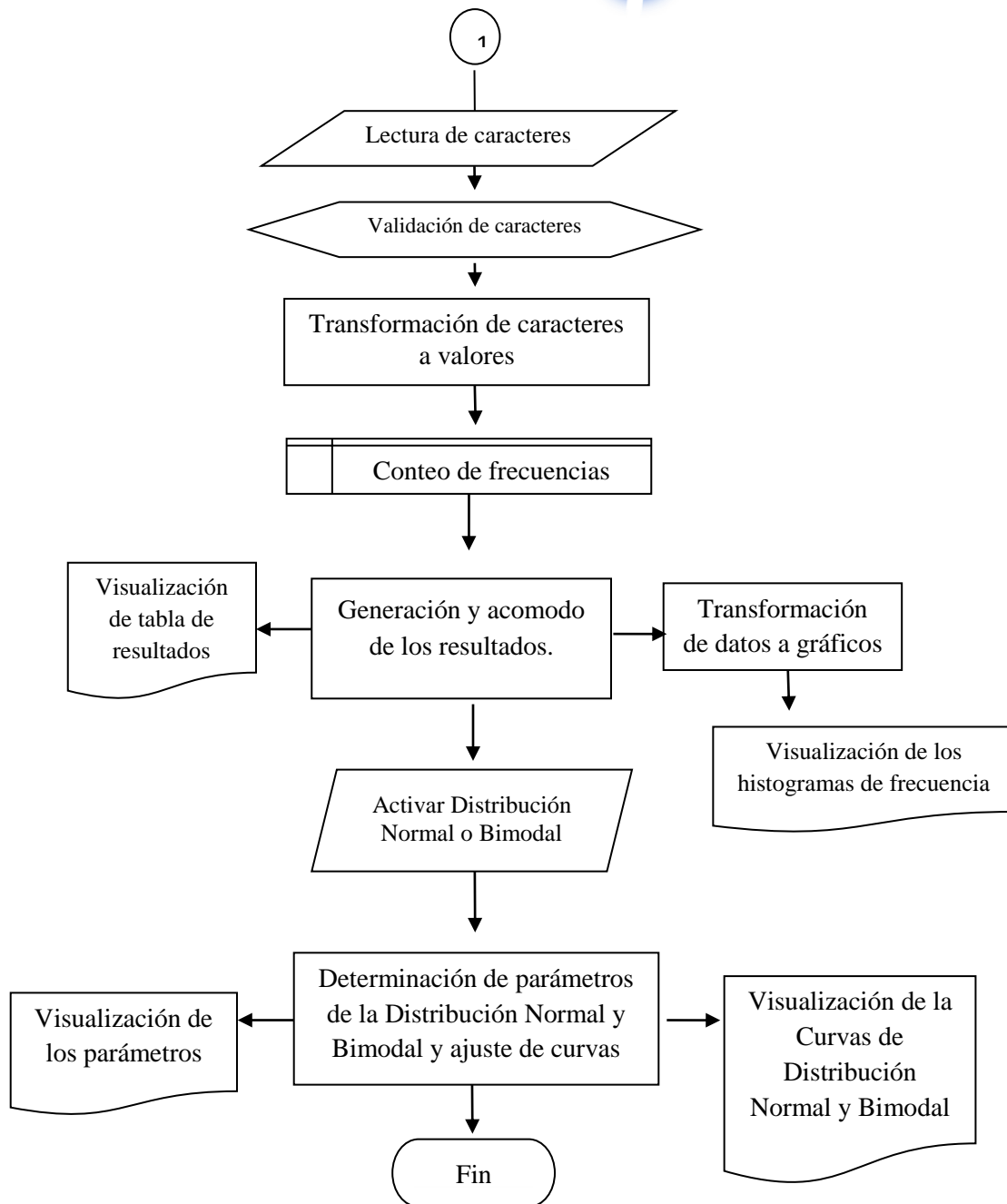


Figura 4.1. Diagrama de flujo del módulo de análisis paramétrico de escenarios de tráfico.



Descripción del proceso. A continuación se describe el proceso del algoritmo que sustenta este módulo del programa. Cabe mencionar que la programación completa en lenguaje C++ de dicho algoritmo se ha incluido en el CD anexo a esta tesis, dentro de la carpeta llamada “algoritmos de DEEFEP en C++”, ya que por su amplia extensión no puede ser agregada dentro de este capítulo.

Ejecutar el programa DEEFEP. Al ejecutar el programa, por medio del ícono de acceso directo que se genera al instalar el programa, lo primero que aparece es la pantalla de inicio y de presentación del programa DEEFEP, al cerrar la pantalla de presentación, se tiene acceso a la ventana principal del programa, llamada “*ventana Padre*”, ya que esta ventana siempre permanecerá a la vista del usuario y dentro de ella se ejecutarán los distintos módulos que contiene. Dentro de esta ventana Padre, podemos siempre observar en la parte superior el menú principal, el cual contiene los distintos módulos que integran el programa DEEFEP. El módulo de “Análisis Estadístico” aparece como pestaña en la barra de menú principal.

Abrir Módulo de Análisis Estadístico. El módulo de “Análisis Estadístico” aparece como pestaña en la barra de menú principal dentro de la ventana Padre.

Abrir sub-módulo de análisis paramétrico (Análisis de dos o tres Archivos de WIM). Al abrir la pestaña del módulo de análisis Estadístico de la barra de menú principal, aparecen dos sub-módulos “distribuciones probabilistas” y “distribuciones extremas”, seleccionamos la correspondiente a “distribuciones probabilistas” y aquí es donde aparece en sub-módulos “Análisis Estadístico par 1 archivo WIM” y “Análisis paramétricos tanto para 2 o 3 archivos de WIM”, se selecciona el deseado por el usuario.

Definición del rango y el número de columna. El usuario define la magnitud de los grupos que conformarán el histograma de frecuencia relativa de los datos de la columna seleccionada, es decir el rango o intervalo de barras, de esta manera el algoritmo va dividiendo la información en varios grupos, con lo cual se generará la gráfica.

Abrir archivo WIM. Definidas las constantes de rango y columna, se buscan los archivos de tráfico vehicular que se deseen analizar, los cuales deben de estar en formato de texto.



Lectura de caracteres. Una vez seleccionados los archivo de WIM, el proceso empieza identificando todos los caracteres que lo integran, reconociendo así reglones y columnas, realizando este proceso archivo por archivo.

Validación de caracteres. Terminada la lectura del archivo de WIM, el proceso de validación de datos consiste en identificar sólo aquellos que representen valores numéricos, con el fin de hacer el análisis estadístico de estos. Con este proceso se eliminan espacios, letras o cualquier otro signo que no represente una cantidad numérica. También se eliminan aquellos caracteres que pudieran causar errores dentro del proceso.

Transformación de caracteres a valores. En este paso se transforman los caracteres numéricos a cantidades. El programa por sí sólo no puede identificar si el archivo contiene cantidades numéricas, por ello es necesaria esta transformación.

Conteo de frecuencias. Se van agrupando las cantidades por rangos de valores. Con un contador incluido en el algoritmo se determina la cantidad de datos que existen por grupo, lo cual indicará la magnitud de la altura de cada barra del histograma.

Generación y acomodo de los resultados. Después del proceso de conteo, todas las variables tienen un valor asignado (producto del análisis), entonces, la información es acomodada en renglones y columnas para facilitar la visualización de los resultados. En este proceso ya se ha generado el histograma de frecuencias en formato de texto.

Visualización de tabla de resultados. Los resultados de los histogramas de frecuencia son impresos y visualizados en las tablas que aparecen dentro del interfaz de DEEFEP.

Transformación de datos a gráficos. Los resultados son asignados a nuevas variables que servirán para el proceso de dibujo. Ahora los valores numéricos serán representados por medio de gráficas dibujadas a base de píxeles.

Visualización de los histogramas de frecuencia. Por medio de puntos, líneas y rellenos, se va dando forma a los histogramas, para que así se interpreten mejor los resultados. Los histogramas de frecuencia se auto escalan dependiendo del espacio disponible y de la magnitud de cada barra y con relación al archivo WIM que presente mayor frecuencia en el histograma,

superponiendo así los diversos histogramas determinados (uno por archivo WIM) y de esta manera, poder realizar comparativas. Finalmente se grafican los histogramas teniendo en el eje de las abscisas los rangos de pesos (en KN) y en el eje de las ordenadas la frecuencia de estos, tanto normales como relativas. Esta nueva versión DEEFEP permite al usuario una interacción gráfica de resultados, es decir, puede controlar que histograma desea ser visualizado, haciéndolo más amigable para el usuario, lo que facilita y ayuda a la interpretación de resultados.

Activar Distribución Normal y Bi-modal. Los datos del histograma de frecuencia son la base para la aproximación de las curvas de distribución normal y bi-modal. Cuando es activada esta opción, el algoritmo empieza un nuevo procesamiento de datos. Se realiza la lectura del archivo de texto que contiene los resultados del histograma, con los cuales se hace la aproximación de las curvas normal y bi-modal utilizando la teoría expuesta en el subcapítulo 2.3. Al igual que los histogramas de frecuencia, las curvas de distribución normal y bi-modal de los respectivos histogramas, pueden ser activadas o desactivadas para mostrarse gráficamente, a necesidad y/o gusto del usuario.

Determinación de parámetros de las Distribuciones: Normal y Bi-modal, y ajuste de curvas. En esta parte se aplican las ecuaciones del subcapítulo 2.3, donde el parámetro p (porcentaje de la primera población de datos) se determina por medio de interacciones hasta que se encuentre la curva que se ajuste mejor al histograma. En seguida se determina el parámetro q (porcentaje de la segunda población de datos, igual a $1 - p$). A partir de esto comienzan la obtención de los parámetros de los momentos de primer orden de la distribución (medias y desviaciones estándar, respectivamente): m_1, m_2, σ_1 y σ_2 , para cada población, utilizando las mismas ecuaciones citadas.

Visualización de los parámetros: Los valores de cada parámetro son guardados en un archivo de texto y se imprimen en los recuadros del interfaz gráfico de DEEFEP.

Visualización de las Curvas de Distribución Normal y Bimodal: Las curvas se sobreponen en el histograma de frecuencia de cada archivo, de tal manera que se pueda observar el ajuste de las curvas de distribución. El realizar interactiva la opción grafica de visualización de histogramas de frecuencia y curvas de distribución permite superponer dichas curvas de

diferentes archivos de registros de datos y a partir de ello, poder realizar comparativas ya sea de evolución de cargas vehiculares, densidad de tráfico y determinar demandas actuales. Los datos de estas curvas también se guardan en un archivo de texto.

El siguiente módulo que integra al programa DEEFEP es el módulo de *Interacción tráfico-puente* a través de líneas de influencia y/o superficies de influencia.

4.2. Modelo de interacción tráfico–puente. Líneas de influencia

Éste módulo fue revisado, adecuado a la nueva estructura de DEEFEP y actualizado; una de estas actualizaciones (de las más importantes) fue el desarrollo de un algoritmo que permite numérica y gráficamente determinar la sección crítica del puente una vez hayan sido asignadas por el usuario sus características generales (número de claros, longitud de claros y módulo de sección) y su integración dentro del módulo de líneas de influencia. Lo anterior se logra con un proceso de cálculo de líneas de influencia unitaria, recorriendo la carga unitaria a todo lo largo del puente, guardando los datos de resultados internamente en el programa (El momento generado en la posición de la carga) y graficando líneas de influencia a cada cierta longitud (10m en puentes de hasta 400m de claro y (longitud del claro/40) para claros mayores), lo que genera una serie de líneas de influencia envolventes y de esta manera, el programa determina la posición crítica que es donde el momento generado sea mayor.

A partir de lo anterior el programa realiza el análisis estructural con los registros de pesaje en movimiento. En el interfaz gráfico DEEFEP se muestra la simulación del paso de los automóviles sobre el puente (de manera lineal), generando a su vez las líneas de influencia correspondientes a las cargas puntuales de los ejes vehiculares.

El diagrama de flujo que sigue el módulo de líneas de influencia, así como la descripción del proceso, se describen en la referencia de Bárcenas (2011), Capítulo 3.3.1 “Módulo de líneas de influencia.”

4.3 Modelo de interacción tráfico-puente. Superficies de influencia

El segundo sub-módulo que integra al módulo de “*modelo de interacción tráfico-puente*” es el de “Superficies de influencia”. Habiendo asignado las características generales del puente

(número de claros, longitud de claros, número de carriles, ancho de carril, ubicación transversal de los apoyos y su módulo de sección), y seleccionando el archivo de WIM acorde a su carril correspondiente, el programa realiza el análisis estructural (cálculo de momentos máximos) con los registros de pesaje en movimiento. Las ecuaciones y el procedimiento planteados en el subcapítulo 3.3 y en el **Apéndice B** de esta tesis, así como las ecuaciones y el procedimiento que sigue el programa DEFP para el cálculo de líneas de influencias se han integrado en el algoritmo de DEEFEP para agilizar este proceso.

En la Figura 4.2 se muestra el diagrama de flujo del proceso descrito y a continuación se describen las partes que integran dicho proceso.

Descripción del proceso del sub-módulo de superficies de influencia

Abrir sub-módulo de análisis por superficies de influencia. Al seleccionar la opción de “Modelo de interacción tráfico-puente” se despliega el cuadro de menú para el cálculo de líneas y superficies de influencia. En esta parte se selecciona la opción de “Superficies de influencia”.

Abrir archivo de registros de WIM. Antes de asignar las propiedades de puente, DEEFEP debe de reconocer el tráfico vehicular al cual estará sometido el puente. Entonces debe seleccionarse los archivos de WIM en formato de texto carril por carril.

Definición de número de carriles de circulación. El primer paso dentro del sub-módulo de superficies de influencia, es definir el número de carriles de circulación; esto se hace al momento de dar click sobre el botón de “abrir Archivos de Registros WIM”.

Lectura y procesamiento de datos del archivo de WIM. El sistema reconoce los caracteres que están dentro de los registros de WIM, los transforma en cantidades y así iniciará el cálculo de líneas de influencia carril por carril para posteriormente determinar la superficie de influencia unitaria..

Asignación de las características del puente. En esta parte se asigna el número de claros, la longitud de estos, el módulo de sección del puente y la posición transversal de los apoyos.



Determinación de la sección crítica del puente. Al igual que en el sub-módulo de líneas de influencia, se desarrolló algoritmos que permiten la deducción de la sección crítica del puente a través del cálculo numérico de líneas de influencia envolventes, de esta manera, el programa determina la posición crítica que es donde el momento generado sea mayor y muestra gráficamente estas envolventes.

Cálculo de superficie de influencia ante carga unitaria: Con los parámetros anteriores, DEEFEP calcula la superficie de influencia de momentos unitaria para puentes de uno, dos o tres claros. Esta información es visualizada en forma gráfica y se imprimen los valores en tablas. Las unidades de tensión que se manejan son KN-m, contra su ubicación dentro del puente en decímetros.

Lectura de la secuencia del tráfico vehicular por carril. Para empezar con el cálculo de las superficies de influencia, DEEFEP lee el archivo de WIM carril por carril, para conocer como están ordenadas las cargas por eje vehicular, entonces, genera nuevos archivos de texto separando las cargas y las distancias de la demás información.

Cálculo de líneas de influencia por eje por carril y superficies de influencia. Teniendo la línea de influencia de esfuerzos unitaria por carril, la información de cargas y las distancias ordenadas de manera secuencial, DEEFEP hace pasar el tráfico por el puente de manera gráfica, con lo cual se van generando una línea de influencia por cada eje. La teoría de superposición de cargas y efectos se aplica en este paso. Al mismo tiempo que se van generando las líneas de influencia por cada eje por carril, se va generando la superficie de influencia, esto se hace sumando los efectos que inciden carriles adyacentes al carril crítico (de baja velocidad).

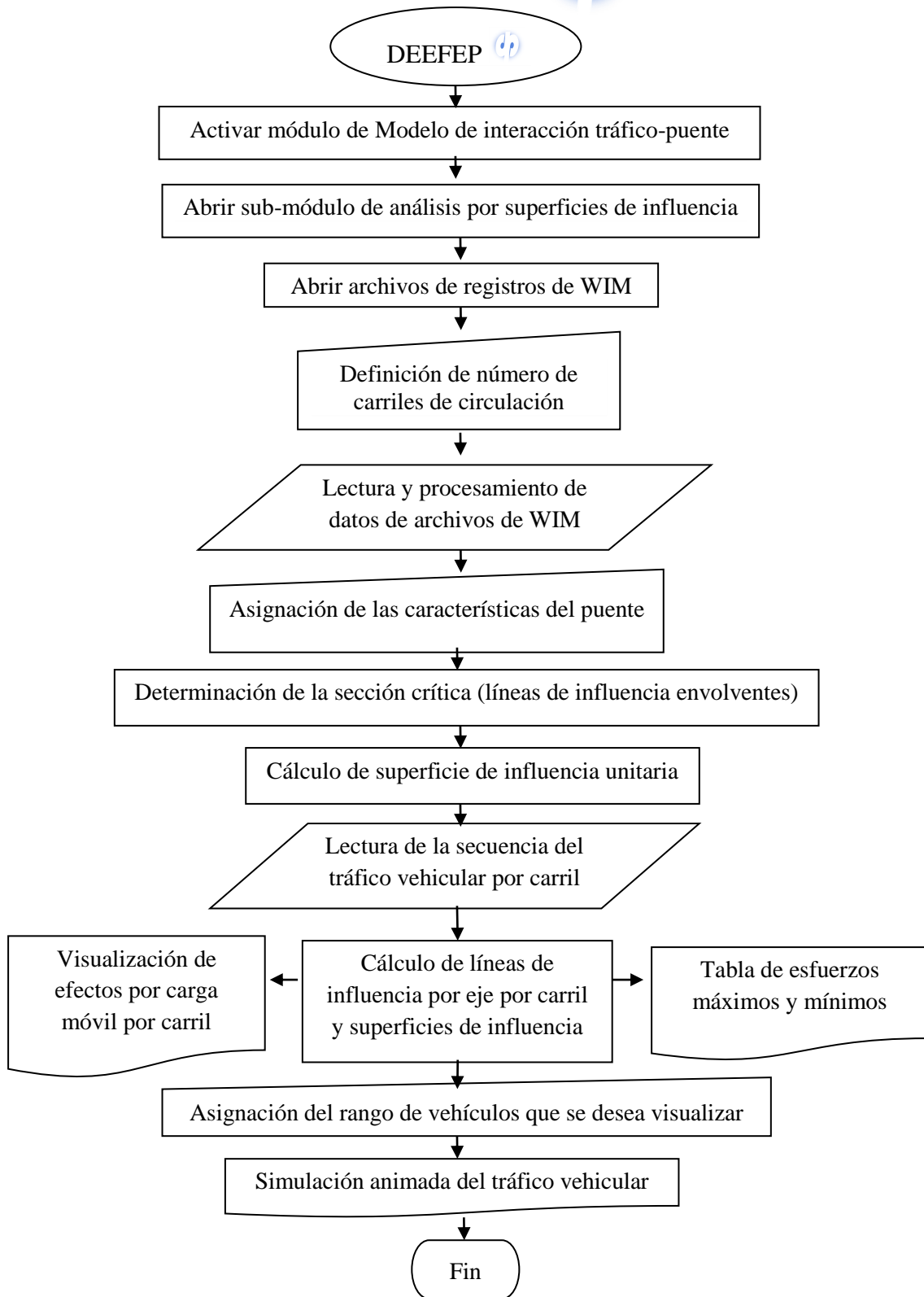


Figura 4.2. Diagrama de flujo del módulo de determinación de esfuerzos (Análisis por superficies de influencia).



Visualización de líneas de influencia por carga móvil. DEEFEP imprime las líneas de influencia por carril y de esta manera se forma las superficies de influencia, a base de píxeles en una gráfica, además presenta la opción de mostrar la simulación del tráfico vehicular en forma animada.

Tabla de esfuerzos máximos y mínimos. DEEFEP imprime los esfuerzos máximos y mínimos para cada superficie de influencia, además ubica la posición a lo largo del puente, donde estos fueron registrados.

Asignación del número de vehículos que se desea ver. Aquí se debe de establecer cuáles son aquellos vehículos que se verán dentro de la simulación animada. El número máximo es de 50 vehículos.

Simulación animada del tráfico vehicular. DEEFEP muestra el paso del tráfico, dibujando cada uno de los vehículos en forma secuencial, y a su vez, se puede visualizar como se van generando las líneas de influencia correspondientes a cada eje.

4.4. Análisis de fatiga en puentes carreteros

Este módulo es el principal dentro de la metodología propuesta y desarrollada por Bárcenas (2011) en su trabajo de tesis, donde tomó como base la teoría que sustenta al reglamento EUROCODE para la generación de los algoritmos. Esta teoría se basa en la obtención de las series de esfuerzos para la evaluación del daño acumulado y predicción de vida a fatiga con la regla de Miner. Dentro de dicha se referencia se encuentra tanto la metodología que se sigue para el análisis de fatiga, así como, el diagrama de flujo y procedimiento de sistematización.

V. EJEMPLOS DE APLICACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS: ANÁLISIS DE FATIGA DEL PUENTE KERVITOUS ANTE DOS ESCENARIOS DE TRÁFICO

En este capítulo se muestra como ilustración de aplicación del programa DEEFEP, el análisis de fatiga del puente carretero de acero Kervitoux de Francia. Al final de este capítulo, se muestran otros resultados de análisis de fatiga de los puentes Auxerre y Layrac de Francia, utilizando el mismo procedimiento de fatiga aplicado al puente Kervitoux. Estos análisis se ilustran en el *Apéndice D “Ejemplos de aplicación para análisis de Fatiga”*. Finalmente, se realiza un análisis y discusión de los resultados de los tres puentes estudiados.

Con el afán de validar paramétricamente los modelos propuestos en el programa DEEFEP, en los análisis de fatiga se utilizan dos escenarios particulares de tráfico vehicular real: Autopista A6 del año 1986 y ruta nacional RN4 de 2007 de Francia, ya que dichos archivos cuentan con registros de 2 carriles de circulación y son utilizados en los trabajos de Arroyo M. (2009) y Bárcenas V. (2011), con el programa Pollux.

El algoritmo de DEEFEP inicia el proceso de fatiga con el modelo de interacción tráfico-puente para la obtención de esfuerzos, y tiene la opción de realizarlo ya sea por los métodos de análisis de líneas o superficies de influencia.

Primeramente se realiza el análisis de fatiga del puente Kervitoux utilizando el método de líneas de influencia para la determinación de esfuerzos, posteriormente, se realiza el análisis de fatiga por medio del análisis de superficies de influencia, considerando un sólo carril de registro WIM (lo que corresponde a un análisis de líneas de influencia, pero considerando la posición transversal de los apoyos), y finalmente, se realiza el análisis de fatiga con superficies de influencia sometiendo el puente a dos carriles de circulación con carga WIM de la autopista A6 (lo más semejante a la realidad).

Con la finalidad de corroborar los resultados, estos se han comparado con los obtenidos en estudios precedentes realizados por M. Arroyo en su publicación 2009, en la cual ha utilizado programas como el CASTOR, el compilador POLLUX y el programa de estadística R, así como resultados obtenidos por Bárcenas 2011 en el programa DEFP, particularmente, se la hace la comparativa al momento de realizar la obtención de esfuerzos, donde se espera una estimación

más real dentro del programa DEEFEP de esta investigación, por análisis de superficies de influencia.

5.1. Puente kervitous: Análisis por método de líneas de influencia

A continuación se presentan las características geométricas del puente Kervitous de Francia. Se presenta su número de claros y longitud, sección transversal y el módulo de sección de las vigas de apoyo.

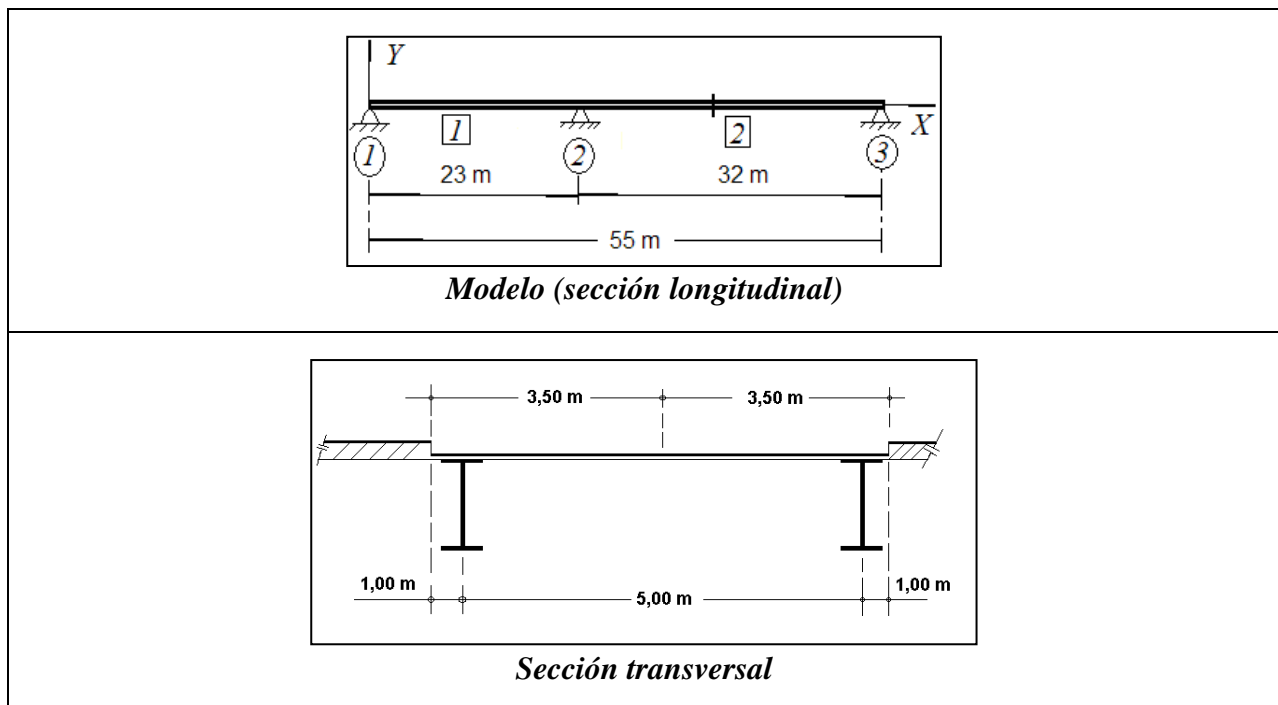


Figura 5.1 Características geométricas principales del puente Kervitous.

Tabla 5.1. Características geométricas principales del puente Kervitous.

Puente	No. De Claros	Dimensión (m)			Módulo de sección (S =I/c) (m ³)
		Claro 1	Claro 2	Claro 3	
Kervitous	2	23	32	NA	0.059

El análisis de fatiga comienza por estimar los efectos que las cargas vehiculares producen sobre la estructura, lo cual es posible determinar con un modelo de interacción tráfico-puente. Este módulo está ubicado en la parte superior del menú principal de DEEFEP.

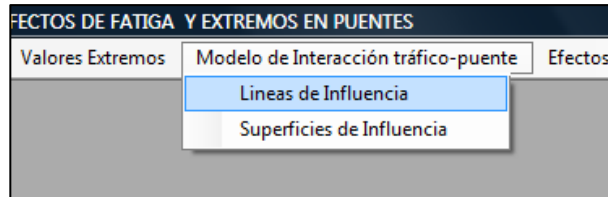


Figura 5.2. Inicialización del módulo de modelo de interacción tráfico-puente. Análisis de líneas de influencia.

Al seleccionar esta opción se abre el cuadro de menú para la determinación de esfuerzos por medio del análisis de Líneas de influencia. Cabe mencionar que el programa DEEFEP puede realizar el análisis de fatiga de cualquier configuración de puentes de acero, pero para el caso de un puente con más de tres claros será necesario ingresar la línea o superficie de influencia unitaria dentro de la carpeta donde se guardan los archivos generados. El archivo de la línea de influencia llevará el nombre de Linfluencia.txt para análisis por líneas de influencia y SuperfInfluencia.txt para análisis por superficie de influencia.

El análisis comienza al abrir el Archivo de Registros WIM, el cual contiene la información de pesaje en movimiento por cada eje vehicular. Estos archivos deben tener el formato adecuado para que DEEFEP pueda procesarlo, de lo contrario será necesario utilizar el módulo de tratamiento de archivos para corregir dicho formato.

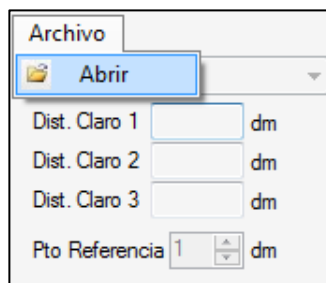


Figura 5.3. Panel inicial del módulo de Análisis por líneas de influencia.

Como en todos los procesos, DEEFEP pide la ruta donde será almacenada la información generada antes de asignar los archivos que se analizarán.

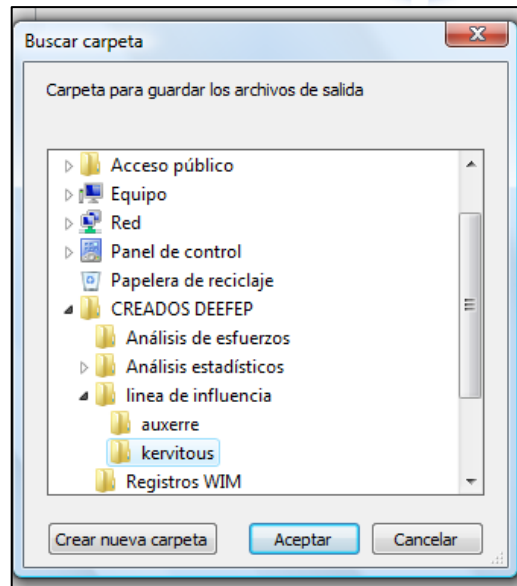


Figura 5.4. Carpeta de almacenamiento de datos generados en el análisis por superficies de influencia.

Enseguida se buscan los archivos de WIM del tráfico vehicular registrado. Para el ejemplo de aplicación, se ha utilizado el archivo A6 1986.txt.

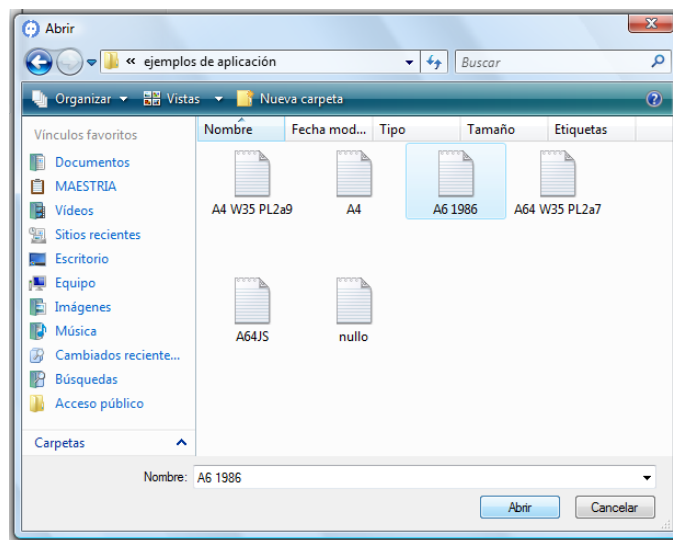
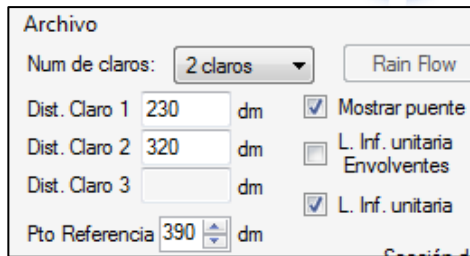


Figura 5.5. Selección de los archivos para el análisis de superficies de influencia.

En seguida se asigna el número de claros que tendrá el puente. Se utilizaron las características del puente Kervitous (de dos claros).



Archivo	
Num de claros: 2 claros	Rain Flow
Dist. Claro 1: 230 dm	<input checked="" type="checkbox"/> Mostrar puente
Dist. Claro 2: 320 dm	<input type="checkbox"/> L. Inf. unitaria Envolventes
Dist. Claro 3:	<input checked="" type="checkbox"/> L. Inf. unitaria
Pto Referencia: 390 dm	

Figura 5.6. Asignación del número de claros para el puente Kervitous.

Como se muestra en la Tabla 5.1, las dimensiones de los dos claros del puente Kervitous son 23 y 32 metros respectivamente. DEEFEP pide las dimensiones en decímetros (dm), ya así han sido registradas y esta es la unidad estándar que se utiliza en los archivos de WIM. Para el caso de un puente de dos claros, la opción de distancia del claro 3 no se habilita, de igual forma para el caso de un claro no se habilitarían los cuadros de distancia 2 y 3.

La sección por analizar debe de establecerse en el recuadro de “Punto de Referencia”, donde se asigna la ubicación en términos de distancia con respecto al primer punto de apoyo del lado izquierdo. En el análisis desarrollado por Bárcenas (2011) y Arroyo (2009), se analizó el centro de claro (CL) del segundo claro. Sin embargo, la nueva versión de DEEFEP determina la sección crítica del puente, a través de un análisis de líneas de influencia envolventes, como se señaló en el capítulo III, sub-capítulo 3.2., así DEEFEP muestra un esquema gráfico del puente con las líneas de influencia envolventes para la determinación de la sección crítica.

Llegados a este punto del análisis tenemos la primer diferencia en las consideraciones del análisis, siendo está el punto de referencia (sección del puente) a la cual vamos a realizar el análisis de fatiga, ya que a través del análisis de líneas de influencia envolventes encontramos que la sección crítica (posición 41.5 m del inicio del puente) no corresponde a la sección de análisis utilizada por los autores mencionados.

Por lo anterior, en esta investigación se realiza el análisis de fatiga por líneas de influencia, tanto para la sección crítica, como la sección ubicada al centro del claro del segundo claro (utilizada por Bárcenas (2011) y Arroyo (2009)), con el fin de comparar los resultados.

5.1.1. Sección del puente localizada a 39 m del inicio (centro de claro del segundo claro), para análisis de fatiga

Una vez determinada la sección de análisis de fatiga, el programa obtiene la línea de influencia unitaria con la cual se realizará el análisis de determinación de momentos máximos. Dicha línea se muestra en KN-m/KN. Como se puede observar las unidades están normalizadas a cargas de KN, ya que la carga del tráfico vehicular de los registros WIM viene en estas unidades.

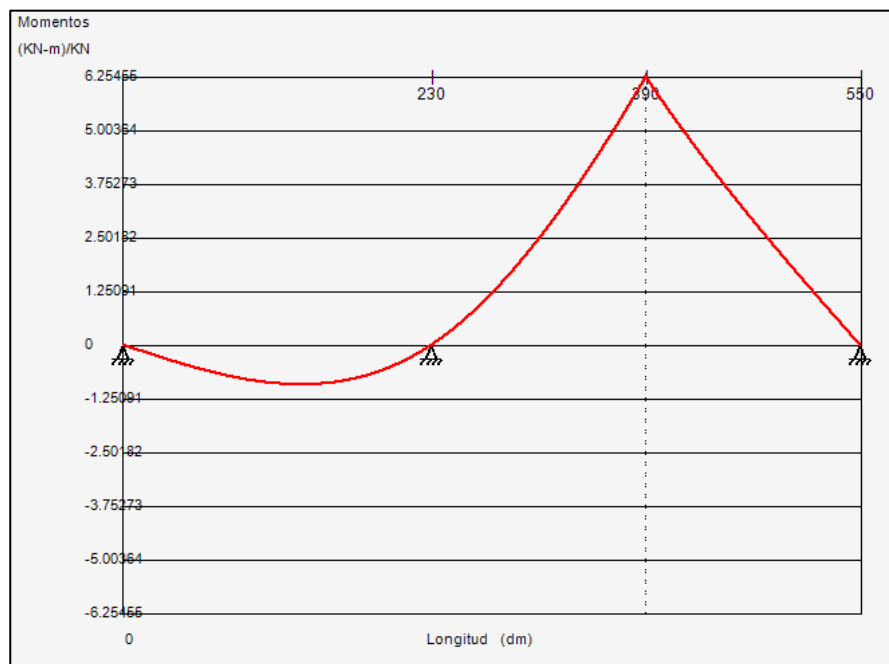


Figura 5.7. Generación de la línea de influencia unitaria del puente Kervitous. Sección de análisis a centro de claro (CL) del segundo claro.

Internamente se ha generado un archivo en formato de texto de la superficie de influencia, el cual podrá ser remplazado si se requiere otra configuración. Para analizar un puente con más de tres claros es necesario establecer la superficie de influencia en un archivo de texto con las unidades mencionadas (KN-m) y con el formato estándar establecido. Cabe mencionar que de analizarse un puente con más de tres claros, las opciones de visualización y simulación gráfica no podrán ser utilizadas.



Al realizar el análisis anterior el programa activa el botón “Resultados Momentos” ubicado en la parte superior junto al cuadro de resultados. Al dar click sobre este botón se generan automáticamente las líneas de influencia de momentos flexionantes con respecto a la sección especificada (en este caso la sección crítica), producto del paso de las cargas vehiculares descritas por cada eje de los registros WIM.

Una vez obtenidos los momentos flexionantes máximos, se procede a asignar el módulo de sección de la viga de apoyo del puente en cuestión. Esta se asigna en el cuadro “S”, que describe el módulo de sección. En la Tabla 5.1 se observa que el puente Kervitous tiene un $S = 0.059 \text{ m}^3$, valor que se estableció en el recuadro correspondiente.

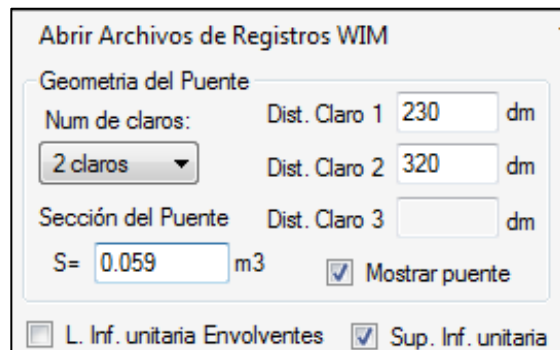


Figura 5.8. Asignación del módulo de sección (S) del puente Kervitous.

El programa obtiene las superficies de influencia que genera el paso de las cargas vehiculares descritas por cada eje. Al oprimir la opción “Resultados Esfuerzos” se generan todas variaciones de líneas de influencia de esfuerzos causadas por las cargas móviles. De igual forma DEEFEP obtiene los esfuerzos máximos y mínimos y su ubicación a lo largo del puente.

dist	Li	Car	Eje	Dist	Minimo	Dist	Maximo
0	0	MAX = Primero Encontrado					
1	-0.01045	1	11	133	-1.113745	1390	7.526656
2	-0.02091	1	12	120	-3.427463	1390	21.83586
3	-0.03136	1	13	182	-4.546405	1335	27.52689
4	-0.04181	1	14	83	-5.594052	1325	32.03863
5	-0.05225	1	15	78	-6.349019	1368	37.03838
6	-0.06268	2	11	133	-0.7215813	1390	4.876425
7	-0.07311	2	12	120	-1.933267	1390	12.21819
8	-0.08354	2	13	171	-2.471924	1322	14.88365
9	-0.09395	2	14	172	-2.999694	1311	16.97058
10	-0.10435	3	11	133	-1.239238	1390	8.37473
11	-0.11474	3	12	116	-3.359664	1390	21.07364

Figura 5.9. Cuadro de información de las líneas de influencia de esfuerzos por eje vehicular.

En la figura anterior se observa la tabla que describe el paso de las cargas en movimiento de los vehículos registrados. En la primera tabla se observa la superficie de influencia unitaria en (KN-m)/KN (normalizada a una carga de KN). En la segunda tabla se visualizan los resultados de esfuerzos y su ubicación en el puente (en MPa). Al igual que con el módulo de análisis por líneas de influencia, DEEFEP tiene la opción de animación gráfica para observar la simulación del flujo vehicular. En esta animación se muestran las líneas de influencia que se generan debido a la configuración de las cargas móviles por eje en cada carril y son visualizadas hasta en rangos de 5 vehículos. Antes de graficar las líneas, se debe de establecer el intervalo de vehículos que se desee visualizar.

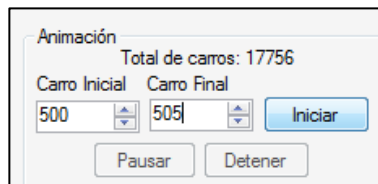


Figura 5.10. Opciones de animación gráfica del flujo vehicular.

DEEFEP tiene la opción de visualizar el escenario de tráfico vehicular en forma de animación. Como el archivo de WIM contiene millones de cargas por eje vehicular, la animación del tráfico también sólo puede visualizarse en rangos de 5 vehículos. Para comenzar con el proceso se oprime el botón “iniciar” y entonces podrá verse el paso de cada vehículo de manera esquemática.

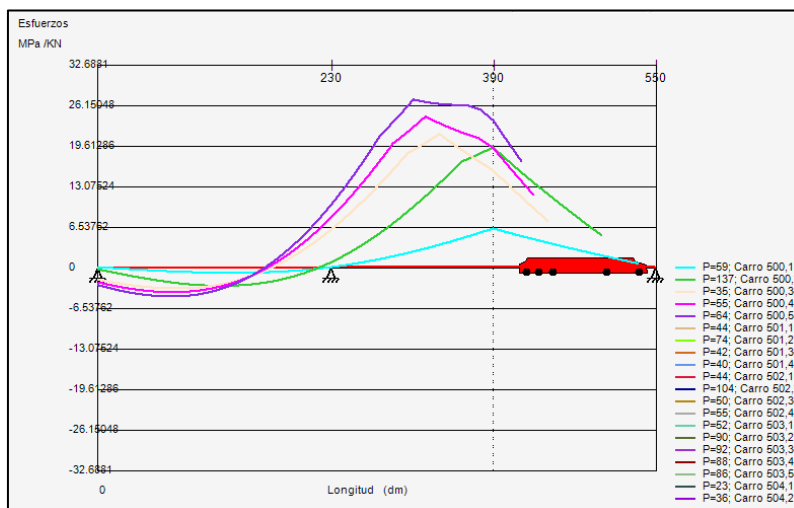


Figura 5.11. Simulación animada del tráfico vehicular registrado (puente Kervitous).

Hasta ahora se ha realizado el cálculo de los esfuerzos debido al paso de los vehículos sobre el puente Kervitous. El siguiente paso que se realizó para el análisis de fatiga fue el conteo de ciclos de esfuerzos con el método de rainflow. El algoritmo de este método se sustenta con la teoría descrita en la referencia de Bárcenas (2011) dentro del Capítulo II - Subcapítulo 2.4.2.2. Para inicializar el conteo de ciclos de esfuerzos se oprime el botón de “rainflow”.

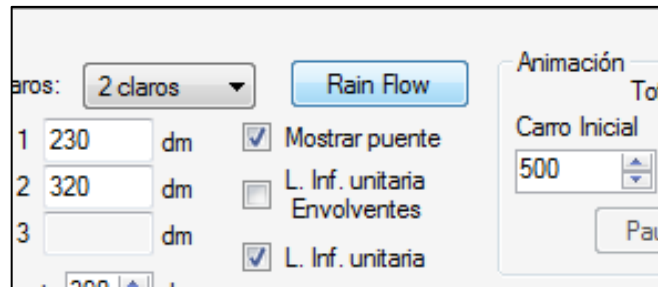


Figura 5.12. Inicialización del conteo de ciclos de esfuerzos con el método de rainflow.

Al oprimir la opción de rainflow, DEEFEP despliega una nueva pantalla donde se observa la gráfica de historia de esfuerzos que provoca el archivo A6 1986.txt.

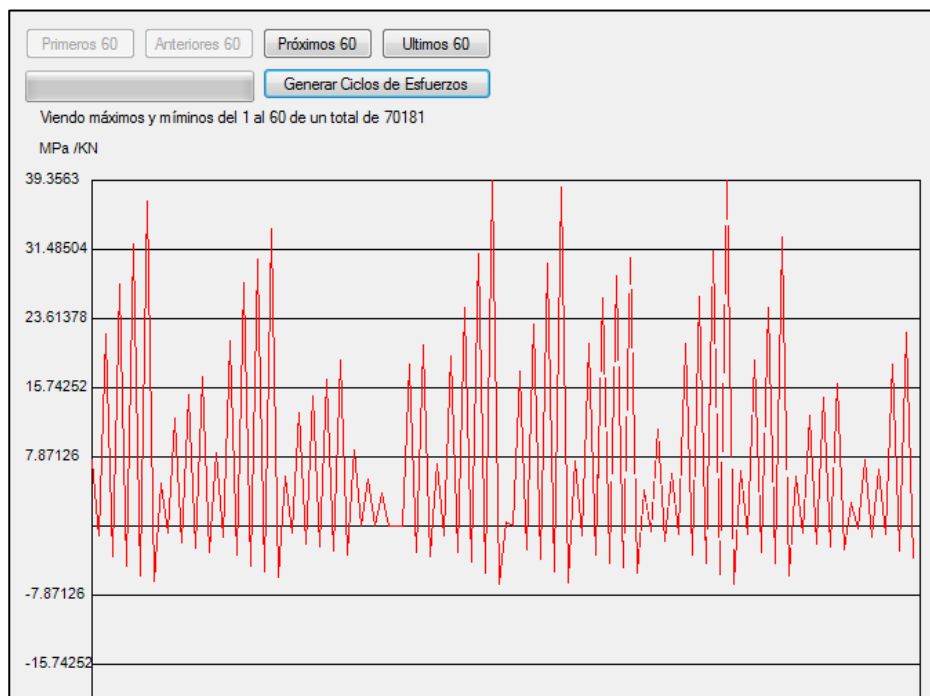


Figura 5.13. Serie de historia de esfuerzos mediante líneas de influencia. Sección 39m. Kervitous.

Al oprimir el botón de “Generar ciclos de esfuerzo” el algoritmo de rainflow determina la magnitud de los ciclos de esfuerzos, los cuenta y almacena en un archivo llamado EsfuerzosMod.txt. Este archivo tiene el formato adecuado para ser manipulado por el programa estadístico, con el cual se ha generado el histograma de los ciclos de esfuerzos, mejor conocido como “histograma de rainflow”.

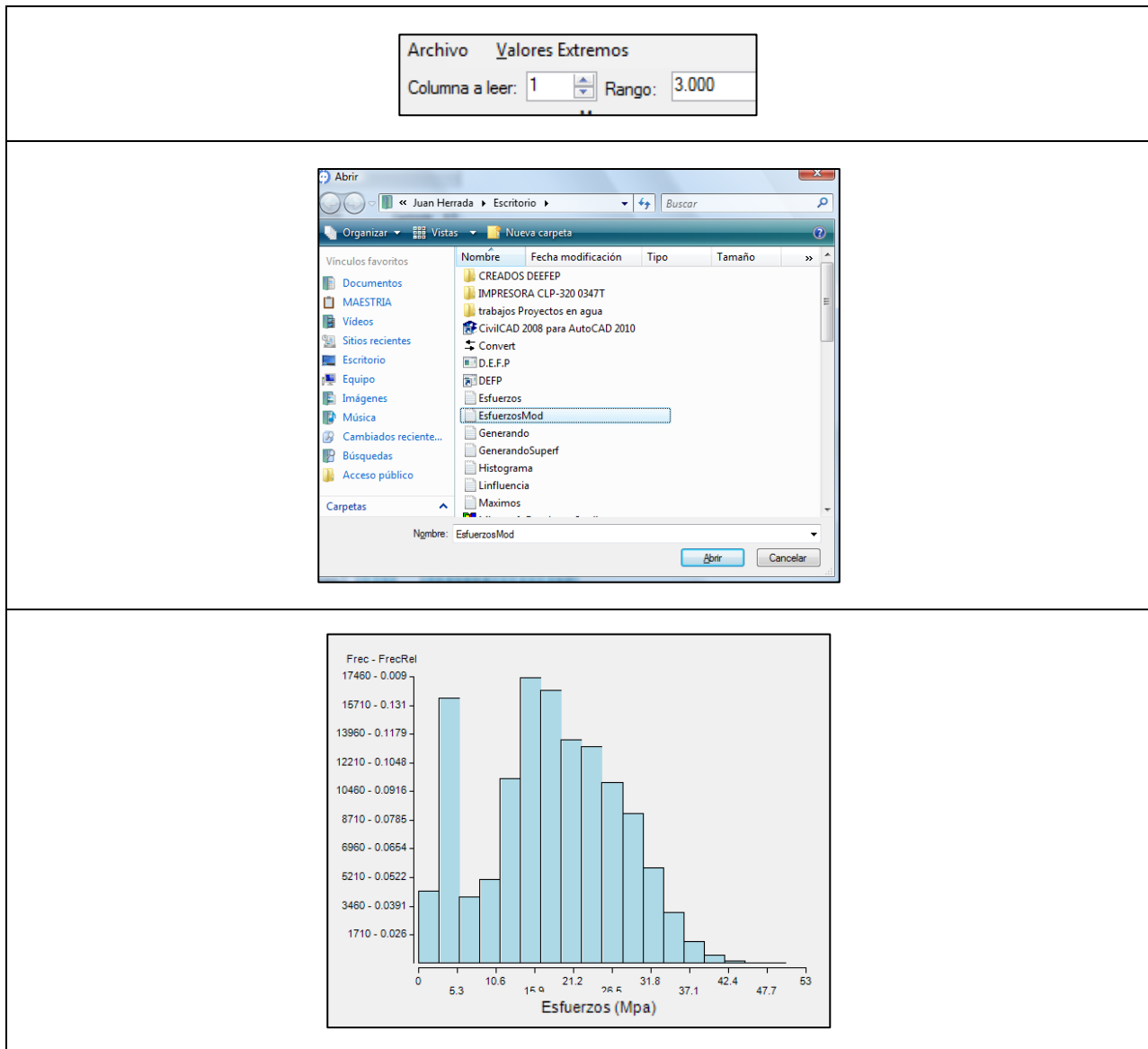


Figura 5.14. Generación del histograma de rainflow. Esfuerzos mediante líneas de influencia. Sección 39m. Kervitous.

Este proceso demuestra que el programa DEEFEP no sólo realiza el análisis estadístico de cargas, si también puede realizar el análisis estadístico de esfuerzo. Los métodos de valores extremos también pueden ser aplicados en la estimación de los valores de esfuerzos máximos para ciertos períodos de retorno. Al dar click en abrir, se genera automáticamente el histograma de rainflow. (ver figura 5.14). Para obtener el “histograma de rainflow”, en primer lugar se tiene que seleccionar en columna a leer “1” ya que el archivo creado “EsfuerzosMod.txt”, es de una sola columna, y el rango sugerido es de 3 Mpa.

Continuando con el análisis de fatiga del puente Kervitous, se realizó la estimación de daño por fatiga mediante la regla de Miner. DEEFEP integra este proceso en el módulo de efectos de fatiga de la barra de menú principal.

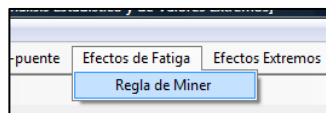


Figura 5.15. Inicialización de la evaluación de daño acumulado con la regla de Miner.

Dentro del análisis de daño acumulado se pide la vida actual del puente, expresada en días. También solicita la fracción de año que representa el registro de WIM. En este caso el archivo A6 1986.txt es el registro de 8 días, lo que significa que la fracción de año correspondiente es de 1/31.25 (250 días hábiles al año / 8 días hábiles de registro).

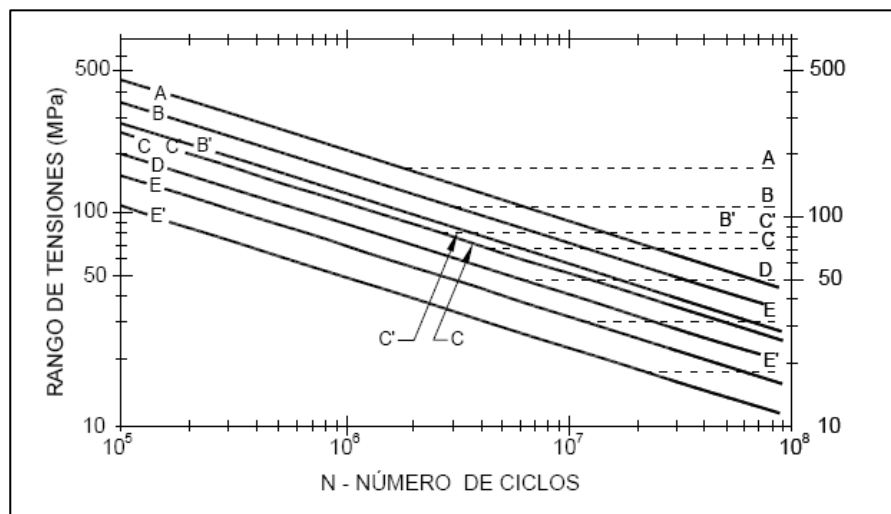
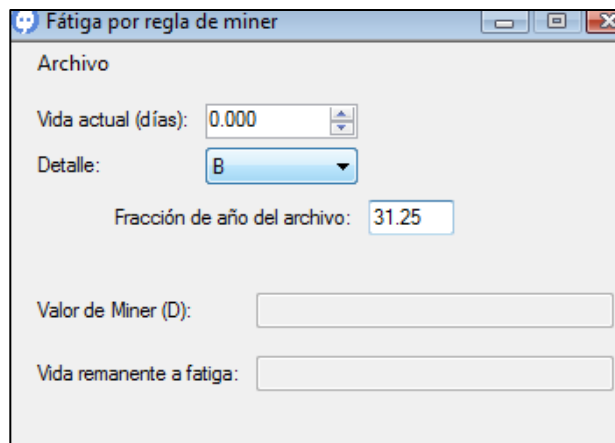


Figura 5.16. Curvas S-N del manual AASHTO (Figura C6.6.1.2.5-1 Rango de tensiones en función del número de ciclos, 2004).

Para aplicar la regla de Miner es necesario conocer las curvas S-N que describen el comportamiento a fatiga de ciertos detalles estructurales de los elementos del puente. El EUROCODE sugiere realizar las pruebas de laboratorio para obtener las curvas S-N de cada elemento, sin embargo dentro de DEFP y ahora en DEEFEP se tomó la decisión de utilizar las curvas S-N del manual AASHTO (capítulo 6, figura C6.6.1.2.5-1 de dicho manual). En la práctica se ha demostrado que el uso de esta gráfica es aceptable para una valoración adecuada de la vida remanente de un puente.

Las ecuaciones de estas curvas fueron agregadas en el algoritmo de DEFP y retomadas en DEEFEP. Para seleccionar alguna curva específica, se indica en el recuadro el tipo de detalle al que corresponde la sección analizada. Para este ejemplo, la parte inferior de las traveses de acero (parte a tensión de la viga) corresponde (según la descripción de AASHTO) a un detalle tipo B. La descripción de los detalles se encuentra en el capítulo 6 páginas 6-37 a 6-52 del manual AASHTO. Estos detalles tienen una equivalencia a los detalles que maneja el Eurocode. Para comparar resultados, se ha observado que el detalle B del manual AASHTO equivale al detalle 71, 80 del Eurocode.



Archivo
Vida actual (días): 0.000
Detalle: B
Fracción de año del archivo: 31.25
Valor de Miner (D):
Vida remanente a fatiga:

Figura 5.17. Asignación de parámetros para la evaluación de daño acumulado.

Por último se abre el archivo del histograma de rainflow (generado en el paso anterior) y automáticamente DEEFEP hace la evaluación de daño con la regla de Miner.

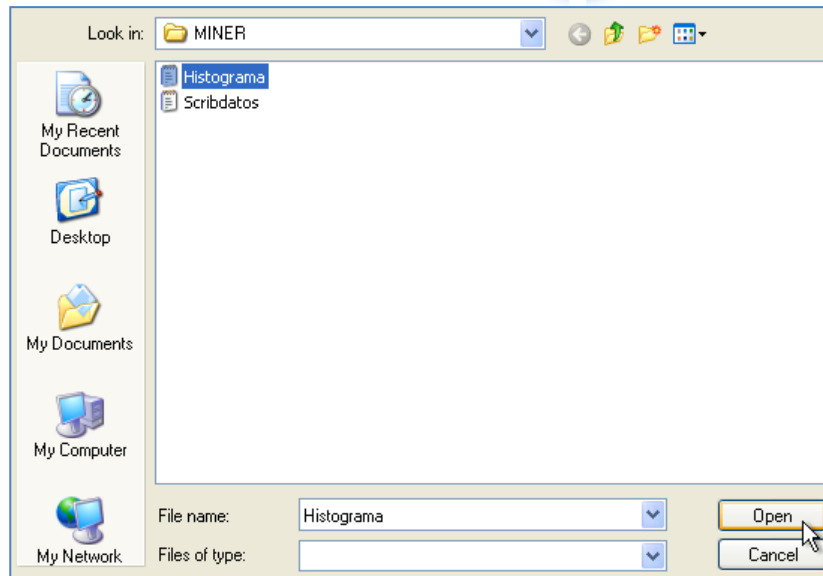


Figura 5.18. Asignación del histograma de rainflow.

Se observa en este ejemplo del puente Kervitous que la vida remanente teórica antes de que se presenten grietas en la parte inferior de las traves de acero es de 25.62 años

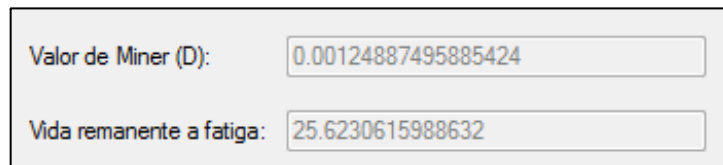


Figura 5.19. Valor de Miner y estimación de Vida a Fatiga. Esfuerzos mediante líneas de influencia. Sección 39m. Kervitous.

El método de Palmgren Miner o regla de Miner no tiene un fundamento teórico formal, en realidad es un proceso que ha justificado sus buenos resultados en la práctica, por ello manuales de gran importancia a nivel mundial (como el EUROCODE) lo siguen incluyendo en sus bases.

5.1.2 Sección del puente localizada a 41.5 m del inicio (sección crítica), para análisis de fatiga

Se determinó la sección crítica del puente a través del análisis de líneas de influencia envolventes, la cual se encuentra a una posición de 41.5 m del inicio del puente.

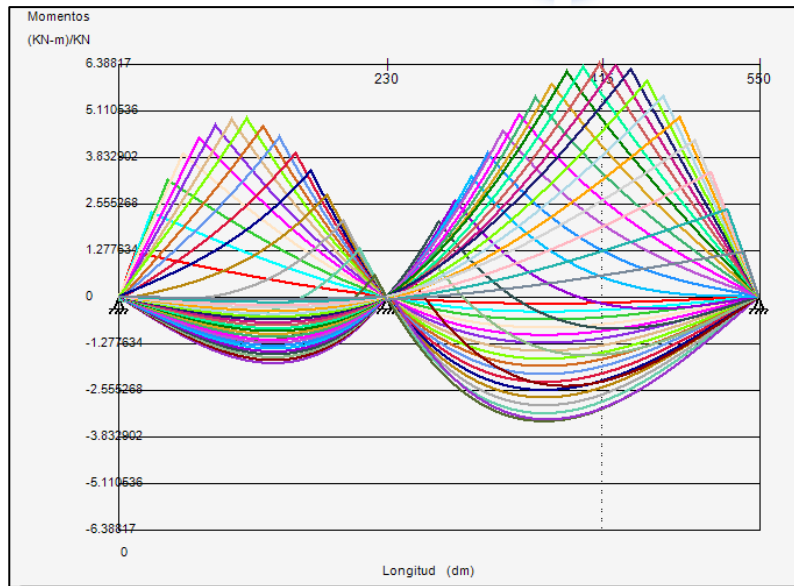


Figura 5.20. Determinación de la sección crítica del puente Kervitous a través del análisis de líneas de influencia envolventes.

Una vez determinada la sección de análisis de fatiga, el programa obtiene la línea de influencia unitaria con la cual se realizará el análisis de determinación de momentos máximos.

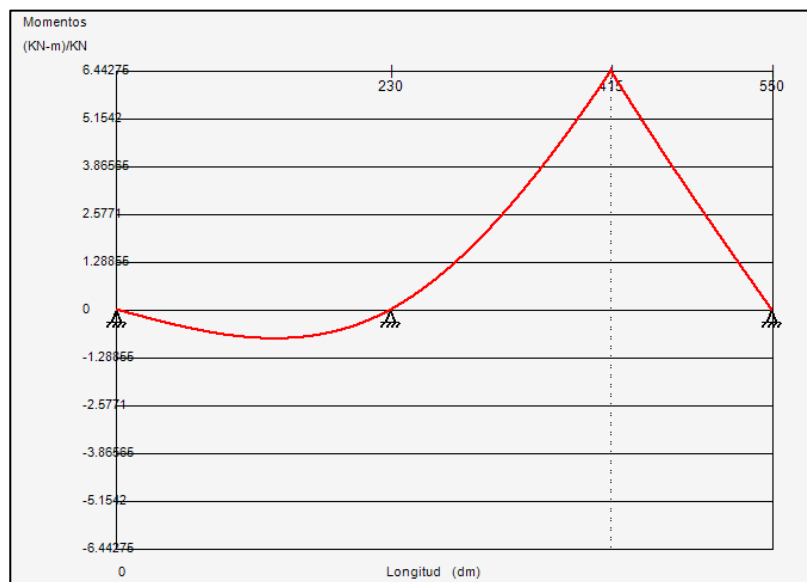


Figura 5.21. Generación de la línea de influencia unitaria del puente Kervitous. Sección de análisis a centro de claro (CL) del segundo claro.

Después del análisis anterior, se determinan los momentos flexionantes máximos con sólo dar click en el botón “Resultados momentos” y posteriormente se procede a asignar el módulo de sección de la viga de apoyo del puente en cuestión $S=0.059 \text{ m}^3$.

Al oprimir la opción “Resultados Esfuerzos” se generan todas variaciones de líneas de influencia de esfuerzos causadas por las cargas móviles.

dist	Li	Car	Eje	Dist	Minimo	Dist	Maximo
0	0	MAX = Primero Encontrado					
1	-0.00882	1	1	133	-0.9397225	415	7.753137
2	-0.01764	1	2	120	-2.891922	415	22.27282
3	-0.02646	1	3	82	-3.836029	360	28.67262
4	-0.03527	1	4	83	-4.719982	350	33.87163
5	-0.04408	1	5	78	-5.356985	338	37.23042
6	-0.05289	2	1	133	-0.6088343	415	5.023159
7	-0.06169	2	2	120	-1.631194	415	12.45666
8	-0.07048	2	3	71	-2.085685	347	15.55328
9	-0.07927	2	4	72	-2.530992	336	18.06149
10	-0.08804	3	1	133	-1.045607	415	8.626729
11	-0.09681	3	2	116	-2.834717	415	21.41541

Figura 5.22. Cuadro de información de las líneas de influencia de esfuerzos por eje vehicular.

El siguiente paso que se realizó para el análisis de fatiga fue el conteo de ciclos de esfuerzos con el método de rainflow. Al oprimir la opción de rainflow, DEEFEP despliega una nueva pantalla donde se observa la gráfica de historia de esfuerzos que provoca el archivo A6 1986.txt, y se procede a determinar el histograma de rainflow.

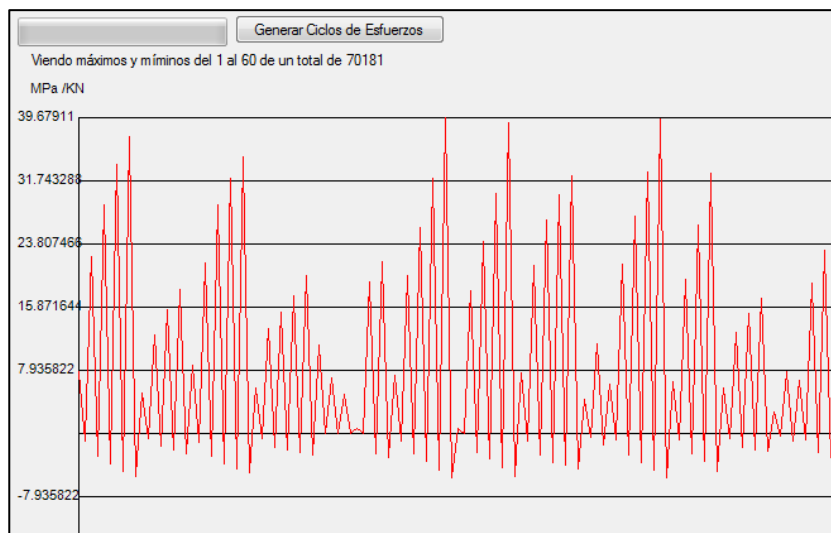


Figura 5.23. Serie de historia de esfuerzos mediante líneas de influencia. Sección 41.5m (sección crítica). Kervitous.

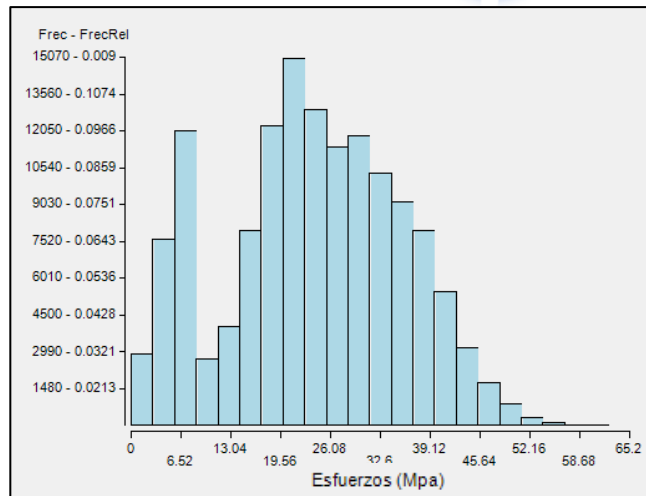


Figura 5.24. Generación del histograma de rainflow. Esfuerzos mediante líneas de influencia. Sección 41.5m. Kervitous.

Para obtener el “histograma de rainflow”, en primer lugar se tiene que seleccionar en columna a leer “1” ya que el archivo creado “EsfuerzosMod.txt”, es de una sola columna, y el rango sugerido es de 3 Mpa. Continuando con el análisis de fatiga del puente Kervitous, se realizó la estimación de daño por fatiga mediante la regla de Miner. Se abre el archivo del histograma de rainflow (generado en el paso anterior) y automáticamente DEEFEP hace la evaluación de daño con la regla de Miner.

Se observa en este ejemplo del puente Kervitous que la vida remanente teórica (mediante un análisis de determinación de esfuerzos por líneas de influencia en la sección crítica), antes de que se presenten grietas en la parte inferior de las traveses de acero es de 25.18 años



Figura 5.25. Valor de Miner y estimación de Vida a Fatiga. Esfuerzos mediante líneas de influencia. Sección 41.5m. Kervitous.

Tanto para el archivo A6-86 como para el RN4-07 se aplica el procedimiento antes descrito, obteniéndose las siguientes gráficas y resultados:

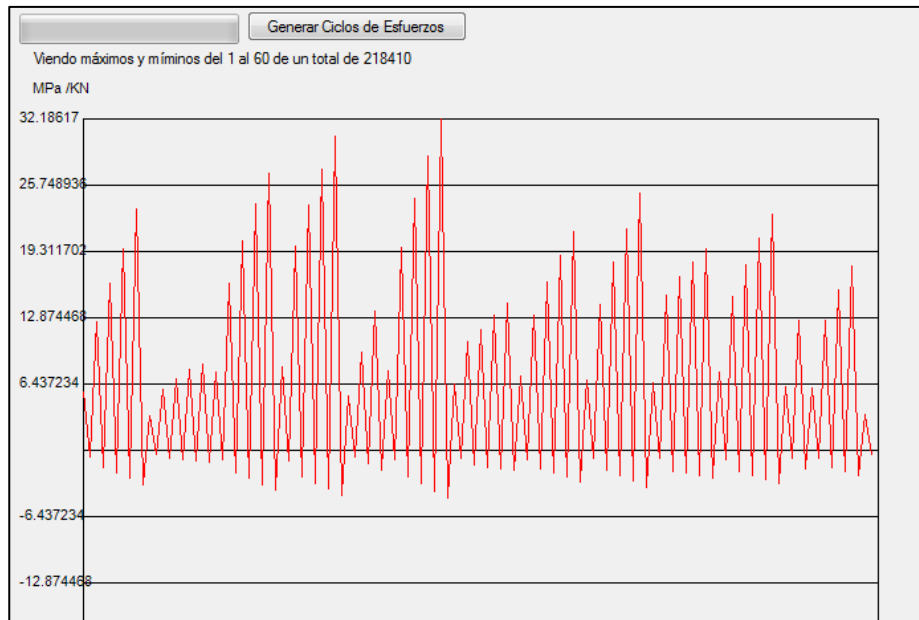


Figura 5.26. Serie de historia de esfuerzos mediante líneas de influencia. Sección 41.5m (sección crítica). Registro WIM RN4, puente Kervitous.

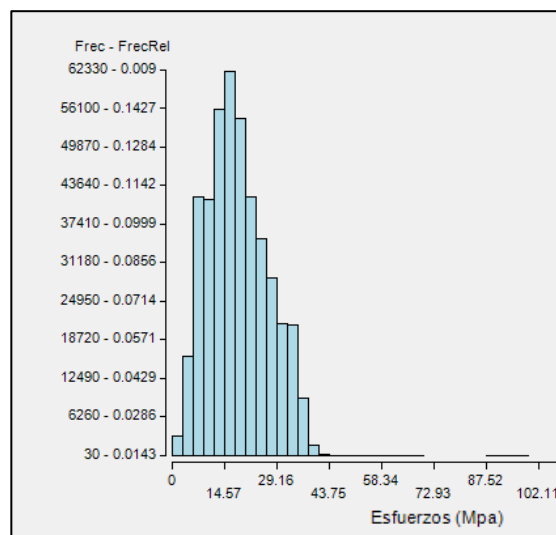


Figura 5.27. Generación del histograma de rainflow. Esfuerzos mediante líneas de influencia. Sección 41.5m. Registro WIM RN4, puente Kervitous.

Vida actual (días):	0.000
Detalle:	B
Fracción de año del archivo:	11.90
Valor de Miner (D):	0.00164203465816477
Vida remanente a fatiga:	51.176516297956

Figura 5.28. Valor de Miner y estimación de Vida a Fatiga. Esfuerzos mediante líneas de influencia. Sección 41.5m. Registro WIM RN4, puente Kervitous.

5.2 Puente kervitous: por método de superficies de influencia, un carril de registro WIM

El módulo de modelo de interacción tráfico-puente por análisis de superficies de influencia, está ubicado en la parte superior del menú principal de DEEFEP.

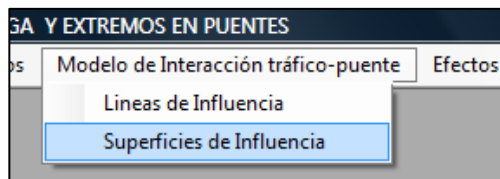


Figura 5.29. Inicialización del módulo de modelo de interacción tráfico-puente. Análisis de Superficies de influencia.

Al seleccionar esta opción se abre el cuadro de menú para la determinación de esfuerzos por medio del análisis de Superficies de influencia.

El análisis comienza al abrir los Archivos de Registros WIM seleccionando si el puente consta de 2 o 3 carriles de circulación. En esta investigación se ilustra la ejemplificación de puentes de 2 carriles Kervitous y Layrac, y de 3 carriles como es el caso de Auxerre.

Una vez seleccionado el tipo de puente (2 o 3 carriles de circulación), el programa pide se ingrese el archivo de registro de tráfico por carril, el cual contiene la información de pesaje en movimiento por cada eje vehicular. Estos archivos deben tener el formato adecuado para que

DEEFEP pueda procesarlo, de lo contrario será necesario utilizar el módulo de tratamiento de archivos para corregir dicho formato.

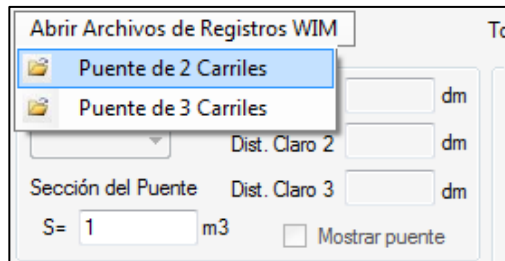


Figura 5.30. Panel inicial del módulo de Análisis por superficies de influencia.

Como en todos los procesos, DEEFEP pide la ruta donde será almacenada la información generada antes de asignar los archivos que se analizarán.

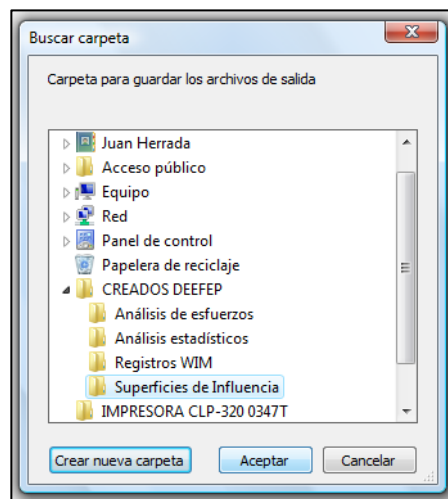


Figura 5.31. Carpeta de almacenamiento de datos generados en el análisis por superficies de influencia.

Posteriormente se buscan los archivos de WIM del tráfico vehicular registrado. Para el ejemplo de aplicación, se han utilizado los archivos A6 1986.txt para el carril de baja velocidad y un archivo nulo “nullo” para el carril de alta velocidad. Esto con la finalidad de realizar un análisis similar al que desarrollo Bárcenas (2011) modelando al puente como viga continua por medio del método de líneas de influencia, contemplando ahora, el puente modelado como un plano de superficie.

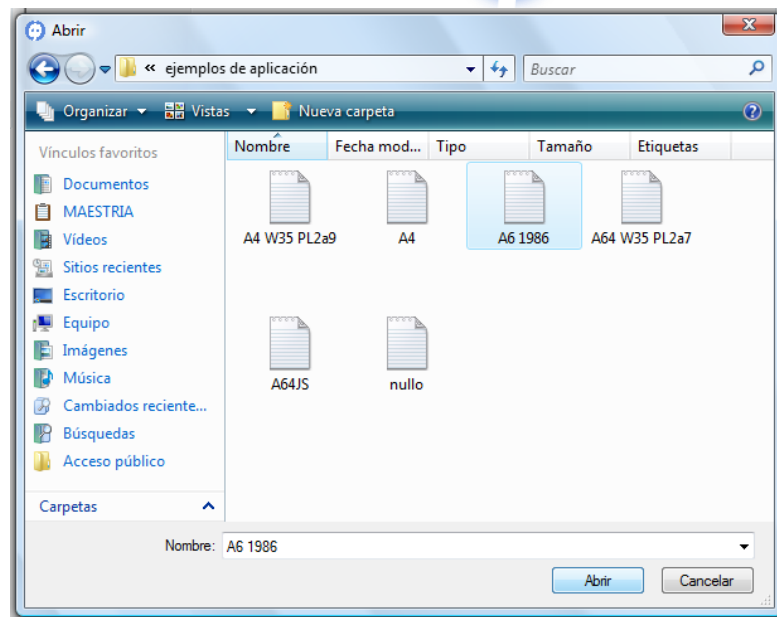


Figura 5.32. Selección de los archivos para el análisis de superficies de influencia.

En seguida se asigna el número de claros que tendrá el puente.

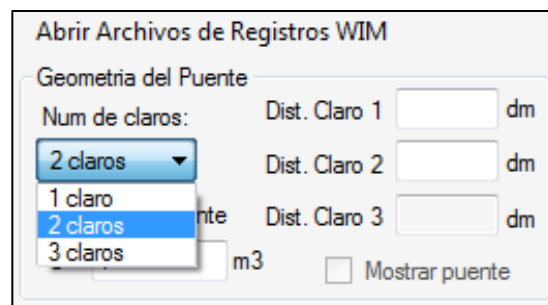


Figura 5.33. Asignación del número de claros para el puente Kervitous.

Como se muestra en la Tabla 5.3, las dimensiones de los dos claros del puente Kervitous son 23 y 32 metros respectivamente.

El siguiente paso es determinar las características de la sección transversal del puente. DEEFEP pide al usuario datos como son ancho de carril (dm), número de apoyos (aunque esta versión se limita a análisis con 2 apoyos) y ubicación transversal de los apoyos a partir de la distancia del extremo de la superficie de rodamiento al eje del apoyo extremo (dm).

Total de carros: Camil 1: 17756 Camil 2: 1

Sección Transversal

Ancho Camil dm No. Apoyos

Dist. del extremo de la superficie de rodamiento al eje del apoyo extremo dm

Distancia entre apoyos dm

Figura 5.34. Asignación de las características de la sección transversal del puente Kervitous.

Una vez asignados los datos anteriores DEEFEP dibuja la sección transversal del puente, permitiendo así al usuario corroborar los datos.

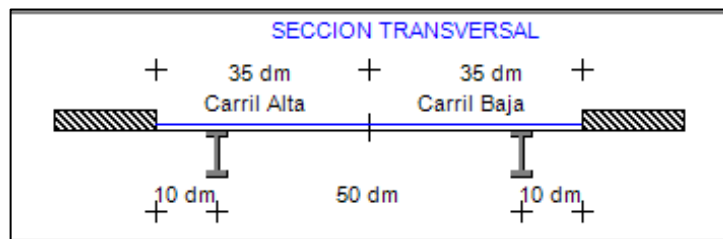


Figura 5.35. Sección transversal del puente Kervitous generada por el programa DEEFEP.

La sección por analizar debe de establecerse en el recuadro de “Punto de Referencia”, donde se asigna la ubicación en términos de distancia con respecto al primer punto de apoyo del lado izquierdo. Como se mencionó anteriormente, en el análisis desarrollado por Bárcenas (2011) y Arroyo (2009), se analizó el centro de claro del segundo claro. Sin embargo, la nueva versión de DEEFEP determina la sección crítica del puente, a través de un análisis de líneas de influencia envolventes, como se señaló en el capítulo III, sub-capítulo 3.2., así DEEFEP muestra un esquema gráfico del puente con las líneas de influencia envolventes para la determinación de la sección crítica.

Por lo anterior, en esta investigación se realiza el análisis de fatiga por superficies de influencia, tanto para la sección crítica, como la sección ubicada al centro del claro del segundo claro (utilizada por Bárcenas (2011) y Arroyo (2009)), con el fin de comparar los resultados.

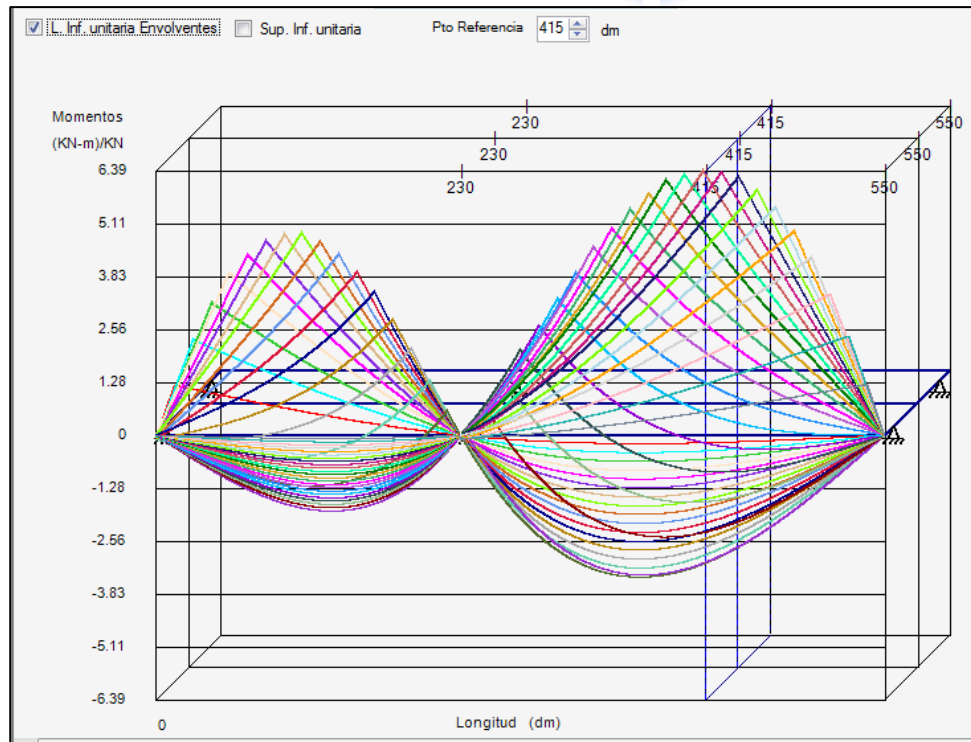


Figura 5.36. Determinación de la sección crítica del puente Kervitous, por medio de análisis de superficie de influencia envolventes.

5.2.1 Sección del puente localizada a 41.5m del inicio (sección crítica), para análisis de fatiga

En esta investigación se realiza el análisis primeramente para la sección crítica encontrada a través del análisis de líneas de influencia envolventes (posición 415 dm a partir del inicio del puente), ya que como su nombre lo indica es la posición crítica que mayores efectos tendrá por el paso vehicular, y posteriormente, se realiza el análisis con la misma sección (posición 390 dm) utilizada por Bárcenas (2011) y Arroyo (2009), con la finalidad de comparar resultados.

El programa obtiene la superficie de influencia unitaria con la cual se realizará el análisis de determinación de momentos máximos. Dicha superficie se muestra en KN-m/KN y muestra las contribuciones de efectos por carril así como la línea de influencia resultante.

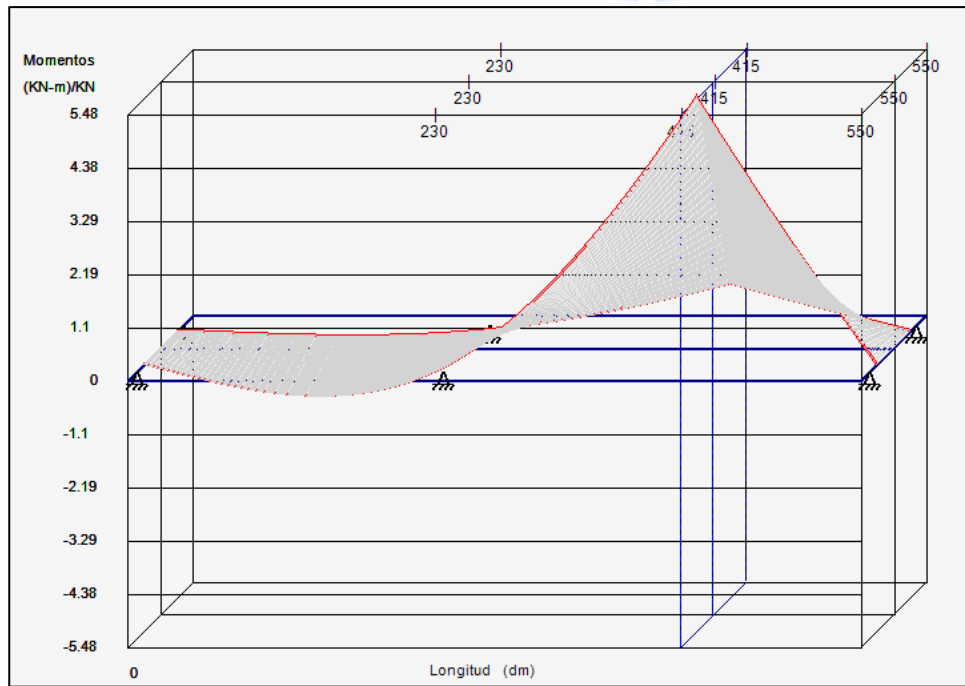


Figura 5.37. Generación de la superficie de influencia unitaria del puente Kervitous en 3D. Sección de análisis a 415 dm (sección crítica).

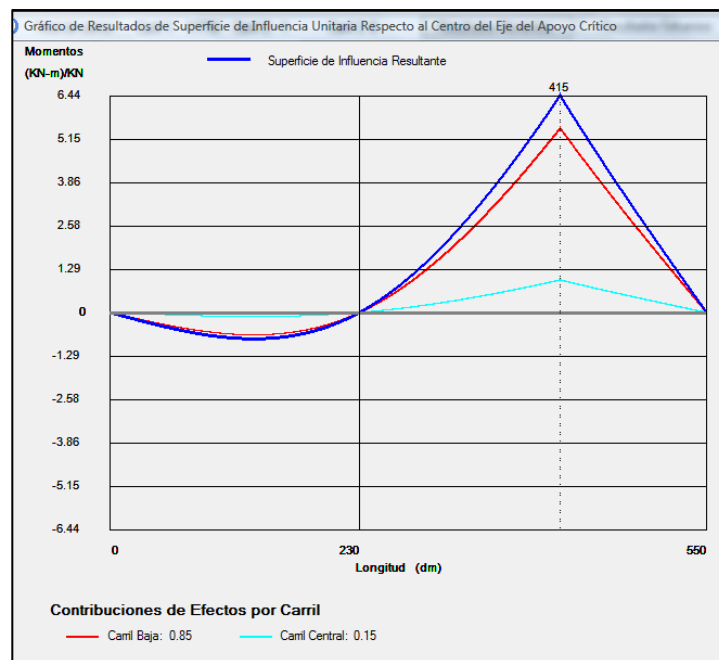


Figura 5.38. Generación de Superficie de influencia unitaria Resultante del puente Kervitous. Sección de análisis a 415 dm (sección crítica).

Internamente se ha generado un archivo en formato de texto de la superficie de influencia, el cual podrá ser remplazado si se requiere otra configuración. Para analizar un puente con más de tres claros es necesario establecer la superficie de influencia en un archivo de texto con las unidades mencionadas (KN-m) y con el formato estándar establecido. Cabe mencionar que de analizarse un puente con más de tres claros, las opciones de visualización y simulación gráfica no podrán ser utilizadas.

Al realizar el análisis anterior el programa activa el botón “Resultados Momentos” ubicado en la parte superior junto al cuadro de resultados. Al dar click sobre este botón se generan automáticamente las superficies de influencia de momentos flexionantes con respecto a la sección especificada (en este caso la sección crítica), producto del paso de las cargas vehiculares descritas por cada eje de los registros WIM.

Una vez obtenidos los momentos flexionantes máximos, se procede a asignar el módulo de sección de la viga de apoyo del puente en cuestión. El puente Kervitous tiene un $S = 0.059 \text{ m}^3$, valor que se estableció en el recuadro correspondiente.

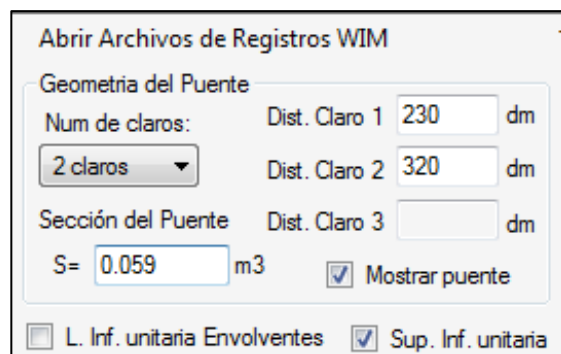


Figura 5.39. Asignación del módulo de sección (S) del puente Kervitous.

El programa obtiene las superficies de influencia que genera el paso de las cargas vehiculares descritas por cada eje. Al oprimir la opción “Resultados Esfuerzos” se generan todas variaciones de superficies de influencia de esfuerzos causadas por las cargas móviles. De igual forma DEEFEP obtiene los esfuerzos máximos y mínimos y su ubicación a lo largo del puente.



Carril 3: 0		Resultados Momentos	Resultados Esfuerzos	Rain Flow			
dist	Sup Infl	Car	Eje	Dist	Minimo	Dist	Maximo
0	0	MAX = Primero Encontrado					
1	-	1	1	133	-0.7987641	415	6.590166
0.008820856		1	2	120	-2.458134	415	18.93189
2	-0.01764071	1	3	82	-3.260625	360	24.37172
3	-0.02645857	1	4	83	-4.011984	350	28.79088
4	-0.03527342	1	5	78	-4.553437	338	31.64585
5	-0.04408427	2	1	78	-4.553437	338	31.64585
6	-0.05289512	2	2	78	-4.553437	338	31.64585

Figura 5.40. Cuadro de información de las superficies de influencia de esfuerzos por eje vehicular.

En la figura anterior se observa la tabla que describe el paso de las cargas en movimiento de los vehículos registrados. En la primera tabla se observa la superficie de influencia unitaria en (KN-m)/KN (normalizada a una carga de KN). En la segunda tabla se visualizan los resultados de esfuerzos y su ubicación en el puente (en MPa). Al igual que con el módulo de análisis por líneas de influencia, DEEFEP tiene la opción de animación gráfica para observar la simulación del flujo vehicular. En esta animación se muestra la variación de los efectos por cada eje vehicular calculado por superficies de influencia. Se muestran las líneas de influencia que se generan debido a la configuración de las cargas móviles por eje en cada carril y son visualizadas hasta en rangos de 50 vehículos. Antes de graficar las líneas, se debe de establecer el intervalo de vehículos que se desee visualizar.

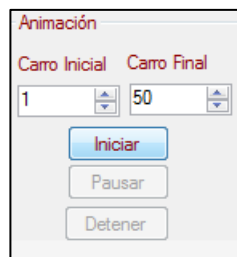


Figura 5.41. Opciones de animación gráfica del flujo vehicular.

DEEFEP tiene la opción de visualizar el escenario de tráfico vehicular en forma de animación. Como el archivo de WIM contiene millones de cargas por eje vehicular, la animación del tráfico también sólo puede visualizarse en rangos de 50 vehículos. Para comenzar con el proceso se oprime el botón “iniciar” y entonces podrá verse el paso de cada vehículo de manera esquemática.

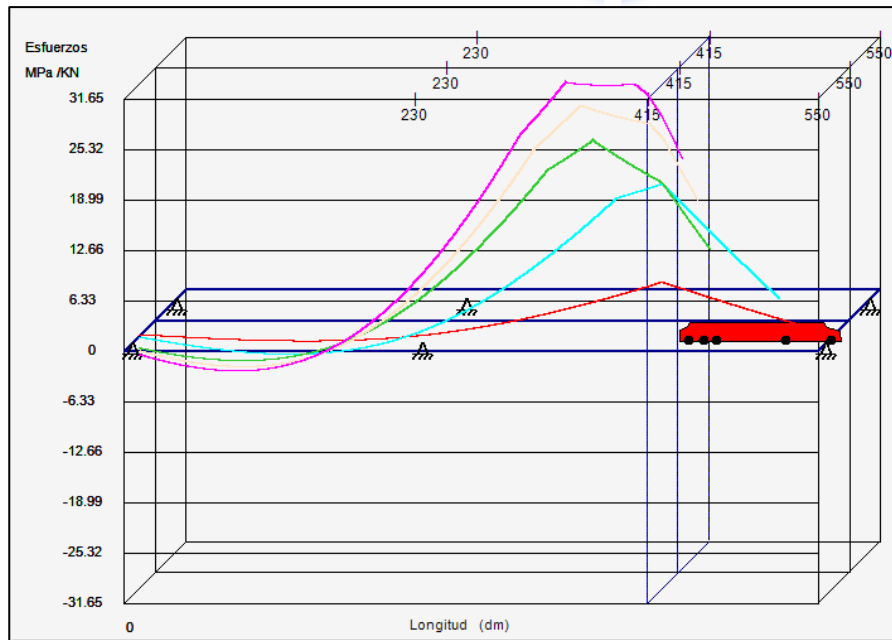


Figura 5.42. Simulación animada del tráfico vehicular registrado (puente Kervitous).

Hasta ahora se ha realizado el cálculo de los esfuerzos debido al paso de los vehículos sobre el puente Kervitous. El siguiente paso que se realizó para el análisis de fatiga fue el conteo de ciclos de esfuerzos con el método de rainflow. Para inicializar el conteo de ciclos de esfuerzos se oprime el botón de “Rain flow”.

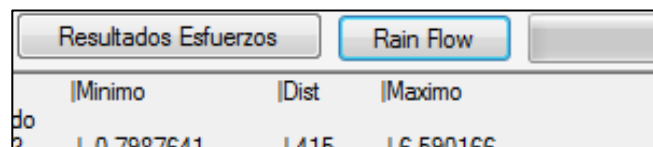


Figura 5.43. Inicialización del conteo de ciclos de esfuerzos con el método de rainflow. Módulo de superficies de influencia. DEEFEP.

Al oprimir la opción de rainflow, DEEFEP despliega una nueva pantalla donde se observa la gráfica de historia de esfuerzos que provoca el archivo A6 1986.txt.

Al oprimir el botón de “Generar ciclos de esfuerzo” el algoritmo de rainflow determina la magnitud de los ciclos de esfuerzos, los cuenta y almacena en un archivo llamado EsfuerzosMod.txt. Este archivo tiene el formato adecuado para ser manipulado por el programa estadístico, con el cual se ha generado el histograma de los ciclos de esfuerzos, mejor conocido como “histograma de rainflow”.

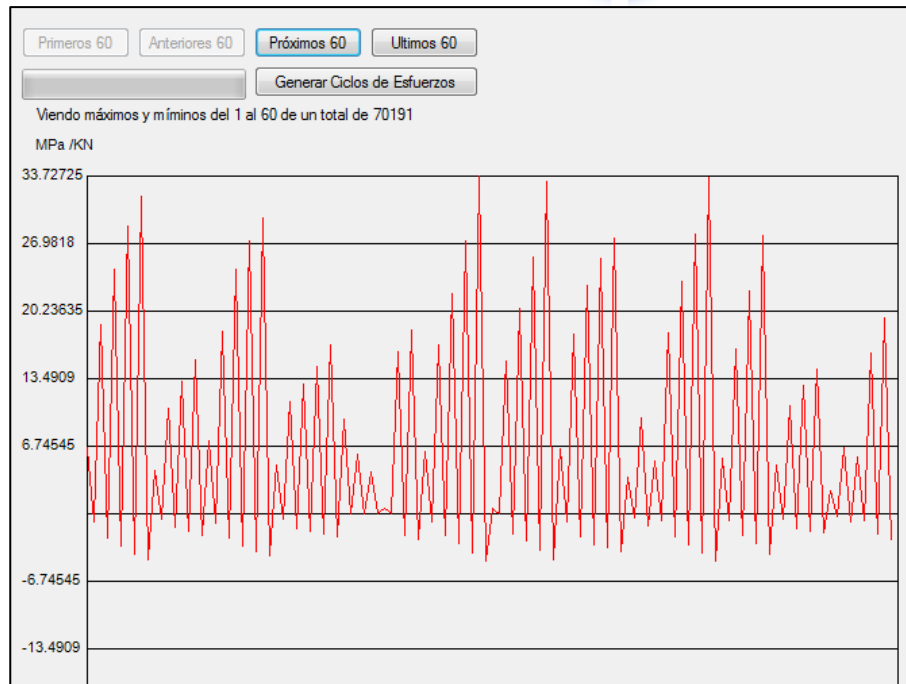


Figura 5.44. Serie de historia de esfuerzos mediante superficies de influencia. Sección 41.5m (sección crítica). Kervitous

Para obtener el “histograma de rainflow”, en primer lugar se tiene que seleccionar en columna a leer “1” ya que el archivo creado “EsfuerzosMod.txt”, es de una sola columna, y el rango sugerido es de 3 Mpa. Al dar click en abrir, se genera automáticamente el histograma de rainflow.

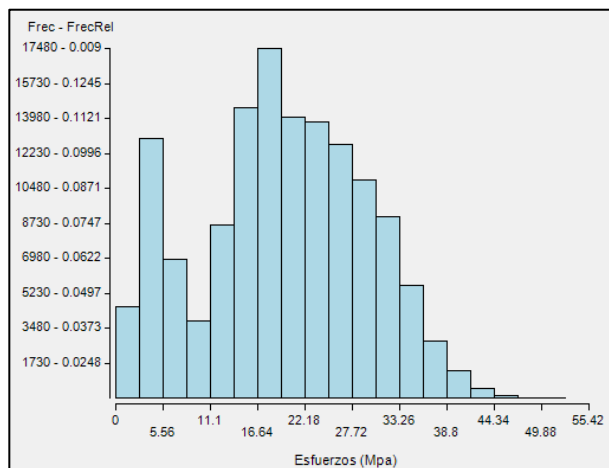


Figura 5.45. Generación del histograma de rainflow. Esfuerzos mediante superficies de influencia. Sección 41.5m (sección crítica). Kervitous.

Continuando con el análisis de fatiga del puente Kervitous, se realizó la estimación de daño por fatiga mediante la regla de Miner. DEEFEP integra este proceso en el módulo de efectos de fatiga de la barra de menú principal. Para el archivo A6 1986.txt el registro es de 8 días, lo que significa que la fracción de año correspondiente es de 1/31.25 (250 días hábiles al año / 8 días hábiles de registro).

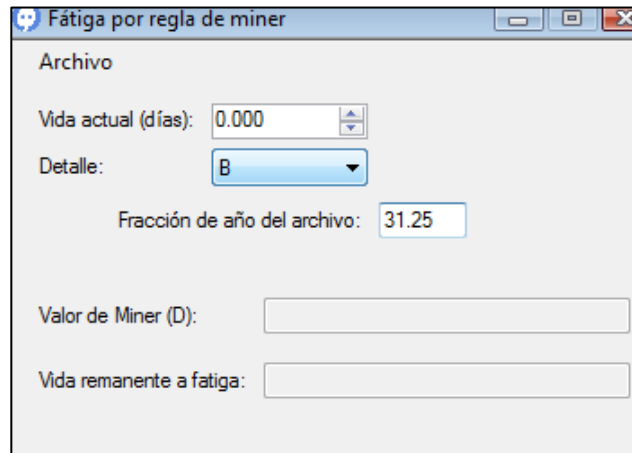


Figura 5.46. Asignación de parámetros para la evaluación de daño acumulado.

Por último se abre el archivo del histograma de rainflow (generado en el paso anterior) y automáticamente DEEFEP hace la evaluación de daño con la regla de Miner. Se observa en este ejemplo del puente Kervitous que la vida remanente teórica antes de que se presenten grietas en la parte inferior de las traves de acero es de 41.40 años

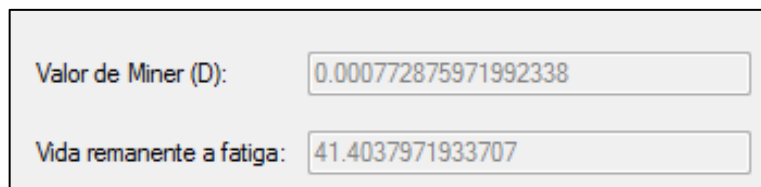


Figura 5.47. Valor de Miner y estimación de Vida a Fatiga. Esfuerzos mediante Superficies de influencia. Sección 41.5m (sección crítica). Kervitous.

El mismo proceso se aplicó para el registro de WIM de RN4 (archivo RN4.txt), obteniendo las siguientes gráficas y resultados:

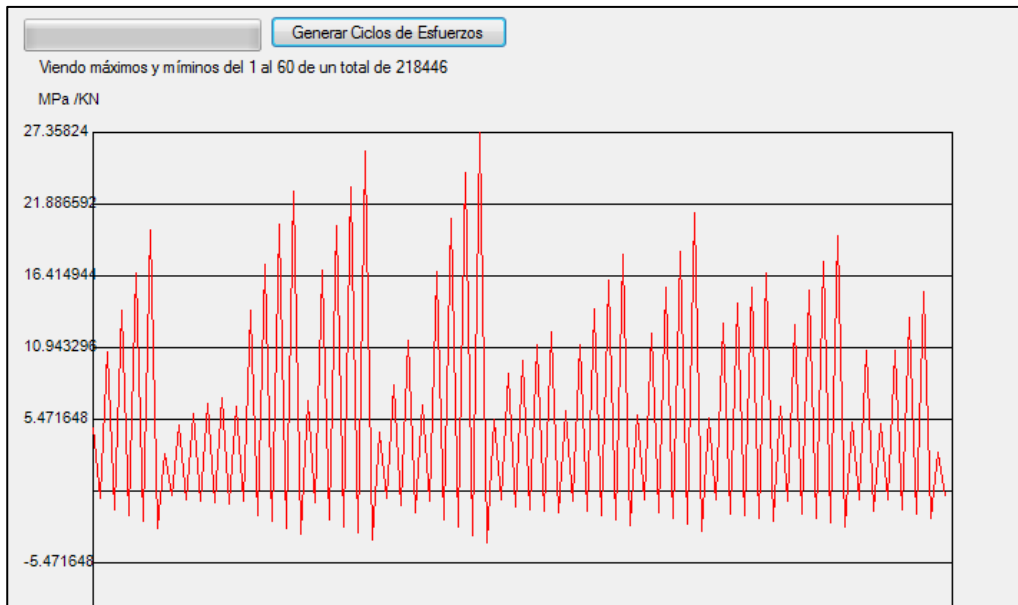


Figura 5.48. Serie de historia de esfuerzos mediante superficies de influencia. Sección 41.5m (sección crítica). Registro WIM RN4, puente Kervitous.

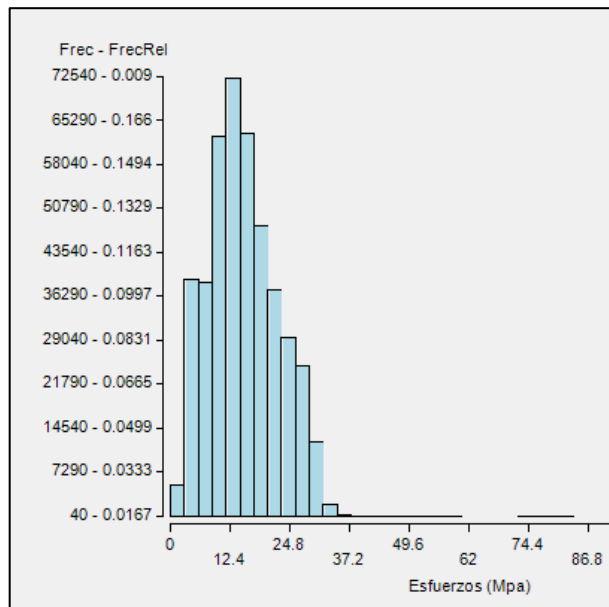


Figura 5.49. Generación del histograma de rainflow. Esfuerzos mediante superficies de influencia. Sección 41.5m. Registro WIM RN4, puente Kervitous.



Vida actual (días):	0.000
Detalle:	B
Fracción de año del archivo:	11.90
Valor de Miner (D):	0.000993915101556617
Vida remanente a fatiga:	84.5480799253067

Figura 5.50. Valor de Miner y estimación de Vida a Fatiga. Esfuerzos mediante superficies de influencia. Sección 41.5m. Registro WIM RN4, puente Kervitous.

5.2.2 Sección del puente localizada a 39 m del inicio (centro de claro del segundo claro), para análisis de fatiga

A continuación, se presenta el análisis del puente Kervitous para una sección de 390dm a partir del inicio del puente, siendo la misma sección que utilizo Bárcenas (2011) y Arroyo (2009) en sus análisis. El programa tiene la capacidad de realizar análisis para fatiga en cualquier sección del puente (asignada manualmente por el usuario).

DEEFEP - DIAGNOSTICO ESTADISTICO DE CARGAS VEHICULARES Y DE EFECTOS DE FATIGA

Tratamiento de Archivos Depuración de Datos Analisis Estadísticos Valores Extremos

Abrir Archivos de Registros WIM Total de carros: Camil 1: 17756 Camil 2: 2

Geometría del Puente

Num de claros: Dist. Claro 1 230 dm

2 claros Dist. Claro 2 320 dm

Sección del Puente Dist. Claro 3 dm

S= 0.059 m3 Mostrar puente

L. Inf. unitaria Envolventes Sup. Inf. unitaria

Sección Transversal

Ancho Camil 35 dm No. Apoyos 2

Dist. del extremo de la superficie de rodamiento al eje del apoyo extremo 10 dm

Distancia entre apoyos 50 dm

Pto Referencia 390 dm

Figura 5.51. Características geométricas del puente Kervitous y asignación de la sección (Pto. de Referencia) para análisis de fatiga.

Primeramente se obtiene la superficie de influencia unitaria con la cual se realizará el análisis de determinación de momentos máximos. Dicha superficie muestra las contribuciones de efectos por carril así como la línea de influencia resultante.

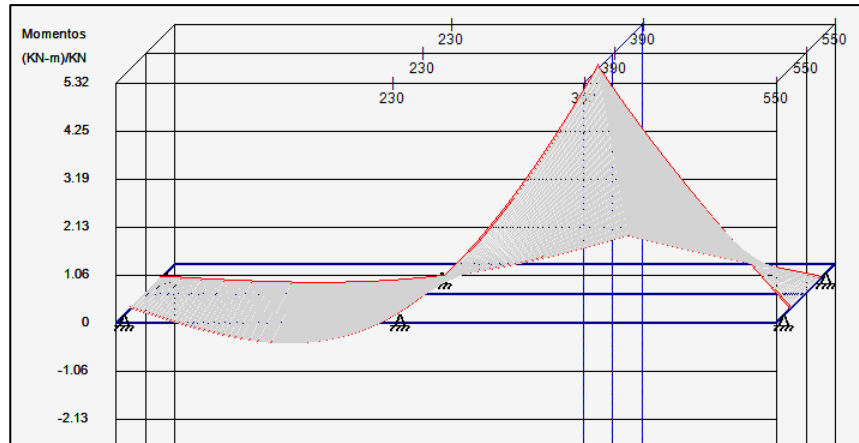


Figura 5.52. Generación de la superficie de influencia unitaria del puente Kervitous en 3D (sección de análisis a 390 dm).

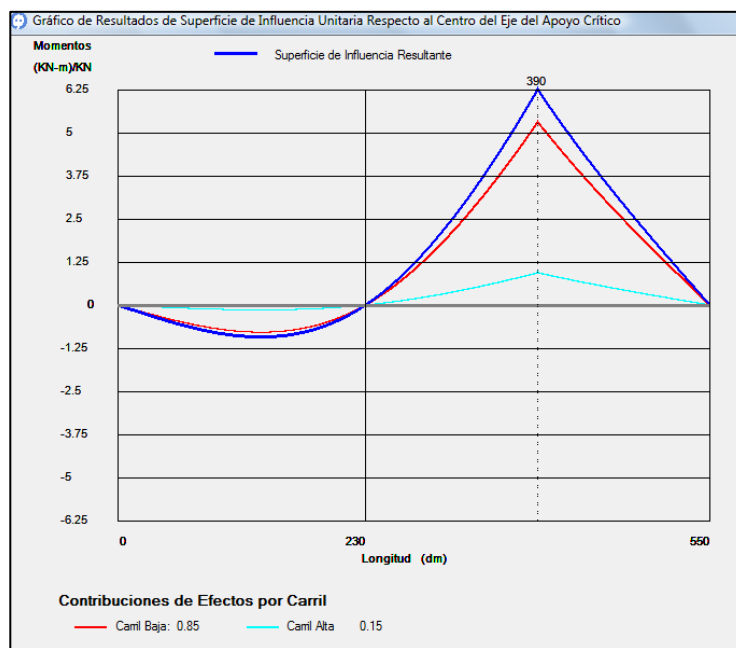


Figura 5.53. Generación de Superficie de influencia unitaria Resultante del puente Kervitous. (Sección de análisis a 390 dm).

El siguiente paso es obtener las superficies de influencia de momentos flexionantes con respecto a la sección especificada (390 dm), producto del paso de las cargas vehiculares descritas por cada eje de los registros WIM. Posteriormente asignamos el módulo de sección de las vigas de apoyo, el cual no varía con respecto al análisis anterior, siendo $S = 0.059 \text{ m}^3$, valor que se estableció en el recuadro correspondiente, y determinamos los esfuerzos máximos y mínimos y su ubicación a lo largo del puente. Una vez obtenidos los esfuerzos, realizamos el conteo de ciclos de esfuerzos con el método de rainflow.

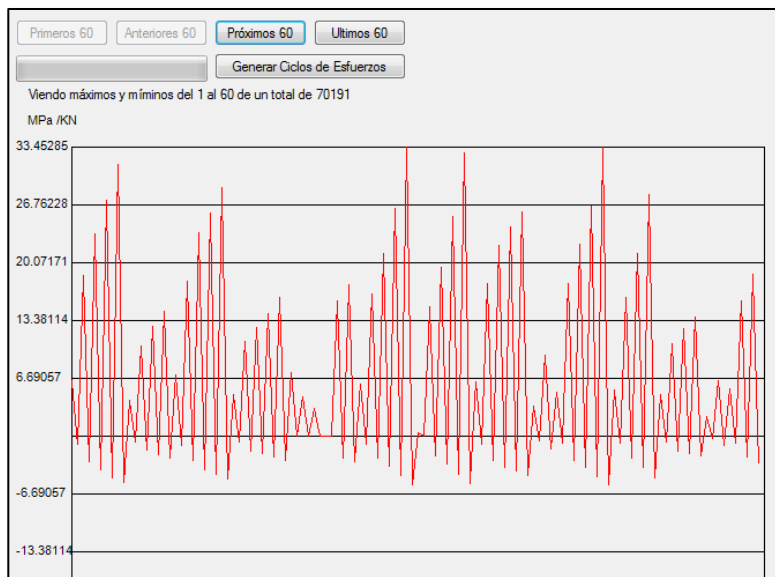


Figura 5.54. Serie de historia de esfuerzos mediante superficies de influencia. Sección 39m. Kervitous.

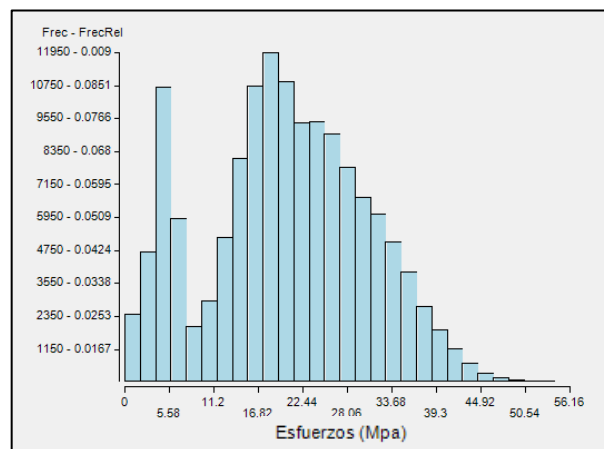


Figura 5.55. Generación del histograma de rainflow. Esfuerzos mediante superficies de influencia. Sección 39m. Kervitous.

Continuando con el análisis de fatiga, se realizó la estimación de daño y vida remanente del puente mediante la regla de Miner.

Parámetro	Valor
Vida actual (días)	0.000
Detalle	B
Fracción de año del archivo	31.25
Valor de Miner (D)	0.000758804840338118
Vida remanente a fatiga	42.1715812800312

Figura 5.56. Asignación de parámetros para la evaluación de daño acumulado. Puente Kervitous. Sección a 390 dm del inicio del puente.

Se observa en este ejemplo del puente Kervitous que la vida remanente teórica antes de que se presenten grietas en la parte inferior de las traveses de acero en su sección a 390 dm del inicio del puente es de 42.17 años.

5.3 Puente kervitous: por método de superficies de influencia, dos carriles de registro WIM

El análisis comienza al abrir los Archivos de Registros WIM por carril, seleccionando para el puente de kervitous dos carriles de circulación. Para este ejemplo de aplicación, se han utilizado los archivos de la autopista Auxerre del año 1986 registrando dos carriles de circulación con los nombres “Aux86-21” para el carril de baja velocidad y el archivo “Aux86-22” para el carril de alta velocidad, con los cuales, al aplicar el análisis por el método de superficies de influencia, se contempla un análisis más apegado a la realidad, ya que los vehículos que circulan sobre vías secundarias producen efectos también producen efectos sobre la sección de análisis.

En seguida se asigna el número de claros del puente (dos) y su longitud (23 y 32 metros respectivamente) y se determinan las características de la sección transversal; se establece la sección por analizar realizándose primeramente un análisis para la sección crítica (415 dm) obtenida por análisis de líneas de influencia envolventes y posteriormente se realiza el análisis para la sección del centro del claro del segundo claro (390 dm), misma utilizaron Arroyo (2009) y Bárcenas (2011).



Abrir Archivos de Registros WIM Total de carros: Camil 1: 17756 Camil 2: 1215

Geometría del Puente

Num de claros: claros

Dist. Claro 1: dm

Dist. Claro 2: dm

Dist. Claro 3: dm

Sección del Puente: m³ Mostrar puente

L. Inf. unitaria Envolventes Sup. Inf. unitaria

Sección Transversal

Ancho Camil: dm

No. Apoyos:

Dist. del extremo de la superficie de rodamiento al eje del apoyo extremo: dm

Distancia entre apoyos: dm

Pto Referencia: dm

Figura 5.57. Asignación de las características geométricas del puente Kervitous.

5.3.1 Sección del puente localizada a 41.5m del inicio (sección crítica), para análisis de fatiga

El programa obtiene la superficie de influencia unitaria con la cual se realizará el análisis de determinación de momentos máximos y muestra las contribuciones de efectos por carril así como la línea de influencia resultante (ver figuras 5.34 y 5.35).

Se obtienen las superficies de influencia de momentos flexionantes con respecto a la sección especificada (en este caso la sección crítica), producto del paso de las cargas vehiculares descritas por cada eje de los registros WIM y se asigna el módulo de sección de la viga de apoyo del puente en cuestión $S = 0.059 \text{ m}^3$ (ver figura 5.36).

Al oprimir la opción “Resultados Esfuerzos” se generan todas variaciones de superficies de influencia de esfuerzos causadas por las cargas móviles.

5 Camil 3: 0		Resultados Momentos			Resultados Esfuerzos		Rain Flow	
dist	Sup Infl	Car	Eje	Dist	Minimo	Dist	Maximo	
0	0	MAX = Primero Encontrado						
1	-	1	1	133	-0.7987641	415	16.590166	
0.008820856		1	2	120	-2.458134	415	18.93189	
2	-0.01764071	1	3	82	-3.260625	360	24.37172	
3	-0.02645857	1	4	83	-4.011984	350	28.79088	
4	-0.03527342	1	5	78	-4.553437	338	31.64585	
5	-0.04408427	2	1	133	-0.5175092	415	4.269685	
6	-0.05289512	2	2	120	-1.288515	415	10.58816	

Figura 5.58. Cuadro de información de las superficies de influencia de esfuerzos por eje vehicular.

Hasta ahora se ha realizado el cálculo de los esfuerzos debido al paso de los vehículos sobre el puente Kervitous. El siguiente paso que se realizó para el análisis de fatiga fue el conteo de ciclos de esfuerzos con el método de rainflow.

Al oprimir el botón de “Generar ciclos de esfuerzo” el algoritmo de rainflow determina la magnitud de los ciclos de esfuerzos, los cuenta y almacena en un archivo llamado EsfuerzosMod.txt. Este archivo tiene el formato adecuado para ser manipulado por el programa estadístico, con el cual se ha generado el histograma de los ciclos de esfuerzos, mejor conocido como “histograma de rainflow”.

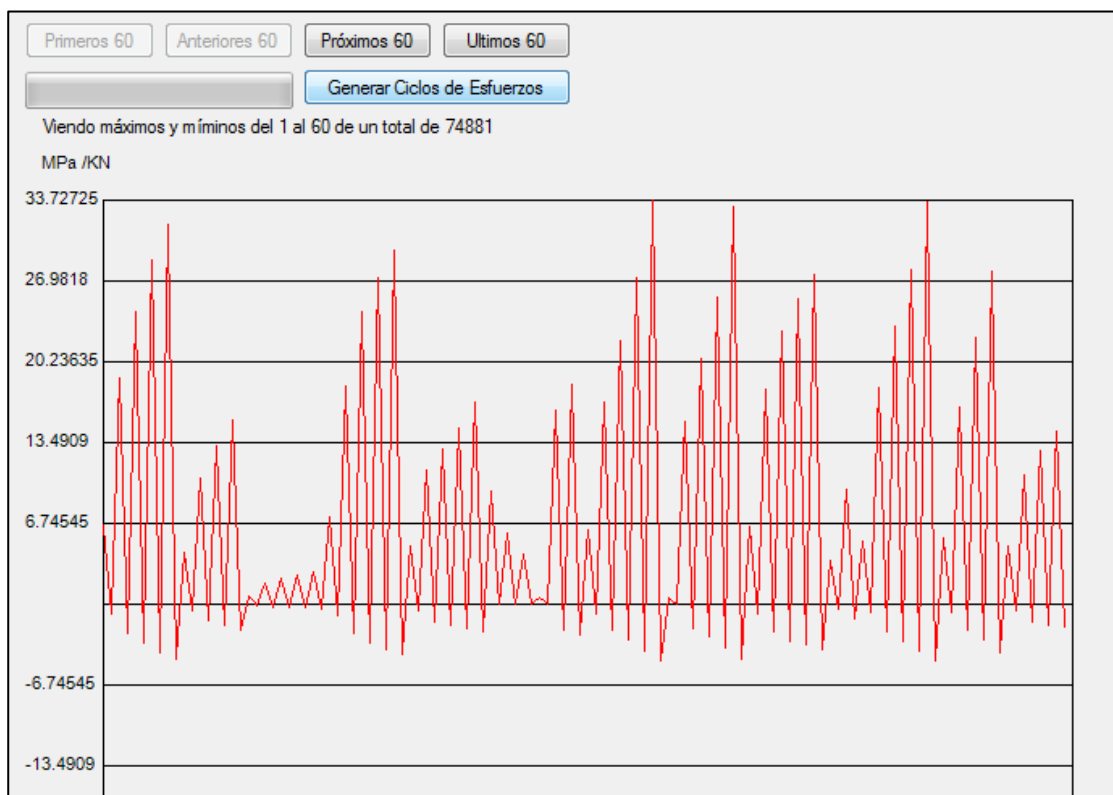


Figura 5.59. Serie de historia de esfuerzos mediante superficies de influencia. Sección 415 dm (sección crítica). Kervitous.

Para obtener el “histograma de rainflow”, en primer lugar se tiene que seleccionar en columna a leer “1” ya que el archivo creado “EsfuerzosMod.txt”, es de una sola columna, y el rango sugerido es de 3 Mpa. Al dar click en abrir, se genera automáticamente el histograma de rainflow.

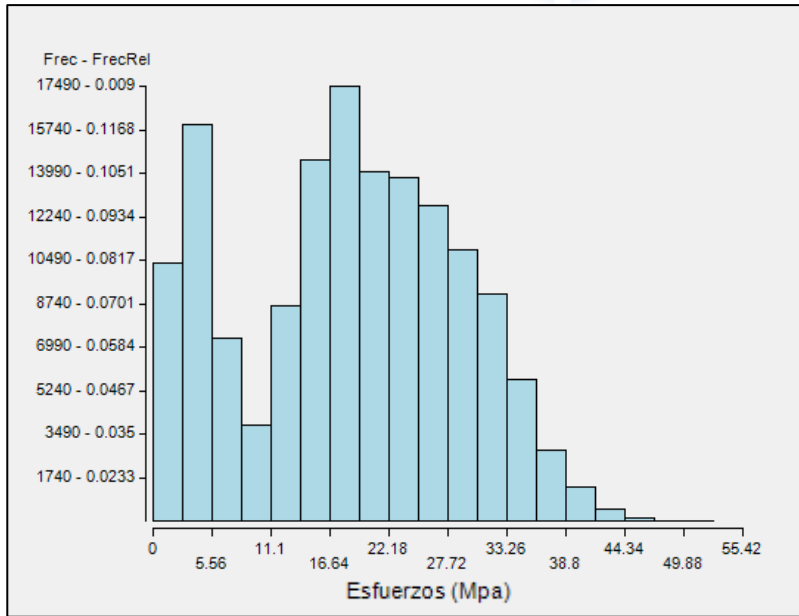


Figura 5.60. Generación del histograma de rainflow. Esfuerzos mediante superficies de influencia. Sección 415 dm (sección crítica). Kervitous.

Continuando con el análisis de fatiga del puente Kervitous, se realizó la estimación de daño por fatiga mediante la regla de Miner. Se observa en este ejemplo del puente Kervitous que la vida remanente teórica antes de que se presenten grietas en la parte inferior de las trabes de acero es de 41.34 años

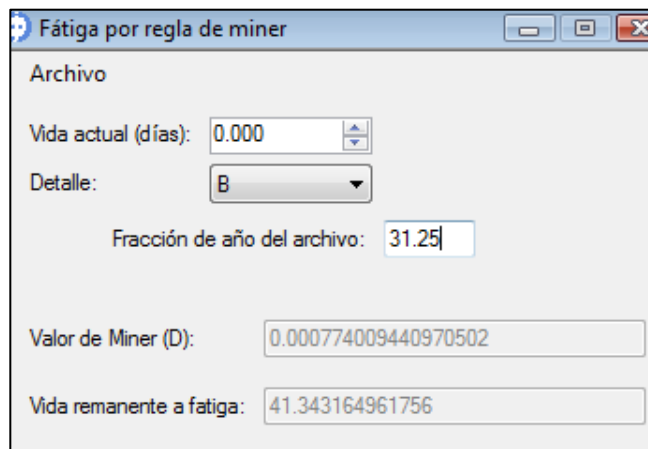


Figura 5.61. Valor de Miner y estimación de Vida a Fatiga. Esfuerzos mediante superficies de influencia. Sección 415 dm (sección crítica). Kervitous.

El mismo proceso se aplicó para el registro de WIM de RN4 (archivo RN4.txt), obteniendo las siguientes gráficas y resultados:

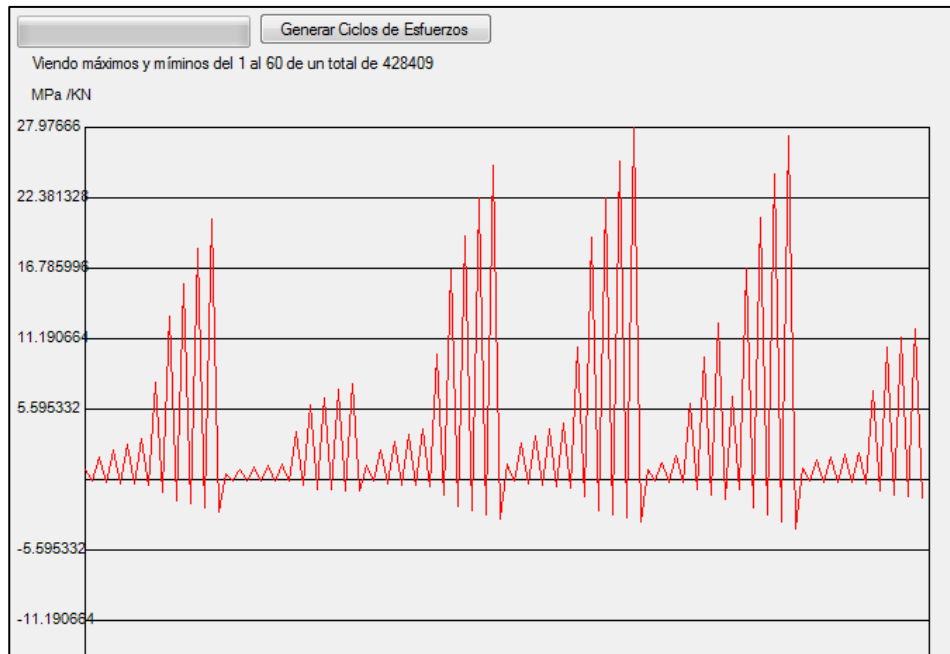


Figura 5.62. Serie de historia de esfuerzos mediante superficies de influencia. Sección 41.5m (sección crítica). Registro WIM RN4 Vía 1 y 2, puente Kervitous.

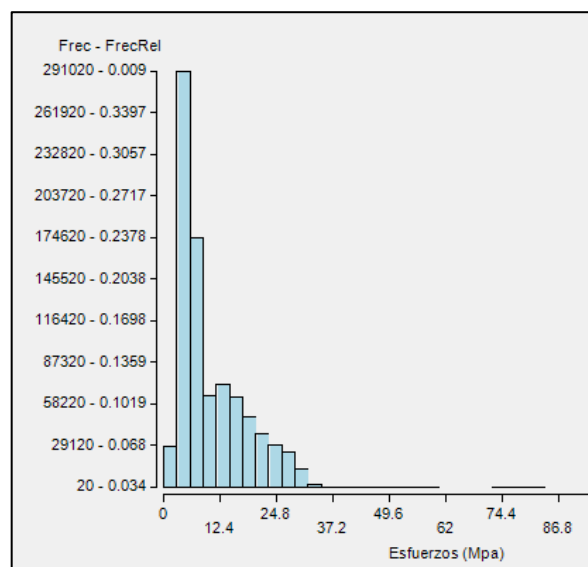


Figura 5.63. Generación del histograma de rainflow. Esfuerzos mediante superficies de influencia. Sección 41.5m. Registro WIM RN4 Vía 1 y 2, puente Kervitous.

Vida actual (días):	0.000
Detalle:	B
Fracción de año del archivo:	11.90
Valor de Miner (D):	0.00105488550207894
Vida remanente a fatiga:	79.6613597208102

Figura 5.64. Valor de Miner y estimación de Vida a Fatiga. Esfuerzos mediante superficies de influencia. Sección 41.5m. Registro WIM RN4 Vía 1 y 2, puente Kervitous.

5.3.2 Sección del puente localizada a 39 m del inicio (centro de claro del segundo claro), para análisis de fatiga

A continuación, se presenta el análisis del puente Kervitous para una sección de (390dm) a partir del inicio del puente, siendo la misma sección que utilizo Bárcenas (2011) y Arroyo (2009) en sus análisis. El programa tiene la capacidad de realizar análisis para fatiga en cualquier sección del puente (asignada manualmente por el usuario).

Una vez asignadas las características generales del puente, se obtienen las superficies de influencia de momentos flexionantes con respecto a la sección especificada (en este caso centro de claro de segundo claro), producto del paso de las cargas vehiculares descritas por cada eje de los registros WIM y se asigna el módulo de sección de la viga de apoyo del puente en cuestión $S = 0.059 \text{ m}^3$ (ver figuras 5.46, 5.47), y posteriormente, determinamos los esfuerzos máximos y mínimos y su ubicación a lo largo del puente. Una vez obtenidos los esfuerzos, realizamos el conteo de ciclos de esfuerzos con el método de rainflow.

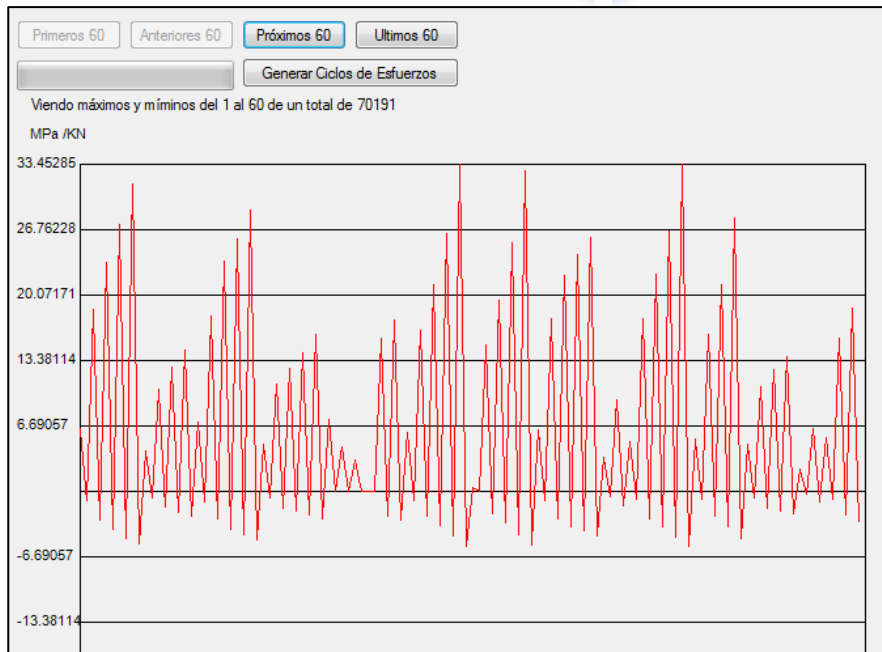


Figura 5.65. Serie de historia de esfuerzos mediante superficies de influencia. Sección 390 dm (centro de claro de segundo claro). Kervitous.

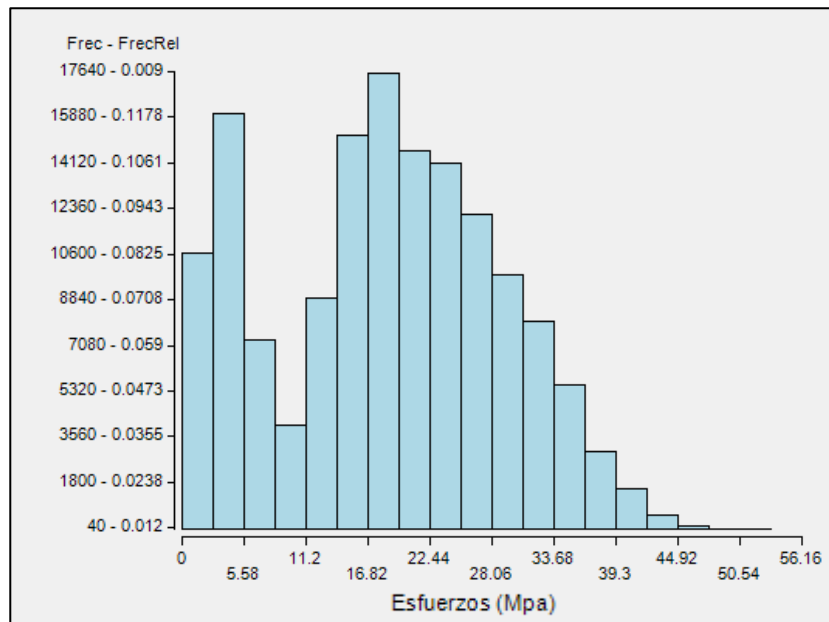
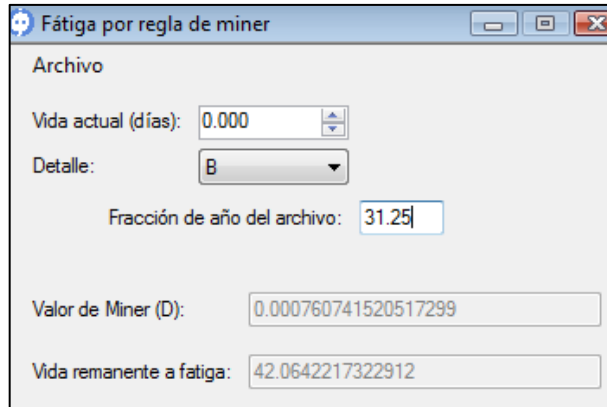


Figura 5.66. Generación del histograma de rainflow. Esfuerzos mediante superficies de influencia. Sección 390 dm (centro de claro de segundo claro). Kervitous.

Continuando con el análisis de fatiga, se realizó la estimación de daño y vida remanente del puente mediante la regla de Miner.



The screenshot shows a software window titled "Fátiga por regla de miner" with the following fields and values:

Field	Value
Vida actual (días)	0.000
Detalle	B
Fracción de año del archivo	31.25
Valor de Miner (D)	0.000760741520517299
Vida remanente a fatiga	42.0642217322912

Figura 5.67. Asignación de parámetros para la evaluación de daño acumulado. Puente Kervitous. Sección a 390 dm del inicio del puente.

Se observa en este ejemplo del puente Kervitous que la vida remanente teórica antes de que se presenten grietas en la parte inferior de las traveses de acero en su sección a 390 dm del inicio del puente es de 42.06 años.

5.4.1 Análisis de los resultados y discusión

El motivo de este subcapítulo es realizar un análisis paramétrico de resultados de los análisis de fatiga aplicados a los puentes Auxerre, Kervitous y Layrac, de Francia, ante las cargas de los registros de tráfico de la autopista A6 (para todos los puentes) y la ruta nacional RN4 (sólo para el puente Kervitous), utilizando el programa DEEFEP.

Los periodos de vida de servicio ante efectos de fatiga obtenidos en este trabajo, se muestran en la Tabla 5.2, en comparación con los resultados de referencia obtenidos en estudios precedentes por Arroyo M. y Jacob B. en el 2009 (CASO I) y Bárcenas V. (CASO II). En las primeras columnas de esta tabla, se muestran las características generales de los puentes: nombre, longitud total y número de claros; seguido por la localización de las secciones de interés para el análisis de fatiga y finalmente los periodos de fatiga considerando tanto líneas como superficies de influencia.

En particular, el análisis de fatiga se realiza para la parte inferior de la sección transversal, al centro de las trabes de acero (curvatura hacia abajo, tensión en la cara inferior de la viga), correspondiente a un detalle tipo B (AASHTO). Cabe mencionar, que la descripción de los detalles se encuentra en el capítulo 6 páginas 6-37 a 6-52 del manual AASHTO. Estos detalles corresponden a los detalles que utiliza el Eurocode. Se observa que el detalle B del manual AASHTO equivale al detalle 71, 80 del Eurocode (utilizados por Arroyo M. y Jacob V.).

Para resaltar la importancia de tomar más variables en los análisis de fatiga, que se apeguen más al comportamiento real de los puentes, en esta investigación se realizan aproximaciones diferentes: a) líneas o superficies de influencia, b) Sección central o sección crítica de la viga más esforzada, c) Carga a centroides o cargas excéntrica, d) Considerando un carril o dos carriles de circulación cargados.

Para cada caso estudiado, se determinan los momentos máximos y los esfuerzos correspondientes, al paso de cada vehículo pesado. Una vez determinados los esfuerzos, el proceso de cálculo de fatiga es el mismo, independientemente de la aproximación. El cálculo de fatiga implica la: utilización del método de rainflow para el conteo de ciclos de esfuerzos y su



magnitud, obtención del histograma de rainflow, utilización de las curvas S-N y la aplicación de la regla de Miner para la estimación de daño acumulado y vida remanente del puente.

A continuación se describen las condiciones particulares de cada caso, resaltando las diferencias entre los casos tratados y resaltando las ventajas de tomar en cuenta más variables que se apegan mejor a la realidad. Los casos I y II son tratados por Arroyo y Bárcenas respectivamente, los demás casos son tratados en este trabajo de tesis.

CASO I. Resultados obtenidos por Arroyo et al. (2009).

CASO II. Resultados obtenidos por Bárcenas (2011).

CASO III. Línea de influencia con cargas centroidales. Con el fin de verificar y calibrar los algoritmos utilizados en la versión anterior del programa DEFP y corregir las posibles anomalías, primeramente en este trabajo, se realiza un análisis de fatiga con el programa DEEFEP considerando el método de análisis por líneas de influencia para la determinación de momentos máximos y cálculo de esfuerzos (Tabla 5.2, CASO III), similar al desarrollado por Bárcenas en 2011 en el programa DEFP (Tabla 5.2, CASO II). En esta aproximación del análisis por líneas de influencia, se tiene la consideración de que el eje centroidal del vehículo se encuentra al centro del ancho del carril y así permanece a lo largo del puente, de la misma manera, se considera que la viga de apoyo se encuentra ubicada al centro del carril (coincidiendo el centroide de la carga vehicular con el centroide de la viga), presumiendo que la viga cargada representa a la totalidad del puente y haciendo la hipótesis de modelado del puente como una sola viga continua (ver *Apéndice B.2.*, Figura B.6).

Revisando los algoritmos y procesos del programa DEFP se encontraron algunas anomalías. En el “módulo de líneas de influencia” de este programa, se identificaron errores en el uso de unidades utilizadas y en la convención de signos, así como, en el “módulo de fatiga”, un error computacional en el algoritmo del método de rainflow que implicaba que el programa dejara fuera ciclos de esfuerzos en el proceso de conteo, provocando una disminución en la estimación de la vida remanente del puente. Por mencionar, para el puente Kervitous se estima un período de vida de 31.12 años con el programa DEFP, y una vez corregido el programa DEEFEP se obtiene un período de vida de 25.62 años.



Gracias a la mejora en la determinación de la sección crítica por líneas de influencia envolventes, para el puente Kervitous en el análisis de fatiga, el periodo de vida de este puente disminuye, en comparación a los resultados obtenidos en estudios precedentes de Arroyo M. et al (2009) y Bárcenas (2011), donde se utiliza la aproximación de considerar la sección central del segundo claro del puente.

Por lo anterior, utilizando el método de líneas de influencia se obtiene el valor de periodo de vida de 25.62 años para la sección central del segundo claro en comparación al periodo de vida de 25.19 años, considerando la sección crítica. Mostrando la importancia de la predicción del periodo de vida respecto a la sección crítica real, y no suponer la sección central como crítica.

Cabe mencionar que en ocasiones puede ser necesario realizar análisis de fatiga para alguna sección en específico, permitiendo el programa DEEFEP realizarlos.

CASO IV y V. Superficies de influencia. Con el afán de resaltar la importancia de realizar análisis de predicción del periodo de vida ante fatiga considerando superficies de influencia (que representa varios carriles) en lugar de líneas de influencia (que representan un carril), además de verificar la importancia de realizar estas predicciones con la sección crítica en comparación con la sección central supuesta; en este trabajo de tesis, se realizan el segundo y tercer análisis de fatiga aplicando el programa DEEFEP, con superficies de influencia en la determinación de momentos máximos y de esfuerzos de las secciones centrales y crítica.

En el **CASO IV** (Tabla 5.2) sólo se utiliza un carril cargado, usando el mismo archivo de registro WIM que el utilizado en los análisis con líneas de influencia de los CASOS I, II y III. Al realizar un análisis por líneas de influencia se sobre-estima los efectos de la carga, ya que al considerar tanto el vehículo como la viga de apoyo al centro del ancho del carril se tiene una influencia directa del 100% de estos efectos de carga sobre la viga de apoyo y por ende, una disminución directa en la estimación del periodo de vida.

Con el afán de tomar en cuenta el efecto del esfuerzo que le corresponde a la viga de apoyo por la posición transversal tanto de esta viga como del vehículo, se realizan análisis de superficies de influencia considerando un sólo carril cargado (el de baja velocidad) y el factor de



influencia correspondiente a la posición transversal del vehículo, considerando una variación lineal de la influencia si se tienen sólo dos apoyos y para más de dos apoyos se debe calcular la línea de influencia transversal correspondiente. Por tanto en el caso más general es necesario calcular las líneas de influencia, longitudinales y transversales, para determinar los momentos y esfuerzos máximos de la sección de interés. (Ver *Apéndice B.2.*, figura B.8).

Una vez realizado el análisis de fatiga con superficie de influencia, para el puente Kervitous, se obtiene un período de vida de este puente de 42.17 años en la sección central del segundo claro, contra el valor de 25.62 años obtenido por líneas de influencia, sobrestimando en este caso la influencia de la caga. Para la sección crítica se tiene un período de vida de 41.40 años para un análisis por superficies de influencia, en comparación al valor de 25.29 años obtenido con un análisis por líneas de influencia, mostrando la misma tendencia.

Finalmente, en el último análisis de fatiga realizado (**CASO V**), se utiliza el método de análisis de superficies de influencia con dos carriles de circulación cargados, de los registros WIM de la autopista Auxerre del año 1986, “Aux86-21” del carril de baja velocidad y “Aux86-22” del carril de alta velocidad. Este escenario de tráfico con dos carriles cargados, se asemeja más a la realidad en comparación con los análisis anteriores que consideran un solo carril cargado.

El período de vida estimado para el puente Kervitous en su sección crítica, considerando dos carriles cargados, es de 41.34 años, en comparación al análisis de superficies de influencia utilizando un sólo carril cargado, que es de 41.40 años. En este caso los dos periodos son muy parecidos, probablemente por la poca influencia de las cargas del segundo carril, donde el periodo de registro es de una semana.

En el caso del análisis de fatiga del puente Kervitous sometido al tráfico de la ruta nacional RN4, los resultados se muestran en las tablas 5.3 y 5.4, para tres escenarios de tráfico: a) registro completo WIM RN4 de 6 semanas, b) registro parcial WIM RN4 de 4 semanas y c) registro parcial WIM RN4 de 3 semanas. Estos dos últimos escenarios se obtienen dividiendo el archivo WIM, dado que el programa DEEFEP tiene limitaciones en la memoria de almacenamiento de datos que se requieren para los análisis de fatiga, que implica un tratamiento de datos mucho mayor al considerar información de más de un carril de circulación. Por otro lado, se quiere estudiar la validez en la predicción considerando todos los datos disponibles de



registros WIM en comparación a datos parciales del mismo. Con base a estos tres escenarios de tráfico WIM se puede observar que los resultados para un carril cargado las predicciones del periodo de vida para 6 y 4 semanas de registro se asemejan (83 y 84.54 años, respectivamente), a diferencia del resultado obtenido para el registro de 3 semanas (66.89 años). Para el caso de 4 semanas, el periodo de vida fue superior al de 6 semanas, esto pudo haberse debido a que un importante número de vehículos más pesados se encuentran dentro de esta muestra y el periodo de vida es función de la muestra utilizada. Si un año está representado por una semana muy demanda en carga o en caso contrario poco demandada, teóricamente, no es representativa de lo que pudiera estar sucediendo en todo el año. Esto muestra la gran dificultad en poder predecir los efectos de la carga de un año en función de una muestra de registro pequeño (1semana). Teóricamente para una buena predicción de la vida útil ante fatiga de un puente, se debería tener registros de máximos anuales, como se realiza en otro tipo de fenómenos meteorológicos.

En el caso de dos carriles cargados con muestras de 4 y 3 semanas se identifica la misma tendencia (79.66 – 62.86 años).



VI. CONCLUSIONES

El trabajo de tesis presentado muestra principalmente el desarrollo del software DEEFEP, actualizado, revisado y mejorado con un enfoque moderno: estructurado por módulos, interactivo y amigable para el usuario. En este programa se realiza el tratamiento de archivos, depuración de datos, análisis estadístico de cargas vehiculares para uno o varios archivos de registro WIM a la vez, cálculo de valores extremos de cargas para diferentes períodos de retorno y análisis de fatiga puentes carreteros de acero, para uno o varios carriles a través de líneas o superficies de influencia. Este programa se basa en la metodología propuesta por el Eurocode, similar a lo propuesto en AASHTO.

Por otro lado, con el módulo de análisis estadístico se pueden realizar estudios paramétricos que permiten conocer tanto las características de flujo vehicular determinadas a partir de un análisis comparativo entre las leyes de distribución y de valores extremos bajo diferentes escenarios de tráfico como la evolución y tendencia histórica; con lo cual también, se puede visualizar gráficamente la manera que ha ido evolucionando el tráfico, información que es útil para regular el tráfico vehicular y/o para diseño de nuevos puentes.

Con el módulo de análisis de superficies de influencia se tiene una aproximación más acorde con la interacción tráfico-puente. Para los ejemplos de aplicación de puentes de Acero de Francia sometidos a tráfico real de la autopista Francesa A6 y ruta nacional RN4, reflejan una mejor aproximación en la determinación de los efectos de los esfuerzos y en la estimación del período de vida de dichos puentes. Con este pronóstico se tiene un mejor punto de referencia para saber que puentes están a punto de sufrir algún tipo de deterioro de fatiga y período de recurrencia.

Dada la necesidad de evaluar la vida remanente ante fatiga de los puentes carreteros de acero, esta herramienta puede servir de ayuda para facilitar esta tarea de revisión masiva de puentes ante las nuevas demandas de tráfico pesado. Desafortunadamente el registro de pesaje en movimiento (WIM) en las carreteras mexicanas no existe, es de esperarse que en un futuro no muy lejano, se puedan adquirir los equipos de pesaje en movimiento tal que se facilite el diagnóstico del estado en que se encuentran los puentes ante condiciones de servicio de tráfico pesado.



VII. BIBLIOGRAFÍA

Arroyo M., Hannachi M., Siegert D., Jacob B., 2009, *Extreme Traffic Load Effects on Medium Span Bridges*, Universidad Autónoma de Querétaro, México and Université Paris-Est, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC), Paris, France.

Badiola V., 2004, *Diseño de Máquinas-Cargas Variables*, Dpto. Ingeniería Mecánica, Energética y de Materiales, pp. 55-79.

Bangoura A., 2007, *Metodología para la Optimización de Análisis de Esfuerzos por Fatiga de Alto Ciclo en Componentes de Maquinas*, Instituto Politécnico Nacional, D.F., México, pp.25- 48.

Bárceñas V., 2011, *Desarrollo de un programa de cómputo para el análisis estadístico de cargas de vehículos en movimiento y sus efectos de fatiga en puentes de acero*, tesis de Maestría, DIP-FI, Universidad Autónoma de Querétaro, México.

Caprani C., O'Brien E., McLachlan G., 2008, *Characteristic traffic load effects from a mixture of loading events on short to medium span bridges*, Department of Civil/Structural Engineering, Dublin Institute of Technology, Ireland; School Urban Institute Ireland, University College Dublin, Ireland, Department of Statistics, University of Queensland, Brisbane, Australia, *Structural Safety* 30 (2008) 394–404, Edit: Elsevier, pp. 394-404.

Carrión F., Quintana J., López J., Balankin A., Samayoa D., 2006, *Metodologías de Inspección No Destructiva Aplicables a Sistemas de Gestión De Puentes*, Secretaría de Comunicaciones y Transportes e Instituto Mexicano del Transporte, Publicación Técnica No 302, Sanfandila, Qro

Castillo E., Fernández A., Esslinger V., Thürlimann B., 1985, *Statistical Model for Fatigue Analysis of Wires, Strands and Cables*. IABSE Proceedings, pp.82-85.

Crespo S., 2011, “*Análisis del deterioro estructural por fatiga y prognosis de un puente típico de concreto utilizando simulación Monte Carlo*”, tesis de Maestría, DIP-FI, Universidad Autónoma de Querétaro, México.

Getachew A., 2003, *Traffic Load Effects on Bridges Statistical Analysis of Collected and Monte Carlo Simulated Vehicle Data*, Structural Engineering, Royal Institute of Technology, SE-100 44 Stockholm, Sweden.

Gorse J. F., 1989, *Le calcul des effets produits par plusieurs voies de trafic routier sur un pont. Le logiciel TRAFMULTI*, Laboratoire central des ponts et Chaussées, Francia.

Gutiérrez S., Cudmani R., Danesi R., 1991, *Estudio del Comportamiento de Vigas Parcialmente Pretensadas Sometidas a Cargas de Fatiga*. XXV Jornadas Sul- Americanas de Engenharia Estructural, Porto Alegre, Brasil., pp. 379-390.

Hernández J. R., Fabela M., 2004, *Diseño y construcción de un prototipo para determinar el peso de vehículos ligeros en movimiento*, Secretaría de Comunicaciones y Transportes, Instituto Mexicano del Transporte, Publicación Técnica No. 247, Sanfandila, Querétaro, México.

Hibbeler R. C., 1997, *Análisis Estructural*, 3a edición, Edit: Pearson/Prentice Hall.

Jacob B. and Eymard R., 1989, *Un Nouveau Logiciel : le programme CASTOR pour le Calcul des Actions et Sollicitations du Trafic dans les Ouvrages Routiers*, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC).

Katz B. J., 2001, *Field And Modeling Framework For Evaluating Truck Weigh Station Operations*, Faculty of the Virginia Polytechnic Institute, Blacksburg Virginia, pp 4-12.

Kwon K. and Frangopol D., 2010 *Bridge fatigue reliability assessment using probability density functions of equivalent stress range based on field monitoring data*, Department of Civil and Environmental Engineering, ATLSS Center, Lehigh University, 117 ATLSS Dr., Bethlehem, USA.

LCPC, 2008 *Logiciel de calcul des effets du trafic sur les ponts routiers POLLUX-LCPC v1.0*, Section Durabilité des Ouvrages d'Art, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Francia.

Liljencrantz A., Karoumi R., Olofsson P., 2007, *Implementing bridge weigh-in-motion for railway traffic*; Computers and Structures 85, Edit: Elsevier, pp. 80–88.

Lindorf A. and Curbach M., 2010, *S-N curves for fatigue of bond in reinforced concrete structures under transverse tension*, Engineering Structures, Edit: Elsevier, Volume 32, Issue 10, pp. 3068-3074.

López A. M., Brincker R., Fernández A., Villa L.M., 2006, *Mejora De La Fiabilidad En El Dimensionamiento A Fatiga Utilizando Análisis Modal*, Dpto. de Construcción e Ingeniería de Fabricación. Universidad de Oviedo, Anales de Mecánica de la Fractura Vol. II, pp. 623-628.

López A. M., Fernández A., Lamela M.J., Castillo E., 2001, *Predicción De Vida A Fatiga En Materiales Compuestos De Fibra De Carbono Bajo Carga De Amplitud Variable*, Anales de Mecánica de la Fractura, Vol. 18, pp. 375-383.

Mc Cormac J., 2002, *Análisis de Estructuras métodos clásicos y matriciales*, 2ª edición, Edit: Alfaomega.

McInnes C.H. and Meehan P.A., 2008, *Equivalence of four-point and three-point rainflow cycle counting algorithms*, International Journal of Fatigue, Volume 30, Issue 3, Edit: Elsevier, pp. 547-559.

Mendoza A., Cadena A., De Buen A., Domínguez L., Rico A., 1991, *Análisis estadístico del peso y las dimensiones de los vehículos de carga que circulan por la red nacional de carreteras. Estaciones instaladas durante 1991*, Secretaría de Comunicaciones y Transportes, Instituto Mexicano del Transporte, Publicación Técnica No.8, Sanfandila, Querétaro, México.

O'Brien E., Znidaric A., 2001, *Weighing-in-motion of Axles and Vehicles for Europe (WAVE)*, Report of Work Package 1.2, Bridge WIM systems (B- WIM), European Commission DG VII – Transport, 4th Framework Programme Transport, Ljubljana, Slovenia.

O'Connor A., 1991, *User's Manual CASTOR-LCPC*, Trinity College Dublin, Ireland, Department of Civil Structural & Environmental Engineering, Museum Building, College Green, Dublin.

Real E., Rodríguez C., Canteli A. F., Belzunce F. J., Aenlle M. L., 2005, *Efecto De La Tensión Media En El Comportamiento A Fatiga De Barras Corrugadas De Acero Inoxidable Dúplex*,



Escuela Politécnica Superior de Ingeniería de Gijón, Universidad de Oviedo Campus de Viesques, Gijón, España, *Anales de Mecánica de la Fractura*, Vol. 22, pp. 353-358.

Rise R., Leis B., Nelson D., Berns H., Lingenfelter, Mitchell M., 1988, *Fatigue Design Handbook*, Society of Automotive Engineers, Inc.

Seçil A., 2004, *Fatigue Life Calculation By Rainflow Cycle Counting Method*, Middle East Technical University, thesis.

APÉNDICES

Los siguientes Apéndices fueron desarrollados en este trabajo de tesis y forman parte íntegra de la metodología desarrollada:

El **Apéndice A “Registros de pesaje en movimiento, weight n motion WIM”** contiene una visión general de la tecnología de pesaje dinámico WIM con la cual se obtienen dichos registros WIM, los distintos formatos de salida que pueden llegar a tener dichos registros y la manera en que podemos modificar un archivo al formato adecuado para su uso y manejo dentro del software desarrollado DEEFEP.

El **Apéndice B “Metodología de los módulos estadísticos y de análisis”** se presenta como complemento y base de la metodología presentada en el capítulo III. “Metodología” y contiene los supuestos de la simulación de flujo de tráfico, hipótesis de modelado, animación de tráfico, posiciones transversales, reglas para el control de velocidad entre vehículos, así como los gráficos y capturas de pantalla que genera el programa DEEFEP.

El **Apéndice C “Sistematización de la metodología integral”** se presenta como complemento de la metodología del Capítulo IV. “Sistematización de la metodología” y describe la forma completa en que se re-estructuró el programa DEFP, así como, la forma en que se desarrolló, sistematizó e integró la nueva metodología, desglosando por los módulos que lo integran.

Finalmente el **Apéndice D “Ejemplos tutoriales de aplicación del programa DEEFEP para análisis de fatiga”** como su nombre lo indica muestra como ejemplificación el análisis de fatiga, para la determinación de la vida útil, de los puentes Auxerre y Layrac de Francia.

APÉNDICE A. Registros de pesaje en movimiento “weight in motion, WIM”

Una visión general de la tecnología de pesaje dinámico WIM, con la cual se obtienen dichos registros de datos, se describe en los siguientes sub-apéndice. Para más detalles de los sistemas de pesaje en Movimiento WIM consultar la referencia Bárcenas (2011) Capítulo II “Marco teórico y metodología”, subcapítulo 2.1 “Base de datos de weight in Motion”.

A.1. Aspectos generales de los sistemas WIM

El sistema automatizado de pesaje dinámico conocido como Weight In Motion (WIM) está definido por las normas de la *American Society for Testing and Materials* (ASTM) como un conjunto de sensores e instrumentos de apoyo que miden la presencia de un vehículo en movimiento y las fuerzas dinámicas relacionadas con los neumáticos en ubicaciones específicas con respecto al tiempo. Además, mide la velocidad, distancia entre ejes, cargas por neumáticos, cargas por ejes y peso total del vehículo (Katz, 2001).

Por lo tanto, el sistema WIM convierte a una vialidad en una balanza que pesa el tráfico mientras éste fluye (Jacob et al, 1989). Como consecuencia, los efectos determinados a partir de escenarios de tráfico real registrados con el sistema WIM, son más representativos que aquellos determinados a partir de datos de tráfico generado artificialmente (Getachew, 2003).

En general, los sistemas WIM pueden ser clasificados en tres tipos: por placas de flexión, por sensores piezoeléctricos, y por celda de carga. Los principios básicos que deben tenerse en cuenta antes de seleccionar un sistema WIM son:

1. Definir claramente el período de vida, el nivel de rendimiento y la precisión del sistema, dependiendo del sitio de ubicación.
2. Destinar los recursos financieros y técnicos necesarios para alcanzar la vida de diseño y el nivel de rendimiento.
3. Considerar los siguientes aspectos del sistema:
 - 3.1. Tipo de sensor.
 - 3.2. Ubicación del procesador de datos.
 - 3.3. Comunicación de módem remoto.

3.4. Software de operación.

3.5. Formato de datos de salida.

La ASTM clasifica a los sistemas WIM en cuatro tipos, de acuerdo a su solicitud, funcionamiento y rendimiento. Estos sistemas tienen diferentes rangos de velocidad, así como distintas aplicaciones y capacidades de recopilación de datos.

A.2. Procesador de los sistemas

Los sistemas WIM utilizan unidades de procesamiento para clasificar y analizar la información obtenida por los sensores colocados en las vialidades. Un típico sistema WIM (de cualquier tipo) puede procesar más de 15,000 vehículos al día y almacenar datos de pesaje por lo menos en 30 días continuos, esto para una instalación de cuatro carriles.

A.3. Formato de datos de salida

El software receptor es capaz de generar informes de tráfico vehicular diarios, semanales o mensuales. También puede generar informes sobre los errores, auto-calibración, historia del sitio, historia de calibración, y los vehículos con sobrepeso.

Los sistemas WIM proporcionan información que puede ser utilizada para la evaluación de los puentes ante carga de tráfico real. Dentro de esta información se manejan variables como el tiempo de llegada de los vehículos, la magnitud y distribución de cargas, así como también las distancias entre ejes. La Tabla A.1 muestra el formato estándar en que los sistemas WIM dan a conocer los datos de tráfico vehicular. Desafortunadamente debido al tipo de sistema WIM que se utilice, incluso dependiendo del modelo y marca, ya que estos sistemas son de mejora continua, y también en gran dependencia del tratamiento que se le dé para su manipulación en distintos programas, según sea el caso de estudio, se puede tener una diversidad de formatos de salida, como se muestra en las figuras A.1, A.2, A.3 y A.5 (entre los más comunes).



Por lo anterior, un archivo de registro WIM es muy posible que al ser proporcionado para su manejo, no se encuentre en su formato de salida original, por lo que se consideró necesario la creación de un módulo de tratamiento de archivos (figura A.4), el cual nos servirá para adecuar los formatos proporcionados al formato correcto o al deseado según el usuario.

Tabla A.1. Formato de los registros de WIM.

Datos por columna	Unidad
Encabezado	-
Día	-
Mes	-
Año	-
Hora	-
Minuto	-
Segundo	-
Centésima de segundo (segundo/100)	-
Velocidad	dm/s
Peso total del vehículo	kN
Longitud total del vehículo (del eje inicial al eje final)	dm
Numero de ejes	
Peso en el eje 1	kN
Longitud del eje 1 al eje 2	dm
Peso en el eje 2	kN
Longitud del eje 2 al eje 3	dm
...	...
Longitud del eje n-1 al eje n	dm
Peso en el eje n	kN

La figura A.1 muestra el formato del archivo de texto de registros de WIM que requiere el programa R-Estadística para su aplicación y manejo, así mismo, la figura A.2 muestra otro formato, de entre los comunes, que debe llevar el archivo de registro WIM para su utilización dentro del manejo del programa CASTOR, un formato diferente al mostrado, puede provocar un error de desbordamiento del programa o una generación de resultados incorrectos. Por lo anterior es necesario tratar cada formato de texto de los archivos WIM en sus correspondientes formatos para los distintos programas.



No.	Fecha	Min	S/100	W Ttl	# ejes	L 1-2	L 2-3	L 3-4	L 4-5	L 5-6	L 6-7													
Encabez	Hr	seg	Vel	LTtl	W E1	W E2	W E3	W E4	W E5	W E6	W E7													
dm/s	kN	dm	kN	dm	kN	dm	kN	dm	kN	dm	kN													
00001	00005	13	0989	17	30	04	67	239	0511	112	5	064	31	153	55	099	12	098	14	097	00	000	00	000

Figura A.1. Formato del Archivo de registros de WIM, para su utilización dentro del programa R-Estadística.

Archivo	Edición	Formato	Ver	Ayuda
00001000052010971410200021300471014008330256200606008				
0000200005201097141036002520173122507336048640221101311017				
0000300005201097141038002440257119503433085610461204513047				
000040000520109714104100283002707130082300848011				
0000500005201097141050002440312123505941089560581305613050				
0000600005201097141051002360210114505437061510361302913030				
0000700005201097141124003610010024200524005				
0000800005201097141131002300395120507236122580711306413066				
0000900005201097141153003470022034200934013				
0001000005201097141155003330017027200727010				
0001100005201097141210003660017027200827009				
0001200005201097141215002380187052207052117				
0001300005201097141225002330262116503036074540641306313031				
0001400005201097141233002380343122505636110600561305913062				
0001500005201097141244002160210112504735078510311302513029				
0001600005201097141248002380252120506436089580391303013030				
0001700005201097141254002410409126506241115590851307413073				
000180000520109714130900313001805630072600730004				
0001900005201097141312002500287123504436088610561305213047				
0002000005201097141322002270336122505537109590611305613055				
0002100005201097141332002380189118503537065550321302913028				
0002200005201097141335002330415106505535108450901308313079				
00023000052010971413390023602831214072361197205213040				
00024000052010971413410023801781224050370527204113035				
0002500005201097141351002380235120504836067580431303813039				
0002600005201097141355002830030032201232018				
0002700005201097141358003580011025200625005				
0002800005201097141416002750056029202429032				
0002900005201097141418002550405120506236107580821307913075				
0003000005201097141428002300486119506336130571091308713097				
0003100005201097141430002440138122504435037610221301713018				
0003200005201097141435002580424120506736110580851308513077				
0003300005201097141437002550298119506336074570591305013052				

Figura A.2. Formato del Archivo de registros de WIM, para su utilización dentro del programa CASTOR.

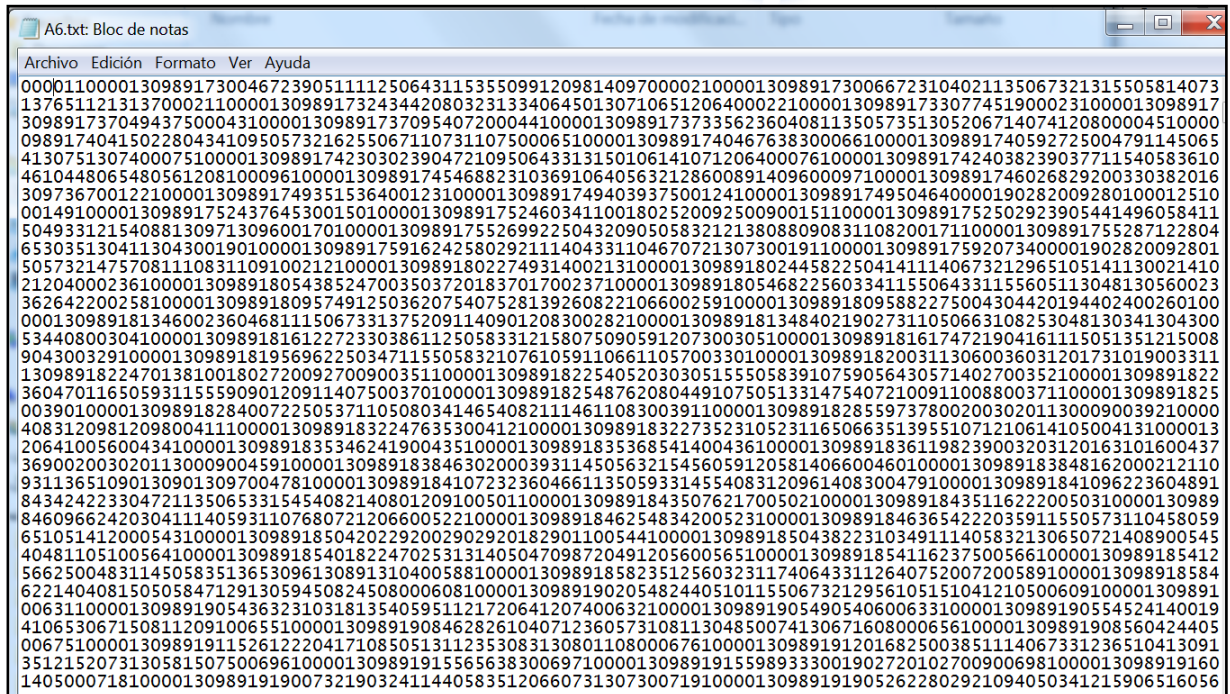


Figura A.3. Formato raro de Archivo de registros de WIM.

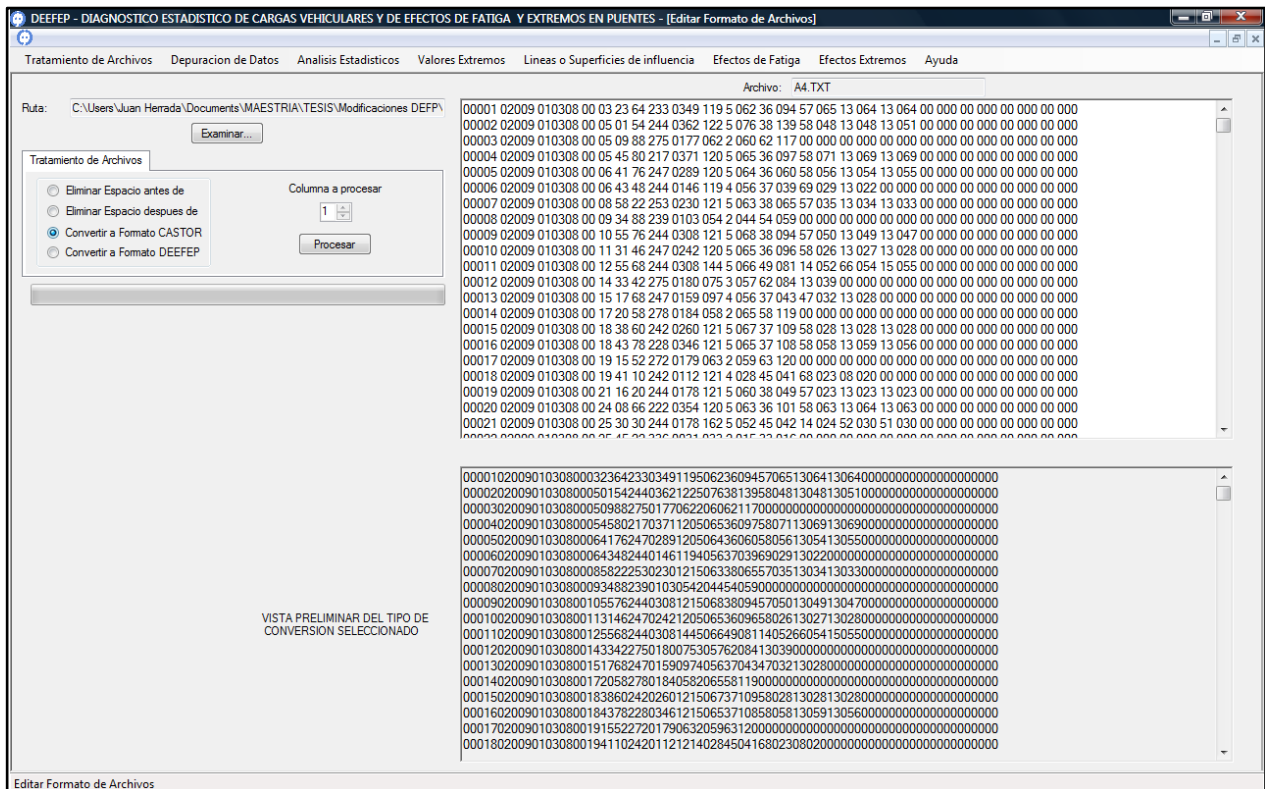


Figura A.4. Módulo de tratamiento de archivos desarrollado dentro del programa DEEFEP



Dentro del nuevo módulo de tratamiento de archivos (Figura A.4) es posible convertir el archivo con formato raro (Figura A.3), entre otros, a cualquier formato para su utilización en programas comunes como R-ESTADISTICA (Figura A.1.), CASTOR (Figura A.2.), DEEFEP (Figura A.5) o algún otro deseado por el usuario, ya que este módulo permite la manipulación del archivo eliminando espacios entre datos o añadiendo columnas en posiciones deseadas. En el “Manual de Usuario” se detalla el funcionamiento de este módulo.

La Figura A.5 muestra la forma en que deben de estar los registros de WIM en formato de texto, para su utilización dentro del programa DEEFEP. Para realizar el estudio de tráfico mediante el programa DEEFEP, el archivo de datos de WIM debe de tener éste formato el cual lo denominaremos “estándar”, pues sólo así se puede tener la confiabilidad de los resultados.

No.	Fecha	Min	S/100	WTl	# ejes	L 1-2	L 2-3	L 3-4	L 4-5	L 5-6	L 6-7	L 7-8	L 8-9
Encabez	Hr	seg	Vel	L Ttl	W E1	W E2	W E3	W E4	W E5	W E6	W E7	W E8	W E9
			dm/s	kN	dm	kN	dm	kN	dm	kN	dm	kN	dm
00001	00005	040607	00 01 52	58 328	0022 030	2 013	30 009	00 000	00 000	00 000	00 000	00 000	00 000
00002	00005	040607	00 04 10	71 339	0013 026	2 007	26 006	00 000	00 000	00 000	00 000	00 000	00 000
00003	00005	040607	00 05 39	91 336	0016 029	2 010	29 006	00 000	00 000	00 000	00 000	00 000	00 000
00004	00005	040607	00 05 45	41 322	0016 026	2 010	26 006	00 000	00 000	00 000	00 000	00 000	00 000
00005	00005	040607	00 06 25	81 325	0014 027	2 008	27 006	00 000	00 000	00 000	00 000	00 000	00 000
00006	00005	040607	00 07 00	35 325	0016 027	2 010	27 006	00 000	00 000	00 000	00 000	00 000	00 000
00007	00005	040607	00 08 04	40 322	0010 024	2 006	24 004	00 000	00 000	00 000	00 000	00 000	00 000
00008	00005	040607	00 08 07	53 361	0017 026	2 010	26 007	00 000	00 000	00 000	00 000	00 000	00 000
00009	00005	040607	00 09 17	48 336	0018 029	2 010	29 008	00 000	00 000	00 000	00 000	00 000	00 000
00010	00005	040607	00 09 19	90 339	0019 025	2 011	25 008	00 000	00 000	00 000	00 000	00 000	00 000
00011	00005	040607	00 10 55	59 242	0257 117	5 066	37 068	54 041	13 041	13 041	00 000	00 000	00 000
00012	00005	040607	00 12 00	55 328	0016 022	2 005	22 011	00 000	00 000	00 000	00 000	00 000	00 000
00013	00005	040607	00 12 39	73 333	0017 026	2 011	26 006	00 000	00 000	00 000	00 000	00 000	00 000
00014	00005	040607	00 13 28	37 325	0016 028	2 005	28 011	00 000	00 000	00 000	00 000	00 000	00 000
00015	00005	040607	00 14 15	10 294	0019 027	2 012	27 007	00 000	00 000	00 000	00 000	00 000	00 000
00016	00005	040607	00 16 13	94 342	0016 026	2 010	26 006	00 000	00 000	00 000	00 000	00 000	00 000
00017	00005	040607	00 18 29	61 328	0009 025	2 006	25 003	00 000	00 000	00 000	00 000	00 000	00 000
00018	00005	040607	00 18 43	17 367	0018 028	2 011	28 007	00 000	00 000	00 000	00 000	00 000	00 000
00019	00005	040607	00 18 51	72 358	0014 027	2 009	27 005	00 000	00 000	00 000	00 000	00 000	00 000
00020	00005	040607	00 19 06	88 333	0018 029	2 008	29 010	00 000	00 000	00 000	00 000	00 000	00 000
00021	00005	040607	00 19 20	42 369	0016 027	2 009	27 007	00 000	00 000	00 000	00 000	00 000	00 000
00022	00005	040607	00 19 35	80 358	0013 023	2 008	23 005	00 000	00 000	00 000	00 000	00 000	00 000
00023	00005	040607	00 21 58	75 247	0265 122	5 058	36 089	60 041	13 038	13 039	00 000	00 000	00 000
00024	00005	040607	00 22 50	51 244	0259 120	5 063	39 076	55 040	13 040	13 040	00 000	00 000	00 000
00025	00005	040607	00 25 42	32 394	0010 027	2 006	27 004	00 000	00 000	00 000	00 000	00 000	00 000
00026	00005	040607	00 27 50	26 239	0110 042	2 046	42 064	00 000	00 000	00 000	00 000	00 000	00 000
00027	00005	040607	00 30 17	44 356	0018 027	2 010	27 008	00 000	00 000	00 000	00 000	00 000	00 000
00028	00005	040607	00 30 20	87 356	0014 026	2 009	26 005	00 000	00 000	00 000	00 000	00 000	00 000
00029	00005	040607	00 30 57	23 250	0306 120	5 070	37 089	57 049	13 049	13 049	00 000	00 000	00 000
00030	00005	040607	00 31 24	84 247	0202 120	5 063	36 054	58 028	13 029	13 028	00 000	00 000	00 000
00031	00005	040607	00 32 09	36 411	0007 025	2 005	25 002	00 000	00 000	00 000	00 000	00 000	00 000
00032	00005	040607	00 33 11	85 386	0016 026	2 010	26 006	00 000	00 000	00 000	00 000	00 000	00 000
00033	00005	040607	00 34 40	23 244	0304 119	5 063	36 100	57 047	13 047	13 047	00 000	00 000	00 000

Figura A.5 Archivo de registros de WIM, para su utilización dentro del programa DEEFEP

APÉNDICE B. Metodología de los módulos estadístico y de análisis

B.1 Análisis estadístico de cargas vehiculares (Módulo 1)

Análisis paramétrico de escenarios de tráfico. Este módulo es parte principal del desarrollo de este trabajo de tesis, donde es posible realizar análisis de 2 y hasta 3 registros de datos WIM al mismo tiempo, generándose numérica y gráficamente los resultados. Al igual que en el análisis estadístico, en primera instancia, se generan los histogramas de frecuencia y a partir de ellos se realizan las curvas de distribuciones de probabilidad de datos tanto distribución normal como bimodal. Con los resultados numéricos generados se obtiene los parámetros característicos de dicha distribución, necesarios para el estudio de valores extremos utilizando el Método Gumbel y Poisson, (Jacob et al, 1989).

El programa DEEFEP muestra de manera interactiva los gráficos, permitiendo al usuario seleccionar a discreción el tipo de distribución o el histograma de frecuencia del registro WIM deseado, para ser visualizado. Con lo anterior, es posible realizar análisis de tráfico que pueden ser de distintas vialidades y realizar su comparativa, o realizar análisis de registros de una misma vialidad con diferentes fechas de registro de datos WIM. Al superponer las distribuciones de probabilidad de manera gráfica, es posible visualizar, la forma en que ha ido evolucionando el tráfico, tanto en densidad como en capacidad de carga. Lo anterior, conlleva a la mejora y ayuda de la toma de decisiones.

Dentro del programa DEEFEP se pueden realizar análisis de diferentes variables, como puede ser el caso de velocidades, cargas, distancias entre ejes, etc., y en estos análisis se presentan curvas de ajuste con las que la distribución de los datos puede ser descrita.

Tomando como referencia el histograma de frecuencia relativa que se haya generado, el programa DEEFEP realiza de manera numérica el proceso de cálculo de los parámetros de la distribución normal y bimodal, además, expresa los resultados imprimiendo la gráfica correspondiente (Figura B.1).

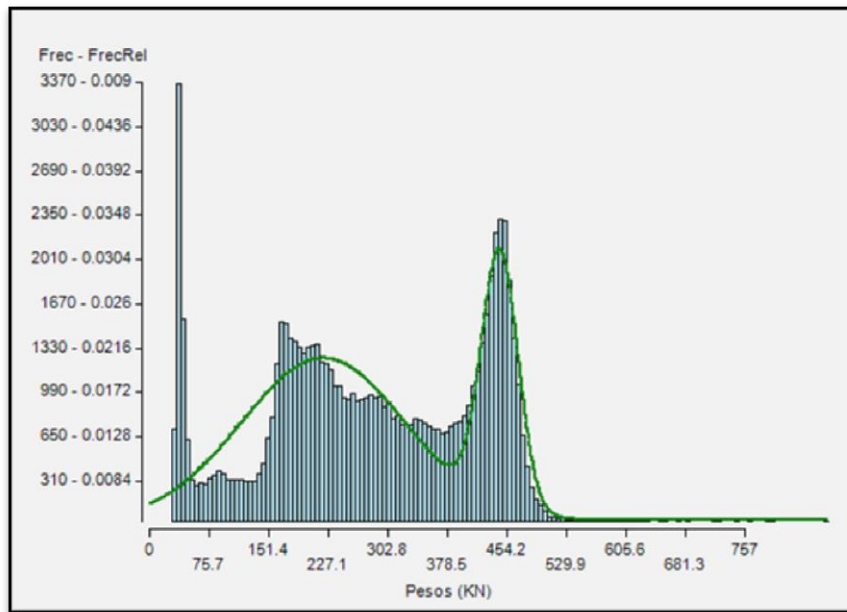


Figura B.1. Distribución de probabilidad bimodal que genera el programa DEEFEP.

La figura B.2 muestra la pantalla del módulo de análisis paramétrico para 2 registros de datos WIM donde se puede observar los resultados numéricos del análisis estadístico de cargas dentro de los cuales se obtienen varianza, media aritmética, desviación estándar y % de población, necesarios para el análisis de valores extremos. Así mismo, se observa los resultados gráficos donde se sobrepone los histogramas de frecuencia y sus respectivas curvas, permitiendo así su comparativa.

En la Figura B.3.a se muestra la pantalla del módulo de análisis paramétrico para 3 registros de datos WIM presentando los resultados de manera numérica, y en la figura B.3.b se muestran de manera gráfica, mostrándose en la parte superior el histograma de cada registro en su propia escala y en la parte inferior se muestra de manera escalada los gráficos superpuestos, permitiendo al usuario interactuar con la impresión de resultados. DEEFEP realiza todos los cálculos con tan sólo abrir el archivo de WIM con el formato adecuado y seleccionar la columna de la variable a analizar.



B.2. Modelo de interacción Tráfico – Puente. (Análisis estructural tipo puente sometido a tráfico pesado, líneas y superficies de influencia). (Módulo 2)

A continuación se describe la metodología que sustenta al nuevo módulo del modelo de interacción tráfico-puente, dentro del cual se realiza el análisis estructural para la determinación de efectos producto del tráfico pesado, mediante el análisis de líneas y/o superficies de influencia.

B.2.1. Modelo de interacción tráfico – puente. Líneas de influencia

Una manera de obtener teóricamente los esfuerzos en las secciones críticas de un puente, o en sus elementos, es a partir del cálculo de líneas de influencia, considerando comportamiento elástico y una carga unitaria que se desplaza a lo largo de la viga. Con lo anterior, se genera la historia de esfuerzos para un punto específico.

En la figura B.4 se muestran líneas de influencia de efectos en centros de claro de vigas continuas que genera el programa DEEFEP, siendo desarrollado para realizar análisis de determinación de momentos máximos por líneas de influencia para puentes continuos, simplemente apoyados, y de uno hasta tres claros. Las ecuaciones y métodos detallados que permiten obtener los momentos, reacciones y líneas de influencia, en que se sustentan el algoritmo del programa DEEFEP, son las mismas desarrolladas por Bárcenas (2011), en dicha referencia se puede ver como anexo la deducción de las ecuaciones y los diagramas correspondientes para su mejor entendimiento.

Con estas ecuaciones, en el programa DEEFEP, primeramente se obtienen gráficas de líneas de influencia de envolventes (nuevo en la metodología) para determinar la ubicación de la sección crítica del puente (Figura B.5), esto se hace recorriendo la carga unitaria en cada posición del puente (a cada unidad) y calculando su línea de influencia internamente. Gráficamente se muestra una línea de influencia por cada 20 dm del claro del puente, de esta forma se determina la sección crítica, aquella sección en donde los Momentos calculados son Máximos, los cuales se usan para la determinación de los esfuerzos.

DEEFEP es capaz de realizar una simulación animada del tráfico vehicular real que se haya seleccionado para su análisis, relacionando además el efecto que se va produciendo por cada eje vehicular al pasar por el puente.

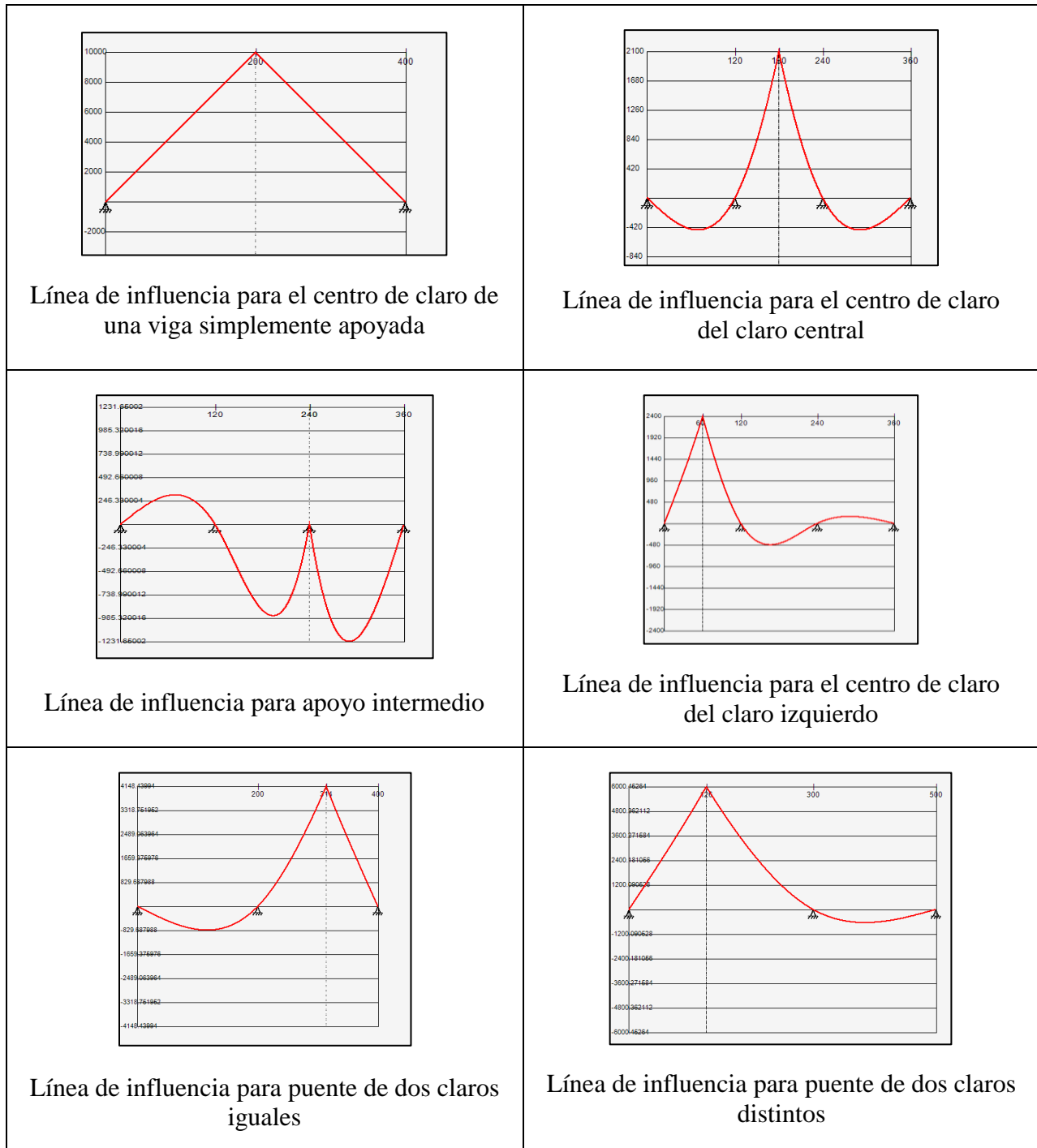


Figura B.4. Ejemplos de líneas de influencia unitarias generadas por el programa DEEFEP.

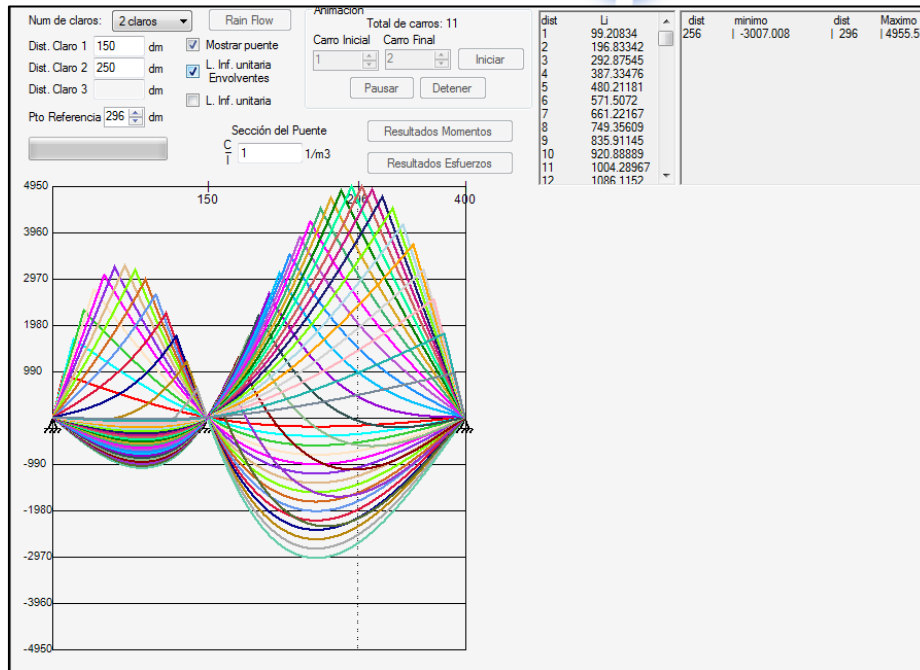


Figura B.5. Líneas de influencia Envolventes, para la determinación de la ubicación de la sección crítica en un puente de 2 claros. Programa DEEFEP

Hipótesis de modelado. Tráfico en un carril y línea de influencia afectada por la posición de las vigas en la sección transversal del puente.

Se determinó para un carril, la relación que une el efecto $E(t)$ y cargas por eje de N vehículos en la zona de influencia, considerando como hipótesis de partida el paso de los vehículos y la viga de apoyo al centro del carril (Ver figura B.6).

Una configuración variable de la posición transversal del vehículo conlleva a un análisis probabilista de distribuciones quedando fuera de los alcances de este trabajo de investigación. Así mismo, hay que resaltar que una posición centroidal de la viga de apoyo fuera del centro del ancho del carril, conlleva a un análisis adicional de una línea de influencia transversal, para determinar el porcentaje de contribución de los efectos por carril en el apoyo.

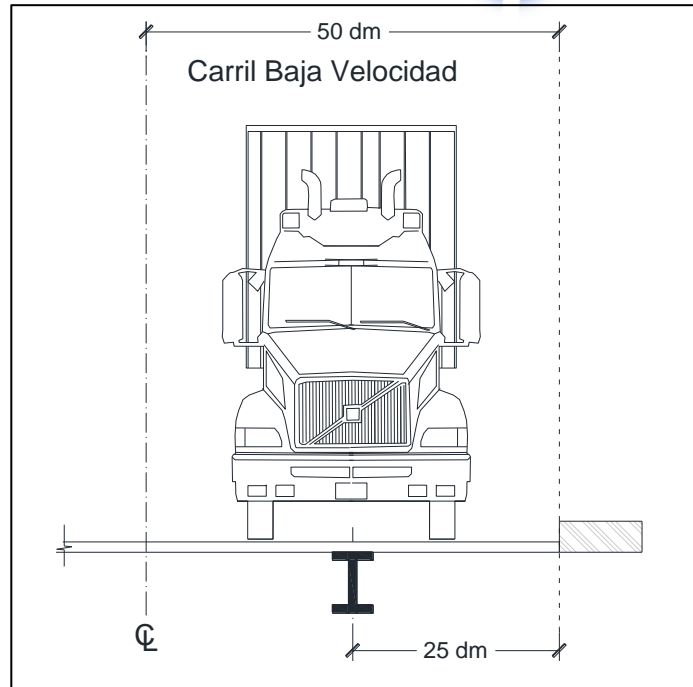


Figura B.6. Consideraciones para el análisis de líneas de influencia de la posición transversal de la viga de apoyo y la posición del vehículo dentro del carril de circulación.

En la figura B.7 se muestra la típica línea de influencia donde se tiene la consideración ideal que tanto el vehículo como la viga de apoyo se encuentran sobre sus ejes centroidales, al centro del ancho del carril. Se puede observar que un vehículo circulando por el carril de baja velocidad proporciona el 100% de los efectos producidos en la sección crítica (patín inferior a tensión de la viga de apoyo), mientras que un vehículo circulando por el segundo carril no proporciona efectos sobre la viga crítica (viga de apoyo del carril de baja velocidad, ya que aquí es donde se supone circulan los vehículos pesados produciendo los efectos máximos). Lo anterior, sustenta la hipótesis de realizar análisis de líneas de influencia para un sólo carril de circulación, siempre y cuando cumpla con las consideraciones mencionadas.

Una posición centroidal de la viga de apoyo fuera del centro del ancho del carril implica un análisis de determinación de efectos por medio de **superficies de influencia**, ya que la contribución de los efectos por carril sería variable (figura B.8), por ello la importancia de complementar la metodología con un nuevo módulo de determinación de esfuerzos por medio de análisis de superficies de influencia (Gorse, 1989).

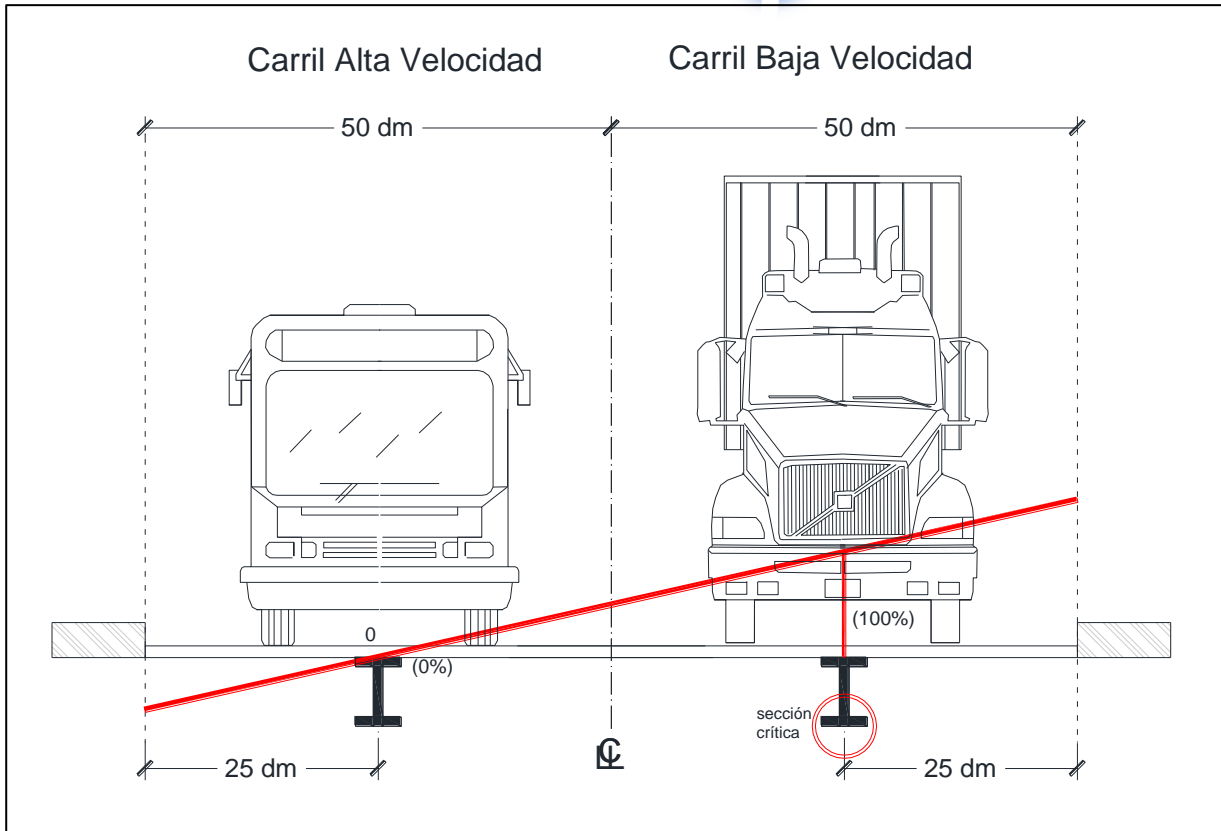


Figura B.7. Contribución de efectos por carril determinado por línea de influencia transversal considerando la posición de la viga de apoyo y la posición del vehículo al centro del carril de circulación.

En el programa DEEFEP se muestra gráficamente las líneas de influencia que generan las cargas por eje de los vehículos pesados (figura B.9), limitado a un rango máximo de 5, así mismo, calcula los momentos máximos y mínimos, como los esfuerzos correspondientes de todos los registros del archivo de escenario de tráfico real. Con estos esfuerzos se genera una gráfica de serie de historia de esfuerzos, que depende de la cantidad de datos y se hallan almacenados en el archivo de WIM. Los resultados son almacenados en archivos de formato de texto.

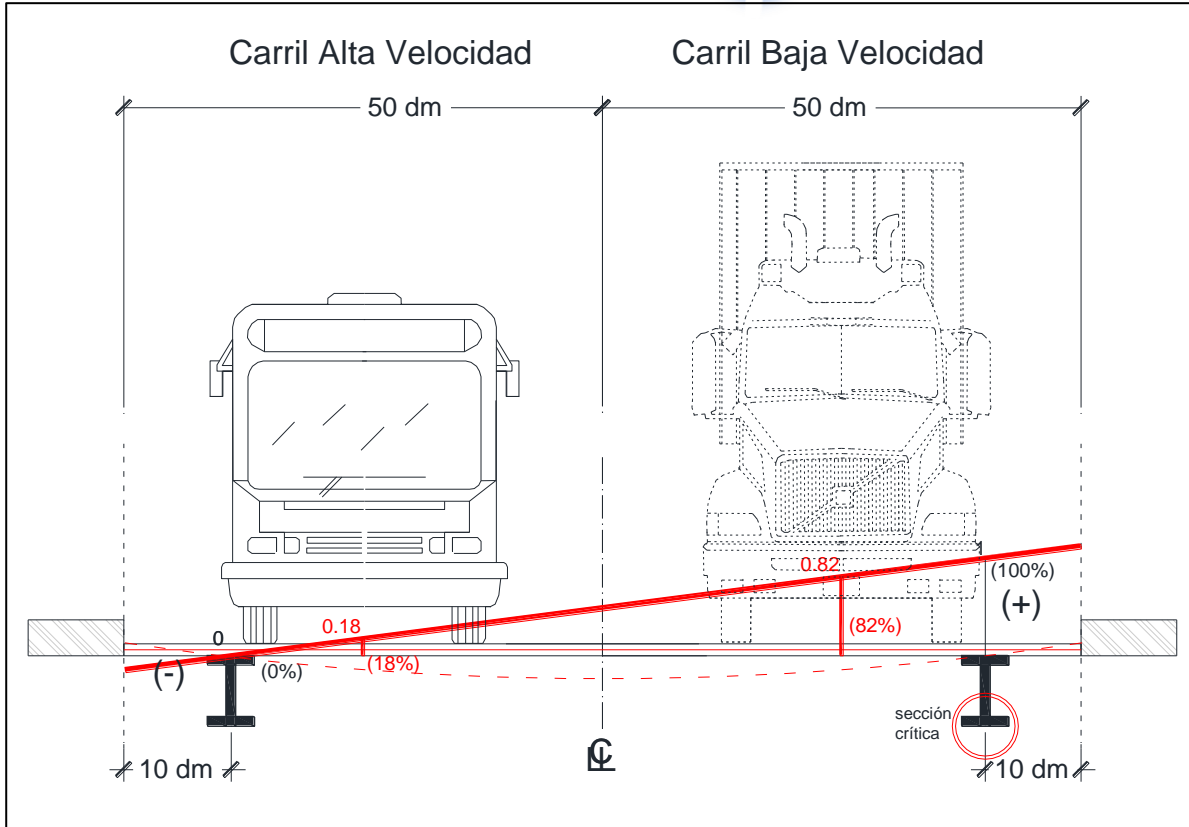


Figura B.8. Contribución de efectos por carril (superficie de influencia) determinado por línea de influencia transversal considerando la variación en la posición transversal de la viga de apoyo y la posición del vehículo al centro del carril de circulación.

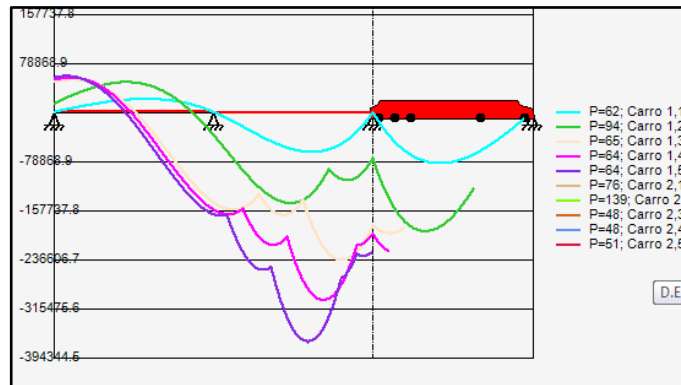


Figura B.9 Animación de la relación que une el efecto y cargas por eje de los vehículos determinados por líneas de influencia de momento flexionante. Programa DEEFEP

B.2.2. Modelo de interacción tráfico-puente. Superficies de influencia

La primera versión del software DEFP únicamente puede simular efectos en el tiempo en un puente a través del conocimiento de su línea de influencia con datos de tráfico real. El proceso de actualización y mejora de la DIP-FI-UAQ, ha dado lugar a la nueva versión de DEFP, “DEEFEP”. Esta nueva versión permite la consideración de flujos de posiciones transversales de vehículos en un puente (con hasta 3 carriles de circulación y zonas de influencia), considerando la posición de cada vehículo en su carril y el efecto que induce al carril crítico. Con estas mejoras se permite un modelado más realista, así como mayor flexibilidad de uso.

DEEFEP permite el análisis de superficies de influencia para puentes de 2 y hasta 3 carriles de circulación con un claro, dos claros (iguales o distintos en longitud) y tres claros (iguales, o primer y tercer claro iguales y central diferente en longitud) pero limitándose a no más de dos vigas de apoyo transversal. Una cantidad mayor de apoyos, requiere de análisis de líneas de influencia transversales para determinar el factor de atenuación o amplificación de efectos quedando fuera de los alcances de esta investigación (Figura B.10).

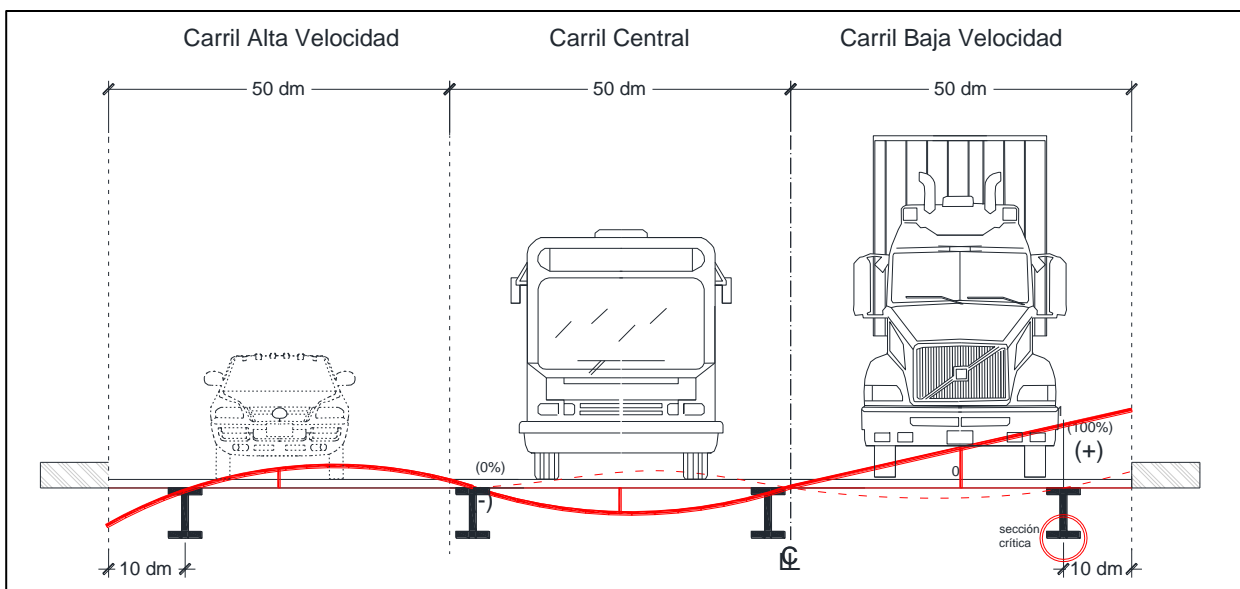


Figura B.10 Línea de influencia transversal para la determinación del factor de atenuación/amplificación de efectos por carril en puentes con más de dos apoyos.

DEEFEP es capaz de realizar una representación gráfica de la sección transversal del puente, al momento en que el usuario ingresa los datos de ancho de carril así como la ubicación de los apoyos (figura B.11), lo que permite al usuario visualizar y corroborar la geometría del puente.

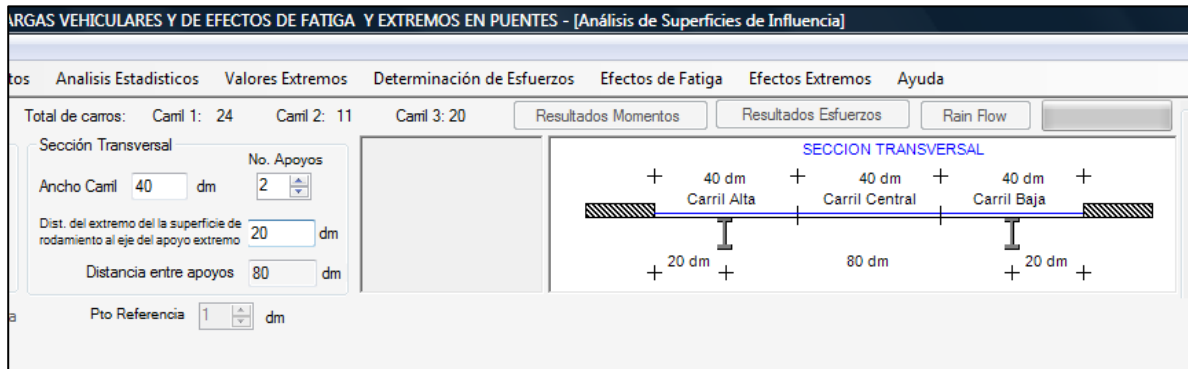


Figura B.11 Representación gráfica de la sección transversal del puente. DEEFEP

Para la sistematización del cálculo de Superficie de influencia unitaria en el programa DEEFEP (Figura B.12), se utilizan las mismas expresiones de las variaciones de las líneas de influencia por carril, sin embargo, se determina una zona de influencia completa, representada por la totalidad o líneas longitudinales paralelas que corresponden al supuesto de una posición de referencia (centro de cada carril), estas líneas de influencia son afectadas por un factor C de atenuación/amplificación de efectos (figura B.13) que depende enormemente de la posición transversal del vehículo (carril de circulación) y de la ubicación de los apoyos en el ancho del carril).

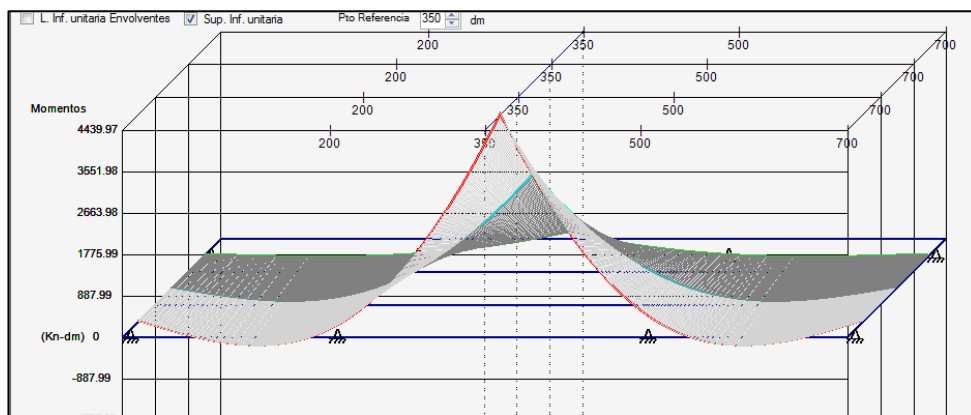


Figura B.12. Superficie de influencia unitaria, puente de 3 claros con 3 carriles de circulación. Programa DEEFEP.

Con las ecuaciones determinadas por Bárcenas (2011) para el cálculo de líneas de influencia, en el programa DEEFEP, primeramente se obtienen gráficas de líneas de influencia de envolventes para determinar la ubicación de la sección crítica del puente (de la misma manera que se realiza en el módulo de líneas de influencia Figura B.5), y posteriormente determinar los Momentos Máximos en dicha sección (pudiéndose realizar para 2 y hasta 3 carriles de circulación), los cuales se usan para la determinación de los esfuerzos.

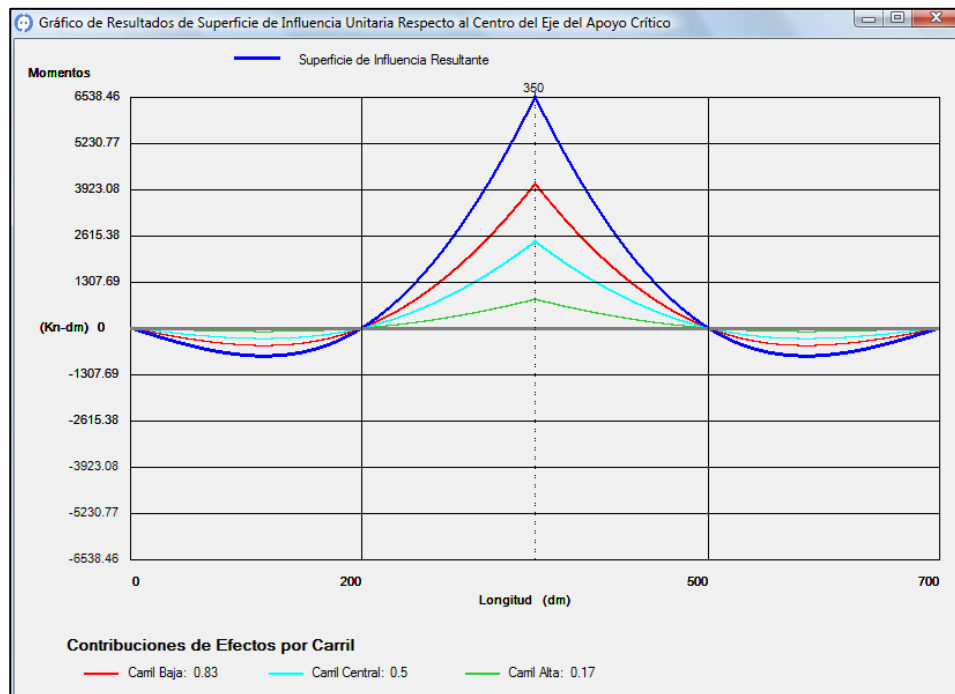


Figura B.13. Gráfico de resultados de superficie de influencia unitaria respecto al centro del eje del apoyo crítico. Programa DEEFEP.

Al igual que en el análisis estadístico y en la determinación de líneas de influencia, la generación de superficies de influencia con DEEFEP se realiza con tan sólo abrir el archivo de WIM en formato y/o extensión “.txt”, además de proporcionar las características del tipo de puente.

B.2.2.1 Hipótesis de modelado. Tráfico en varios carriles y superficie de influencia afectada por la posición de las vigas en la sección transversal del puente.



Composición de los registros de tráfico

Consta de los vehículos en el orden cronológico, mezclando vehículos pesados y ligeros, cada vehículo se describe por los siguientes datos:

- Fecha y hora de la grabación (en 1/100 s).
- Su velocidad actual (m / s).
- Su peso (KN) y longitud total (en dm);
- El número de ejes (<10);
- El peso del eje y la distancia entre ejes.

Posiciones Transversales

En ausencia de una medición directa de la posición transversal de los vehículos y/o de su variación respecto a un eje de referencia, se desarrolló el programa para que esta posición sea determinada de acuerdo al archivo de tráfico ingresado por carril. De esta manera, se toma la consideración de que el eje centroidal del vehículo se ubica al centro del ancho de cada carril y permanecerá así a lo largo del puente. Una variación de la posición de los vehículos implica un análisis de variación de probabilidad, que queda fuera de los alcances de este trabajo de tesis.

En el programa DEEFEP, se toman en cuenta los factores de atenuación de efectos para carriles adyacentes al de baja velocidad, calculados para dos y tres carriles, pero limitándose el análisis a puentes con sólo dos vigas de apoyo transversal.

Los supuestos de la simulación.

La posición de cada vehículo se determina sobre la superficie de rodamiento del puente, en cualquier momento, siguiendo las reglas de circulación entre vehículos, con el fin de establecer de manera realista el flujo de tráfico.

Después de haber obtenido una configuración realista de tráfico, el cálculo de un efecto se realiza directamente mediante la aplicación de la ecuación 2.8.



Modelando el movimiento de vehículos: el caso de múltiples carriles.

Para la modelación de tráfico, se debe tomar en cuenta diferentes reglas de tráfico en el caso de varios carriles con algunas diferencias (mencionados aquí) que con el caso de un sólo carril. La dirección del movimiento del vehículo se determina por el de la vía en que va inicialmente y conserva su movimiento sobre el mismo carril a lo largo del puente. Al igual que en la realidad, un carril puede acomodar vehículos en direcciones opuestas según la gestión de configuración de tránsito.

Animación de tráfico por incrementos de tiempo variables.

En cada instante τ_j , los vehículos son conducidos por incrementos de tiempo $\Delta\tau_j$ igual al tiempo necesario más rápido del vehículo presente en la zona de influencia para cubrir una distancia fija D :

$$\Delta\tau_j = \frac{D}{v_{max_j}} \quad (B.1)$$

Los otros vehículos se desplazarán a lo largo de una distancia proporcional a la velocidad:

$$d_{jn}^i = \Delta\tau_j \cdot v_{in}(j) \quad (B.2)$$

($v_{in}(j)$ se denotará v_{in} , si es necesario, i indica el número de la vía de circulación, y n es el rango del vehículo en el camino).

Animación de tráfico por los incrementos de tiempo constante.

Otra posibilidad para animar el tráfico es mover el vehículo una distancia d_{jn}^i variable, vinculado a un incremento de tiempo $\Delta\tau$ constante en el tiempo y la velocidad de cada vehículo propio v_{in} . Los vehículos se moverán entonces una cantidad $d_{jn}^i = \Delta\tau \cdot v_{in}$.

La distancia recorrida por cada vehículo es determinada a través de las siguientes relaciones:



$$\begin{aligned}
 t_j &= t_{j-1} + \Delta\tau_j \\
 d_{jn} &= d_{j-1,n}^i + \Delta\tau_j \cdot v_{in} \\
 d_{j0n} &= 0
 \end{aligned}
 \tag{B.3}$$

posiblemente con $\Delta\tau_j = \text{constante}$.

La posición del eje se deduce de (B.4) restando la distancia entre los ejes x_{nk}^i ;

$$\begin{aligned}
 e_{n,k+1}^i &= e_{nk}^i + x_{nk}^i \\
 x_1^i &= 0 \\
 e_1^i &= d_{jn}^i
 \end{aligned}
 \tag{B.4}$$

$1 < k \leq m - 1$, m es el número de ejes.

Reglas para control de velocidad entre vehículos

El adelantamiento entre vehículos no está considerado en esta versión de DEEFEP.

Hay un *pronóstico excedido* cuando la distancia entre dos vehículos consecutivos es menor que una distancia C fijado a priori, este requisito (C) está dada por:

$$d_{j-1,n}^i - l_{in} - d_{j-1,n+1}^i - \Delta\tau_j (v_{i,n+1} - v_{in}) < C \tag{C_0}$$

donde $v_{i,n+1} - v_{in}$ y l_{in} denota la longitud del vehículo n .

La condición (C₀) se dice condición de *colisión*.

Cuando (C₀) no se cumple, los vehículos conservan su velocidad inicial durante su paso a través de la zona de influencia. Por el contrario, cuando (C₀) se cumple, el desplazamiento del vehículo más lento v_{in} por el vehículo más rápido $v_{i,n+1}$ es posible si el modelo de tráfico es consistente con esta acción. Sin embargo, en esta versión del software DEEFEP sólo se considera el flujo de tráfico que se mantiene a lo largo de su carril de circulación al momento de ingresar a la zona de influencia y sin variar sin velocidad, si se llegase a cumplir esta condición de colisión el programa manda un cuadro de mensaje informando al usuario dicha situación.

DEEFEP es capaz de realizar una simulación animada del tráfico vehicular acorde a los registros de WIM seleccionados (figura B.14), mostrando además, los efectos calculados producto de cada eje y de la interacción de los vehículos según su carril de circulación, así como, la impresión numérica de resultados, tanto de momentos máximos como sus esfuerzos.

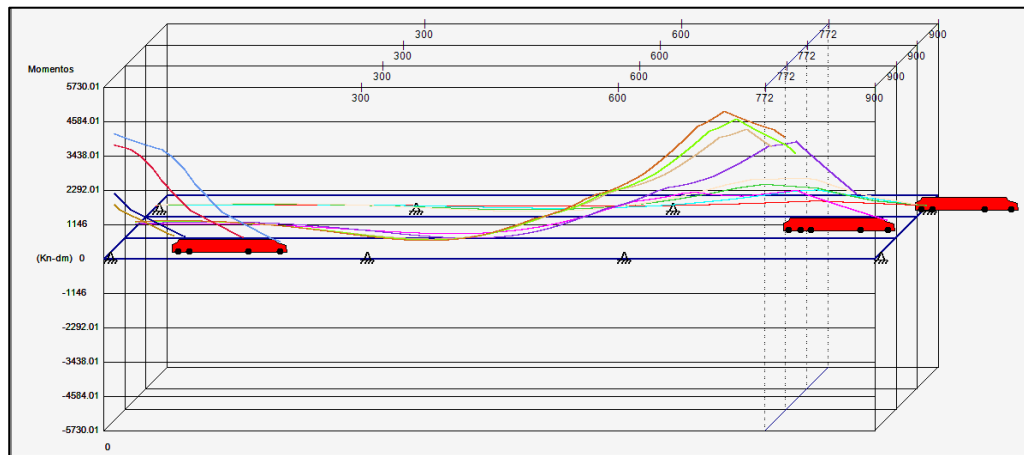


Figura B.14. Simulación animada del tráfico vehicular de registros WIM. DEEFEP.

APÉNDICE C. Sistematización de la metodología integral

En los siguientes sub-apéndices se describe la forma en que se re-estructuró el programa DEFP, así como, la forma en que se desarrolló, sistematizó e integró la nueva metodología, desglosando por los módulos que lo integran.

C.1. Pantalla de inicio, presentación y estructura

A partir de la re-estructuración del programa anterior DEFP dando origen a DEEFEP (figura 3.3, capítulo 3), se creó la pantalla de inicio y presentación de dicho programa (Figura C.1), así mismo, se puede observar dentro de dicha figura que se modificó y mejoró la estructura de la pantalla de trabajo, con una barra de menús que diferencia los diferentes tipos de análisis (Tratamiento de Archivos, Depuración de Datos, Análisis Estadístico, Modelo de interacción tráfico-puente, análisis de fatiga, efectos extremos, ayuda), por otro lado, se hicieron independientes cada una de las tareas a necesidad del usuario, lo que permite potencializar la interacción con las diferentes tareas y darle mayor claridad a dichas tareas. Así mismo, la nueva versión del programa permite realizar múltiples tareas a la vez, sin necesidad de cerrar algún módulo para realizar análisis en algún otro.

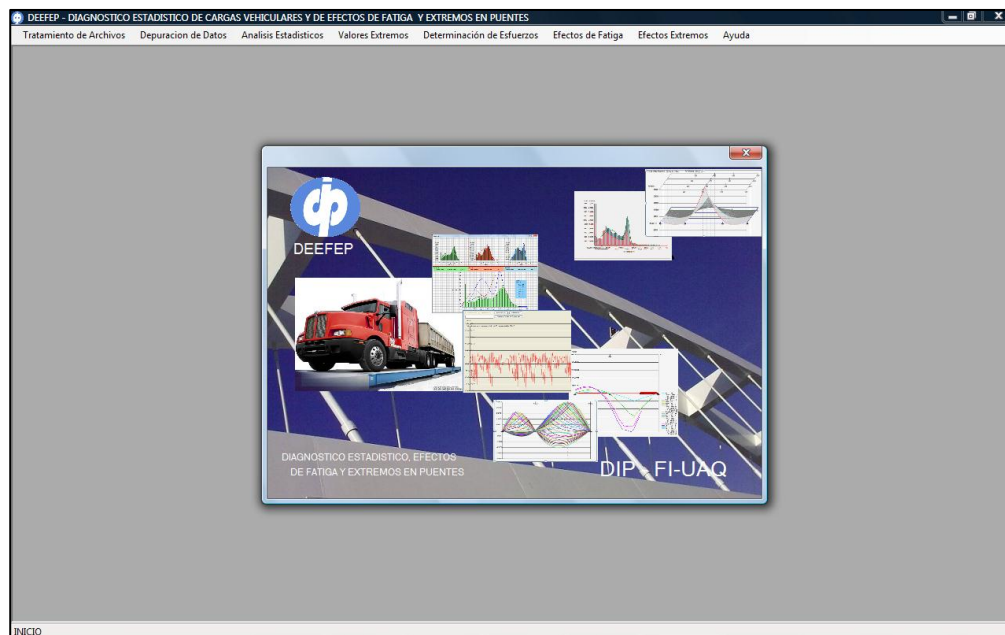


Figura C.1. Pantalla de inicio y presentación de la nueva versión del programa DEEFEP



Al ejecutar el programa DEEFEP, se abren dos ventanas, la primera, al fondo, es el campo de trabajo del programa donde se muestra en la parte superior la barra de menú principal del programa; sobre la primer ventana, se abre otra en forma de imagen, la cuál es la pantalla de presentación del programa. Esta segunda ventana no puede moverse ni se puede ejecutar alguna otra tarea dentro del programa hasta cerrarse dicha ventana.

C.2. Tratamiento de archivos y depuración de datos

Se creó un módulo de *“tratamiento de archivos”*, el cuál como se explica dentro del Apéndice A, permite adecuar los archivos de texto de los registros WIM a un formato específico (a necesidad del usuario), para su tratamiento en los diferentes programas (CASTOR, R-ESTADÍSTICA, DEEFEP, entre otros).

Al iniciar el módulo de tratamiento de archivos, primeramente se selecciona el archivo a modificar, dando click al botón “Examinar”. Este módulo permite la visualización del archivo de texto “.txt” a modificar y además genera una vista preliminar del archivo modificado según la acción seleccionada, la cual se tiene como opción eliminar el espacio entre columnas o convertir directamente a un formato específico (CASTOR o DEEFEP, entre las opciones disponibles).

Otro de los módulos que se utilizan para la manipulación de los datos en el archivo de texto del registro WIM, es el módulo denominado *“Depuración de Datos”*, el cual originalmente fue desarrollado dentro del programa DEFP y tiene la opción de separar datos, ya sea, por número de ejes o por rangos de peso filtrando así los registros de datos WIM, de acuerdo a necesidades de estudio. Este módulo fue revisado, adecuado a la nueva estructura del programa y actualizado, permitiendo la visualización del archivo de texto WIM dentro del mismo módulo, para facilitar su tratamiento (Figura C.2).

C.3. Módulo de análisis estadísticos

Este módulo es explicado dentro del capítulo 4, ya que forma parte principal de la nueva metodología, que se integró al programa DEEFEP.

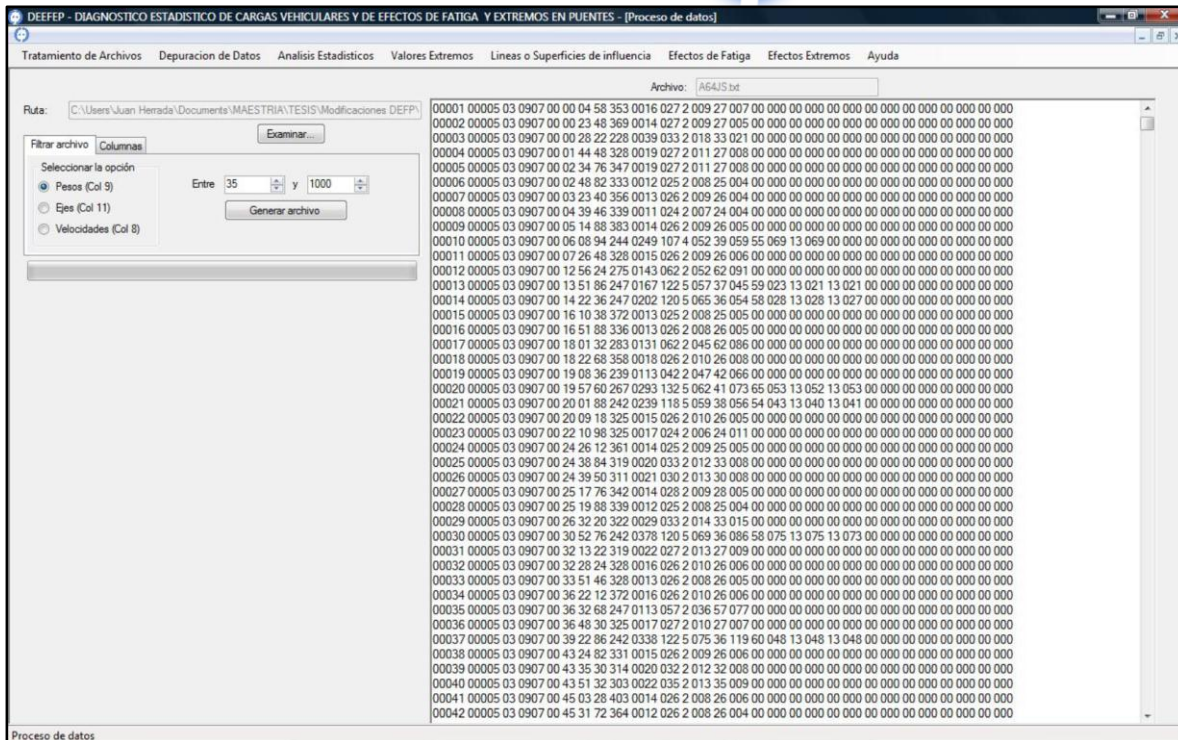


Figura C.2. Pantalla de módulo de depuración de datos.

C.4. Módulo de predicción de valores extremos

Partiendo de los resultados obtenidos en el análisis estadístico de cargas, el siguiente paso es el análisis de valores extremos de los registros de pesaje vehicular. Este módulo fue desarrollado dentro del programa DEFP por Bárcenas (2011), en este trabajo de tesis se retoma la teoría de valores extremos de POT, GEV, Gumbel y Poisson, se revisan los algoritmos, métodos y procesos y se adecuan en la nueva estructura del programa DEEFEP. El módulo de valores extremos pronostica los valores de pesos máximos esperados para ciertos períodos de retorno, mostrándose los resultados tanto en tablas como en gráficas.

Dentro de las adecuaciones realizadas es el extraer este módulo del análisis estadístico, haciéndolo un módulo principal e independiente, de tal forma que facilite al usuario el acceso a la tarea de cálculo de valores extremos. Así mismo, pueden realizarse análisis de valores extremos de manera directa (Método GEV) sin necesidad de realizar análisis estadísticos.

El diagrama de flujo que sigue el módulo de valores extremos, así como la descripción del proceso, se describen en la referencia de Bárcenas (2011), Capítulo 3.2 “Módulo de valores extremos”.

C.5. Módulo de interacción Tráfico-Puente (análisis estructural tipo puente sometido a tráfico pesado, líneas y superficies de influencia)

Al igual que el módulo de análisis estadístico, el módulo de *Modelo de interacción tráfico-puente* junto con sus sub-módulos de líneas de influencia y/o superficies de influencia, se explican dentro del capítulo 4, debido a que forman parte principal de la nueva metodología que se integró al programa DEEFEP.

C.5.1. Conteo de ciclos de esfuerzos con el método de rainflow

Este proceso se encuentra dentro de los sub-módulos de líneas y superficies de influencia, el cual fue desarrollado en el programa DEFP dentro del módulo de líneas de influencia. En este trabajo de tesis se retoma este proceso, se revisa e integra dentro del módulo de superficies de influencia. Con las líneas o superficies de influencia calculadas se tiene la historia de ciclos de esfuerzos que presenta la sección de interés del puente. Los momentos generados son graficados en forma de serie dentro del módulo de “rainflow”, donde se utiliza este método para obtener los ciclos de esfuerzos y sus magnitudes. Para esto es necesario saber las características principales de la sección del puente y aplicar la ecuación de la escuadría. DEEFEP despliega la serie de historia de esfuerzos de manera gráfica, además de generar un archivo en formato de texto donde se almacenan los resultados.

El diagrama de flujo que sigue el proceso de conteo de ciclos de esfuerzos con el método de rainflow, así como la descripción del proceso, se describen en la referencia de Bárcenas (2011), Capítulo 3.3.2 “Módulo del conteo de ciclos de esfuerzos con el método de rainflow” y la teoría que sustenta a este módulo se encuentra en el sub-capítulo 2.4.2.2. “Método de rainflow” de dicha referencia.



C.6. Análisis de fatiga en puentes carreteros de acero

Este módulo es el principal dentro de la metodología propuesta y desarrollada por Bárcenas (2011) en su trabajo de tesis, donde tomó como base la teoría que sustenta al reglamento Eurocode para la generación de los algoritmos. Esta teoría se basa en la obtención de las series de esfuerzos para la evaluación del daño acumulado y predicción de vida a fatiga con la regla de Miner.

C.6.1. Módulo de estimación de daño acumulado y vida a fatiga

Conociendo los esfuerzos, el módulo estadístico es nuevamente utilizado para obtener los histogramas de los ciclos de esfuerzos, mejor conocidos como histogramas de rainflow. Entonces se puede ahora habilitar la opción de “regla de Miner” la cual tiene un algoritmo basado en los principios de dicho proceso. El programa DEEFEP da como resultado el valor de daño acumulado o número de Miner (M) y una aproximación teórica del período de vida que le falta al puente para que se presenten daños estructurales (primeras grietas o deformaciones excesivas).

El diagrama de flujo de la estimación de daño aculado y predicción de vida a fatiga, así como la descripción de cada paso de este análisis se describen en la referencia de Bárcenas (2011), sub-capítulo 3.3.3. “Módulo de estimación de daño acumulado y vida a fatiga”.

C.7. Menú de ayuda

Se creó un módulo de Ayuda dentro del menú principal, el cual ofrece al usuario una descripción detallada del procedimiento a seguir para la utilización del programa en cada uno de sus módulos. Esta ayuda esta presentada a través de ejemplos sencillos de aplicación de manera ilustrada, lo cual facilita significativamente la tarea del manejo del programa.

APÉNDICE D. Ejemplos tutoriales de aplicación del programa DEEFEP para análisis de fatiga

A continuación se muestra como ejemplificación el análisis de fatiga, para la determinación de la vida útil, de los puentes Auxerre (de un claro y tres carriles), y el puente Layrac (de tres claros y dos carriles) de Francia, considerando para todos los casos un registro de WIM de la autopista A6 obtenido en el año de 1986, el cual se ha seleccionado para poder realizar la comparación de resultados con el trabajo precedente de Arroyo M. (2009) y Bárcenas V. (2011).

D.1 Análisis de fatiga del puente Auxerre de Francia. Líneas de influencia

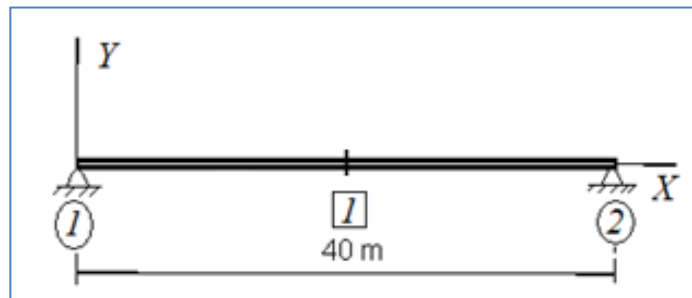


Figura D.1. Modelo del Puente Auxerre.

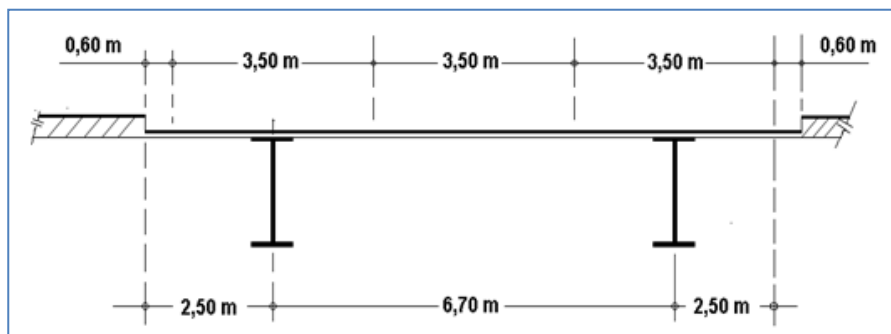


Figura D.2. Sección del Puente Auxerre.

Tabla D.1. Características geométricas principales de los puentes considerados para el análisis de fatiga.

Puente	No. De Claros	Dimensión (m)			Módulo de sección (S =I/c) (m ³ /KN)
		Claro 1	Claro 2	Claro 3	
Auxerre	1	40	NA	NA	0.1098
Layrac	3	510	690	510	0.0874

A continuación, se presenta de manera general y siguiendo el procedimiento de análisis de fatiga por medio de líneas de influencia del puente Kervitous, el análisis del puente Auxerre de Francia. El análisis comienza al abrir el Archivo de Registros WIM, para este como en los demás ejemplos de aplicación, se ha utilizado el archivo A6 1986.txt. En seguida se asigna el número de claros que tendrá el puente. Se utilizaron las características del puente Auxerre (un claro). La dimensión del claro del puente Auxerre es de 40 metros. Se determinó la sección crítica del puente a través del análisis de líneas de influencia envolventes, la cual se encuentra a una posición de 41.5 m del inicio del puente.

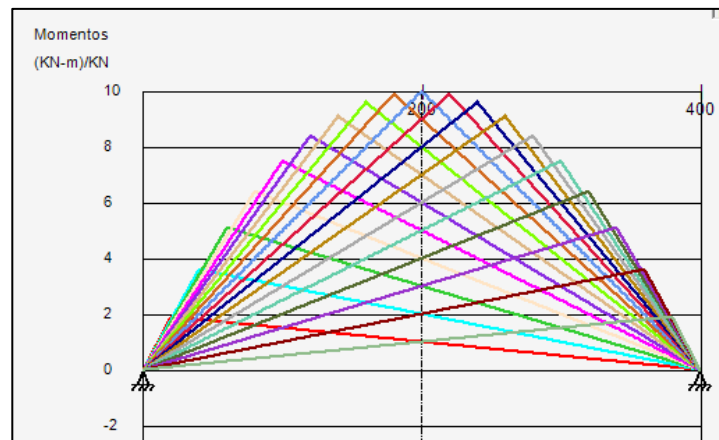


Figura D.3. Determinación de la sección crítica del puente Auxerre a través del análisis de líneas de influencia envolventes.

Una vez determinada la sección de análisis de fatiga, el programa obtiene la línea de influencia unitaria con la cual se realizará el análisis de determinación de momentos máximos.

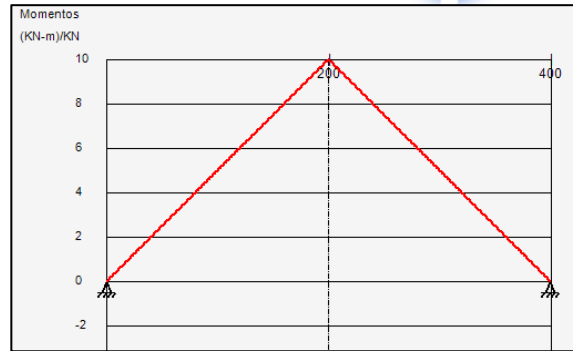


Figura D.4. Generación de la línea de influencia unitaria del puente Auxerre. Sección de análisis a centro de claro (sección crítica).

Después del análisis anterior, se determinan los momentos flexionantes máximos con sólo dar click en el botón “Resultados momentos” y posteriormente se procede a asignar el módulo de sección de la viga de apoyo del puente en cuestión $S=0.1098 \text{ m}^3$.

Al oprimir la opción “Resultados Esfuerzos” se generan todas variaciones de líneas de influencia de esfuerzos causadas por las cargas móviles.

dist	Li	Car	Eje	Dist	Minimo	Dist	Maximo
0	0	MAX = Primero Encontrado					
1	0.05	1	1	-1	10	200	16.466302
2	0.1	1	2	-1	10	200	19.23679
3	0.15	1	3	-1	10	145	25.50956
4	0.2	1	4	-1	10	135	30.79645
5	0.25	1	5	-1	10	178	34.9071
6	0.3	2	1	-1	10	200	4.189435
7	0.35	2	2	-1	10	200	10.78415
8	0.4	2	3	-1	10	132	13.96995
9	0.45	2	4	-1	10	121	16.66986
10	0.5	3	1	-1	10	200	7.1949
11	0.55	3	2	-1	10	200	18.70765

Figura D.5. Cuadro de información de las líneas de influencia de esfuerzos por eje vehicular.

El siguiente paso que se realizó para el análisis de fatiga fue el conteo de ciclos de esfuerzos con el método de rainflow. Al oprimir la opción de rainflow, DEEFEP despliega una nueva pantalla donde se observa la gráfica de historia de esfuerzos que provoca el archivo A6 1986.txt, y se procede a determinar el histograma de rainflow.

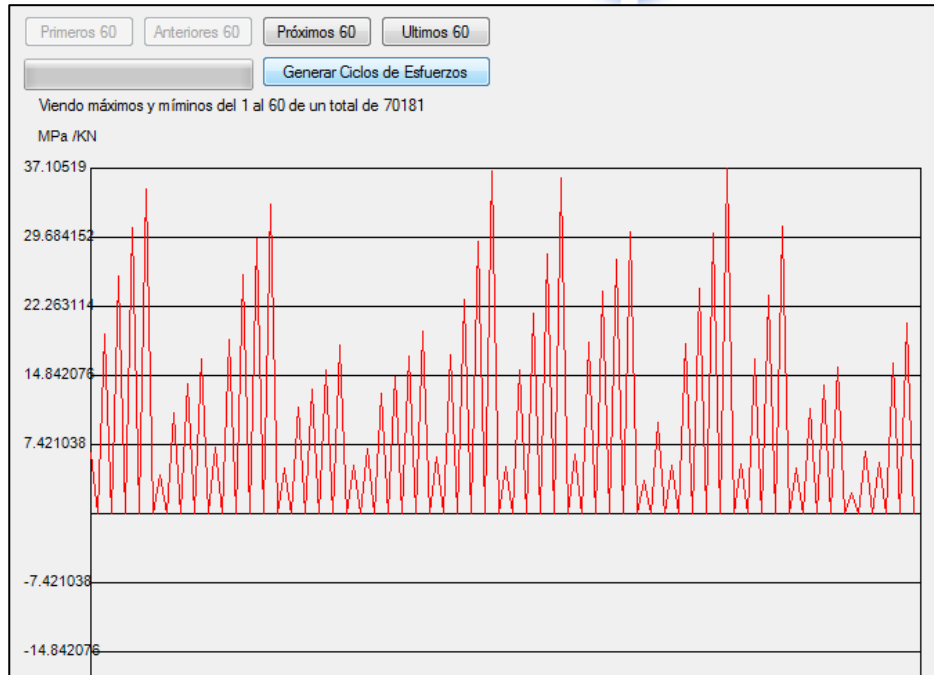


Figura D.6. Serie de historia de esfuerzos obtenidos mediante líneas de influencia.

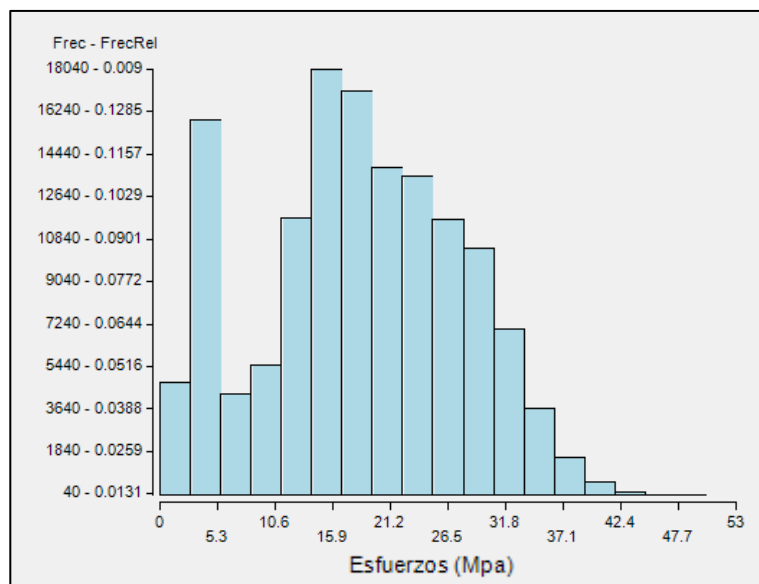


Figura D.7. Generación del histograma de rainflow. Esfuerzos mediante líneas de influencia.

Para obtener el “histograma de rainflow”, en primer lugar se tiene que seleccionar en columna a leer “1” ya que el archivo creado “EsfuerzosMod.txt”, es de una sola columna, y el rango sugerido es de 3 Mpa. Continuando con el análisis de fatiga del puente Auxerre, se realizó la estimación de daño por fatiga mediante la regla de Miner. Se abre el archivo del histograma de rainflow (generado en el paso anterior) y automáticamente DEEFEP hace la evaluación de daño con la regla de Miner.

Se observa en este ejemplo del puente Auxerre que la vida remanente teórica (mediante un análisis de determinación de esfuerzos por líneas de influencia en la sección crítica), antes de que se presenten grietas en la parte inferior de las traveses de acero es de 50.28 años

Fátiga por regla de miner	
Archivo	
Vida actual (días):	0.000
Detalle:	B
Fracción de año del archivo:	31.25
Valor de Miner (D):	0.000636430609477755
Vida remanente a fatiga:	50.280422599816

Figura D.8. Valor de Miner y estimación de Vida a Fatiga. Esfuerzos mediante líneas de influencia. Puente Auxerre.

D.2 Análisis de fatiga del puente Auxerre de Francia. Superficies de influencia. Un sólo registro WIM

A continuación, se presenta de manera general y siguiendo el procedimiento de análisis del puente kervitous por medio de superficies de influencia, el análisis de fatiga del puente Auxerre de Francia.

El análisis comienza al abrir los Archivos de Registros WIM. El puente Auxerre consta de tres carriles de circulación. Para este análisis, se ha utilizado el archivo A6 1986.txt para el carril de baja velocidad y un archivo nulo “nullo” para el carril central y el carril de alta velocidad.



En seguida se asigna el número de claros del puente Auxerre (un claro con longitud de 40 metros). El siguiente paso es determinar las características de la sección transversal del puente.

Abrir Archivos de Registros WIM		Total de carros: Camil 1: 17756 Camil 2: 2	
Geometría del Puente		Sección Transversal	
Num de claros:	Dist. Claro 1 400 dm	Ancho Camil 35 dm	No. Apoyos 2
1 claro	Dist. Claro 2	Dist. del extremo del la superficie de rodamiento al eje del apoyo extremo 19 dm	Distancia entre apoyos 67 dm
Sección del Puente	Dist. Claro 3	Pto Referencia 200 dm	
S= 0.1098 m3	<input checked="" type="checkbox"/> Mostrar puente		
<input type="checkbox"/> L. Inf. unitaria Envolventes	<input checked="" type="checkbox"/> Sup. Inf. unitaria		

Figura D.9. Asignación de las características geométricas del puente Auxerre.

Una vez asignados los datos anteriores DEEFEP dibuja la sección transversal del puente, permitiendo así al usuario corroborar los datos.

La sección crítica es determinada a través de un análisis de líneas de influencia envolventes. Una vez asignada la sección de análisis, primeramente se obtiene la superficie de influencia unitaria con la cual se realizará el análisis de determinación de momentos máximos. Dicha superficie muestra las contribuciones de efectos por carril así como la línea de influencia resultante.

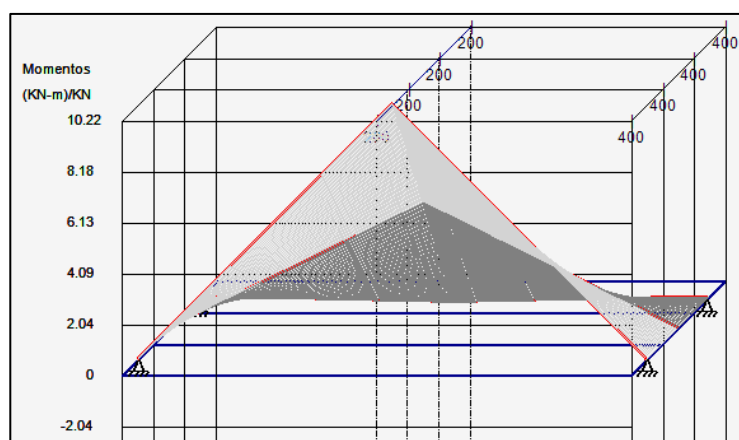


Figura D.10. Generación de la superficie de influencia unitaria del puente Auxerre de tres carriles. Sección de análisis a 200 dm (sección crítica).

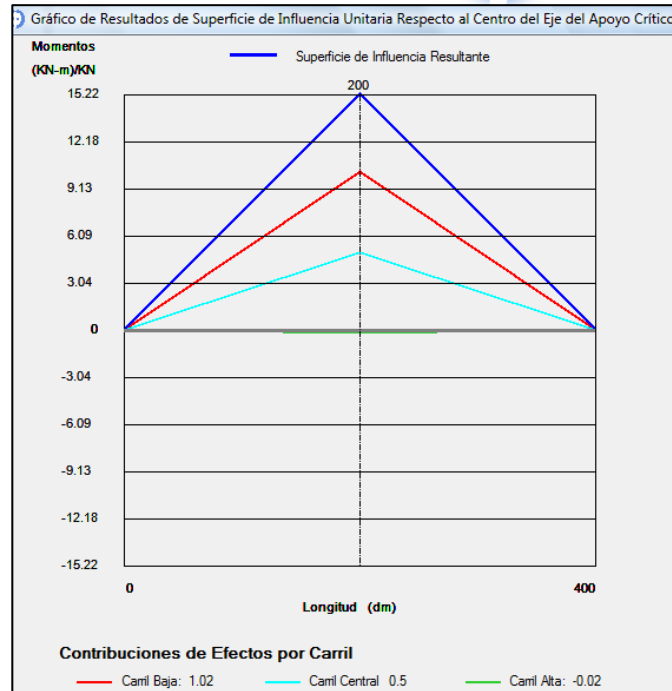


Figura D.11. Generación de Superficie de influencia unitaria Resultante del puente Auxerre. Sección de análisis a 200 dm (sección crítica).

Se obtienen los momentos flexionantes máximos y se procede a asignar el módulo de sección de la viga de apoyo del puente en cuestión $S = 0.1098 \text{ m}^3$.

Al oprimir la opción “Resultados Esfuerzos” se generan todas variaciones de superficies de influencia de esfuerzos causadas por las cargas móviles.

Carril 3: 2		Resultados Momentos		Resultados Esfuerzos		Rain Flow	
dist	Sup Infl	Car	Eje	IDist	Minimo	IDist	Maximo
0	0	MAX = Primero Encontrado					
1	0.07611941	1	1	-1	10	200	16.611071
2	0.1522388	1	2	-1	10	200	19.66747
3	0.2283582	1	3	-1	10	145	26.08067
4	0.3044776	1	4	-1	10	135	31.48592
5	0.380597	1	5	-1	10	178	35.68861
6	0.4567164	2	1	-1	10	200	4.283229
7	0.5328358	2	2	-1	10	200	11.03558

Figura D.12. Cuadro de información de las superficies de influencia de esfuerzos por eje vehicular.

El siguiente paso que se realizó para el análisis de fatiga fue el conteo de ciclos de esfuerzos con el método de rainflow. Al oprimir la opción de rainflow, DEEFEP despliega una

nueva pantalla donde se observa la gráfica de historia de esfuerzos que provoca el archivo A6 1986.txt.

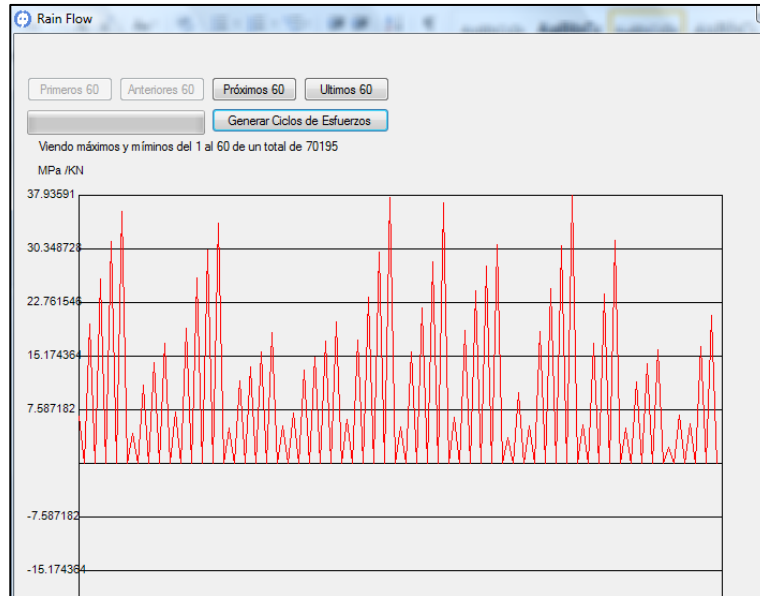


Figura D.13. Serie de historia de esfuerzos mediante superficies de influencia. Utilizando registró WIM en un sólo carril.

Para obtener el “histograma de rainflow”, en primer lugar se tiene que seleccionar en columna a leer “1” ya que el archivo creado “EsfuerzosMod.txt”, es de una sola columna, y el rango sugerido es de 3 Mpa. Al dar click en abrir, se genera automáticamente el histograma de rainflow.

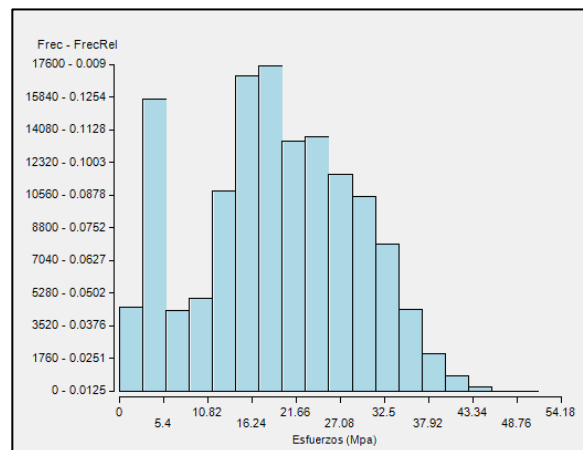
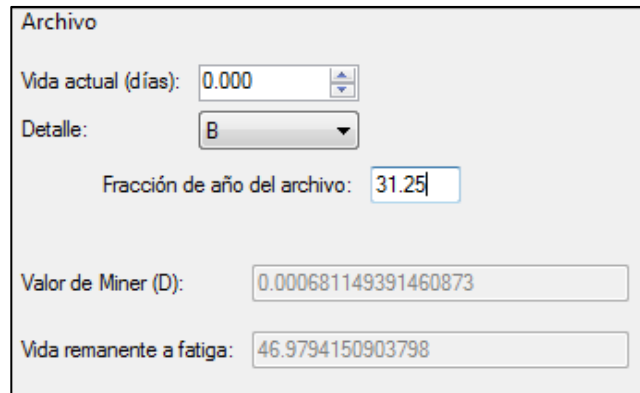


Figura D.14. Generación del histograma de rainflow. Obtención de esfuerzos mediante superficies de influencia. Utilizando registró WIM en un sólo carril.

Continuando con el análisis de fatiga del puente Auxerre, se realizó la estimación de daño por fatiga mediante la regla de Miner.



Archivo	
Vida actual (días):	0.000
Detalle:	B
Fracción de año del archivo:	31.25
Valor de Miner (D):	0.000681149391460873
Vida remanente a fatiga:	46.9794150903798

Figura D.15. Valor de Miner y estimación de Vida a Fatiga. Obtención de esfuerzos mediante superficies de influencia. Utilizando registró WIM en un sólo carril.

Se observa en este ejemplo del puente Auxerre que la vida remanente teórica antes de que se presenten grietas en la parte inferior de las traves de acero es de 46.98 años.

D.3 Análisis de fatiga del puente Auxerre de Francia. Superficies de influencia. Dos carriles con registro WIM

El análisis comienza al abrir los Archivos de Registros WIM. Para este análisis, se ha utilizado el archivo “Aux86-21” para el carril de baja velocidad, el archivo “Aux86-21” para el carril central y un archivo nulo “nulo” para el carril de alta velocidad.

En seguida se asigna el número de claros del puente Auxerre (un claro con longitud de 40 metros). El siguiente paso es determinar las características de la sección transversal del puente.

La sección crítica es determinada a través de un análisis de líneas de influencia envolventes. Una vez asignada la sección de análisis, primeramente se obtiene la superficie de influencia unitaria con la cual se realizará el análisis de determinación de momentos máximos. Dicha superficie muestra las contribuciones de efectos por carril así como la línea de influencia resultante.



Se obtienen los momentos flexionantes máximos y se procede a asignar el módulo de sección de la viga de apoyo del puente en cuestión $S = 0.1098 \text{ m}^3$.

Al oprimir la opción “Resultados Esfuerzos” se generan todas variaciones de superficies de influencia de esfuerzos causadas por las cargas móviles.

Camil 3: 2		Resultados Momentos	Resultados Esfuerzos	Rain Flow			
dist	Sup Infl	Car	Eje	Dist	Minimo	Dist	Maximo
0	0	MAX = Primero Encontrado					
1	0.07611941	1	1	-1	10	200	6.611071
2	0.1522388	1	2	-1	10	200	19.66747
3	0.2283582	1	3	-1	10	145	26.08067
4	0.3044776	1	4	-1	10	135	31.48592
5	0.380597	1	5	-1	10	178	35.68861
6	0.4567164	2	1	-1	10	200	4.283229
7	0.5328358	2	2	-1	10	200	11.03558

Figura D.16. Cuadro de información de las superficies de influencia de esfuerzos por eje vehicular.

El siguiente paso que se realizó para el análisis de fatiga fue el conteo de ciclos de esfuerzos con el método de rainflow. Al oprimir la opción de rainflow, DEEFEP despliega una nueva pantalla donde se observa la gráfica de historia de esfuerzos que provoca el archivo A6 1986.txt.

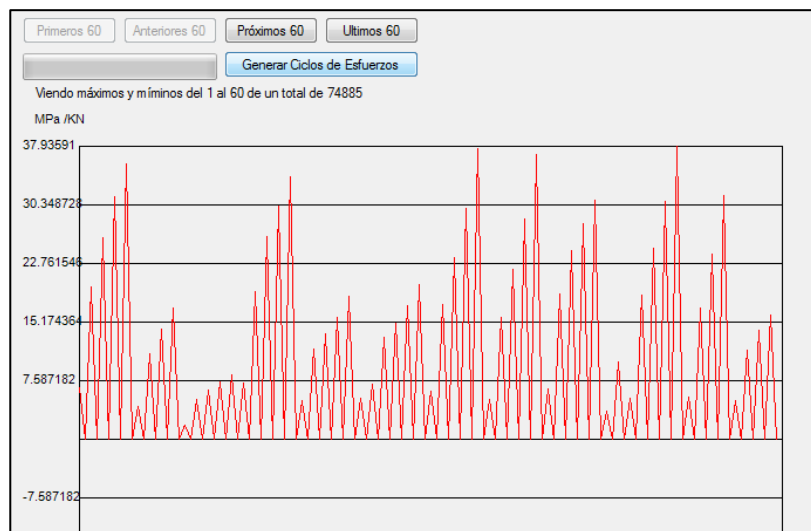


Figura D.17. Serie de historia de esfuerzos mediante superficies de influencia. Utilizando registros WIM en dos carriles.

Para obtener el “histograma de rainflow”, en primer lugar se tiene que seleccionar en columna a leer “1” ya que el archivo creado “EsfuerzosMod.txt”, es de una sola columna, y el rango sugerido es de 3 Mpa. Al dar click en abrir, se genera automáticamente el histograma de rainflow.

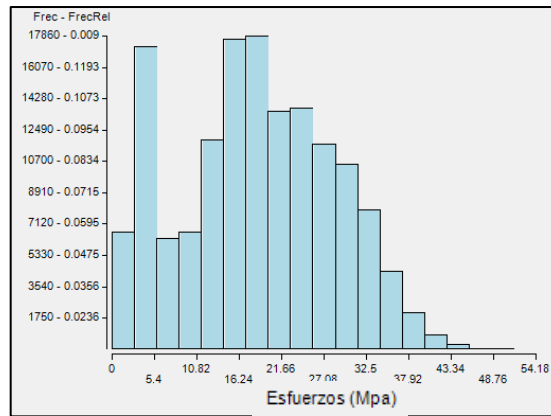


Figura D.18. Generación del histograma de rainflow. Obtención de esfuerzos mediante superficies de influencia. Utilizando registros WIM en dos carriles.

Finalmente, se realizó la estimación de daño por fatiga mediante la regla de Miner.

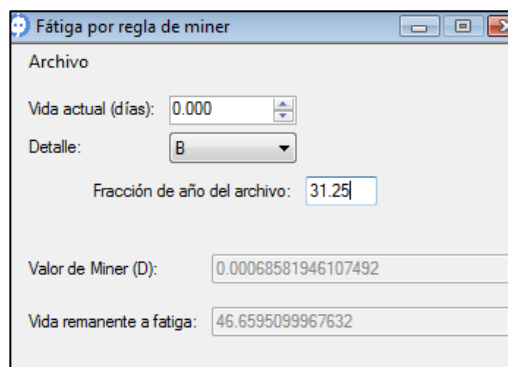


Figura D.19. Valor de Miner y estimación de Vida a Fatiga. Obtención de esfuerzos mediante superficies de influencia. Utilizando registros WIM en dos carriles.

Se observa en este ejemplo del puente Auxerre que la vida remanente teórica antes de que se presenten grietas en la parte inferior de las traveses de acero es de 46.66 años.

Los mismos análisis realizados en el puente Auxerre, se realizaron para el puente Layrac, presentándose en la tabla 5.2 del capítulo 5 los resultados.



ANEXOS



ANEXO A

CD con el Programa DEEFEP

Contiene:

A.1 Instalador del Programa DEEFEP

A.2 Código fuente del programa DEEFEP

A.3 Manual de Usuario del programa DEEFEP

A.4 Tesis Digital PDF