



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA
DE AGUASCALIENTES

CENTRO DE CIENCIAS DEL DISEÑO Y DE LA CONSTRUCCIÓN

DEPARTAMENTO DE POSGRADOS

TESIS

PROPUESTA METODOLÓGICA PARA LA EVALUACIÓN POR FATIGA EN CASO
PRÁCTICO DE LOSA COMPUESTA, CON ÉNFASIS EN TRATAMIENTO DE
HISTORIA DE ESFUERZOS Y DAÑO ACUMULADO

PRESENTA

José de Jesús Sánchez Gallegos

PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRO EN INGENIERÍA CIVIL EN EL ÁREA DE
ESTRUCTURAS

TUTOR

Dr. José Ángel Ortiz Lozano

CO-TUTOR

Dr. Mario Eduardo Zermeño De León

ASESOR

M en Ing. Daniel Enrique Reyna Valdivia

Aguascalientes, Ags, 30 de noviembre del 2023

MTRA. EN ING. AMB. MA. GUADALUPE LIRA PERALTA
DECANA DEL CENTRO DE CIENCIAS DEL
DISEÑO Y DE LA CONSTRUCCIÓN
P R E S E N T E

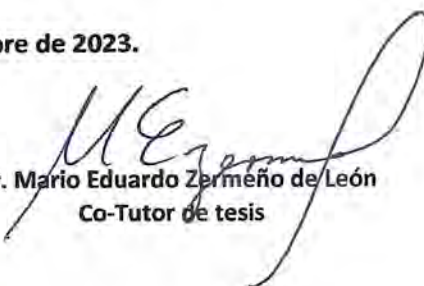
Por medio del presente como **Miembros del Comité Tutorial** designado del estudiante **JOSÉ DE JESÚS SÁNCHEZ GALLEGOS** con ID **97664** quien realizó la tesis titulada: **PROPUESTA METODOLÓGICA PARA LA EVALUACIÓN POR FATIGA EN CASO PRÁCTICO DE LOSA COMPUESTA, CON ÉNFASIS EN TRATAMIENTO DE HISTORIA DE ESFUERZOS Y DAÑO ACUMULADO**, un trabajo propio, innovador, relevante e inédito y con fundamento en el Artículo 175, Apartado II del Reglamento General de Docencia damos nuestro consentimiento de que la versión final del documento ha sido revisada y las correcciones se han incorporado apropiadamente, por lo que nos permitimos emitir el **VOTO APROBATORIO**, para que él pueda proceder a imprimirla así como continuar con el procedimiento administrativo para la obtención del grado.

Ponemos lo anterior a su digna consideración y sin otro particular por el momento, le enviamos un cordial saludo.

ATENTAMENTE
"Se Lumen Proferre"

Aguascalientes, Ags., a 16 de noviembre de 2023.


Dr. José Ángel Ortiz Lozano
Tutor de tesis


Dr. Mario Eduardo Zermeño de León
Co-Tutor de tesis


M. en Ing. Daniel Enrique Reyna Valdivia
Asesor de tesis

c.c.p.- Interesado
c.c.p.- Secretaría Técnica del Programa de Posgrado

Elaborado por: Depto. Apoyo al Posgrado.
Revisado por: Depto. Control Escolar/Depto. Gestión de Calidad.
Aprobado por: Depto. Control Escolar/ Depto. Apoyo al Posgrado.

Código: DO-SEE-FO-16
Actualización: 00
Emisión: 17/05/19

Fecha de dictaminación dd/mm/aaaa: 21/11/2023

NOMBRE: JOSÉ DE JESÚS SÁNCHEZ GALLEGOS

ID 97664

PROGRAMA: MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL LGAC (del posgrado): ESTRUCTURAS

TIPO DE TRABAJO: (X) Tesis () Trabajo Práctico

TÍTULO: PROPUESTA METODOLÓGICA PARA LA EVALUACIÓN POR FATIGA EN CASO PRÁCTICO DE LOSA COMPUESTA, CON ÉNFASIS EN TRATAMIENTO DE HISTORIA DE ESFUERZOS Y DAÑO ACUMULADO

IMPACTO SOCIAL (señalar el impacto logrado):

Se propone una metodología que permite revisar estructuras tipo edificación por fatiga, desde la obtención de la historia de esfuerzos y la elección óptima del algoritmo para cuantificación y simplificación de ciclos de tensión, así como el cálculo del daño acumulado. Esta metodología no es descrita, sugerida ni propuesta en ningún código de diseño de estructuras.

INDICAR SI NO N.A. (NO APLICA) SEGÚN CORRESPONDA:

<i>Elementos para la revisión académica del trabajo de tesis o trabajo práctico:</i>	
SI	El trabajo es congruente con las LGAC del programa de posgrado
SI	La problemática fue abordada desde un enfoque multidisciplinario
SI	Existe coherencia, continuidad y orden lógico del tema central con cada apartado
SI	Los resultados del trabajo dan respuesta a las preguntas de investigación o a la problemática que aborda
SI	Los resultados presentados en el trabajo son de gran relevancia científica, tecnológica o profesional según el área
SI	El trabajo demuestra más de una aportación original al conocimiento de su área
SI	Las aportaciones responden a los problemas prioritarios del país
N.A.	Generó transferencia del conocimiento o tecnológica
SI	Cumple con la ética para la investigación (reporte de la herramienta antiplagio)
<i>El egresado cumple con la siguiente:</i>	
SI	Cumple con lo señalado por el Reglamento General de Docencia
SI	Cumple con los requisitos señalados en el plan de estudios (créditos curriculares, optativos, actividades complementarias, estancia, predoctoral, etc)
SI	Cuenta con los votos aprobatorios del comité tutorial, en caso de los posgrados profesionales si tiene solo tutor podrá liberar solo el tutor
SI	Cuenta con la carta de satisfacción del Usuario
SI	Coincide con el título y objetivo registrado
SI	Tiene congruencia con cuerpos académicos
SI	Tiene el CVU del Conacyt actualizado
N.A.	Tiene el artículo aceptado o publicado y cumple con los requisitos institucionales (en caso que proceda)
<i>En caso de Tesis por artículos científicos publicados</i>	
N.A.	Aceptación o Publicación de los artículos según el nivel del programa
N.A.	El estudiante es el primer autor
N.A.	El autor de correspondencia es el Tutor del Núcleo Académico Básico
N.A.	En los artículos se ven reflejados los objetivos de la tesis, ya que son producto de este trabajo de investigación.
N.A.	Los artículos integran los capítulos de la tesis y se presentan en el idioma en que fueron publicados
N.A.	La aceptación o publicación de los artículos en revistas indexadas de alto impacto

Con base a estos criterios, se autoriza se continúen con los trámites de titulación y programación del examen de grado:

Sí X
No

FIRMAS

Elaboró:

* NOMBRE Y FIRMA DEL CONSEJERO SEGÚN LA LGAC DE ADSCRIPCIÓN:

Dr. Mario Eduardo Ziermeño De León

NOMBRE Y FIRMA DEL SECRETARIO TÉCNICO:

Dr. Martín Hernández Marín

* En caso de conflicto de intereses, firmará un revisor miembro del NAB de la LGAC correspondiente distinto al tutor o miembro del comité tutorial, asignado por el Decano

Revisó:

NOMBRE Y FIRMA DEL SECRETARIO DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO:

Dr. en Amb. Ant. Mario Ernesto Esparza Díaz de León

Autorizó:

NOMBRE Y FIRMA DEL DECANO:

Mtra. en Ing. Amb. Ma. Guadalupe Lira Peralta

Nota: procede el trámite para el Depto. de Apoyo al Posgrado

En cumplimiento con el Art. 105C del Reglamento General de Docencia que a la letra señala entre las funciones del Consejo Académico: ... Cuidar la eficiencia terminal del programa de posgrado y el Art. 105F las funciones del Secretario Técnico, llevar el seguimiento de los alumnos.

AGRADECIMIENTOS

Primeramente, quiero expresar mi más profundo agradecimiento a Dios, por mostrarme siempre el camino y brindarme la vida y el entendimiento para culminar este objetivo académico. A mi familia, por creer en mí, por sus palabras de aliento, y apoyo incondicional.

Un especial agradecimiento a mi tutor, el Dr. José ángel Ortiz Lozano por su guía y experiencia durante el desarrollo del trabajo, su conocimiento, sus consejos y tiempo otorgado a esta investigación. Asimismo, a mis asesores de tesis, el Dr. Mario Eduardo Zermeño de León y al M. en Ing. Daniel Enrique Reyna Valdivia por sus valiosas aportaciones y recomendaciones durante todo el proceso.

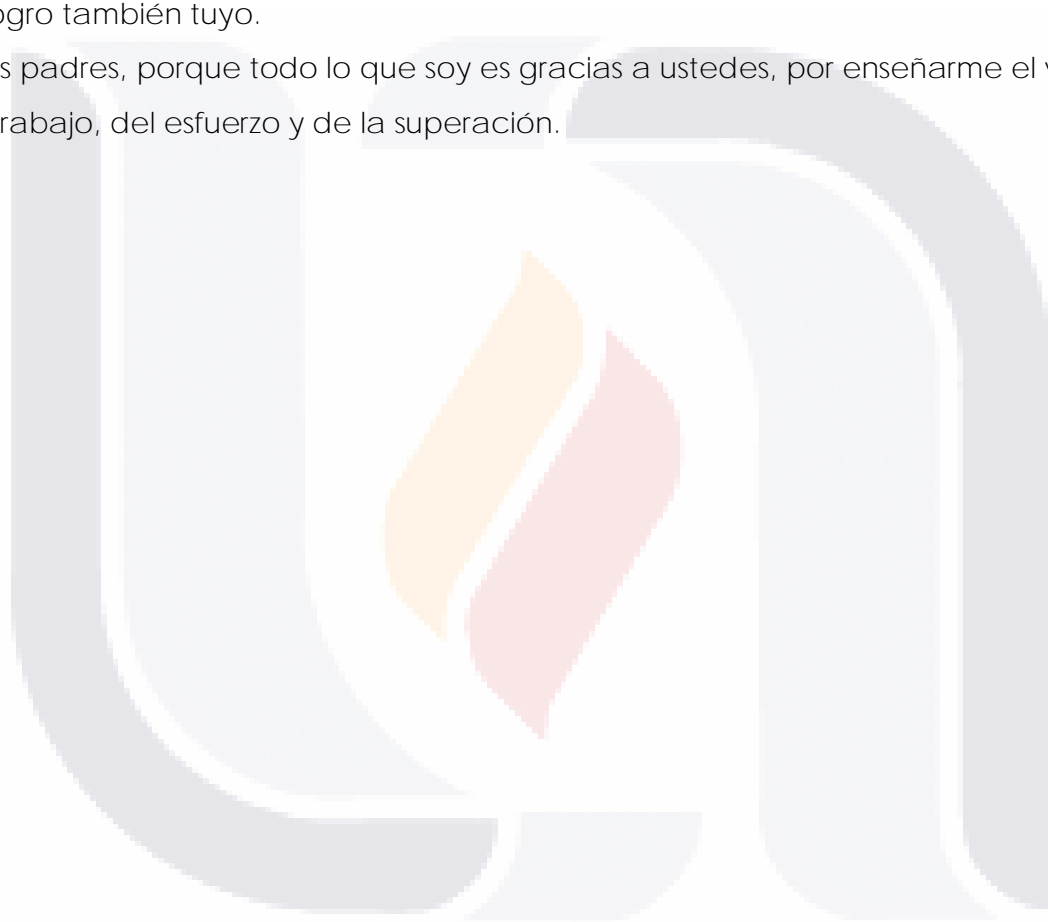
Gracias a mi esposa Gaby por el asesoramiento y guía en el manejo de lenguajes de programación y su gran apoyo durante el procesamiento de datos y formateo final del documento.

Agradezco al gobierno de México, el cuál a través del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) mediante el Programa Nacional de Posgrados de Calidad (PNPC), me brindó un apoyo económico durante el desarrollo de mis estudios de maestría.

DEDICATORIAS

A mi esposa Gaby, por tu apoyo incondicional en todos y cada uno de los momentos difíciles y de duda, de las alegrías y satisfacciones que vivimos juntos a lo largo de estos últimos dos años y medio de trabajo académico. Eres mi motor y mi inspiración, gracias por todo el esfuerzo y trabajo que amorosamente hiciste para que yo pudiera enfocarme en este objetivo. Haber culminado este trabajo es un logro también tuyo.

A mis padres, porque todo lo que soy es gracias a ustedes, por enseñarme el valor del trabajo, del esfuerzo y de la superación.



ÍNDICE GENERAL

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN	13
1.1. PRÓLOGO	13
1.2. OBJETIVOS	15
1.2.1. Objetivo General	15
1.2.2. Objetivos particulares	15
1.3. JUSTIFICACIÓN	17
1.4. HIPÓTESIS	17
1.5. METODOLOGÍA	18
1.6. TIPOS DE VARIABLES	20
1.6.1. Variables independientes	21
1.6.2. Variables dependientes	21
CAPÍTULO II. ESTADO ACTUAL DEL CONOCIMIENTO	23
2.1. FATIGA EN LA PRIMERA MITAD DEL SIGLO XX	23
2.2. DESARROLLO DE CURVAS S-N	24
2.3. FATIGA E INGENIERÍA	25
2.4. ENFOQUES RECIENTES	27
CAPÍTULO III. MARCO TEÓRICO	29
3.1. CONCEPTOS BÁSICOS PARA FATIGA EN ESTRUCTURAS	29
3.1.1. Vida útil de diseño	29
3.1.2. Tolerancia de daño	29
3.1.3. Esfuerzo nominal	29
3.1.4. Evento de carga (ciclo de carga)	29
3.1.5. Historia de cargas (Loading History)	29
3.1.6. Historia de esfuerzos/tensión	30
3.1.7. Rango o Carrera de esfuerzo	30
3.1.8. Espectro de esfuerzos	30
3.1.9. <i>Limite de Fatiga</i> (F_{TH})	30
3.1.10. <i>Conteo de ciclos</i>	30
3.1.11. <i>Resistencia a la fatiga</i>	31
3.1.12. <i>Daño por fatiga</i>	31

3.1.13.	<i>Daño acumulado por fatiga</i>	31
3.2.	FATIGA Y FASES DEL DAÑO.....	31
3.2.1.	Inicio del Agrietamiento.....	32
3.2.2.	Propagación.....	32
3.2.3.	Rotura.....	33
3.3.	RÉGIMEN DE FALLA POR FATIGA.....	33
3.3.1.	Fatiga de bajo ciclaje (LCF).....	33
3.3.2.	Fatiga de alto ciclaje (HCF).....	34
3.4.	CARACTERÍSTICAS DE LAS CURVAS S-N.....	35
3.5.	ALCANCES DE LAS NTC ACERO (2020).....	36
3.5.1.	Aspectos generales.....	36
3.5.2.	Limitaciones y recomendaciones de aplicación.....	37
3.5.3.	Diseño por Fatiga.....	38
CAPÍTULO IV. DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN.....		43
4.1.	ACOTACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN.....	43
4.2.	CASO PRÁCTICO DE ESTUDIO.....	43
4.2.1.	Proyecto arquitectónico.....	43
4.2.2.	Proyecto estructural.....	44
4.3.	MODELACIÓN DE LA FUNCIÓN DINÁMICA.....	47
4.4.	MODELO ESTRUCTURAL EN ETABS.....	52
4.4.1.	Elección del software.....	52
4.4.2.	Secciones empleadas y estructuración.....	53
4.4.3.	Función dinámica Time-History.....	56
4.5.	OBTENCIÓN DE LA HISTORIA DE ESFUERZOS.....	61
4.5.1.	Historia de momentos en conexión viga-columna.....	62
4.5.2.	Historia de esfuerzos patín superior - placa de momento.....	65
4.6.	ALGORITMOS UTILIZADOS PARA EL CONTEO DE CICLOS.....	68
4.6.1.	Aspectos generales.....	68
4.6.2.	Métodos de doble parámetro.....	70
4.6.2.1.	Range-Pair Counting.....	71
4.6.2.2.	Rainflow Cycle Counting.....	73
4.6.3.	Métodos de un parámetro.....	75
4.6.3.1.	Level-Crossing Counting.....	75

4.6.3.2.	Peak-Counting.....	78
4.6.3.3.	Simple-Range Counting	80
4.6.4.	Programación de algoritmos para conteo de ciclos.....	82
4.7.	APROXIMACIONES USADAS PARA ESTIMAR DAÑO ACUMULADO	86
4.7.1.	Consideraciones preliminares.....	86
4.7.2.	Daño acumulado linealmente. Regla de Palmgreen-Miner	87
4.7.3.	Daño acumulado no lineal. Manson-Halford.....	90
4.7.4.	Programación de herramientas para cálculo de daño por fatiga..	92
4.7.5.	Consideraciones para la aproximación de daño por fatiga	93
CAPÍTULO V. RESULTADOS.....		97
5.1.	RESUMEN DE RESULTADOS.....	97
5.1.1.	Resumen de resultados algoritmos para conteo de ciclos.....	98
5.1.1.1.	Range Pair Counting.....	99
5.1.1.2.	Rainflow Cycle Counting	100
5.1.1.3.	Peak Counting.....	101
5.1.1.4.	Simple Range Counting.....	102
5.1.2.	Resumen de resultados estimación de daño acumulado.....	103
5.2.	CORRIDAS COMPLETAS DE ALGORITMOS PARA CUANTIFICACIÓN DE CICLOS Y DAÑO ACUMULADO.....	104
5.2.1.	Range Pair Counting.....	104
5.2.2.	Rainflow Cycle Counting	127
5.2.3.	Peak Counting.....	141
5.2.4.	Simple Range Counting.....	155
CAPÍTULO VI. DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....		178
6.1.	COMBINACIONES DE DAÑO ACUMULADO LINEALMENTE.....	178
6.2.	COMBINACIONES DE DAÑO ACUMULADO NO LINEAL.....	180
CAPÍTULO VII. CONCLUSIONES.....		183
7.1.	CONCLUSION GENERAL Y METODOLOGÍA RECOMENDADA	183
7.2.	CONCLUSIONES PARTICULARES.....	184
7.3.	NICHOS DE INVESTIGACIÓN	185
FUENTES DE REFERENCIA		187

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Parámetros propuestos para proyectos estructurales (Ecuación 1). 50

Tabla 2. Criterios considerados para la estimación de historias de esfuerzos en 1 año.....95

Tabla 3. Tabla de frecuencias para rangos de ciclos (Range-Pair Counting). 99

Tabla 4. Tabla de frecuencias para rangos de ciclos (Rainflow Cycle Counting).100

Tabla 5. Tabla de frecuencias para rangos de ciclos (Peak Counting). 101

Tabla 6. Tabla de frecuencias para rangos de ciclos (Simple Range Counting). .102

Tabla 7. Resumen daño acumulado por fatiga en 1 año para cada combinación de conteo de ciclos y aproximación de daño acumulado.. 103

Tabla 8. Conteo de ciclos para la historia de esfuerzos del detalle estructural estudiado por el método de Range-Pair Counting (Diagrama 1). Picos, valles y rangos en Ton-m. 105

Tabla 9. Reorganización de conteo de ciclos de mayor a menor magnitud de rango de momentos, para ciclos completos y medios ciclos. método de Range-Pair Counting. Rangos en Ton-m..... 115

Tabla 10. Resumen conteo de ciclos transformados a esfuerzos en Kg/cm². Range Pair Counting..... 116

Tabla 11. Daño acumulado por la Regla de Palmgreen-Miner, esfuerzos en Kg/cm² (>F_{TH}). Ciclos a partir del Range Pair Counting..... 118

Tabla 12. Daño acumulado no lineal por método de Manson-Halford, esfuerzos en Kg/cm² (>F_{TH}). Ciclos a partir del Range Pair Counting. 119

Tabla 13. Resumen daño acumulado no lineal por método de Manson-Halford, esfuerzos en Kg/cm² (>F_{TH}). Ciclos a partir del Range Pair Counting..... 125

Tabla 14. Resultados del conteo de ciclos para la historia de esfuerzos del detalle estructural a partir del Rainflow Cycle Counting corrido en Python (Diagrama 2). Rangos en Kg/cm²..... 127

Tabla 15. Daño acumulado por la Regla de Palmgreen-Miner, esfuerzos en Kg/cm² (>F_{TH}). Ciclos a partir del Rainflow Cycle Counting..... 130

Tabla 16. Daño acumulado no lineal por método de Manson-Halford, esfuerzos en Kg/cm² (>F_{TH}). Ciclos a partir del Rainflow Cycle Counting..... 132

Tabla 17. Resumen daño acumulado no lineal por método de Manson-Halford, esfuerzos en Kg/cm² (>F_{TH}). Ciclos a partir del Rainflow Cycle Counting..... 139

Tabla 18. Definición de picos y valles de la historia de momentos del detalle estructural revisado, como procedimiento inicial para el conteo de ciclos por Peak Counting (Diagrama 4). Picos y valles en Ton-m... 141

Tabla 19. Resultados del conteo de ciclos para la historia de esfuerzos del detalle estructural a partir del algoritmo Peak Counting (Diagrama 4). Rangos finales de esfuerzos en Kg/cm². 145

Tabla 20. Daño acumulado por la Regla de Palmgreen-Miner, esfuerzos en Kg/cm² (>F_{TH}). Ciclos a partir del Peak Counting. 148

Tabla 21. Resumen rangos daño acumulado no lineal por método de Manson-Halford, esfuerzos en Kg/cm². Ciclos a partir del Peak Counting..... 150

Tabla 22. Daño acumulado no lineal por método de Manson-Halford, esfuerzos en Kg/cm² (>F_{TH}). Ciclos a partir del Peak Counting. 153

Tabla 23. Identificación de cambios de pendiente en la historia de momentos del detalle estructural revisado, como procedimiento inicial para el conteo de ciclos por Simple Range Counting (Diagrama 5). Picos y valles en Ton-m 155

Tabla 24. Resultados del conteo de ciclos para la historia de esfuerzos del detalle estructural a partir del algoritmo Simple Range Counting (Diagrama 5). Rangos finales de esfuerzos en Kg/cm²..... 158

Tabla 25. Daño acumulado por la Regla de Palmgreen-Miner, esfuerzos en Kg/cm² (>F_{TH}). Ciclos a partir del Simple Range Counting. 164

Tabla 26. Daño acumulado no lineal por método de Manson-Halford, esfuerzos en Kg/cm² (>F_{TH}). Ciclos a partir del método Simple Range. 166

Tabla 27. Resumen daño acumulado no lineal por método de Manson-Halford, esfuerzos en Kg/cm² (>F_{TH}). Ciclos a partir del método Simple Range.....173

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2 - 1. Diferentes fases de la vida por fatiga y factores relevantes (Schijve, 2003). 24

Figura 2 - 2. Resultados de prueba por fatiga para un espécimen sin hendiduras para una aleación de acero. Regiones de fatiga de bajo ciclaje y fatiga de alto ciclaje (Schijve, 2003). 25

Figura 3 - 1. Fatiga de bajo ciclaje (LCF) y Fatiga de alto ciclaje (HCF) (Homan, 2018). 34

Figura 3 - 2. Curvas S-N para aleaciones férricas y titanio (con límite de resistencia a la fatiga F_{TH}) y para aleaciones no férricas (sin límite F_{TH}) (Modificada de ITEA, s.f.) 36

Figura 3 - 3. Ejemplo de curva S-N para la resistencia a Fatiga (NTC Acero, 2020). 39

Figura 3 - 4. Curvas S-N de resistencia para aplicación de la ecuación D.2.1 para las diferentes categorías de esfuerzos (NTC 2020). 40

Figura 4 - 1. Planta arquitectónica del caso práctico. 44

Figura 4 - 2. Modelo estructural investigado, tablero de losa compuesta de 12.0 m. x 20.0 m. (Unidades en m.) 45

Figura 4 - 3. Ubicación del modelo estructural en referencia a planta estructural de salón de eventos. 46

Figura 4 - 4. Instrumentación sobre plataforma experimental para 49
actividades de gimnasia aeróbica (Faisca, 2003)..... 49

Figura 4 - 5. Posibles configuraciones de aplicación de cargas dinámicas en área de salón. (a) Área de carga de 20.0 m. x 20.0 m. Incluye zonas fuera del tablero de estudio. (b) Área de carga de 12.0 m. x 20.0 m. Zona limitada a tablero de estudio. (c) Dos áreas de carga separadas de 8.0 m. x 20.0 m. Incluye zonas fuera del tablero de estudio. 51

Figura 4 - 6. Sistema de losa compuesta en caso de estudio con lámina acanalada cal. 24 y conectores de cortante ligados a la estructura metálica. 53

Figura 4 - 7. Viga VP-1, IR 18"x157.5 Kg/m. 54

Figura 4 - 8. Viga VP5, IR 18"x74.5 Kg/m. 55

Figura 4 - 9. Viga VS1, IR 12"x23.9 Kg/m. 55

Figura 4 - 10. Columna C1. 55

Figura 4 - 11. Estructuración caso de estudio; nomenclatura por elemento. 56

Figura 4 - 12. Función dinámica de Faisca evaluada durante 10 segundos para actividad del tipo aeróbics. 57

Figura 4 - 13. Definición de la función “Aeróbics Faisca” de tipo “Time History” en ETABS. En este caso la función dependiente del tiempo se define con una duración de 10 segundos. 58

Figura 4 - 14. Modelo de ETABS para caso práctico de estudio, necesario para la modelación de la función dinámica. 59

Figura 4 - 15. Configuración de carga evaluada con 137 personas en tablero inferior (zona de pista representadas por círculos rojos), sin cargas en tablero aldaño superior. 60

Figura 4 - 16. Creación del “load case” o estado de carga “Aeróbics 137 personas”. Definió la aplicación de la Función “Aeróbics Faisca” sobre los nodos de control que representan a las 137 personas en actividad simultánea. 61

Figura 4 - 17. La función dinámica “Aeróbics Faisca” aplicada sobre los 137 nodos de control en el modelo estructural de ETABS. 61

Figura 4 - 18. Detalle de conexión viga-columna elegido para la obtención de la historia de esfuerzos y análisis por fatiga. 62

Figura 4 - 19. Detalle 3.5 para diseño por fatiga, indica los puntos potenciales para inicio de la grieta. (a) En el patín, al pie de la soldadura en el extremo de la placa. (b) En el patín, en la terminación de las soldaduras longitudinales. (c) En el borde del patín con placas anchas. (NTC Acero, 2020). 63

Figura 4 - 20. Historia o bloque de momentos para la conexión viga VP1 a columna C1, evaluada durante 31.0 segundos en total. 64

Figura 4 - 21. Modificación del eje neutro para una sección compuesta. El cálculo del esfuerzo dependerá de la distancia del punto de interés en la sección, a la ubicación del eje neutro. 66

Figura 4 - 22. Historia de esfuerzos de amplitud variable para el detalle de conexión estudiado (interfaz patín superior de viga-placa de momento), con una duración de 31.0 segundos. 68

Figura 4 - 23. Simplificación de la historia de esfuerzos o espectro de tensiones (NTC Acero, 2020). 69

Figura 4 - 24. Fragmento de código en Python para conteo de ciclos por el método “Rainflow Cycle Counting”. 83

Figura 4 - 25. Fragmento de datos de salida para el conteo de ciclos obtenido por Rainflow Cycle Counting, a partir de código de Python. 84

Figura 4 - 26. Fragmento de programación en Excel para conteo de ciclos (Método Range Pair). Los pasos y resultados del algoritmo pueden visualizarse paso a paso y pueden aplicarse a extensos registros de historia de esfuerzos. 85

Figura 4 - 27. Regla de Palmgreen-Miner para daño acumulado linealmente.(Eljufout et al., 2019). 88

Figura 4 - 28. Tabla D.2.2 Parámetros de diseño por fatiga para distintos detalles estructurales y categorías de esfuerzos (NTC,2020.)..... 90

Figura 4 - 29. Curva de Acumulación de Daño. Método no lineal de Manson-Halford. (tomada de Luna, 2017.)..... 91

Figura 4 - 30. Fragmento de programación en Excel para estimación de daño acumulado no lineal por Manson-Halford (datos de Peak Counting). Los pasos y resultados del algoritmo pueden visualizarse paso a paso y pueden aplicarse a extensos registros de rangos de esfuerzos derivados de otros métodos para conteo de ciclos. 93



ACRÓNIMOS

NTC	Normas Técnicas Complementarias
ASTM	American Society for Testing and Materials
ANSI	American National Standards Institute
AISC	American Institute of Steel Construction



RESUMEN

La evaluación de fallas por fatiga en estructuras sujetas a tensiones cíclicas de amplitud variable (VAL) suele ser subestimada en el diseño de sus elementos y conexiones. La normativa mexicana relativa a estructuras de tipo edificación propensas a la fatiga, presenta un enfoque general y limitado para evaluar el fenómeno, por lo que se estudia y propone una metodología para la evaluación por fatiga en elementos de una estructura de tipo edificación, orientada a la elección óptima del algoritmo de reducción y conteo de ciclos y a la estimación del daño acumulado.

Se modeló un caso práctico de estudio en el software ETABS, sometiendo el modelo a cargas rítmicas simultáneas de tipo aerobics, obteniendo un bloque representativo de la historia de esfuerzos en el detalle de conexión investigado. Se aplicaron dos métodos de aproximación de parámetro simple y dos de doble parámetro para la simplificación de bloques de esfuerzos de amplitud variable y conteo de ciclos. Asimismo, se aplicó un método de aproximación lineal y uno de aproximación no lineal para la cuantificación del daño acumulado.

Se encontró que el uso de las aproximaciones de parámetro simple para el conteo de ciclos es en términos prácticos igual o más adecuado con respecto a los métodos de doble parámetro para aplicaciones de ingeniería estructural similares a la aquí investigada, tomando en cuenta factores como la incertidumbre numérica, la complejidad de cada método y el tiempo invertido para su aplicación.

La estimación de daño acumulado linealmente con la regla de Miner, continúa siendo la más recomendable para aplicaciones de ingeniería, mientras que las estimaciones de daño acumulado no lineal como Manson and Halford, no pueden recomendarse por sus resultados que pueden ir de muy conservadores a estimaciones fuera de rangos adecuados de confiabilidad.

Palabras clave: fatiga, daño por fatiga, daño acumulado, losas compuestas, conteo de ciclos, estructuras.

ABSTRACT

Fatigue assessment in structures subjected to cyclic tension variable amplitude loading (VAL) is generally underestimated while designing their elements and connections. Mexican codes and specifications regarding building structures which are prone to fatigue failure, present a general and limited approach to evaluate the phenomenon, this is why a methodology for fatigue assessment aimed at building structures has been investigated and proposed, focused on the optimal choice of the cycle counting method and the cumulative damage approach.

A case study was developed in ETABS, subjecting it to simultaneous human rhythmic aerobics action, and obtaining a representative block of the stress history for the investigated connection detail. Two single parameter and two double parameter methods for stress history block simplification and cycle counting were used, along with one linear and one non-linear cumulative damage estimates.

It was found that using the single parameter approaches for cycle counting turned out to be in practical terms equal or even better methods than the other two parameter options, concerning to structural engineering applications similar to the study case shown in this work, all of this taking into account factors such as numerical uncertainty, the complexity of each method and the time taken to finalize its application.

Linear fatigue cumulative damage using Miner's rule continues to be the most recommendable approach for engineering applications, while non-linear cumulative damage estimates such as Manson and Halford method, cannot be suggested at this point of knowledge due to its very conservative or underestimated results leading to data out of an appropriate reliability level.

Key words: fatigue, fatigue damage, cumulative damage, composite slabs, cycle counting, structures.



CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

1.1. PRÓLOGO

El estudio y evaluación de la Fatiga en los materiales y en las estructuras, se convirtió en un tema de interés a raíz de los grandes avances derivados de la revolución industrial a mediados del siglo XIX, asociándose frecuentemente con motores de vapor, locomotoras y bombas (Schijve, 2003). August Wöhler, en la década de 1860, desarrolló una máquina de ensayo denominada "probeta giratoria" a partir de la cual concluyó dos puntos de crucial importancia para sentar las bases teóricas del fenómeno como lo entendemos hoy en día. La primera, que las fuerzas necesarias para provocar una rotura en el material con cargas dinámicas eran mucho menores a las necesarias para una falla estática, y la segunda, que existe un umbral de carga por debajo del cual las probetas no se rompían en el ensayo (Timetoast timelines, 2021).

Los esfuerzos enfocados a la investigación de la fatiga en las últimas décadas son remarcables, de tal manera que ha sido posible entender de manera práctica diversos problemas de la ingeniería y con ello, cubrir las necesidades que el desarrollo industrial ha requerido. Sin embargo, si hay algo claro en el estado del arte en lo que a la fatiga concierne, es el hecho de que aún falta mucho por resolver, el problema aún se presenta en estructuras y máquinas, teniendo invariablemente elementos probabilísticos y de incertidumbre en la naturaleza del fenómeno que lo hacen complejo e inexacto.

Según el Eurocódigo, la fatiga se define como el proceso de aparición y propagación de fisuras en un elemento estructural, debidas a la acción de esfuerzos de tensión derivados de un número elevado de ciclos de aplicación de carga (EN 1993-1-9, 2005). Debido a su naturaleza, en ingeniería civil el problema y los esfuerzos en investigación son mayormente centrados en estructuras tales como puentes, plataformas marinas, grúas viajeras, etc., dejando en un nivel de importancia mucho menor a estructuras de tipo edificación en las cuales es más baja la probabilidad de ocurrencia de una falla por fatiga, sin embargo, esta

probabilidad se encuentra lejos de ser nula, como ha quedado demostrado en numerosos casos de falla documentados (Alacero, 2018).

Los elementos de estructuras de tipo edificación sujetos a actividades de tipo rítmicas o cuya naturaleza produce cargas cíclicas de magnitud constante o variable, como lo son el uso de losas de entrepiso como salones de baile, gimnasios, talleres y antros, entre otros, son propensos a la ocurrencia de una falla por fatiga (Faisca, 2003), la cual, dependiendo de la magnitud del esfuerzo de tensión en el detalle estudiado, puede desencadenar la aparición de la fisura inicial en algún punto de concentración de esfuerzos, debilitar el material y propagar el defecto hasta la ocurrencia de una eventual fractura total del elemento por fatiga.

El presente trabajo de investigación concentra su interés en estudiar y proponer una metodología para la evaluación del análisis por fatiga en elementos críticos de una estructura de tipo edificación a partir de la información disponible derivada de uno o varios bloques representativos de la historia de esfuerzos para elementos específicos de la estructura.

Los datos a analizar, serán tomados a partir del análisis dinámico en software especializado ETABS (CSI, 2020), modelando la acción de algunos patrones de cargas rítmicas cíclicas sobre una estructura tipo edificación, la cual corresponde a un caso práctico de tablero de losa compuesta (sistema losacero) de características y dimensiones definidas a partir de un proyecto de potencial construcción en la ciudad de Aguascalientes, Ags.

El alcance de la investigación, se enfoca en el estudio de la fatiga en las conexiones (soldaduras IPR-placas de momento) del caso práctico mencionado, y busca como objetivo principal encontrar la mejor opción dentro de las alternativas estudiadas, bajo los criterios de practicidad y certeza ingenieril para la simplificación y tratamiento de la historia de esfuerzos (cuantificación de ciclos de tensión) y para la aproximación del daño acumulado en el elemento estudiado (años esperados a la falla).

Asimismo, se relacionarán los datos obtenidos con la información disponible en la normativa aplicable (NTC) para emplear las curvas S-N propuestas y complementar la propuesta metodológica mediante el cálculo del daño acumulado por fatiga de los elementos estudiados, y con ello poder estimar la vida útil hasta presentarse

la falla para cada combinación de algoritmos para conteo y simplificación de ciclos y de estimación del daño.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. Objetivo General

Revisar y aplicar a un caso práctico de estudio particular basado en una estructura tipo edificación algunos métodos estandarizados disponibles y aceptados en la práctica de la ingeniería mecánica y de materiales, pero de poco o nulo conocimiento y aplicación en la ingeniería civil y estructural para la simplificación y conteo de ciclos de esfuerzos de amplitud variable, derivados de la acción de cargas debidas al efecto de actividades humanas de tipo rítmicas, y efectuar posteriormente la estimación del daño sobre la estructura mediante la aplicación de teorías de acumulación de daño lineal y no lineal, analizando las dificultades y beneficios que cada combinación metodológica aplicada representa para poder estimar finalmente la vida útil por fatiga del elemento o detalle analizado, eligiendo la combinación metodológica más adecuada para su aplicación en estructuras similares.

1.2.2. Objetivos particulares

- A. Realizar la modelación en software especializado de la estructura contemplada en el caso práctico de estudio y de las cargas dinámicas derivadas de las acciones humanas de tipo rítmicas cuyos efectos a priori podrían provocar una eventual falla por fatiga en alguno de los detalles estructurales o elementos de la estructura.
- B. Obtener la historia de esfuerzos en el detalle o elemento estudiado de la estructura para un periodo de tiempo tal que pueda considerarse como representativo a lo largo de la vida útil durante la cual estará sujeta a las acciones dinámicas derivados de la modelación de las actividades humanas de tipo rítmicas.

- C. Aplicar opciones disponibles para el análisis, simplificación y conteo de ciclos de la historia de esfuerzos y la posterior creación del espectro de esfuerzos de las zonas o detalles que se pretendan revisar a partir del modelo estructural.
- D. Aprovechar la información disponible en las NTC Acero (2020), con el fin de emplear las curvas S-N disponibles para el cálculo de la vida esperada por fatiga de los detalles en ella descritos para cargas de amplitud variable y poder con esta información emplear estimaciones de daño acumulado.
- E. Aplicar al menos una aproximación de daño acumulado linealmente y al menos una alternativa de estimación de acumulación de daño no lineal al detalle o elemento estudiado, a partir de su historia de esfuerzos representativa durante su vida útil.
- F. Aplicar todas las combinaciones metodológicas posibles que se desprenden de la estimación de daño acumulado (lineal o no lineal) partiendo de cada algoritmo empleado para el conteo de ciclos, para comparar y discutir los resultados de cada opción.
- G. Elaborar herramientas en base a programación computacional con ayuda de lenguajes como Python y software para el procesamiento de datos como Excel, para la aplicación de los algoritmos de simplificación y conteo de ciclos derivados de una historia de esfuerzos, así como de las aproximaciones de cuantificación de daño y daño acumulado con la capacidad de aplicación a cualquier historia de esfuerzos independientemente del número de datos de manera automatizada.
- H. Según el análisis comparativo, recomendar la mejor combinación metodológica definida por un algoritmo para el conteo de ciclos y una estimación de daño acumulado a emplear para el caso práctico de estudio propuesto, para la evaluación de la fatiga como estado límite de servicio.
- I. Discutir la posible aplicación de la metodología propuesta en casos similares al estudiado en esta investigación, sirviendo como punto de partida para otros casos particulares.

1.3. JUSTIFICACIÓN

Los efectos sobre edificaciones sujetas a actividades de tipo rítmicas o cuya naturaleza puede producir tensiones cíclicas de amplitud variable, y por ende quedar sujetas a una eventual falla por fatiga, pueden llegar a ser subestimados, sobre todo cuando se comparan con estructuras con procedimientos más definidos y mucho más estudiados (puentes, grúas viajeras, etc.)

En este sentido, los códigos aplicables en México, relativos a la revisión del estado límite de servicio por fatiga en estructuras de tipo edificación, si bien presentan un enfoque teórico general para abordar el fenómeno, adolecen de una metodología clara y concisa que permita seguir una línea general de procedimiento de análisis y diseño para cada uno de los pasos que el procedimiento teórico de evaluación requiere, dejando al criterio y responsabilidad del ingeniero la definición inicial del tratamiento y procesamiento de la información derivada de una historia de esfuerzos y los pasos necesarios hasta poder obtener un daño acumulado por fatiga.

Lo anterior repercute, en que el estudiante de ingeniería civil o el ingeniero estructural profesionalista que desea instruirse para poder revisar una estructura de tipo edificación ante fatiga si lo requiere en sus actividades académicas, profesionales, o simplemente quiere conocer un camino lógico, práctico y razonado para evaluar cada uno de los pasos necesarios y poder aplicar las ecuaciones propuestas en las normativas mexicanas, se verá limitado y posiblemente perjudicado al llevar a cabo bajo su propio criterio procedimientos que podrían no resultar prácticos o bien, presentar resultados con dudosa certeza.

1.4. HIPÓTESIS

Es viable proponer una combinación metodológica abordando el análisis por fatiga para estructuras similares al caso práctico de estudio propuesto en esta investigación, enfocada en la elección óptima de los algoritmos o aproximaciones empleados para la simplificación y conteo de ciclos derivados de la historia de esfuerzos de amplitud variable y la posterior estimación del daño acumulado por

fatiga, contemplando la elección de la combinación metodológica que presente la mejor relación costo-beneficio para el ingeniero estructural en relación a la practicidad y complejidad de los procedimientos estudiados, el tiempo empleado para su análisis y el grado de certeza numérica en sus resultados.

1.5. METODOLOGÍA

Se realizará un análisis en el software especializado ETABS (CSI, 2020), modelando la acción dinámica de actividades humanas del tipo aeróbicas actuando sobre un caso práctico de estructura tipo edificación, particularmente sobre un tablero crítico de losa compuesta (sistema losacero) de características y dimensiones definidas a partir de un proyecto de potencial construcción en la ciudad de Aguascalientes, México.

A partir del análisis dinámico efectuado en el modelo, se obtendrán los datos de las historias de esfuerzos actuando en puntos de importancia crítica por fatiga en la estructura. En este trabajo se particularizará la revisión por fatiga a un punto en específico del caso práctico de estudio, correspondiente a la conexión de momento de las vigas principales del tablero con las columnas de acero que forman los marcos principales de la estructura, específicamente se revisaron las soldaduras entre la placa de momento superior con el patín de la viga en el punto crítico de interés. Se pretende poder extender la revisión a otros puntos de interés a partir de las herramientas desarrolladas en procesos posteriores de la metodología, como lo es el metal base en el patín inferior de las vigas principales en los centros de los claros de los tableros principales.

Posteriormente, se desarrollarán hojas de cálculo para el procesamiento de la información inicial, donde se tabularán y graficarán los distintos bloques de historia de esfuerzo estudiados, a fin de organizar y clarificar la información disponible para su posterior tratamiento metodológico.

Como segunda parte del proceso de la investigación, se procederá al estudio y análisis de diversos algoritmos disponibles para el conteo y simplificación de ciclos, dentro de los cuales se tomarán en cuenta opciones dentro de las aproximaciones de parámetro simple, así como aproximaciones de doble parámetro,

seleccionando aquellos cuyas características y limitaciones de aplicación se ajusten al tipo de datos que analizaremos, es decir a configuraciones y arreglos típicos para ciclos de amplitud variable. Se tomarán en cuenta las recomendaciones de aplicación descritas en el ASTM E1049-85, que aborda las prácticas estandarizadas para el conteo de ciclos en análisis por fatiga (E08 Committee, 2017) como apoyo para la elección de los métodos a elegir, según las limitantes de tiempo y recursos para la ejecución de la investigación.

Una vez seleccionados los métodos a aplicar, se desarrollará la programación de los algoritmos correspondientes a cada método seleccionado aplicando herramientas como Python y Microsoft Excel, de manera que podamos analizar sistemáticamente numerosas series de bloques de historia de esfuerzos, simplificando, cuantificando y tabulando los resultados derivados de cada procedimiento para el conteo de ciclos de amplitud variable mediante la generación del espectro de esfuerzos correspondiente para el bloque estudiado. En este sentido se buscará generar herramientas de programación que sean de fácil uso y acceso para cualquier usuario, desarrollando una interfaz y procesamiento de los datos sencilla y con resultados numéricos y gráficos de fácil interpretación.

De manera similar y buscando también como resultado final la generación de hojas de cálculo a partir del uso de Python y Excel, en conjunto con lo descrito en los párrafos anteriores, nos concentraremos en la evaluación de algunas aproximaciones disponibles para la estimación del daño acumulado por fatiga. En este respecto, el objetivo será el de cubrir al menos un método de aproximación de daño acumulado linealmente, y un método de aproximación de daño acumulado no linealmente.

Disponibles las herramientas descritas para el análisis y cuantificación de los ciclos correspondientes al bloque de esfuerzos, así como aquellas destinadas a la estimación del daño acumulado según cada espectro de esfuerzos contemplado, se analizarán los datos correspondientes al caso práctico objetivo de estudio en esta investigación, efectuando un análisis comparativo para los resultados de las propuestas tomadas en cuenta tanto para el conteo y síntesis de ciclos como para la estimación del daño.

En este punto, se pretende discutir y analizar el costo-beneficio de factores tales como las limitaciones metodológicas, información previa necesaria de entrada para aplicar la aproximación estudiada, dificultad de aplicación del algoritmo en cada método, el tiempo necesario invertido para el desarrollo de la programación correspondiente y obtención de los cálculos finales, el grado de certeza o error esperado en cada caso, etc.

Posteriormente, estudiando a detalle todos los puntos comparativos antes mencionados, se procederá a seleccionar a criterio de la presente investigación, el algoritmo para el conteo de ciclos y simplificación del espectro de esfuerzos, así como la aproximación para cálculo de daño y daño acumulado que resulten tener el mejor balance costo-beneficio según los criterios señalados en el párrafo anterior, pasando a ser parte fundamental de la propuesta metodológica para la evaluación por fatiga en un caso práctico de losa compuesta que esta tesis propondrá.

Paralelamente, otro aspecto importante de la investigación es conseguir la integración de los resultados obtenidos hasta esta parte de la investigación, con la información disponible en la normativa mexicana aplicable para la evaluación de estructuras por fatiga. Este proceso consistirá en relacionar los datos obtenidos del espectro de esfuerzos resumido, derivado del cálculo y simplificación de los ciclos en la historia de esfuerzos, con la información disponible dentro de las curvas S-N para evaluación de las categorías de detalles sujetos a fatiga que propone la normativa.

Recomendaciones generales para la aplicación de la metodología propuesta son brindadas al final del documento, de manera que podrá esbozarse un panorama general para la aplicación de la metodología para casos similares al aquí revisado o bien, como medio de base o guía de partida para otros casos particulares.

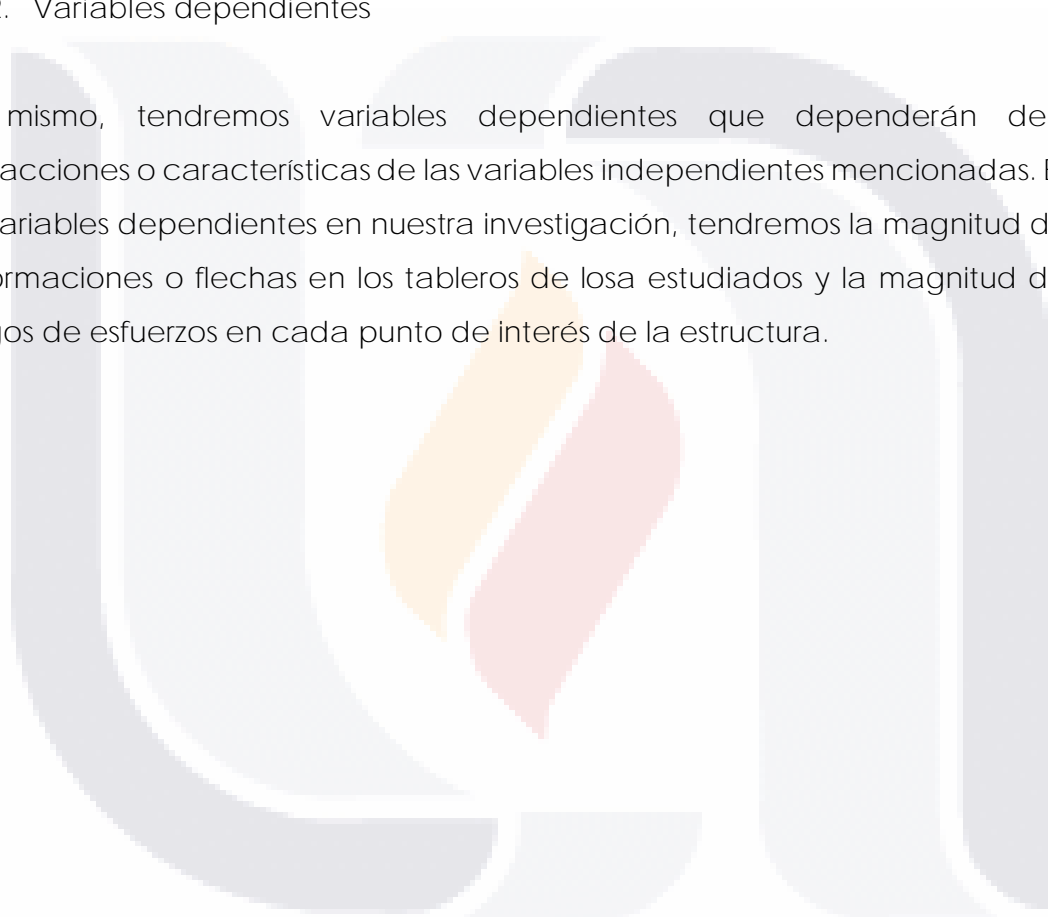
1.6. TIPOS DE VARIABLES

1.6.1. Variables independientes

Las variables independientes que tendremos en el desarrollo del trabajo de investigación serán: los tableros de losa compuesta, las dimensiones de los claros para cada tablero de losa estudiado, los perfiles usados y la configuración y el tipo de carga modelada actuando sobre la estructura.

1.6.2. Variables dependientes

Así mismo, tendremos variables dependientes que dependerán de las interacciones o características de las variables independientes mencionadas. Entre las variables dependientes en nuestra investigación, tendremos la magnitud de las deformaciones o flechas en los tableros de losa estudiados y la magnitud de los rangos de esfuerzos en cada punto de interés de la estructura.





CAPÍTULO II

ESTADO ACTUAL DEL CONOCIMIENTO

CAPÍTULO II. ESTADO ACTUAL DEL CONOCIMIENTO

2.1. FATIGA EN LA PRIMERA MITAD DEL SIGLO XX

A principios del siglo XX, Ewing y Humfrey (1903) llevaron a cabo una investigación de gran importancia, encontrando a partir de estudios microscópicos que la aparición del núcleo inicial del agrietamiento por fatiga comienza con microfracturas en bandas de deslizamiento.

Más adelante, a mediados del siglo XX, se llevaron a cabo grandes contribuciones al estudio del fenómeno lideradas por Peterson (1950) quien retomó y amplió las observaciones de varios autores desde el punto de vista de la fatiga como un fenómeno de los materiales y la idea de la aparición de las grietas iniciales en forma de bandas de deslizamiento, refiriéndose también al concepto de límite o umbral de fatiga, de gran importancia como propiedad del material para numerosas predicciones por fatiga en ingeniería. De manera similar Timoshenko (1954) consideró diversos estudios experimentales sobre distribuciones de esfuerzos y concentraciones alrededor de muescas

Es de suma importancia comprender que el entendimiento de estos conceptos, previos a la segunda mitad del siglo XX, sentó las bases para poder llevar a cabo avances substanciales a partir de la década de 1950, a partir de la cual gracias al desarrollo tecnológico y la posibilidad de llevar a cabo análisis numéricos computacionales de esfuerzos, así como el desarrollo de importantes instalaciones experimentales, y la ocurrencia de eventos particulares que se han estudiado e investigado ampliamente, se ha logrado llegar al estado del conocimiento actual que se ha adquirido alrededor del tema de la fatiga en los materiales y en las estructuras.

La predicción del comportamiento de una estructura sometida a la fatiga es resultado de una serie de pasos y procedimientos adoptados, muchos de los cuales se realizan bajo suposiciones que, aunque cuentan con una fuerte base teórica, implica que la exactitud de los resultados finales puede ser limitada, aún más si se toman en cuenta variables estadísticas. Por tanto, la confiabilidad de la predicción

aproximada independientemente del procedimiento adoptado debe siempre ser acotada y evaluada, para lo cual se requiere de buen juicio y entendimiento del problema físico estudiado, experiencia, intuición y un muy buen criterio ingenieril (Schijve, 2003).

Igualmente, diversos autores enfatizan el hecho de que un diseñador no puede simplemente confiar ciegamente en la validez de las ecuaciones propuestas, ya que más allá de la ecuación existen modelos y ensayos físicos de los que se derivan las expresiones, por lo que la pregunta debería ser si el modelo revisado o tomado en cuenta es físicamente relevante o similar al del problema considerado.

A finales de la década de los 1950's varios investigadores mencionaron la observación de microfracturas en un tiempo temprano de la vida por fatiga a partir de los elementos estudiados bajo microscopios de escaneo de electrones (SEM), desde entonces es claro que la vida por fatiga de un elemento sometido a cargas cíclicas se divide en dos fases, la vida hasta la iniciación de la fractura seguida del periodo de crecimiento de la fractura (Figura 2-1).

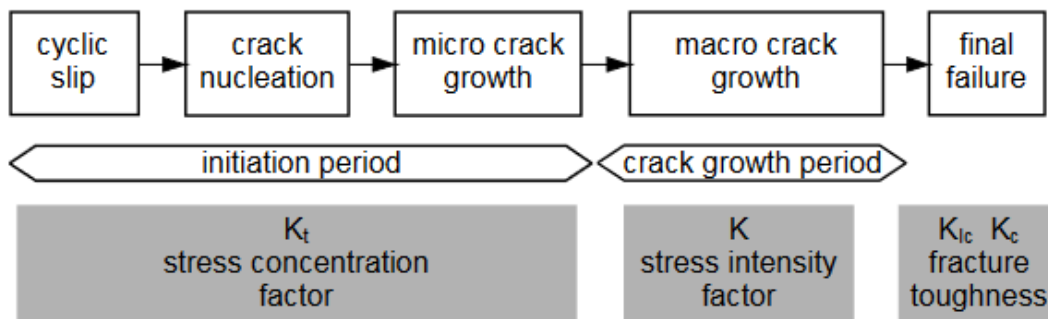


Figura 2 - 1. Diferentes fases de la vida por fatiga y factores relevantes (Schijve, 2003).

2.2. DESARROLLO DE CURVAS S-N

Las curvas S-N, han sido desarrolladas gracias a numerosas pruebas de fatiga considerando especímenes con y sin hendiduras o entalladuras a partir de la década de 1940, desarrollándose los ensayos correspondientes en función de esfuerzos medios constantes y una amplitud constante de esfuerzos. La disponibilidad de esta información es de gran importancia ya que relaciona la vida

por fatiga dado un nivel de amplitud de esfuerzo constante y el número de ciclos esperados para la falla, así como el límite de fatiga o umbral de fatiga, definido después de observar que, para amplitudes bajas de esfuerzo, la falla por fatiga nunca ocurrió después de un alto número de ciclos de carga aplicados.

La asíntota horizontal de las curvas S-N fue llamada límite de fatiga o límite de resistencia por fatiga. En el límite superior de las curvas S-N, aparece lo que asemeja otra asíntota, esta zona en la gráfica es de gran importancia para estructuras que fallan por fatiga sujetas a espectros de relativamente pocos ciclos de esfuerzos severos. Hoy en día se encuentran estas curvas en la literatura disponible, así como en software de uso comercial (figura 2-2).

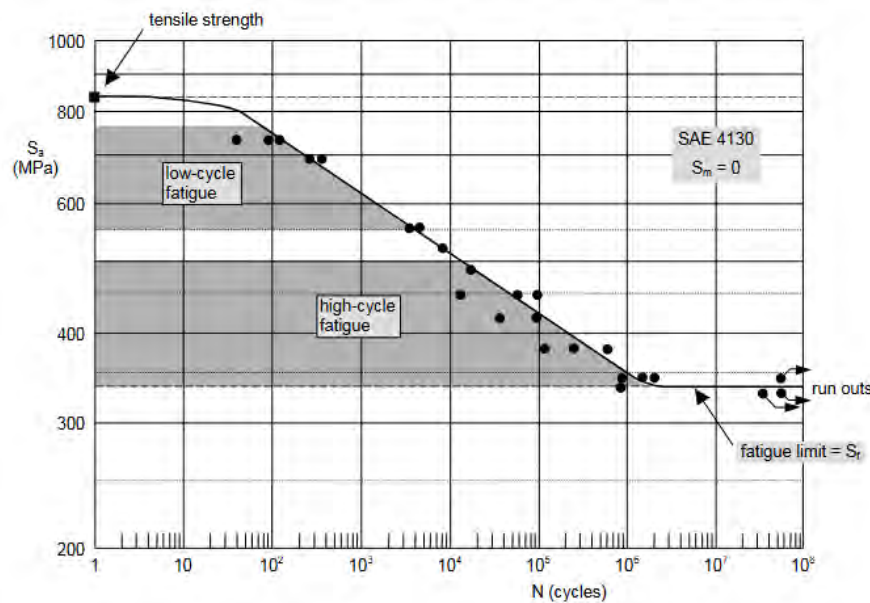


Figura 2 - 2. Resultados de prueba por fatiga para un espécimen sin hendiduras para una aleación de acero. Regiones de fatiga de bajo ciclaje y fatiga de alto ciclaje (Schijve, 2003).

2.3. FATIGA E INGENIERÍA

La necesidad de predecir el daño por fatiga en problemas de ingeniería fue abordada en el texto de Heywood (1962) "Designing against fatigue", quien desarrolló varios modelos analíticos para la predicción de daños debidos al tamaño y forma de los defectos en superficies planas, buscando derivar las propiedades y características de la fatiga en los elementos con defectos a partir de aquellas

obtenidas de los mismos elementos sin defectos. Una meta específica era poder predecir también el límite de fatiga, una propiedad de la fatiga de suma importancia para muchos productos de la industria.

Poco después, a finales de la década de los 1960, surgió otro problema de comprensión y tratamiento de la fatiga, relacionado con espectros de cargas que incluían ciclos de distintas magnitudes de carga, es decir fatiga debido a cargas de amplitud variable (VAL). El interés en este tipo de fatiga surgió a raíz de la preocupación e incertidumbre derivada del uso de puentes vehiculares con cierta antigüedad, los cuales, cada vez eran sujetos a condiciones de carga más severas y continuas, preguntándose los ingenieros si era posible predecir una posible falla por fatiga, cuánto tiempo de vida podían soportar dichas estructuras o bien, si se deberían reemplazar definitivamente. Problemas similares surgieron con el uso de aeronaves antiguas después de observar varias fallas serias en algunas de sus partes.

En las últimas décadas, derivado de la continua investigación se sabe que las variables que pueden afectar la resistencia por fatiga e intervenir en la vida por fatiga de una estructura son numerosas. Sin embargo, se acepta que diseñar estructuras contra fatiga con el conocimiento actual es posible. Los esfuerzos en poder diseñar estas estructuras se enfocan en poder estimar el límite de fatiga, predecir la vida por fatiga debido a cargas constantes, (CA loading), predecir la vida por fatiga debida a cargas de amplitud variable (VA loading) y predecir la resistencia a la fatiga de las conexiones o uniones entre los elementos de una máquina o estructura (Schijve, 2003).

Para estimar el límite por fatiga, diversas ecuaciones empíricas se han propuesto, derivando a razonables estimaciones para este parámetro, tomando en cuenta un factor de seguridad derivado de la incertidumbre existente debida a la falta de certeza en las magnitudes de la carga cíclica. Para predecir la vida por fatiga debida a cargas de amplitud constante, se realizan aproximaciones protegidas también mediante factores de seguridad, aceptando, que la ocurrencia de fisuras por fatiga es aceptable, ya que sería económicamente inviable diseñar estructuras de vida infinita.

2.4. ENFOQUES RECIENTES

Existen actualmente varias ideas y enfoques a partir de los cuales se llevan a cabo las investigaciones más recientes en términos del daño por fatiga y daño acumulado, como la esperanza de encontrar vía la naturaleza no lineal del fenómeno mejores aproximaciones que contemplen cada vez más parámetros que lleven a resultados más realistas, sin embargo, la complejidad del fenómeno persiste y sobrepasa las capacidades actuales del estado del conocimiento. Pruebas de fatiga a modelos reales de los detalles revisados parecen brindar esperanza buscando mayor certeza y apegar los datos a la realidad de los casos prácticos estudiados, pero de alguna u otra manera se continúan empleando curvas S-N o información disponible que a priori se conoce es inexacta (Schijve, 2003).

Finalmente, es importante aclarar, que para llegar a una predicción de la vida por fatiga y del crecimiento de las fisuras sometidas a cargas de amplitud variable (VA loading) completamente racional, la mayoría de los autores concluyen que, con el conocimiento actual una aproximación acertada no será posible en el futuro cercano. Las predicciones actuales mayormente aceptadas, en sí mismas se contraponen teóricamente al entendimiento actual del daño acumulado por fatiga, ya que dependen en gran medida de información derivada de las curvas S-N, las cuales, no siempre están disponibles para los casos particulares de estudio. Sin embargo, poder contar con modelos de predicciones, aun siendo relativamente burdos, supone una gran herramienta para enfrentar la mayoría de los problemas que la ingeniería se enfrenta en el complejo mundo moderno en que vivimos hoy, por lo que cualquier avance, propuesta, o investigación en el campo, supone un paso hacia adelante en la búsqueda de la depuración y exactitud en los métodos y conocimiento disponible que tenemos en la actualidad.



CAPÍTULO III

MARCO TEÓRICO

CAPÍTULO III. MARCO TEÓRICO

3.1. CONCEPTOS BÁSICOS PARA FATIGA EN ESTRUCTURAS

3.1.1. Vida útil de diseño

Refiere al periodo de tiempo de referencia, que depende del tipo y uso de la estructura para la cual sus detalles constructivos particulares (conexiones, elementos y discontinuidades) requieren desempeñarse de manera segura con un nivel de confiabilidad aceptable referente a la no ocurrencia de una falla debida a un agrietamiento por fatiga.

3.1.2. Tolerancia de daño

Capacidad de la estructura para admitir un daño por fatiga, bajo un aceptable grado de confiabilidad que no implique la falla estructural o una condición que imposibilite el servicio de esta.

3.1.3. Esfuerzo nominal

Magnitud del esfuerzo elástico ubicado en la zona adyacente a la ubicación potencial del inicio de la grieta en un detalle estructural particular a revisar, como aquellos definidos en las tablas D.2. de las NTC Acero (2020).

3.1.4. Evento de carga (ciclo de carga)

Periodo de tiempo con una variación definida en magnitud y/o punto de aplicación de una acción que pueda causar un daño por fatiga sobre la estructura, la cual da lugar a una historia de esfuerzos. Generalmente se repite un número determinado de veces

3.1.5. Historia de cargas (Loading History)

Arreglo de los eventos de carga esperados en la estructura en orden con respecto a su ocurrencia en el tiempo durante la vida útil de diseño.

3.1.6. Historia de esfuerzos/tensión

Registro de la variación de esfuerzos calculada en una parte o zona particular de la estructura durante un evento de carga en un tiempo determinado.

3.1.7. Rango o Carrera de esfuerzo

Magnitud de la diferencia algebraica entre los extremos de un particular ciclo de esfuerzos (puntos máximo y mínimo) derivado de una historia de esfuerzos.

3.1.8. Espectro de esfuerzos

Evaluación de la historia de esfuerzos de una estructura, presentando los distintos niveles de magnitud de los rangos de esfuerzos y sus frecuencias relativas asociadas (número de ciclos de esfuerzos) en orden descendente despreciando los efectos de la secuencia de las cargas.

3.1.9. Límite de Fatiga (F_{TH})

También conocido como umbral admisible de intervalo de esfuerzos, es el límite superior de un rango de esfuerzos por debajo del cual el valor de la magnitud de un esfuerzo particular derivado de un evento de carga y que forma parte del espectro de esfuerzos, no contribuirá a un daño acumulado por fatiga sobre el detalle estructural.

3.1.10. Conteo de ciclos

Proceso de transformación de una historia de esfuerzos de amplitud variable a un espectro de esfuerzos de rangos y frecuencia definidos.

3.1.11. Resistencia a la fatiga

La resistencia de un componente se define como el rango de tensión tal que, actuando a una amplitud constante va a originar el agotamiento del componente tras un número especificado de ciclos de carga (N).

3.1.12. Daño por fatiga

La razón entre el número de ciclos n_i de una particular magnitud de rango de esfuerzos con respecto al número de ciclos N_i que el detalle estructural revisado requeriría para llegar a la falla por fatiga bajo la misma magnitud de rango de esfuerzos de amplitud constante.

3.1.13. Daño acumulado por fatiga

La suma algebraica de daños por fatiga derivados de una historia de rangos de esfuerzos actuando en el detalle estructural.

3.2. FATIGA Y FASES DEL DAÑO

La fatiga se define como el proceso de aparición y propagación de fisuras en un elemento estructural debidas a la acción de esfuerzos de tensión derivados de un número elevado de ciclos de aplicación de carga, aun cuando las magnitudes de esas cargas inducidas se encuentren considerablemente por debajo de la tensión de ruptura del material bajo cargas estáticas, incluso del límite elástico del material (EN 1993-1-9, 2005).

Una de las principales características que describe el fenómeno, es que después de la aplicación de una cantidad "n" de ciclos, los cuales pueden ser de amplitud

constante de la carga, o bien, de amplitud variable de la misma, la pieza, material o componente se ha debilitado a tal grado que se rompe de manera frágil, independientemente de la magnitud de la carga al momento de la falla. Relacionado a ello se ha observado que, en piezas metálicas sometidas a un valor de tensión por debajo de cierto valor referencial, no se va a producir una ruptura por fatiga en el material, independientemente del número de ciclos de carga al que se someta el material.

Esas condiciones y características que diferencian a la fatiga de otros tipos de falla la vuelven un tema sumamente complejo para la ingeniería civil, mecánica y de materiales, convirtiéndola en una de las principales causas de falla en piezas o elementos construidos con materiales férricos.

Gracias a diversas investigaciones se reconoce que la vida por fatiga de un material puede dividirse en un proceso de tres etapas principales: 1) Inicio de la grieta o fisuración; 2) propagación y ensanchamiento debido a esfuerzos de tensión; 3) fractura súbita de tipo frágil del material (Eljufout et al., 2019).

3.2.1. Inicio del Agrietamiento

Se refiere a la primera fase representativa del inicio del daño por fatiga en un material, caracterizada por la aparición de una o varias grietas simultáneas de características similares. Si bien, estas grietas podrían aparecer en cualquier punto del material, a menudo suelen ocurrir cerca o alrededor de algún punto de concentración de los esfuerzos de tensión generalmente en la superficie exterior del material (Avilés González, 2005).

Impurezas e imperfecciones en el material a nivel microscópico, tales como muescas, entalladuras, rayaduras o golpes causados en el proceso de fabricación, manipulación y/o transporte pueden generar la aparición inicial de las grietas, entre muchas otras razones. Particularmente en materiales frágiles, defectos propios del material, como poros e inclusiones, pero también discontinuidades geométricas pueden ser la causa principal del inicio de la grieta.

3.2.2. Propagación

Durante el proceso continuo de carga y descarga cíclicas, y, por tanto, la acción de esfuerzos de tensión en el material, alguna o todas las grietas crecen paulatinamente por efecto de las cargas. Las grietas pueden ser tan finas que su detección suele ser bastante complicada, incluso si dichas grietas se encuentran próximas a producir una rotura en el material (Avilés González, 2005).

3.2.3. Rotura

A partir del crecimiento paulatino de la grieta o propagación, el material continuará deteriorándose debido a la pérdida cada vez mayor del área la sección neta, la cual eventualmente quedará tan reducida que será incapaz de resistir una carga desde el punto de vista estático, produciéndose así la rotura definitiva del material de manera frágil, conocida propiamente como falla por fatiga. (Avilés González, 2005).

3.3. RÉGIMEN DE FALLA POR FATIGA

De manera general, se puede diferenciar el régimen en el que se presenta una falla por fatiga distinguiendo entre dos casos particulares: fatiga de bajo ciclaje o (LCF por sus siglas en inglés) y fatiga de alto ciclaje (HCF por sus siglas en inglés). La diferencia entre estos tiene que ver principalmente con las deformaciones que se presentan en los materiales sujetos a cada régimen.

La transición entre la fatiga de bajo ciclaje y la fatiga de alto ciclaje queda determinada por el nivel de esfuerzos que se alcanzan por los ciclos de carga, específicamente por la transición entre deformaciones elásticas y deformaciones en el rango plástico (Homan, 2018). Esto implica que no existe un punto de cambio fijo, pero sí que el número de ciclos de la transición depende de la ductilidad del material (figura 3-1).

3.3.1. Fatiga de bajo ciclaje (LCF)

La fatiga de bajo ciclaje (LCF) define un modo de degradación del material que se caracteriza por alcanzar deformaciones plásticas de alta amplitud y baja frecuencia repetidamente, en muchos o en cada uno de los ciclos de carga, por lo que el número de ciclos necesarios para llevar el material a la falla es bajo. De esta manera, la vida por fatiga del régimen LCF, depende enteramente del nivel de deformaciones inducidas en el material (deformación-vida).

El nivel de esfuerzos derivados de este tipo de falla, se encuentra aproximadamente por encima del 80 % del esfuerzo de fluencia del material, y el número de ciclos necesarios para llegar a la falla suele manejarse de manera referencial por debajo de los diez mil ciclos (10^3) (Reiling & Laird, 2022).

La figura 3-1 muestra gráficamente las diferencias respecto al número de ciclos que marcan la transición referencial entre la fatiga de LCF y la de HCF.

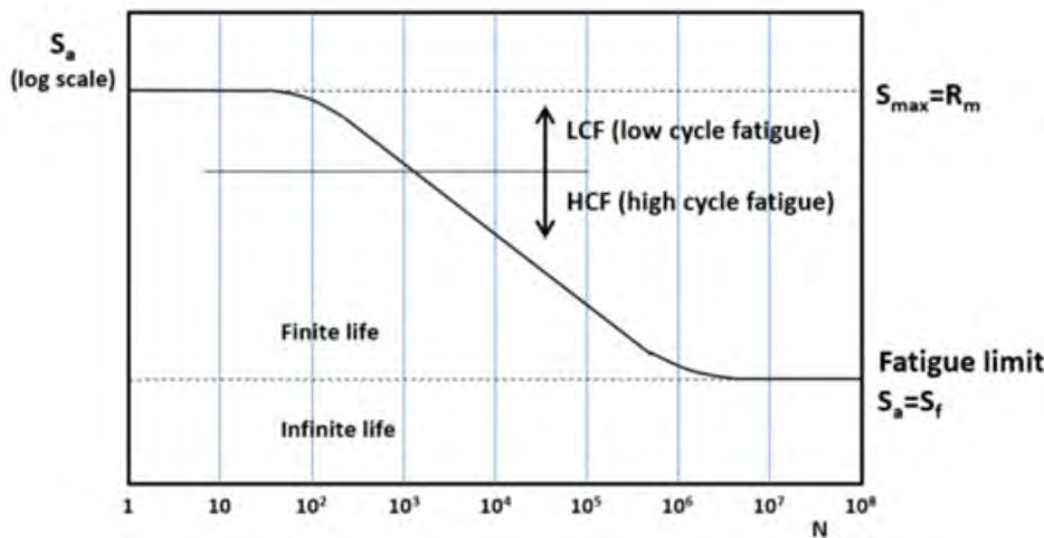


Figura 3 - 1. Fatiga de bajo ciclaje (LCF) y Fatiga de alto ciclaje (HCF) (Homan, 2018).

3.3.2. Fatiga de alto ciclaje (HCF)

La fatiga de alto ciclaje (HCF) es determinada por el hecho de que los ciclos de carga generan típicamente deformaciones de alta frecuencia y de baja amplitud dentro del rango elástico, debido a lo cual el número de ciclos necesarios para llevar el material a la falla es muy alto. Para este caso, la vida por fatiga del régimen

HCF, es determinada por la magnitud de los esfuerzos de tensión actuando en el material (esfuerzos-vida).

En contraparte, el nivel de esfuerzos derivados de este tipo de falla se encuentra por debajo del 80% del esfuerzo de fluencia del material, y según Reiling & Laird (2022) el número de ciclos necesarios para llegar a la falla suele estar muy por encima de los diez mil ciclos, pudiendo tener registros de miles de ciclos, a varios millones de ciclos.

3.4. CARACTERÍSTICAS DE LAS CURVAS S-N

Las curvas S-N, nos presentan en los códigos de diseño de ingeniería estructural, mecánica y de materiales, los resultados estadísticos de numerosas pruebas de fatiga ejecutadas para distintos tipos de materiales, en las cuales se someten las probetas de ensayo a diversos rangos de amplitud constante de esfuerzo hasta registrar la fractura total del elemento por fatiga a un número de ciclos N_i .

Por tanto, se resumen en las gráficas los ensayos para diversos rangos de esfuerzos de amplitud constante "S", relacionándolos con el número de ciclos necesarios "N_i" para que se presente la fractura por fatiga del elemento ensayado, formando las curvas S-N para un material a manera de probeta o bien, de un detalle mecánico o estructural típico de interés (ITEA, s. f.). La información disponible ya toma en cuenta la dispersión obtenida de datos con respecto a la resistencia a la fatiga arrojada por los ensayos, tomando precauciones pertinentes a partir de la desviación estándar obtenida de la dispersión de los datos.

Asimismo, la generación de las curvas S-N muestran un dato de gran importancia para el estudio y análisis de las fallas por fatiga, y es que "para aleaciones férricas y de titanio muestran una tensión limitadora por debajo de la cual no se produce el agotamiento; esto se denomina el límite de fatiga con amplitud constante o el límite de resistencia a la fatiga F_{TH} " (ITEA, s. f., p. 29). El punto conocido como "rodilla" o punto de inversión a partir del cual comienza a definirse el límite de resistencia a la fatiga en la curva, se ubica generalmente en el rango de 10^5 a 10^7 ciclos. Para el caso de aleaciones del tipo no férricas, así como aleaciones de

aluminio en general, no existe una asíntota que conduzca al límite F_{TH} , por lo que para cualquier nivel de tensión existirá una vida finita a la fatiga (figura 3-2).

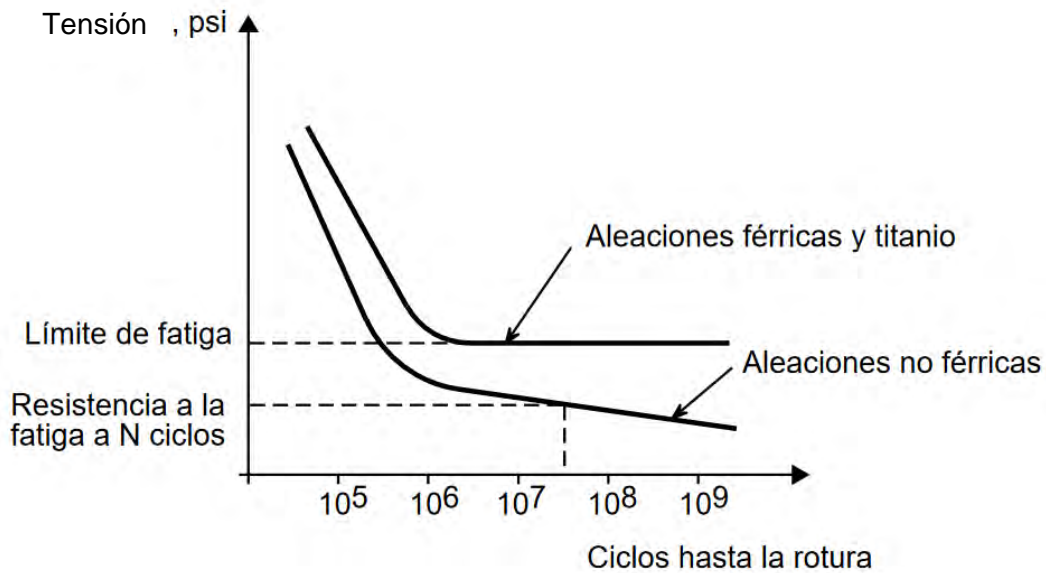


Figura 3 - 2. Curvas S-N para aleaciones férricas y titanio (con límite de resistencia a la fatiga F_{TH}) y para aleaciones no férricas (sin límite F_{TH}) (Modificada de ITEA, s.f.).

3.5. ALCANCES DE LAS NTC ACERO (2020)

3.5.1. Aspectos generales

Las Normas Técnicas Complementarias del Distrito Federal para el diseño de estructuras de acero, en su edición 2020, integran el “apéndice D. Diseño por Fatiga”, cubriendo el diseño de miembros y conexiones sometidas a un número elevado de ciclos de aplicación de esfuerzos dentro del intervalo de comportamiento elástico, de magnitud y frecuencia suficientes para iniciar el agrietamiento y la falla progresiva que definen el estado límite de fatiga (NTC Acero, 2020).

No obstante, cabe aclarar que las normas brindan especial énfasis a la revisión por fatiga de trabes carril en grúas viajeras, por tanto, el caso de estudio que proponemos en esta investigación (capítulo IV) queda descobijado de las

recomendaciones específicas en las que se enfoca la normativa, la cual menciona que “pocos son los miembros o conexiones de edificios convencionales que requieren un diseño por fatiga, puesto que las variaciones de cargas en esas estructuras ocurren, en general, un número pequeño de veces, o producen sólo pequeñas fluctuaciones en los valores de los esfuerzos. En general se aplica, entre otros casos, a traves carril de grúas viajeras” (NTC Acero, 2020, p. 352).

3.5.2. Limitaciones y recomendaciones de aplicación

La normativa refiere que no es necesario evaluar la resistencia ante fatiga de un elemento o conexión de la estructura en los siguientes casos:

- a) Cuando el intervalo de esfuerzos producido por la acción de carga de servicio es menor que el umbral admisible del intervalo de esfuerzos, o umbral mínimo de fatiga F_{TH} .
- b) Si el número de ciclos de aplicación de carga en miembros formados por placas o perfiles es menor de 20,000 durante su vida útil.
- c) La resistencia ante cargas cíclicas determinada por las NTC es aplicable solo a estructuras protegidas contra la corrosión adecuadamente.

Asimismo, se hace hincapié en la necesidad de identificar elementos en una estructura sujetos a cargas móviles; como el caso de grúas viajeras o maquinarias generando vibraciones estacionarias. Como es claro, aunque en este punto no se mencionan propiamente las edificaciones, evidentemente aquellos sujetas a ciertas acciones dinámicas que generen esfuerzos de amplitud variable y que cumplan con los criterios de evaluación por fatiga listados anteriormente deberán tratarse con la misma atención y las siguientes consideraciones:

- I. Identificar elementos y/o conexiones que durante su vida útil estarán sometidos un número elevado de veces a la acción de cargas variables repetidas.

- II. Las amplitudes de esfuerzos serán calculadas con la teoría elástica lineal, usando las propiedades de la sección total sin considerar concentraciones de esfuerzos en el punto o detalle revisado. Si los esfuerzos variables son siempre compresiones, no es necesaria una revisión por fatiga.
- III. Estimar el número de ciclos de carga y descarga con inversión de ciclo para cada amplitud de esfuerzos de los miembros estructurales que soportan a los elementos, acciones o equipos que pueden producir fatiga.

Para este último punto, la norma únicamente menciona que los registros de cargas y el número de ciclos son proporcionados por las especificaciones particulares del equipo (NTC Acero, 2020, p. 355). En este sentido no emite ningún comentario sobre cómo estimar el número de ciclos y las amplitudes para acciones diferentes a aquellas derivadas de equipos, como las acciones del caso práctico de estudio que abordaremos más adelante.

3.5.3. Diseño por Fatiga

Las normas referentes al diseño de estructuras de acero (NTC Acero, 2020), en el apartado de fatiga nos presentan las curvas S-N que pueden emplearse en la estimación de ciclos necesarios para la fatiga de distintos detalles categorizados de "A" a "E" según la magnitud del rango de esfuerzos para llevar el elemento a la falla.

Es importante puntualizar como se explicó en el apartado 3.4, que las gráficas S-N, también nos presentan el límite de fatiga para el cual, no se espera una ocurrencia de falla por este fenómeno, independientemente del número de ciclos a los que sea sometido el elemento (figura 3-3).

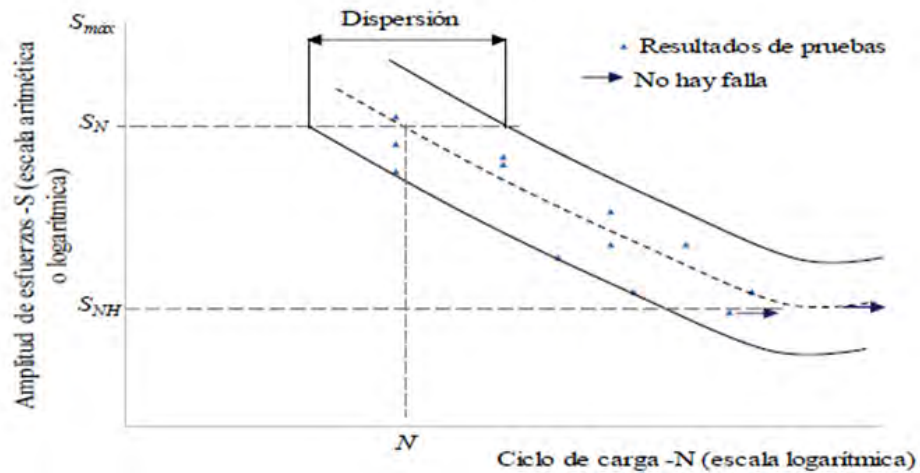


Figura 3 - 3. Ejemplo de curva S-N para la resistencia a Fatiga (NTC Acero, 2020).

Para material simple y en juntas soldadas, los intervalos de esfuerzos producidos por cargas de servicio no deben ser mayores que los permitidos, calculados por la ecuación D.2.1.

$$F_{SR} = \left(\frac{C_f}{n_{SR}} \right)^{\frac{1}{m}} \times 70.3 \geq F_{TH} \quad (D.2.1.)$$

Donde:

C_f = Constante tomada de la Tabla D.2.1 a D.2.7 (NTC Acero, 2020) (figura 4-28).

F_{SR} = Amplitud de esfuerzos permisibles (Kg/cm²).

F_{TH} = Umbral de amplitud de esfuerzos permisibles máximo para el que la vida de diseño no está controlada por fatiga (Kg/cm²) (figura 4-28).

n_{SR} = Número de ciclos de esfuerzos de amplitud constante durante el tiempo de uso o el total de la vida útil contemplada en el análisis.

m = Exponente que depende de la categoría en estudio (3 para todas las categorías excepto la F, será 6 para esta).

Para el diseño por fatiga debe cumplirse que la amplitud constante del esfuerzo de servicio por fatiga (f_{SR}) calculado para un determinado número de ciclos de carga

deberá ser menor que la amplitud constante del esfuerzo resistente (F_{SR}) calculado con la ecuación D.2.1; es decir:

$$f_{sr} \leq F_{SR} \quad (C-D.2.1.)$$

En términos sencillos, la ecuación D.2.1. relaciona de forma directa el número de ciclos de carga (N) y el esfuerzo resistente (F_{SR}), mediante el cual es posible trazar la curva S-N que permite observar la resistencia a fatiga del elemento en análisis. A medida que se disminuye la amplitud del esfuerzo S_N , aumentará el número de ciclos que resistirá a la fatiga, N , hasta que se llegará a la amplitud de esfuerzo límite F_{TH} , a partir de la cual nuevas disminuciones en la amplitud de los esfuerzos no tendrán ningún efecto en la resistencia por fatiga.

Existen ocho categorías definidas en la norma, con diferentes valores de la constante C_f y del umbral del intervalo de esfuerzos permisibles F_{TH} , los cuales se obtienen de las tablas D.2.1 a D.2.7. Cada categoría depende de los ensayos realizaos tomando en cuenta la forma de la conexión y de los niveles de esfuerzo a esperar en los elementos, definiendo las curvas para cada categoría (figura 3-4).

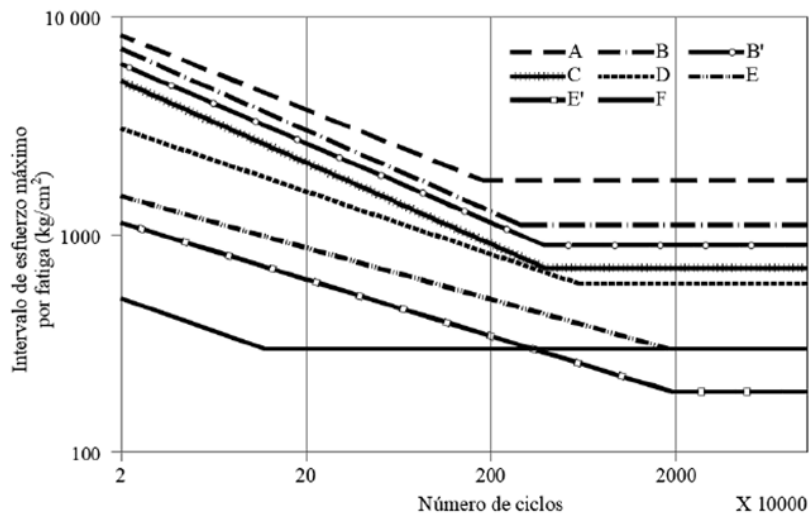
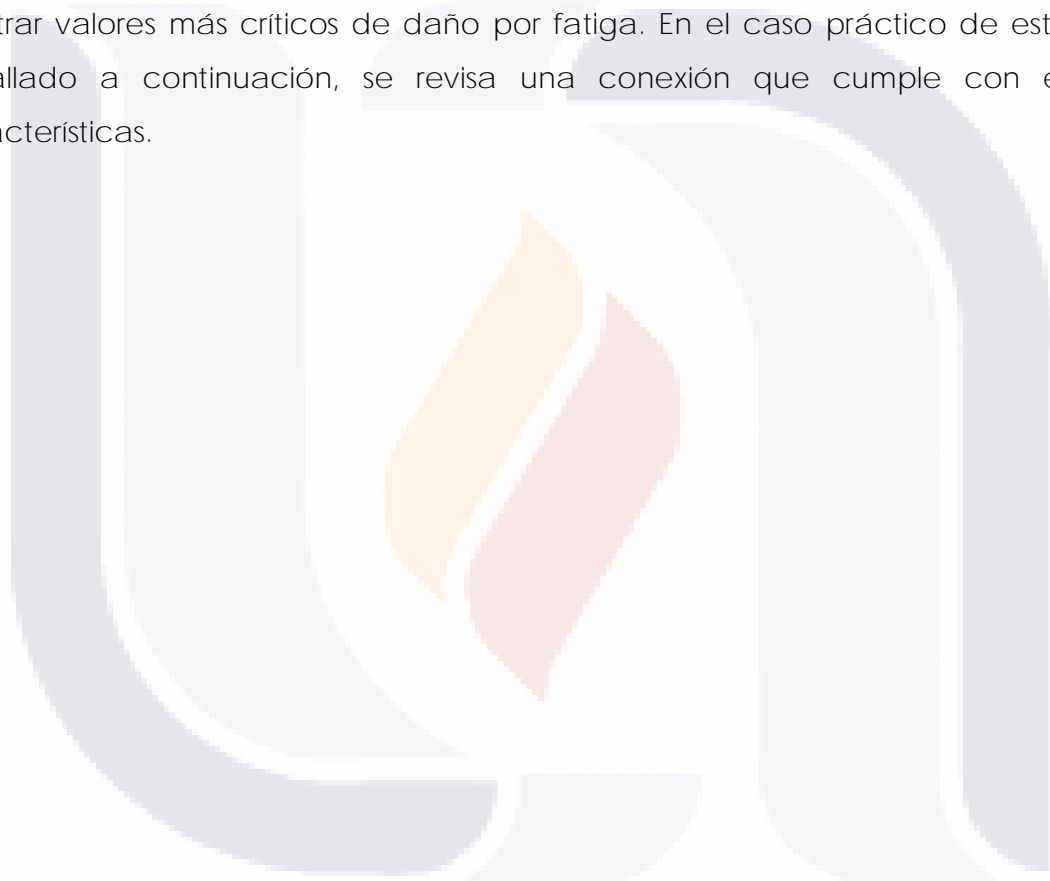


Figura 3 - 4. Curvas S-N de resistencia para aplicación de la ecuación D.2.1 para las diferentes categorías de esfuerzos (NTC 2020).

Finalmente, la norma reconoce que un detalle particularmente susceptible a los efectos de fatiga son las conexiones soldadas debido a que, en la mayor parte de sus procesos, se dejan discontinuidades metalúrgicas a partir de las cuales se generan las micro fisuras que inician los procesos de fatiga, por lo que recomienda la revisión de todas las conexiones de este tipo en estructuras propensas al fenómeno de fatiga, y no solamente enfocarse a las conexiones principales.

Este factor es notorio en los parámetros de fatiga que se definen en la ecuación D.2.1, siendo ese tipo de conexiones soldadas las que generalmente tienden a mostrar valores más críticos de daño por fatiga. En el caso práctico de estudio detallado a continuación, se revisa una conexión que cumple con estas características.





CAPÍTULO IV

DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

CAPÍTULO IV. DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

4.1. ACOTACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

Para poder predecir las propiedades de fatiga en un detalle estructural o un componente mecánico, es necesario contar con una historia de esfuerzos como información de entrada representativa del tipo de acciones bajo las cuales estará sometido tal detalle o componente durante su operación o uso (Schijve, 2003). Debe procurarse que el registro de esfuerzos en dicha historia en función de un tiempo determinado sea razonablemente extrapolable a toda la vida útil del elemento estudiado.

Por ello, dada la complejidad del tema abordado y según los objetivos trazados en este trabajo, fue necesario acotar la investigación a un caso práctico de estudio correspondiente a una estructura tipo edificación, con características geométricas y de ocupación que se asumieron a priori como propensas a presentar una falla por fatiga en alguno de sus elementos durante la vida útil del inmueble.

Sobre este caso práctico se desarrolló la metodológica explicada previamente para la evaluación por fatiga de un detalle crítico que será abordado más adelante, efectuando el tratamiento y cuantificación de la historia de esfuerzos, así como la estimación del daño acumulado. Se buscó que el caso práctico actuara como objeto de estudio particular que permitiera, no obstante, obtener conclusiones generales aplicables para estructuras de características similares.

4.2. CASO PRÁCTICO DE ESTUDIO

4.2.1. Proyecto arquitectónico

En la Figura 4-1, se presenta el caso práctico de estudio seleccionado para este trabajo. El proyecto consta de una edificación destinada a eventos y servicios. Actualmente se encuentra en etapa de planeación y presupuestación para su construcción en la ciudad de Aguascalientes, México. El edificio incluye un sótano de servicios y patio de maniobras, planta baja con terraza y locales comerciales,

primer nivel con restaurante y segundo nivel con salón de eventos y actividades deportivas.

Es precisamente en la zona de salón del segundo nivel, donde se proyecta un espacio con capacidad para alojar hasta 500 personas y cuyas dimensiones generales son de 28.00 m. de largo, por 28.00 m. de ancho. Así, tanto las características geométricas y particularmente las distintas actividades humanas rítmicas que acontecerán a lo largo de la vida útil de la estructura, tales como distintos tipos de bailes, aeróbics o saltos a voluntad derivados de eventos o conciertos multitudinarios encajan en la posibilidad de aparición de problemas estructurales asociados con vibraciones excesivas y fatiga en sistemas de piso (Ana C. S. da Silva et al, 2021).

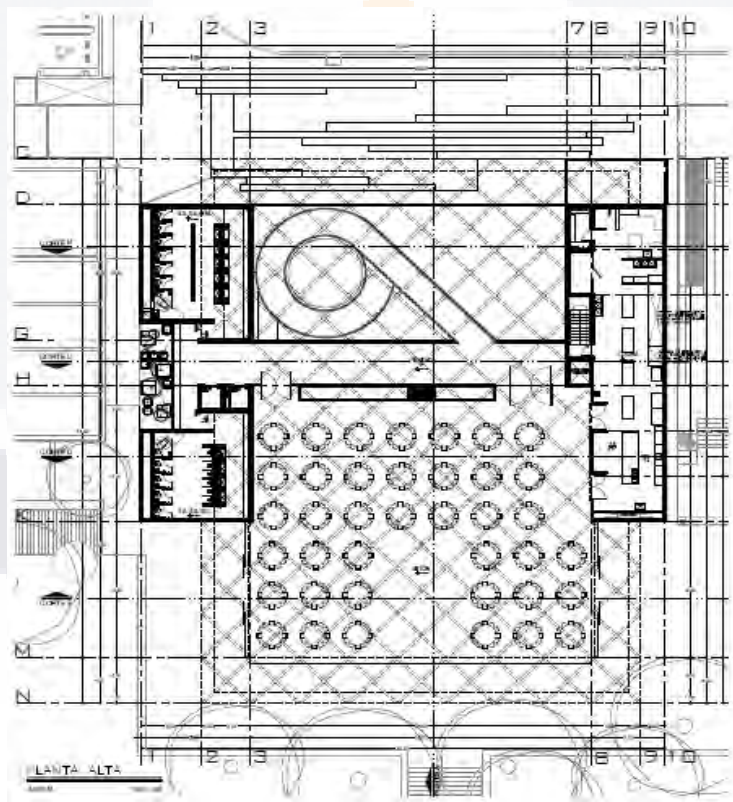


Figura 4 - 1. Planta arquitectónica del caso práctico.

4.2.2. Proyecto estructural

El proyecto estructural para esta edificación propuso como solución del sistema de piso para todas las losas, incluyendo la zona del salón mediante el uso de un sistema tipo Losacero de sección compuesta, el cuál emplea vigas tipo IPR de acero principales y secundarias conectadas a una capa de compresión de concreto mediante conectores de cortante tipo Perno Nelson.

La solución final para este espacio, según los apoyos disponibles sobre columnas y muros en la zona crítica definió dos tableros estructurales principales para el área del salón de 20.00 m. x 12.00 m. como claros libres. Cada uno de estos tableros se subdivide en tres sub-tableros secundarios, uno central de dimensiones 4.00 m. x 12.00 m. y dos tableros laterales de 8.00 m. x 12.00 m.

Dada la configuración del salón, y debido a la zona de este donde se pretende incluir la pista de baile y de actividades aeróbicas se consideró uno de los tableros principales de 20.00 m. x 12.00 m. (figura 4-2) como el elemento más crítico ante posibles efectos de fatiga, por lo que de manera preliminar se seleccionó como el caso práctico de estudio para su desarrollo y análisis en un modelo estructural.

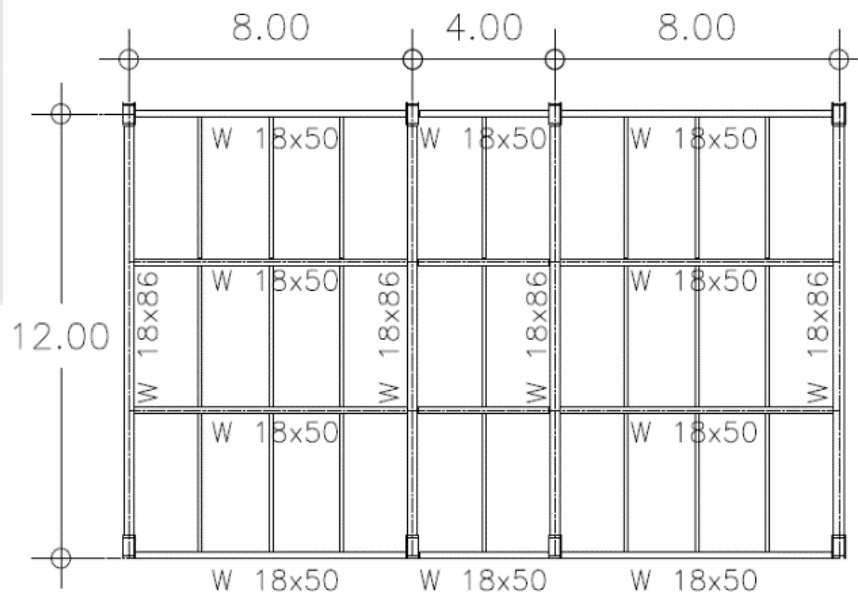


Figura 4 - 2. Modelo estructural investigado, tablero de losa compuesta de 12.0 m. x 20.0 m. (Unidades en m.)

En la figura 4-3, en achurado color café se aprecia la ubicación relativa del tablero seleccionado como nuestro caso práctico de estudio en referencia a la planta

completa del segundo nivel de la edificación en el cual se ubica este elemento, a partir del cual se llevó a cabo la construcción del modelo estructural para continuar con la investigación.

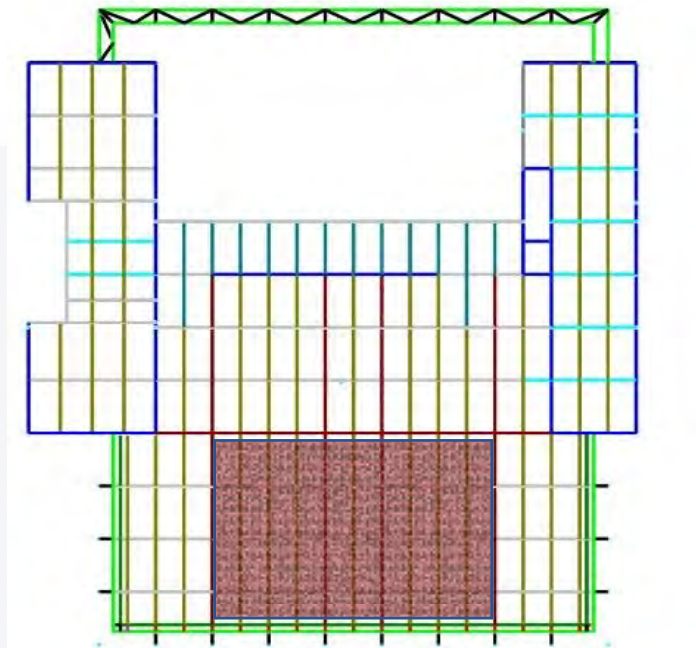


Figura 4 - 3. Ubicación del modelo estructural en referencia a planta estructural de salón de eventos.

Como se explica en el apartado 3.5 referente a las condiciones y recomendaciones para las cuales es pertinente realizar una revisión por fatiga, la selección del tablero mostrado en la figura 4-2 como caso práctico de estudio, representa un punto crítico de gran significancia dentro del proceso de la investigación, ya que, como sugiere da Silva (2021), los impactos dinámicos debidos a la acción de actividades humanas del tipo rítmicas pueden inducir un incremento significativo en las magnitudes de los desplazamientos y de los esfuerzos en una estructura.

En este sentido, se dedujo que debido a las características previamente comentadas respecto al caso de estudio y particularmente del tablero

seleccionado para realizar el modelo estructural, el cual tiene claros considerablemente grandes y será sometido regularmente a un uso de actividades rítmicas derivadas de la ocupación humana, no solo presentaría probablemente los rangos de esfuerzos más amplios y las deformaciones en sus elementos más notables derivados de una revisión estructural bajo cargas y combinaciones de servicio convencionales, sino también el hecho de que serían sus miembros principales y/o puntos de conexión los elementos más susceptibles a presentar una eventual falla por fatiga en algún momento de su vida de servicio antes que cualquier otro elemento de la edificación.

4.3. MODELACIÓN DE LA FUNCIÓN DINÁMICA

Como se ha enfatizado continuamente a lo largo de este trabajo, la historia de esfuerzos de la estructura o componente que se pretende revisar por fatiga representa información imprescindible que debe tener el ingeniero proyectista para poder llevar a cabo la evaluación. El profesional tiene como objetivo anticipar la secuencia y magnitud de las cargas, ya que de esto depende el rango de tensiones actuando sobre el detalle revisado (ITEA, s. f.).

Una predicción más exacta o precisa de las características que intervienen para estimar el daño por fatiga es esencial para diseñar los elementos sujetos al fenómeno, sin embargo, las guías y recomendaciones de diseño brindadas por los códigos en lo referente a estas prácticas son limitadas y aplicables solamente a secciones simples o casos particulares que sí cuentan con más soporte e investigación que se refleja en guías de diseño.

Por ello, el uso de software especializado se ha vuelto un método recomendado por los ingenieros civiles en la práctica para modelar por un lado las acciones dinámicas actuando en estructuras de tipo edificación y por otro, obtener historias de esfuerzos lo más cercanas posibles a la interacción y comportamiento de la estructura real (Lakshmi & Prabha, 2017).

Si bien, teóricamente sería posible instrumentar una estructura para obtener por ejemplo mediciones exactas para las aceleraciones en un punto particular de interés, la realidad en la práctica es que dicha acción es compleja y complicada,

más aún si se pretende tomar lecturas en estructuras del tipo edificación durante su operación en tiempo real, sometidas a actividades humanas del tipo rítmicas como aquellas que estudiamos en esta investigación.

Es fácil concluir, por tanto, que el problema de las acciones dinámicas inducidas por actividades humanas del tipo rítmicas, como lo son el caminar, saltos, bailes o actividades aeróbicas, es altamente complejo. Esto se debe a que las características de la excitación dinámica generadas durante estas actividades están directamente relacionadas a los atributos particulares de los cuerpos de los individuos y a la forma específica en que cada uno ejecuta cierta actividad rítmica (*Campista y Da Silva, 2018*).

En esta investigación, para lograr una correcta modelación y evaluación de una acción dinámica de tipo rítmica sobre un tablero de losa compuesta, se utilizaron los resultados publicados por la investigadora brasileña Faisca (2003), quien propuso una función que modela el efecto variable de la acción dinámica particular, como lo son saltos a voluntad, gimnasia aeróbica o una actividad multitudinaria tipo "show" a través de un pulso causado por la variación en la magnitud de la fuerza ejercida sobre la estructura por la acción rítmica particular, partiendo del peso promedio de una persona ejecutando dicha actividad.

La función de carga dinámica nació a partir de la modificación y desarrollo de la función matemática denominada "función de Hanning" y resultó del testeo e instrumentación llevada a cabo sobre plataformas de concreto sometidas a diversas configuraciones de carga y actividades rítmicas (figura 4-4), en las cuales se colocaron apoyos removibles que permitieron variar la rigidez de las plataformas logrando que la investigación de cargas derivadas de actividades humanas de tipo rítmicas pudiera ser evaluada en estructuras rígidas o flexibles (Faisca, 2003).



Figura 4 - 4. Instrumentación sobre plataforma experimental para actividades de gimnasia aeróbica (Faisca, 2003).

A continuación, se presenta en la Ecuación 1, la descripción del modelo matemático desarrollado a partir de la investigación de Faisca (2003).

$$\begin{aligned}
 F(t) &= \left\{ K_p P \left[0.5 - 0.5 \cos \left(\frac{2\pi}{T_c} t \right) \right] \right\} \quad t \leq T_c ; \\
 F(t) &= 0 \quad T_c \leq t \leq T
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

Donde: $F(t)$ define a la fuerza dinámica (N).

K_p representa un coeficiente de impacto.

CD es el coeficiente de fase.

P es el peso considerado de la persona (N).

T_c es el periodo de contacto de la actividad (s).

T es el periodo total de la actividad (s)

t es el tiempo (s).

La Tabla 1 muestra los parámetros finalmente propuestos para la evaluación de la Ecuación 1 para tres actividades humanas de tipo rítmicas.

Tabla 1

Parámetros propuestos para proyectos estructurales (Ecuación 1).

Actividad	T (s)	Tc (s)	Kp'	A1	A2	A3
Saltos a voluntad	0.44 ± 0.15	0.32 ± 0.09	1.74 ± 0.32	0.89	0.25	0.03
Gimnasia aeróbica	0.44 ± 0.09	0.34 ± 0.09	2.56 ± 0.55	1.32	0.29	0.05
Show/Multitud	0.37 ± 0.03	0.33 ± 0.09	1.71 ± 0.36	0.89	0.08	0.02

Adaptada de Faisca (2003).

De la evaluación para los tipos de actividades contempladas en la aplicación de la Ecuación 1, la actividad tipo gimnasia aeróbica, resultó ser la que definió la opción más crítica en la revisión del caso de estudio, por lo que la investigación se limitó a la modelación de esta actividad actuando sobre la estructura, como se explicará a detalle más adelante. En esta investigación se asumió que el peso de un individuo es de 80.0 kg en promedio.

En lo que respecta a las zonas del proyecto donde estaría actuando la función dinámica, si bien se contemplaron algunas configuraciones de carga implicando zonas tanto dentro del tablero delimitado como caso de estudio como fuera del mismo, como se observa en las figuras 4-5 (a) - (c) en las áreas sombreadas en azul, se consideró que la configuración de zona de carga mostrada en la figura 4-5 (b) representa el caso más realista para ello, ya que delimita únicamente la región de la planta del salón donde se pretende según el diseño arquitectónico predefinir la pista de baile en un evento, o bien delimitar también el área de ejercicio para el uso del espacio como salón de actividades aeróbicas.

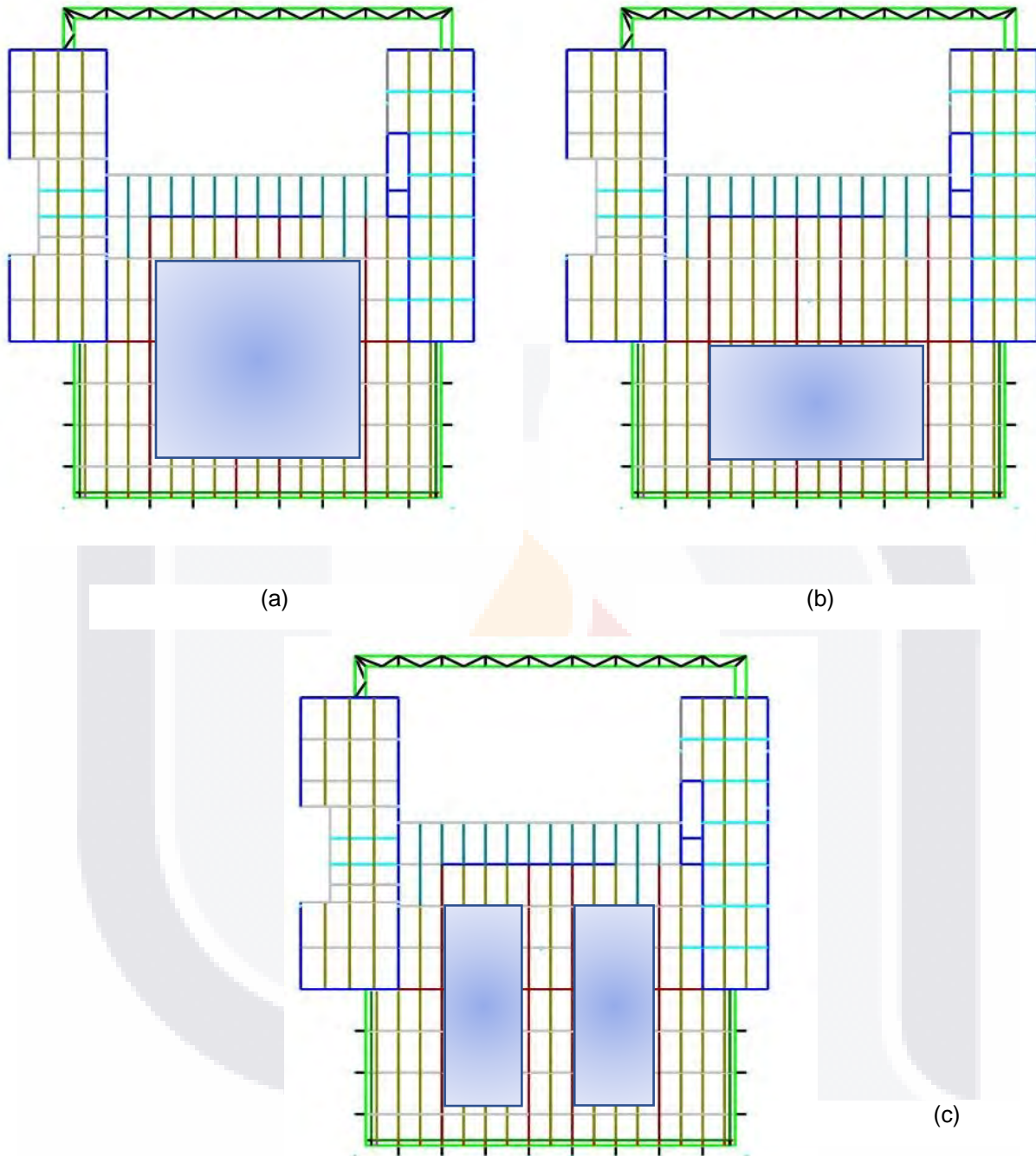


Figura 4 - 5. Posibles configuraciones de aplicación de cargas dinámicas en área de salón. (a) Área de carga de 20.0 m. x 20.0 m. Incluye zonas fuera del tablero de estudio. (b) Área de carga de 12.0 m. x 20.0 m. Zona limitada a tablero de estudio. (c) Dos áreas de carga separadas de 8.0 m. x 20.0 m. Incluye zonas fuera del tablero de estudio.

Así, se decidió únicamente revisar la condición de carga mostrada en la figura 4-5 (b) como zonificación para modelar la acción de cargas rítmicas dinámicas tipo aeróbics actuando sobre el caso práctico de estudio definidas por la Ecuación 1. Por tanto, esta zona de carga resultó coincidente con el tablero de losa compuesta mostrado en la figura 4-2.

4.4. MODELO ESTRUCTURAL EN ETABS

4.4.1. Elección del software

Una vez que se consideró pertinente el uso de la Ecuación 1 propuesta por Faisca, el siguiente paso de la investigación consistió en desarrollar un modelo estructural en un software especializado con la suficiente capacidad para poder evaluar funciones dinámicas dependientes del tiempo y para poder modelar adecuadamente el tipo de estructura particular que investigamos en nuestro caso práctico de estudio; en este sentido, existen diversas paqueterías de software disponibles en el mercado con dicha potencia.

Para la selección final se buscó primeramente poder hacer uso de software con licencia vigente disponible en la Universidad, contemplando paralelamente en elegir un programa de acceso relativamente fácil en términos económicos y de disponibilidad, así como que fuera preferentemente de conocimiento general en el ramo de los estudiantes y profesionales de la ingeniería civil y estructural.

En este sentido, para la realización del análisis dinámico y modelación del caso práctico, se utilizó el software ETABS v.20 (CSI, 2022) , cuya ventaja para nuestra investigación radicó principalmente en el aprovechamiento de la herramienta disponible en el programa para la modelación y diseño de losas de sección compuesta, tomando en cuenta sus propiedades geométricas de manera directa en el análisis a diferencia de otros programas comerciales similares.

Asimismo, ETABS v.20 (en adelante lo referiremos únicamente como ETABS) es en la actualidad ampliamente usado en los despachos de ingeniería estructural del país, y uno de los softwares especializados de mayor uso en las facultades de Ingeniería Civil en las Universidades de México y el mundo.

Así pues, se procedió a realizar la modelación en el Software ETABS de la estructura estudiada después de haber analizado las distintas configuraciones de cargas dinámicas que se consideraron razonablemente posibles y de mayor impacto tanto para el fenómeno de vibraciones y resonancia, como para efecto de la fatiga en sus elementos y conexiones.

4.4.2. Secciones empleadas y estructuración

Como se adelantó previamente, el modelo estructural se construyó contemplando tableros de losa de sección compuesta acero-concreto con un claro total entre apoyos de 20.0 m. por 12.0 m., subdivididos en tableros menores de dimensiones máximas de 8.0 m. por 12.0 m. mediante vigas principales tipo IPR conectadas a los apoyos disponibles, en este caso definidos por columnas perimetrales rectangulares construidas a base de placas soldadas.

Las secciones metálicas usadas para las vigas se modelaron con acero ASTM A992 Gr.50 con un esfuerzo de fluencia de 50 ksi. Para las columnas se utilizó acero ASTM A36 con un esfuerzo de fluencia de 36 ksi. La losa se modeló mediante el sistema Ternium Losacero 25, el cual integra un perfil laminado (cal.24 en esta investigación), y tiene un espesor total de 11.30 cm. que incluye una capa de compresión de 5.0 cm cuya especificación contempló un concreto con resistencia mínima a la compresión de $F'c = 250 \text{ Kg/cm}^2$ (ver figura 4-6).

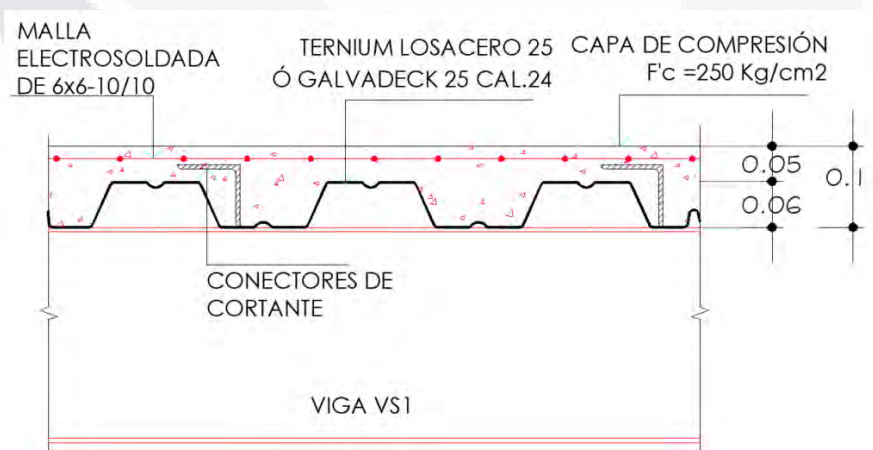


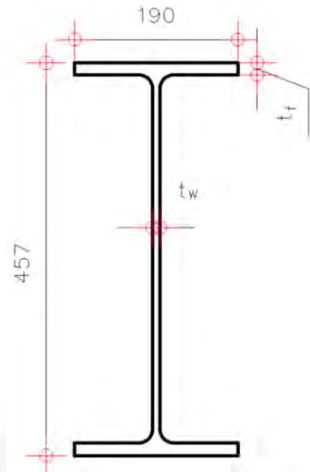
Figura 4 - 6. Sistema de losa compuesta en caso de estudio con lámina acanalada cal. 24 y conectores de cortante ligados a la estructura metálica.

Las figuras 4-7 a 4-10, muestran la nomenclatura otorgada a los elementos que conforman el sistema de vigas del caso práctico de estudio. Como se aprecia, existen dos tipos de vigas principales; la viga VP1 (IR 18" x 157.5 Kg/m) y la viga VP5 (IR 18" x 74.5 Kg/m), las cuales forman junto con las columnas C1 (columnas compuestas de 35.0 cm x 61.0 cm a base de 4 placas $t = 1/2"$) los marcos rígidos principales que soportan el sistema de piso.

Por tanto, para tal fin todas las vigas principales que llegan a las columnas C1 se modelaron conectadas a momento. Asimismo, de manera similar las conexiones entre vigas VP5 y VP1 que se cruzan al centro del tablero se modelaron también como conexiones rígidas con transmisión de momento. Las conexiones restantes, como la viga VP5 llegando a una viga VP1 de extremo, así como las conexiones de todas las vigas secundarias, identificadas como VS1 (IR 12" x 23.9 Kg/m), se conectaron articuladas en sus llegadas únicamente permitiendo la transmisión de cortante.



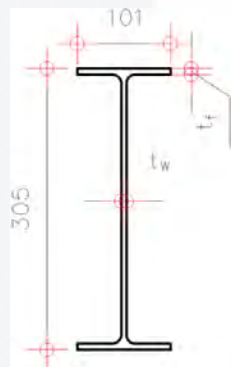
Figura 4 - 7. Viga VP-1, IR 18"x157.5 Kg/m.



IR 18"x74.5 Kg/m

- $d = 46.7 \text{ cm}$
- $t_w = 1.08 \text{ cm}$
- $b_f = 28.2 \text{ cm}$
- $t_f = 1.96 \text{ cm}$

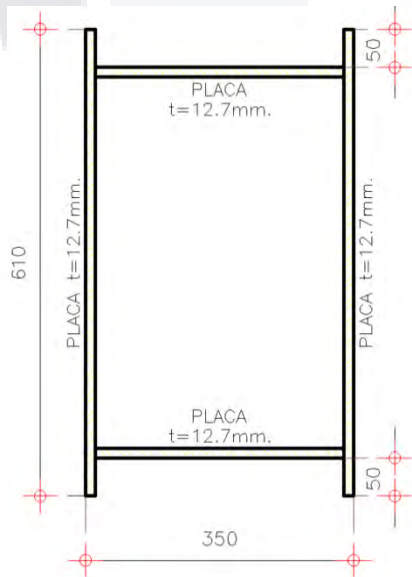
Figura 4 - 8. Viga VP5, IR 18"x74.5 Kg/m.



IR 12"x23.9 Kg/m

- $d = 30.3 \text{ cm}$
- $t_w = 0.56 \text{ cm}$
- $b_f = 10.1 \text{ cm}$
- $t_f = 0.67 \text{ cm}$

Figura 4 - 9. Viga VS1, IR 12"x23.9 Kg/m.



4 placas 1/2"

- $B = 35.0 \text{ cm}$
- $H = 61.0 \text{ cm}$
- $t_{placa} = 1.27 \text{ cm}$

Figura 4 - 10. Columna C1.

La estructuración descrita en el párrafo anterior que podemos observar en la planta de la figura 4-11, incluyendo las características y tipos de perfiles, sus conexiones, disposición y separación de los elementos se modeló respetando el diseño estructural del caso de estudio tomado como ejemplo para el desarrollo de esta investigación. Es importante comentar que tal y como se muestra en la memoria de cálculo, el proyecto estructural referente a la edificación de la cual se tomó el caso práctico de estudio para este trabajo cumple cabalmente con los criterios de diseño bajo condiciones de servicio, así como para las combinaciones de diseño propuestas por la normativa mexicana aplicable, específicamente a las NTC Acero (2020), las NTC Concreto (2017) y las NTC Mampostería (2020).

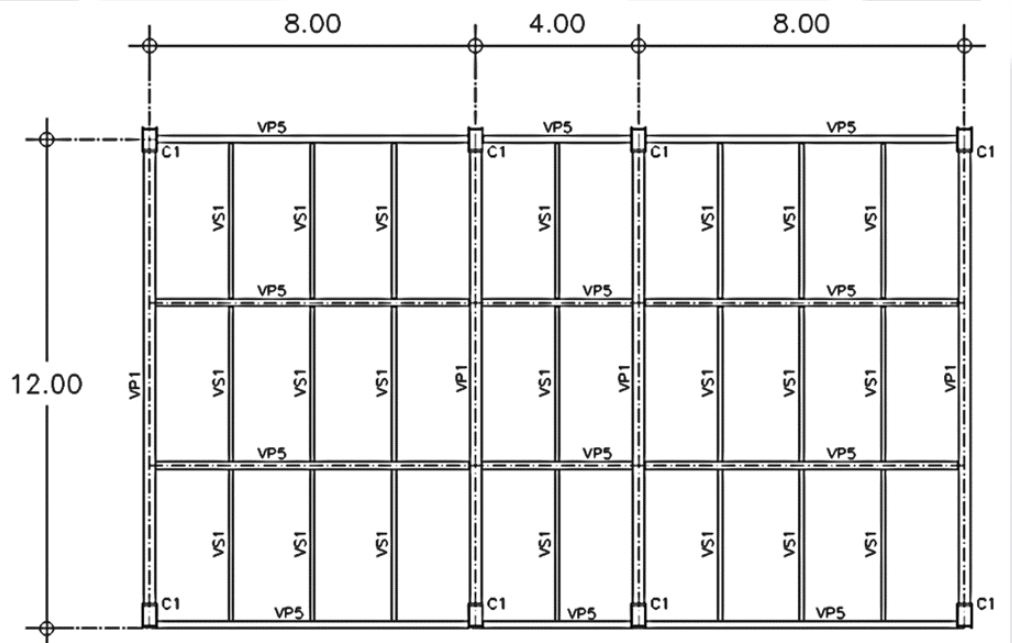


Figura 4 - 11. Estructuración caso de estudio; nomenclatura por elemento.

4.4.3. Función dinámica Time-History

El siguiente paso de la investigación consistió en integrar al modelo estructural y sus características a partir del modelo en el software ETABS, la función dinámica de Faisca que se describió y desarrolló en el apartado 4.3, que como se explicó en la mencionada sección, el objetivo de la función consiste en modelar

matemáticamente el efecto de la fuerza ejercida por los individuos a partir de la realización una serie de actividades humanas rítmicas, a partir de una serie de parámetros que fueron obtenidos gracias a la experimentación llevada sobre modelos de plataformas sometidas a diversas pruebas (Faisca, 2003).

De esta manera, la función dinámica se implementó por medio de la definición de una función dependiente del tiempo, generada en el software como "function" del tipo *Time-History*, la cual evaluó la magnitud de la fuerza $F(t)$ definida por la Ecuación 1 cada 0.01 segundos. En la figura 4-12 se muestran los datos de tiempo vs carga (fuerza) para la función dinámica de Faisca para aeróbics evaluada durante diez segundos.

Como podemos apreciar, la función se comporta de manera periódica aproximadamente cada 0.49 segundos, por lo que encima de este intervalo de tiempo teóricamente la función evaluada durante periodos más largos o más cortos múltiplos del intervalo, arrojarán los mismos resultados periódicos. Este comportamiento se tomó como base para la implementación de la acción para la actividad rítmica del tipo aeróbics sobre la estructura.

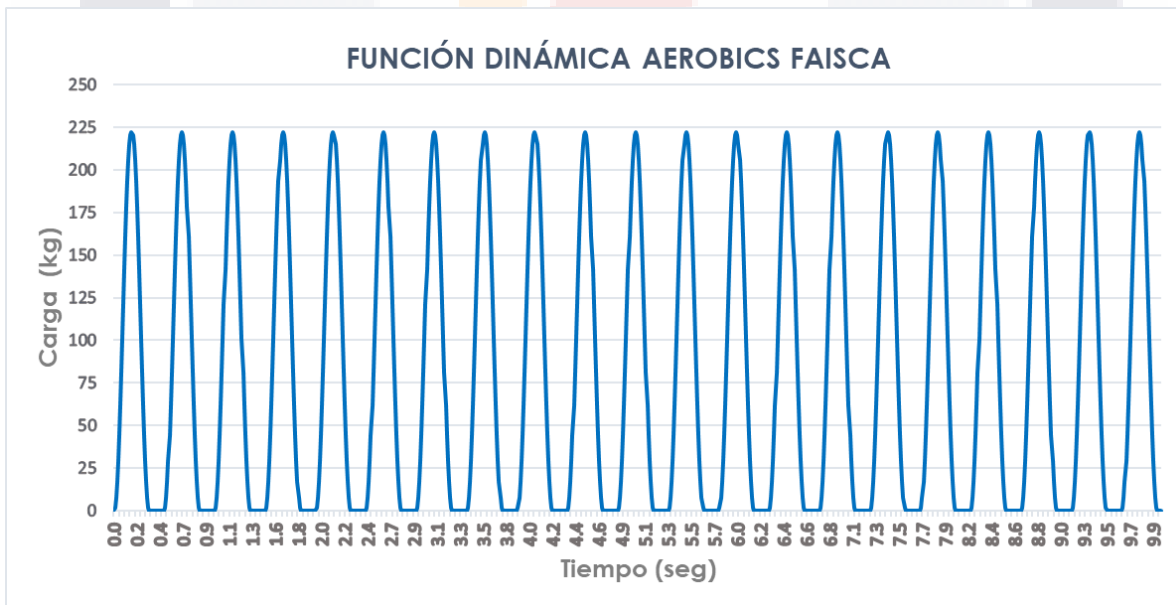


Figura 4 - 12. Función dinámica de Faisca evaluada durante 10 segundos para actividad del tipo aeróbics.

Los pasos llevados a cabo en el software ETABS, consistieron primeramente en definir la función dinámica desde la pestaña "Define", seleccionando como se explicó previamente la pestaña "function" seguido de la opción "Time History" (figura 4-13). La función dinámica representando la acción rítmica de aeróbics según los hallazgos de Faisca se nombró "Aeróbics Faisca".

Paralelamente, fue necesaria la generación del modelo del caso de estudio contemplando todas las condiciones definidas por el proyecto estructural original, con el fin de poder crear la condición de carga base o "load pattern" a partir de la cual obligamos al software a aplicar la función definida previamente.

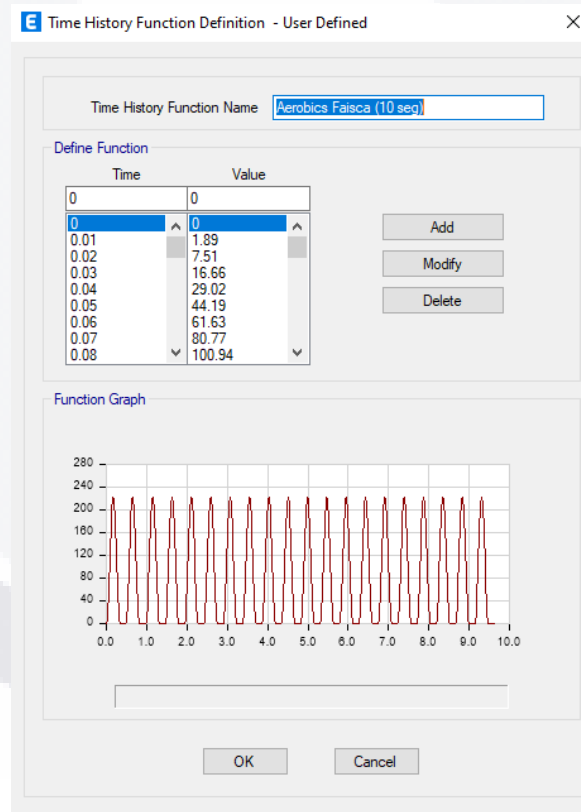


Figura 4 - 13. Definición de la función "Aeróbics Faisca" de tipo "Time History" en ETABS. En este caso la función dependiente del tiempo se define con una duración de 10 segundos.

Como se muestra en la figura 4-14, se generó el modelo estructural incluyendo las zonas circundantes del tablero de estudio seleccionado. A partir de la zonificación

explicada en el apartado 4.3, para someter a la estructura a la acción dinámica de la actividad rítmica se definió el load pattern denominado como "ritmo", cuyo objetivo fue el de definir una configuración de carga sobre la estructura simulando la acción simultánea de 137 personas en la zona de pista de baile, lo que representa poco menos del 30% de la capacidad del salón de eventos en el caso práctico de estudio.

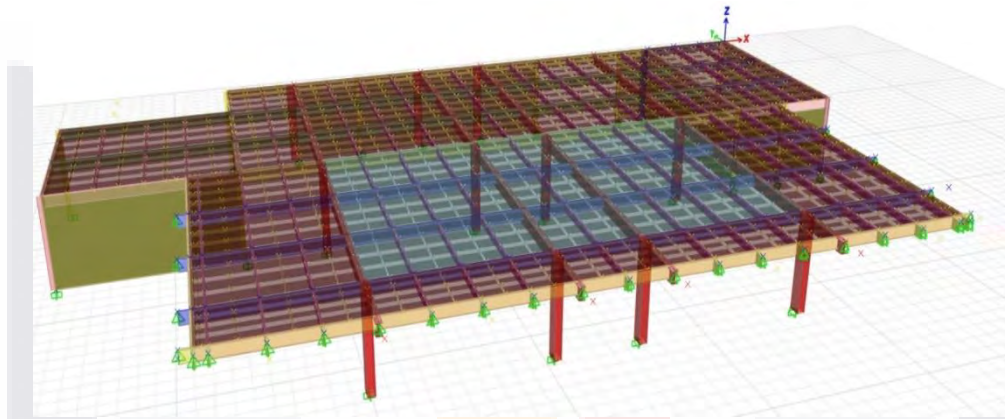


Figura 4 - 14. Modelo de ETABS para caso práctico de estudio, necesario para la modelación de la función dinámica.

En términos prácticos, el load pattern creado, generó 137 nodos de control que representan a las personas ubicadas simultáneamente en esas posiciones particulares (ver figura 4-15), a partir de los cuales fue posible definir la ejecución de la función dinámica a través de la generación de un estado de carga particular o "load case" llamado "Aeróbics 137 personas", mediante el cual se indicó al software la aplicación de la función de "Aeróbics Faisca" sobre los 137 nodos durante un periodo total de tiempo de 30.0 segundos, con la posibilidad de observar el comportamiento de la estructura cada 0.1 segundos durante 35.0 segundos en total, incluyendo 5.0 segundos adicionales de medición de la respuesta de la estructura pero sin la acción dinámica, buscando observar posibles efectos de amortiguamiento en la estructura. (ver figura 4-16).

Dado que el load case generado con la función aeróbics está directamente relacionado con el load pattern definido sobre los 137 nodos, se aseguró que la función estuviese corriendo adecuadamente en cada uno de estos puntos (figura

4-17). Al realizar algunas corridas durante distintos lapsos de tiempo, se definió el periodo de tiempo mencionado como definitivo para el análisis, ya que se observó que la respuesta de la estructura también mostró un comportamiento periódico, por lo que se llegó a la conclusión de que la ejecución de corridas en el software correspondientes a tiempos mayores resultó no otorgar resultados distintos a los del tiempo comentado, llevando únicamente a mayores tiempos de procesamiento del software y a un tratamiento redundante para un registro de datos de salida más amplio, lo que involucra también más tiempo y recursos humanos empleados sin que esto suponga ningún tipo de beneficio.

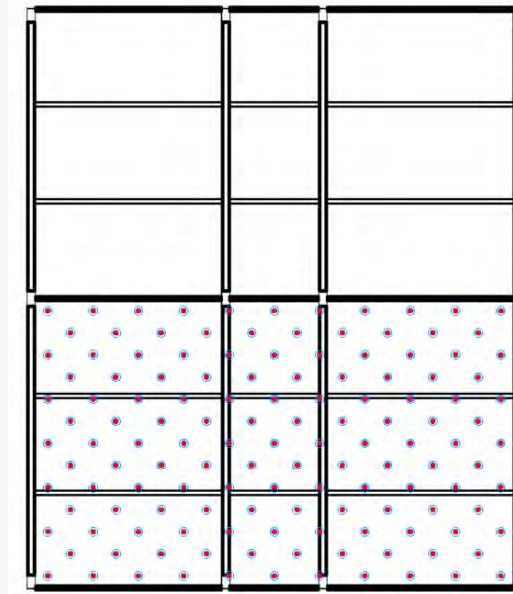


Figura 4 - 15. Configuración de carga evaluada con 137 personas en tablero inferior (zona de pista representadas por círculos rojos), sin cargas en tablero aledaño superior.

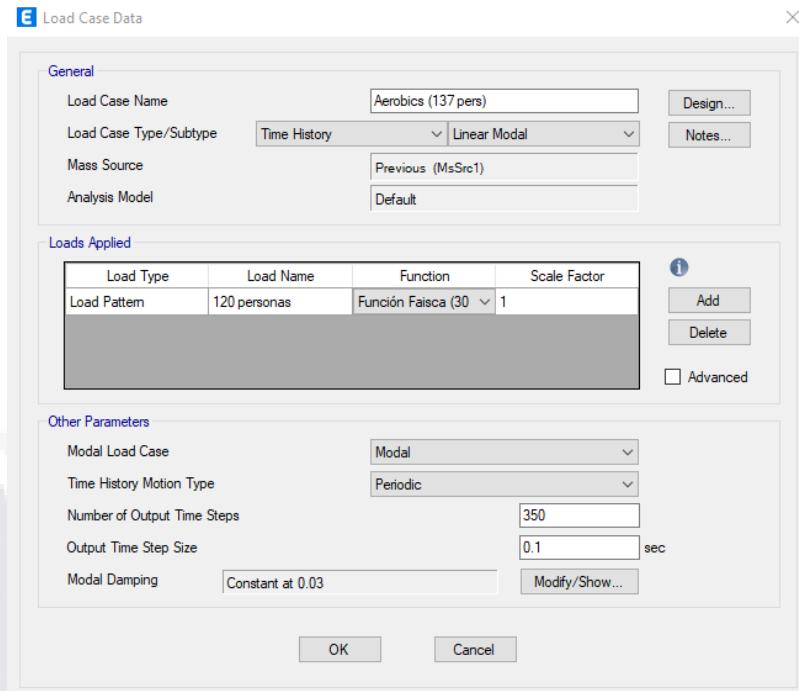


Figura 4 - 16. Creación del “load case” o estado de carga “Aeróbics 137 personas”. Definió la aplicación de la Función “Aeróbics Faisca” sobre los nodos de control que representan a las 137 personas en actividad simultánea.

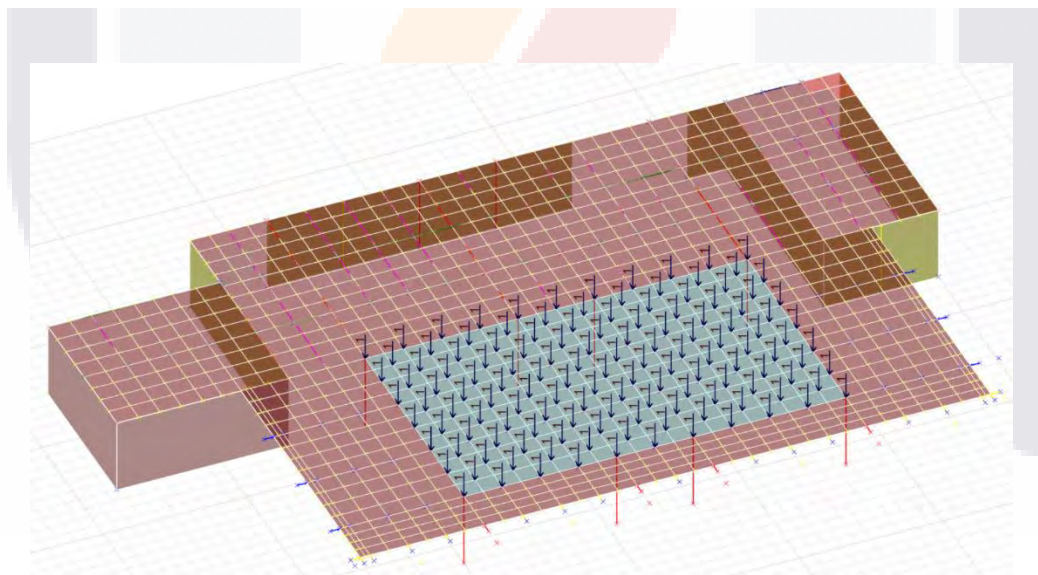


Figura 4 - 17. La función dinámica “Aeróbics Faisca” aplicada sobre los 137 nodos de control en el modelo estructural de ETABS.

4.5. OBTENCIÓN DE LA HISTORIA DE ESFUERZOS

4.5.1. Historia de momentos en conexión viga-columna

A partir del modelo estructural del caso práctico de estudio, y del análisis dinámico derivado de la modelación de la función dinámica "Aeróbics Faisca" actuando sobre la estructura tal como se describió en los apartados anteriores, fue posible visualizar y obtener como resultados de salida información de relevancia como aceleraciones, desplazamientos o reacciones en los nodos, así como fuerzas axiales, cortantes, torsiones o momentos tanto al centro como en los extremos de los elementos tipo barra como columnas y/o vigas.

Partiendo del hecho de que para realizar un análisis por fatiga se necesitan las magnitudes de los rangos de esfuerzos en el detalle particular que se revisa, la información de importancia que se extrajo para continuar con la investigación consistió en un bloque representativo de la historia de momentos de amplitud variable registrado con una duración de 31.0 segundos, específicamente de los momentos en el extremo de la barra que representa la conexión a momento viga-columna de uno de los marcos críticos centrales del caso de estudio (figura 4-18).

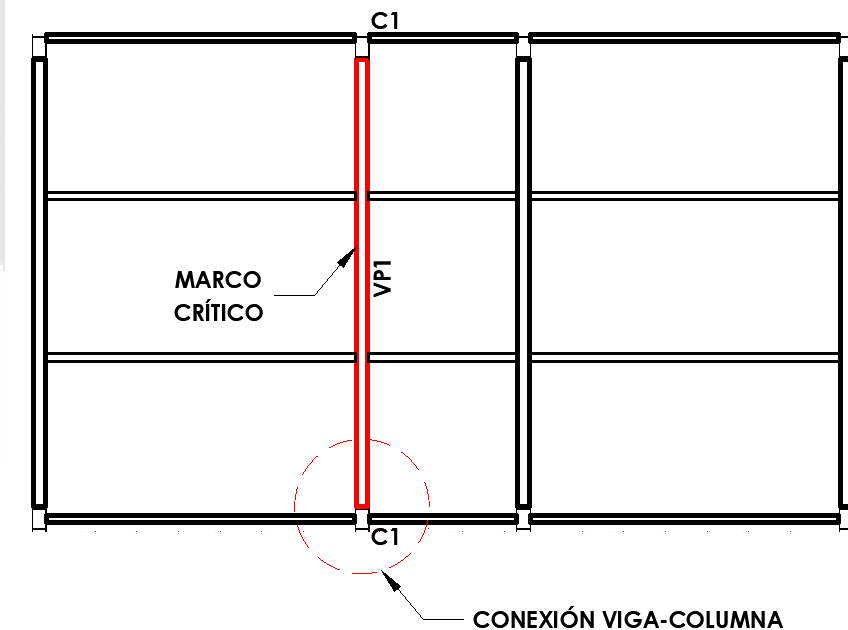


Figura 4 - 18. Detalle de conexión viga-columna elegido para la obtención de la historia de esfuerzos y análisis por fatiga.

Para continuar la investigación, se tomó la decisión de particularizar aún más el enfoque para la aplicación de la metodología estudiada a la conexión indicada en la figura 4-18, específicamente a evaluar la fatiga estructural entre los cordones de soldadura de filete para la conexión de la placa de momento superior con el metal base de la viga VP1 en su punto de conexión con la columna C1. Este tipo de conexión corresponde al detalle 3.5 tipificado dentro de la sección 3 (conexiones soldadas entre componentes de miembros armados), (figura 4-19) descrito en la Tabla D.2.1 de las NTC Acero (2020).

Se eligió la revisión del detalle comentado ya que estas conexiones se presumen teóricamente como algunos de los puntos más propensos a sufrir un daño por fatiga por dos motivos principales; primero, que los momentos resultaron ser de los más críticos en magnitud en todo el tablero a lo largo de la historia de momentos obtenida a partir de los resultados generados por la función Aeróbics Faisca (figura 4-20), y segundo, que este tipo de detalle estructural está categorizado dentro de la categoría "E" con el umbral mínimo de esfuerzo para daño por fatiga F_{TH} más bajo en la normativa mexicana (NTC Acero, 2020).

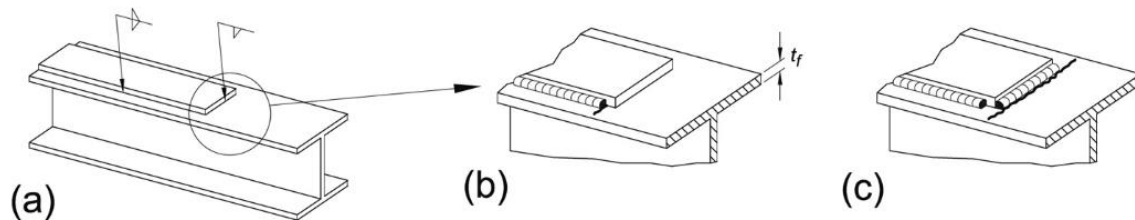


Figura 4 - 19. Detalle 3.5 para diseño por fatiga, indica los puntos potenciales para inicio de la grieta. (a) En el patín, al pie de la soldadura en el extremo de la placa. (b) En el patín, en la terminación de las soldaduras longitudinales. (c) En el borde del patín con placas anchas. (NTC Acero, 2020).

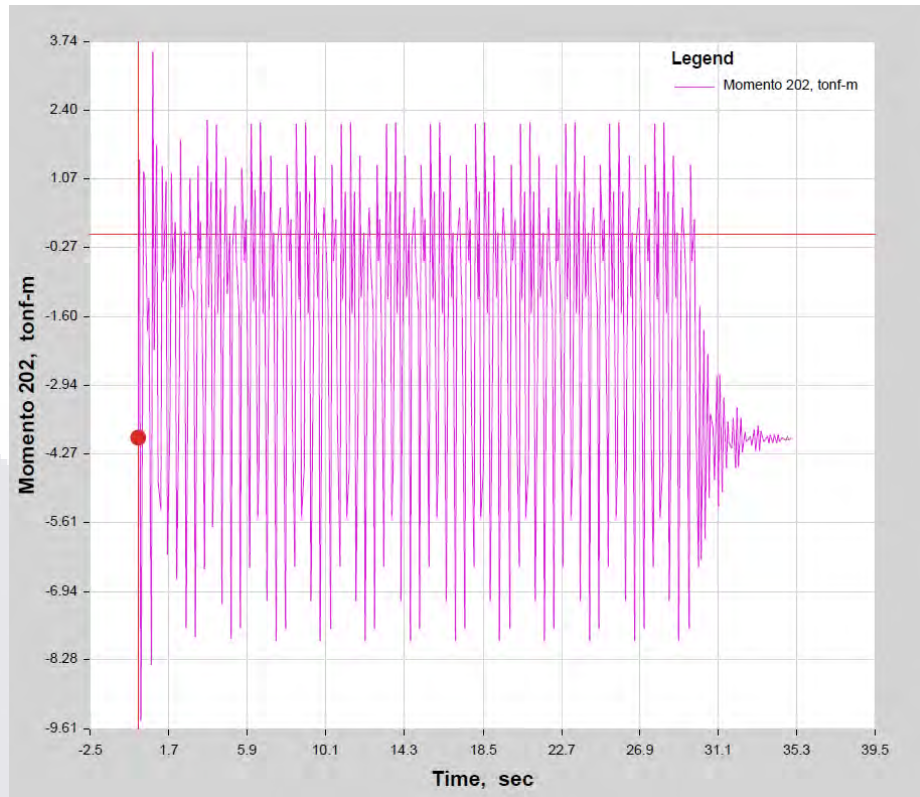


Figura 4 - 20. Historia o bloque de momentos para la conexión viga VP1 a columna C1, evaluada durante 31.0 segundos en total.

Es importante puntualizar, no obstante, que la gran bondad que resultó de la modelación del modelo estructural del caso práctico lo más completo posible, fue el hecho de se pudo revisar la historia de momentos en cualquier punto o elemento deseado de la estructura, por lo que gracias al desarrollo de la metodología descrita en esta investigación, es posible replicar las revisiones efectuadas por fatiga a otros detalles de importancia, como pudiera ser el metal base de las vigas VP1 al centro del claro sometidas a esfuerzos de tensión en su patín inferior.

El bloque de momentos mostrado en la figura 4-20 se tomó como un bloque representativo de la actividad rítmica tipo aeróbics evaluada, el cuál procedimos a transformar en una historia de esfuerzos de amplitud variable en la zona de la sección compuesta de nuestro interés, teniendo finalmente una duración de 31.0 segundos.

4.5.2. Historia de esfuerzos patín superior - placa de momento

Partiendo de la historia de momentos obtenida de la conexión viga-columna indicada en la figura 4-20, fue necesario calcular los esfuerzos actuantes en la viga a la altura de la sección correspondiente al detalle particular que se revisaría por fatiga. En este respecto se debe tomar en cuenta que, al tener un sistema de losa compuesta acero-concreto ligada con conectores de cortante, existe teóricamente una aportación de inercia debida básicamente a la capa de compresión del concreto. Para esta consideración se tienen recomendaciones en los códigos referentes al ancho efectivo B_{EF} que puede tomarse como válido para transformar la porción de la parte de concreto que actuará en la sección compuesta en conjunto con la viga de acero (ANSI/AISC, 2020).

El área transformada se toma en cuenta en el cálculo de las propiedades geométricas mediante una relación modular de la razón entre el módulo de elasticidad del concreto con respecto al módulo de elasticidad del acero estructural de la viga, permitiendo suponer un área o cantidad de acero que contribuye con el mismo efecto que el área de concreto a la que sustituye, considerando una compatibilidad de deformaciones en la sección compuesta.

Consecuentemente, bajo tales consideraciones, se pueden calcular los esfuerzos de flexión en la sección compuesta, con la fórmula de flexión tradicional en el patín superior de la sección de acero, y en el patín inferior de la sección de acero respectivamente con las ecuaciones (2) y (3):

$$f_{st} = \frac{M c_1}{I_{tr}} \tag{2}$$

$$f_{sb} = \frac{M c_3}{I_{tr}} \tag{3}$$

Donde:

f_{st} = Esfuerzo de flexión en el patín superior de la viga de acero.

f_{sb} = Esfuerzo de flexión en el patín inferior de la viga de acero.

M = momento flexionante actuante.

I_{tr} = momento de inercia con respecto al eje neutro (mismo que el eje centroidal) de la sección transformada.

c_1 = distancia del eje neutro de la sección compuesta a la parte superior de la viga.

c_3 = distancia del eje neutro de la sección compuesta la parte inferior de la viga.

Sin embargo, las consideraciones y el procedimiento anteriormente comentadas para la sección compuesta son aplicables solamente para una condición de momento positivo, es decir, con compresión en la zona superior de la sección debido a que el concreto posee resistencia a la tensión prácticamente nula (Segui, 2013). En la figura 4-21, observamos la geometría de la sección compuesta, con y_c como la distancia de la parte superior de la sección compuesta al eje centroidal de la misma, y y_b como la distancia del extremo superior del patín de la viga, a su eje neutro como sección individual.

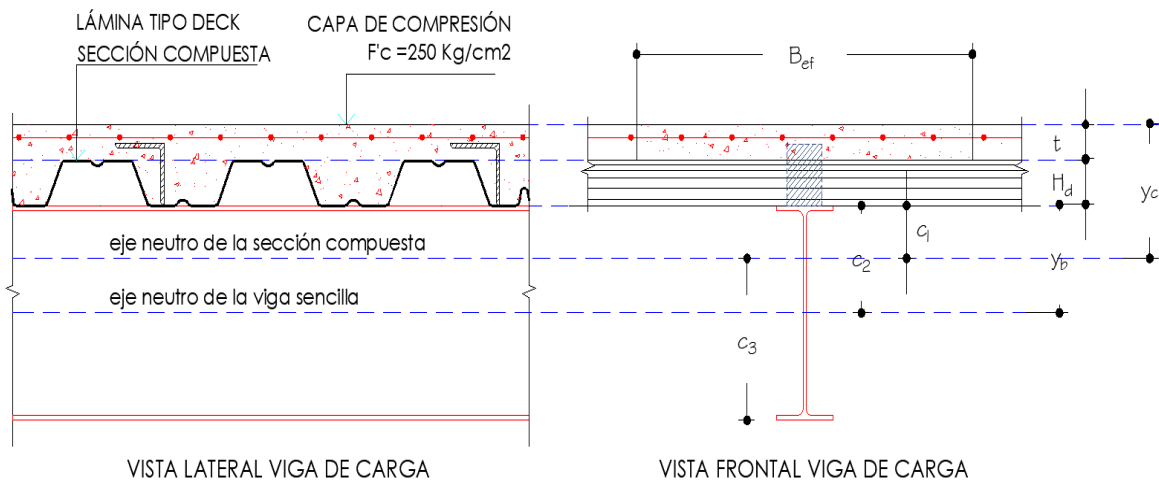


Figura 4 - 21. Modificación del eje neutro para una sección compuesta. El cálculo del esfuerzo dependerá de la distancia del punto de interés en la sección, a la ubicación del eje neutro.

De acuerdo a la condición mencionada en el párrafo anterior, para la conexión correspondiente a nuestro caso de estudio, observamos según la figura 4-20, que los momentos durante la acción dinámica revisada se encuentran en rangos de magnitud predominantemente negativos, por lo que, si bien existen inversiones de signo en la historia de momentos, a criterio de este trabajo, se consideró que la

condición que refleja el estado más realista del trabajo estructural particularmente en el detalle estudiado, es justamente la existencia de esfuerzos de tensión en la zona superior de la sección de losa compuesta; por tanto, tomar en cuenta para este caso la inercia aumentada de la sección compuesta, podría llevar a subestimar la magnitud de los rangos de esfuerzos actuando sobre el detalle estructural revisado, y por tanto, la estimación de la fatiga sobre el mismo. Así, se procedió a calcular la historia de esfuerzos con la ecuación (4) que contempla únicamente las características geométricas del perfil IR aislado.

$$f_b = \frac{M c_2}{I_b} \quad (4)$$

Donde:

f_b = Esfuerzo de flexión en el patín superior de la viga de acero.

M = momento flexionante actuante.

I_b = momento de inercia con respecto al eje neutro de la viga.

c_2 = distancia del eje neutro de la viga a la parte más alejada del patín superior (interfaz patín-placa superior de momento).

Vale la pena comentar que si se pretendiera estimar la vida por fatiga del metal base de la misma viga que se revisó en nuestro caso práctico de estudio, pero al centro del claro en su patín inferior, acorde a los resultados que reflejan magnitudes de momentos predominantemente positivos en esa sección, contemplar la sección compuesta y la inercia aumentada de la misma tendría una justificación más que razonable para ello, y no hacerlo en este caso podría resultar en una sobre estimación los esfuerzos actuando en el elemento. Por tanto, es de suma importancia la aplicación de un criterio por parte del ingeniero que contemple el funcionamiento real de la estructura lo más cercano posible a la realidad, de manera que se pueda llegar a resultados y soluciones ingenierilmente óptimas.

En la figura 4-22, se muestra la historia de esfuerzos calculada bajo los criterios comentados en este apartado, contemplando finalmente únicamente la inercia de la sección de la viga VP1 individualmente.

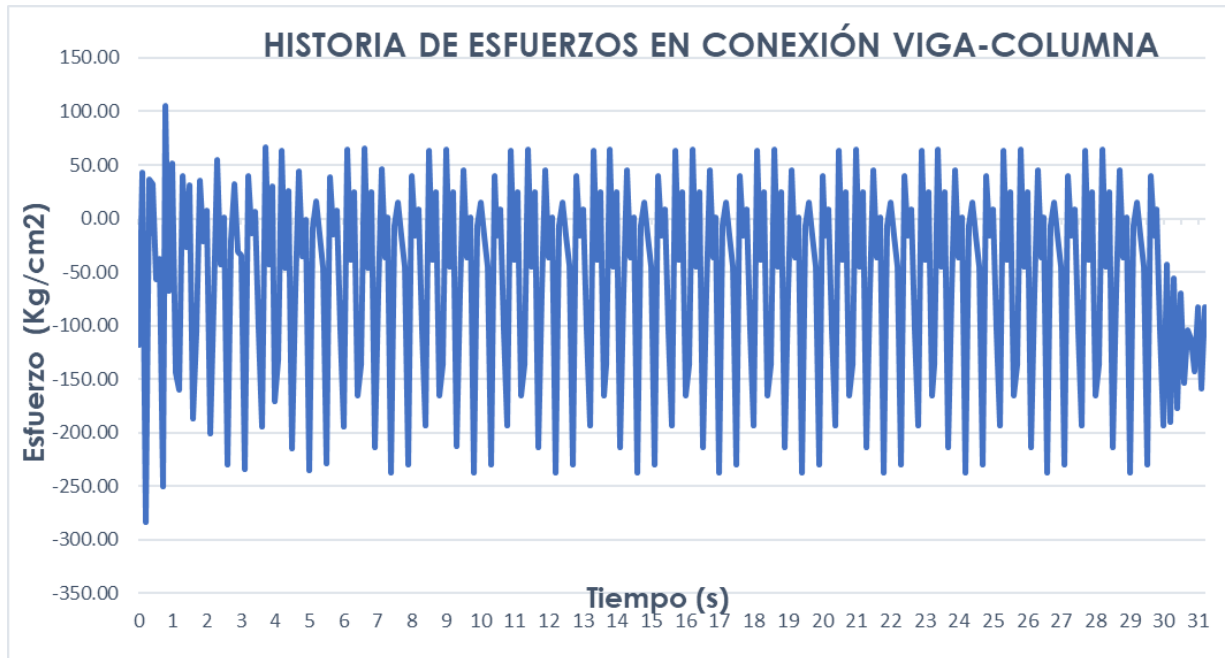


Figura 4 - 22. Historia de esfuerzos de amplitud variable para el detalle de conexión estudiado (interfaz patín superior de viga-placa de momento), con una duración de 31.0 segundos.

Con los resultados obtenidos, fue posible aplicar los diversos algoritmos para conteo y simplificación de ciclos de amplitud variable que seleccionamos en esta investigación, mediante los cuales, se obtuvieron los rangos o carreras de esfuerzos que en última instancia permitieron aplicar dos metodologías (una de aproximación de daño acumulado linealmente, y una para aproximación de daño acumulado no lineal), como se detallará a continuación para poder realizar finalmente una comparación costo-beneficio para cada combinación analizada.

4.6. ALGORITMOS UTILIZADOS PARA EL CONTEO DE CICLOS

4.6.1. Aspectos generales

Los procedimientos disponibles para el conteo de ciclos se usan para sintetizar historias irregulares de registros del tipo carga vs tiempo, donde la carga puede denotar fuerzas, deformaciones, momentos, aceleraciones, deflexiones, esfuerzos u otros parámetros de interés. El objetivo de estas prácticas es definir el número de veces que los ciclos de distintas magnitudes ocurren (E08 Committee, 2017).

En este trabajo, para el caso de estudio presentado el parámetro de nuestro interés resulta ser la magnitud del esfuerzo actuando en el punto o detalle particular de la estructura estudiada, resultando en un registro en función del tiempo mejor conocido como “historia de esfuerzos” o bien, “espectro de esfuerzos”.

En la práctica, una historia de esfuerzos es, por lo general un registro extenso con un gran número de datos disponibles con la forma tiempo vs esfuerzo (figura 4-22), cuya principal característica en aplicaciones de ingeniería consiste en que las magnitudes de los esfuerzos tienen una amplitud variable, por lo que se vuelve imprescindible la tarea de simplificar la información de dicho espectro mediante la aplicación de algoritmos de conteo de ciclos (Cycle Counting) que el ingeniero o investigador considere más adecuado para poder trabajar la información de manera práctica (figura 4-23).

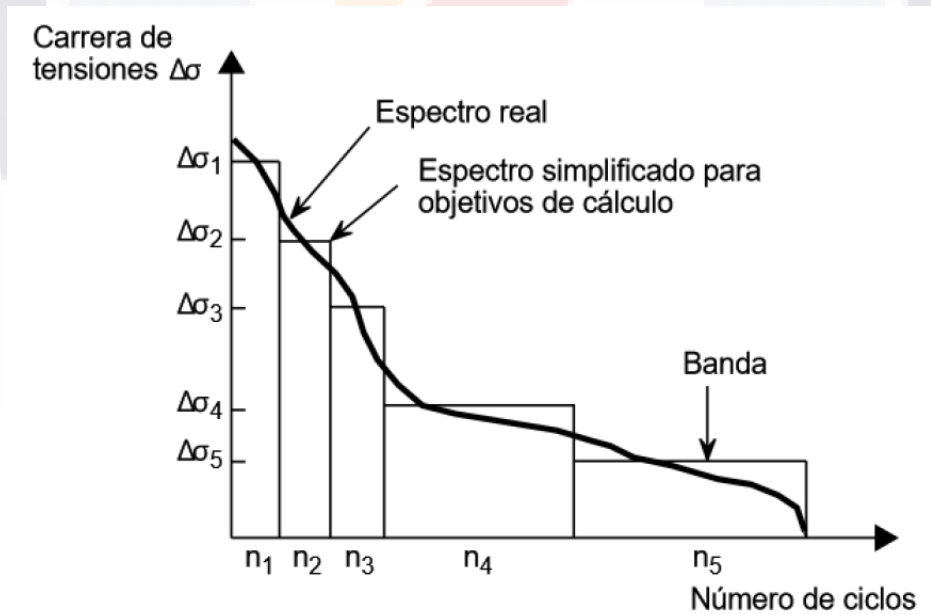


Figura 4 - 23. Simplificación de la historia de esfuerzos o espectro de tensiones (NTC Acero, 2020).

Finalmente, con la información simplificada generalmente en bloques de ciclos de amplitud constante en un tiempo estudiado, se disponen las frecuencias de ocurrencia para determinada magnitud o rango de esfuerzo de amplitud constante, las cuales pueden usarse por ejemplo, para la ejecución de análisis estadísticos de confiabilidad en componentes, el diseño mecánico de piezas sujetas a tensión, cortante, etc. y para la estimación del daño acumulado por fatiga con el que cada bloque de esfuerzos de amplitud constante contribuirá para llevar un componente o una estructura a la falla por fatiga.

Los métodos que se describirán a continuación, sobre los cuales se fundamenta la metodología buscada en esta investigación, fueron aplicados según las establecido en el ASTM E1049-85, que aborda las prácticas estandarizadas para el conteo de ciclos en análisis por Fatiga. Es importante aclarar que dichas prácticas no pretenden recomendar algún método en particular, y tampoco toman en cuenta factores de seguridad adecuados a ninguna aplicación en particular, por lo que es responsabilidad del usuario la elección y aplicación del método (E08 Committee, 2017).

Hoy en día, se cuenta con un buen número de métodos estandarizados por organismos internacionales como el American Society for Testing and Materials (ASTM) que pueden ser aprovechados en distintas aplicaciones de la ingeniería, por tanto, la intención de aplicar estas herramientas radicó en poder evaluar y comparar la practicidad, pros y contras de la utilización de cada algoritmo en el caso práctico de estudio y poder definir dentro de estas opciones cuáles representan alternativas más adecuadas para una estructura del tipo edificación, abriendo el abanico de opciones a las tradicionalmente tomadas en cuenta por los códigos y normativas aplicables a la fatiga en edificaciones.

4.6.2. Métodos de doble parámetro

La principal característica que diferencia a los *métodos o algoritmos de doble parámetro* para la cuantificación y simplificación de ciclos de amplitud variable consiste en la posibilidad de poder obtener no solo cada ciclo y la magnitud de su

rango, sino también el valor de la media de cada ciclo por medio del mismo procedimiento estandarizado.

Existe un gran número de métodos de doble parámetro, todos ellos similares, mas no iguales al “Rainflow Method” (E08 Committee, 2017) cuyos resultados pueden asemejarse hasta cierto punto dependiendo de las características y disposición de la historia de cargas, pero pueden resultar más o menos adecuados para su uso dependiendo de la aplicación práctica para la que son empleados.

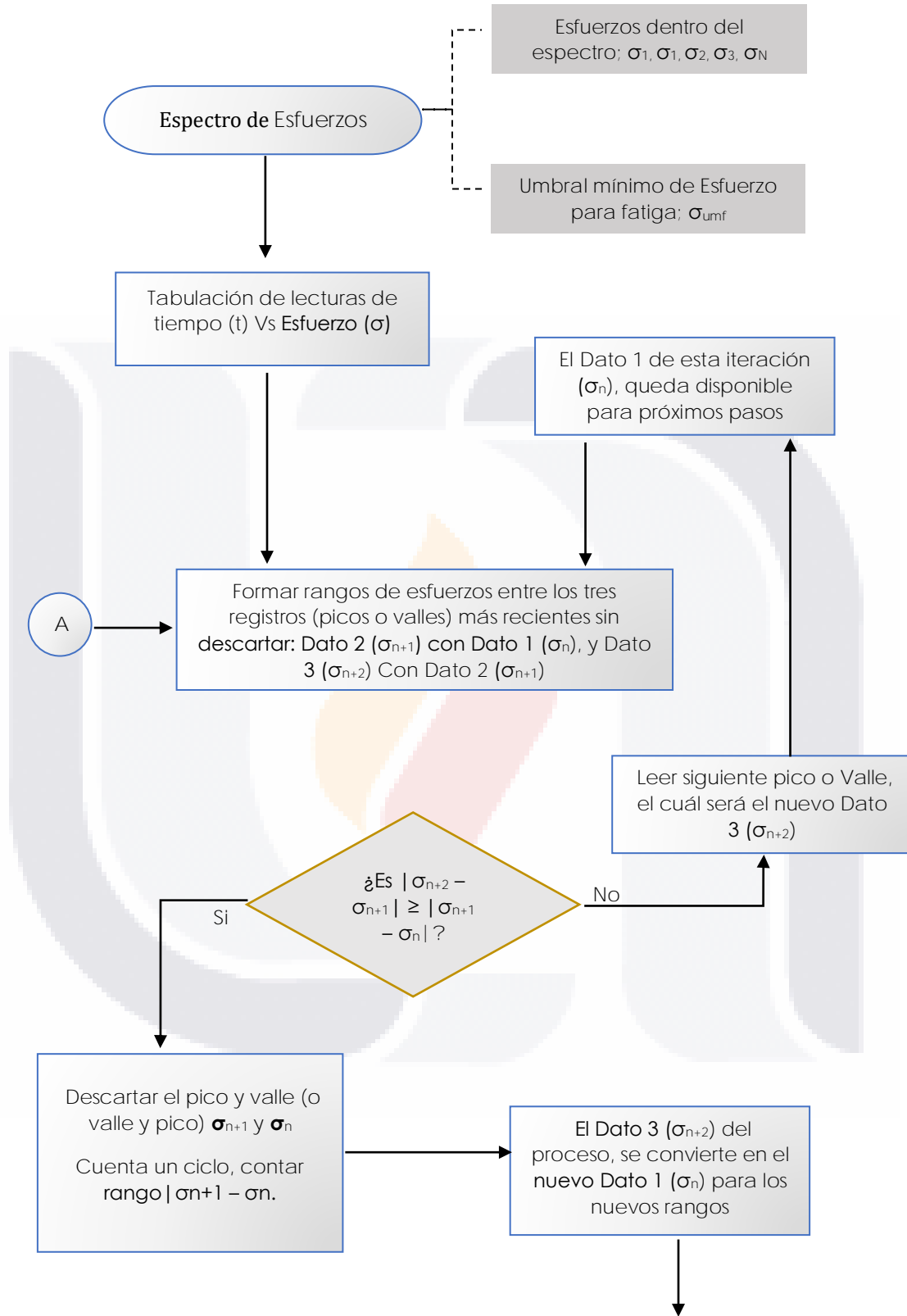
En la presente investigación se desarrollan y prueban dos de estos métodos: El *Rainflow Cycle Counting*, que representa posiblemente el método más ampliamente utilizado en diversas aplicaciones y el único mencionado por las NCT Acero y el *Range-Pair Counting* como una alternativa al *Rainflow Cycle Counting*.

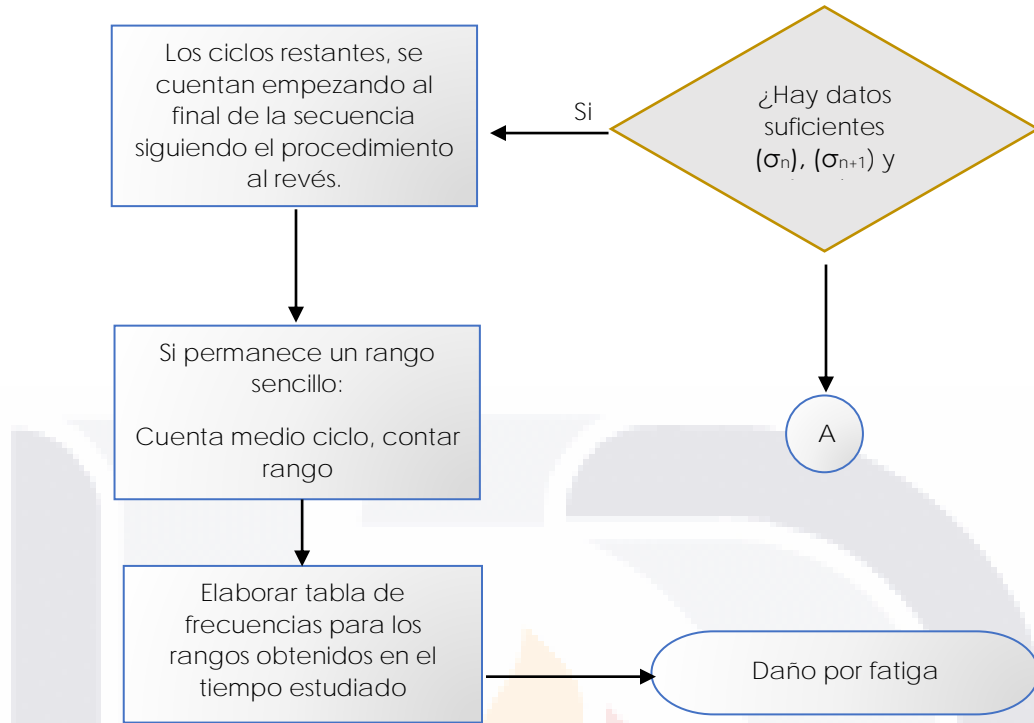
4.6.2.1. Range-Pair Counting

Este método es relativamente sencillo de aplicar, ya que cuenta un rango de carga dado (un rango de esfuerzo para nuestra investigación) como un ciclo, siempre y cuando dicho rango pueda ser emparejado con la carga subsecuente registrada en la historia de esfuerzos, pero de sentido contrario.

Las reglas para aplicar el método se describen en el siguiente diagrama de flujo:

Diagrama 1. Algoritmo para conteo de ciclos por Range-Pair Counting.





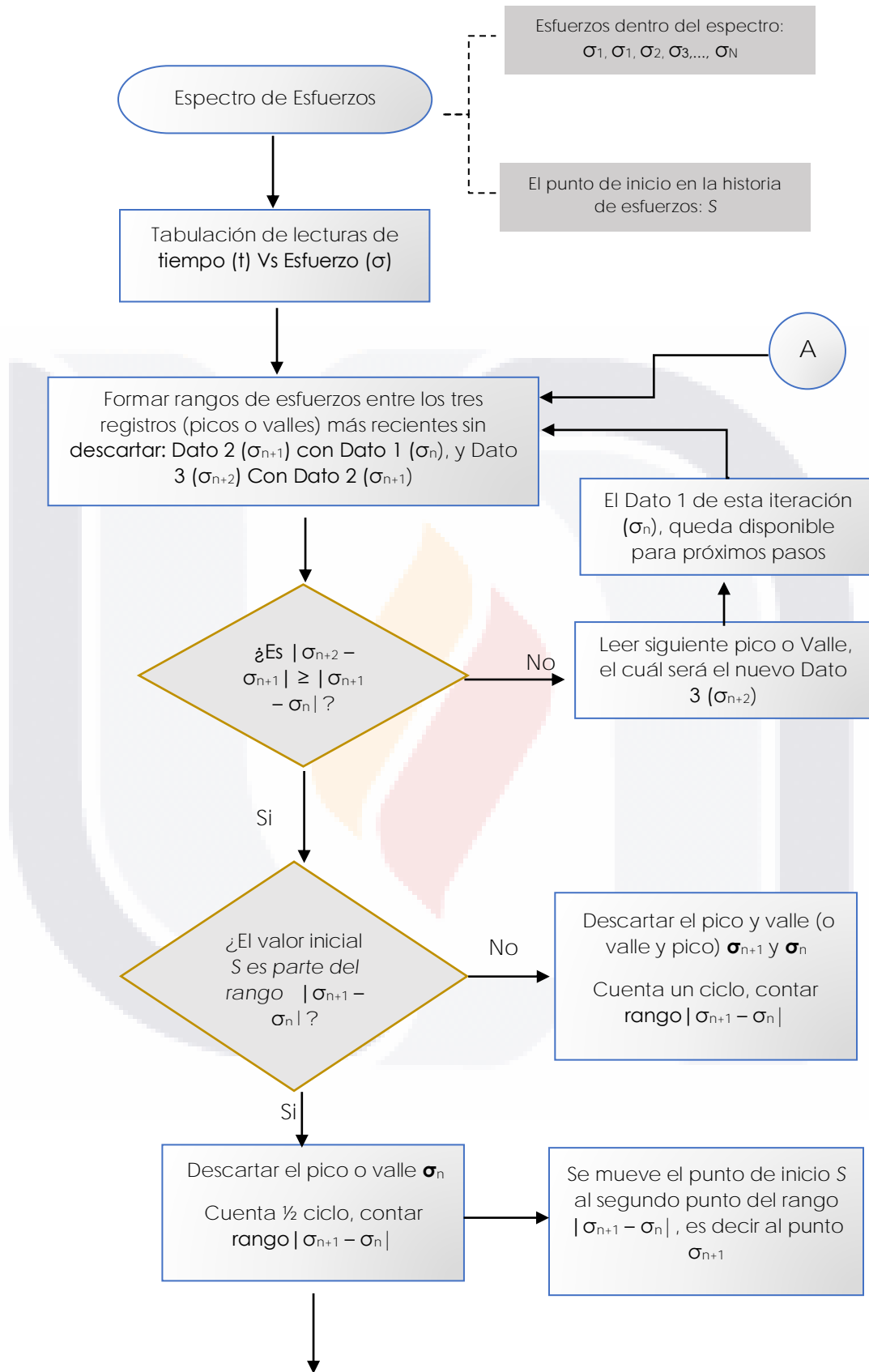
4.6.2.2. Rainflow Cycle Counting

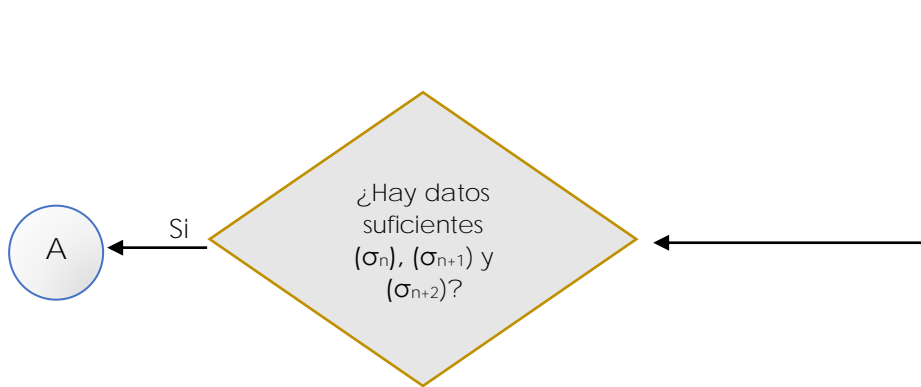
Se trata del más extensamente usado método para conteo de ciclos. Esta estimación cuenta el número de bucles de histéresis para la variación de esfuerzo-deformación en el tiempo.

El método requiere que la historia de esfuerzos sea primeramente convertida únicamente a registros de picos y valles, reacomodados de tal manera que el registro comience con el valor de mayor magnitud en valor absoluto, derivado ya sea a partir del pico de mayor amplitud o con el valle de mayor amplitud en sentido contrario con respecto al pico.

Las reglas para aplicar el método se describen en el siguiente diagrama de flujo:

Diagrama 2. Algoritmo para conteo de ciclos por Rainflow-Cycle Counting.





4.6.3. Métodos de un parámetro

Análogamente, cuando el valor de la media para cada ciclo cuantificado no es de relevancia en el procedimiento, y, por tanto, no es tomado en cuenta en ningún punto del algoritmo, dichos métodos son referidos como métodos de un solo parámetro.

En la presente investigación se explican tres de los algoritmos disponibles de un parámetro para su comprensión, de los cuales se desarrollan y aplican dos en el desarrollo del trabajo: El Peak Counting y el Simple Range Counting.

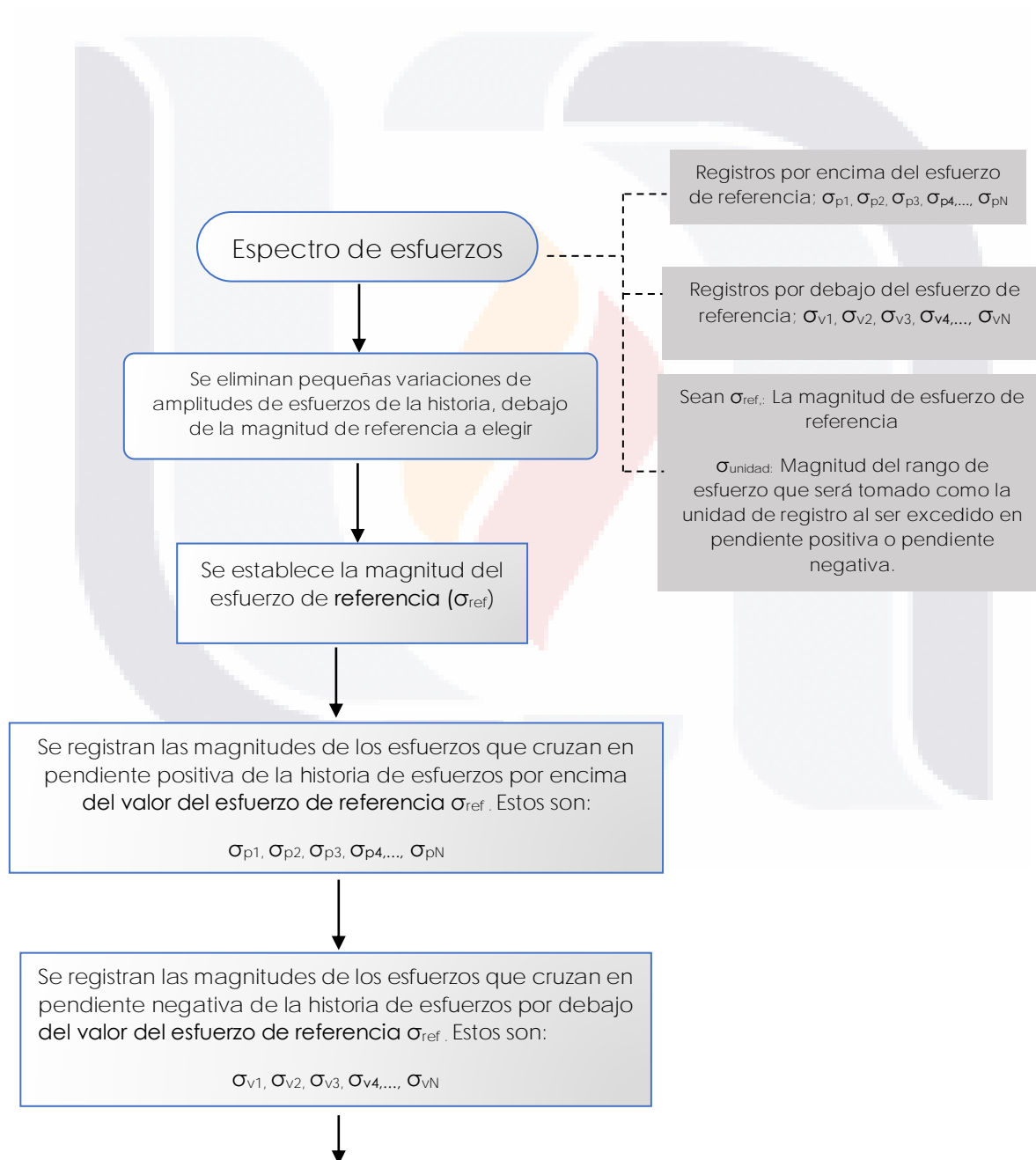
4.6.3.1. Level-Crossing Counting

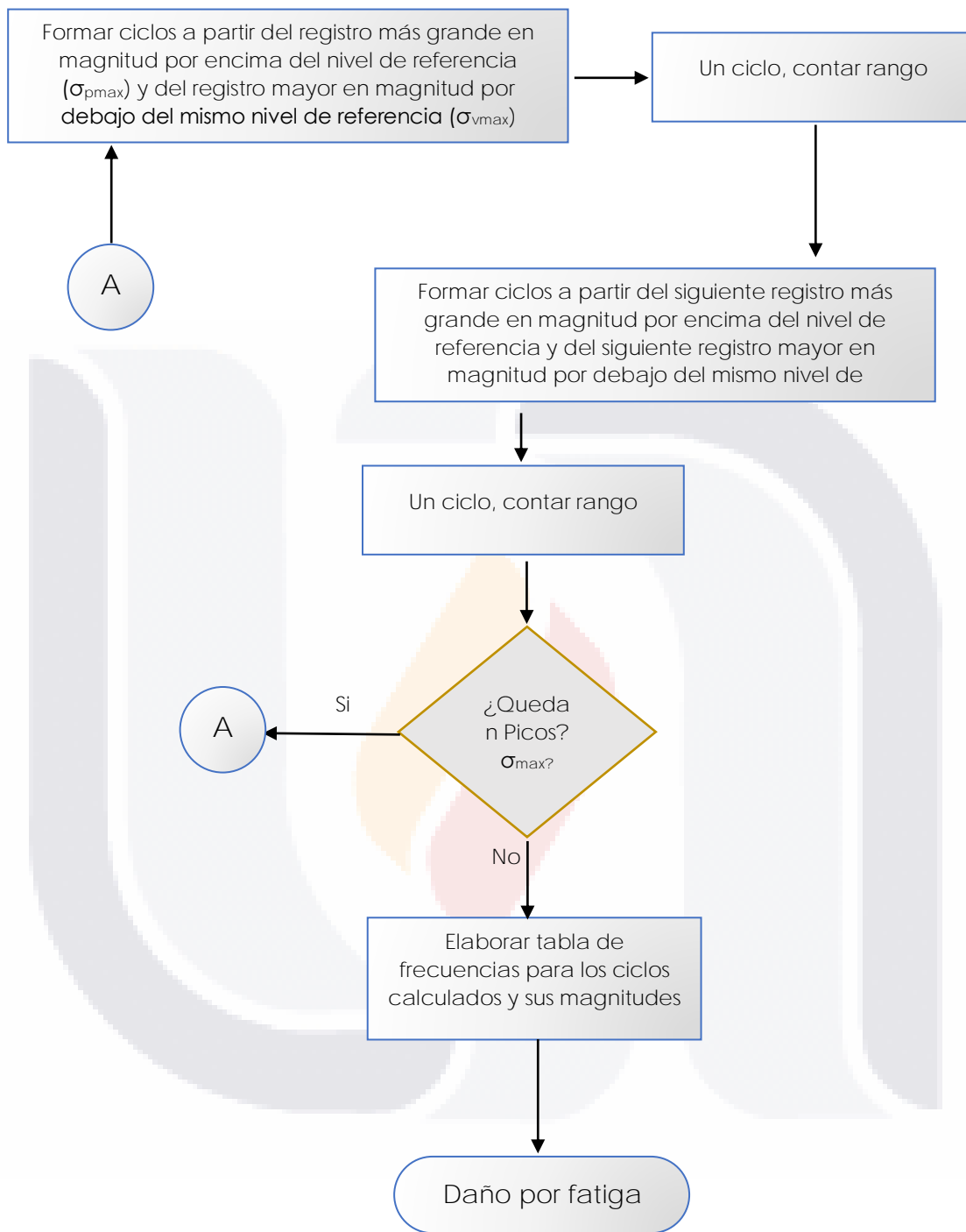
Para este método, una unidad de carga es cuantificada cada vez que la pendiente positiva de la carga en la historia de esfuerzos excede un rango de esfuerzo predefinido por encima de la magnitud de referencia (por ejemplo, cero). De manera análoga, cuando la pendiente negativa de la carga en la historia de esfuerzos excede un rango de esfuerzos predefinido, pero por debajo de la magnitud de referencia, se cuantificará una unidad para el valor de carga predefinido en este caso.

Pequeñas variaciones en las amplitudes de las cargas pueden elevar demasiado los conteos para este método, por lo que se recomienda filtrar registros de carga pequeños y esporádicos.

El conteo de ciclos más crítico para el posterior análisis por fatiga aplicando Level-Crossing Counting se deriva construyendo en una primera instancia el ciclo más amplio posible, esto es, una variación de carga desde un valor dado, llegando a un máximo, bajando a un mínimo y regresando al valor inicial. Se continúa con el segundo ciclo más amplio posible hasta terminar con los datos disponibles.

Diagrama 3. Algoritmo para conteo de ciclos por Level-Crossing Counting.





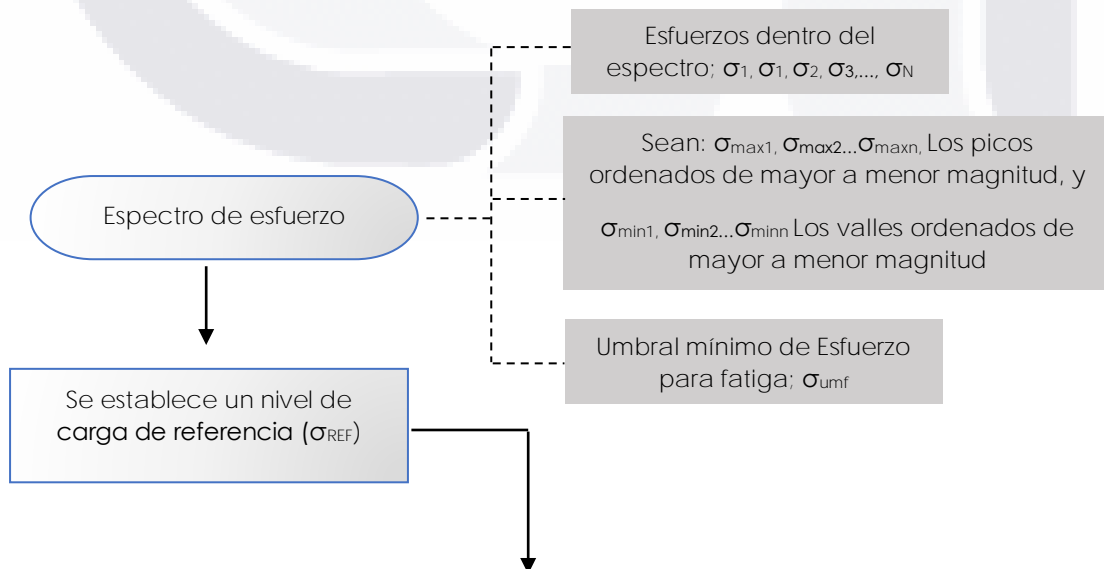
4.6.3.2. Peak-Counting

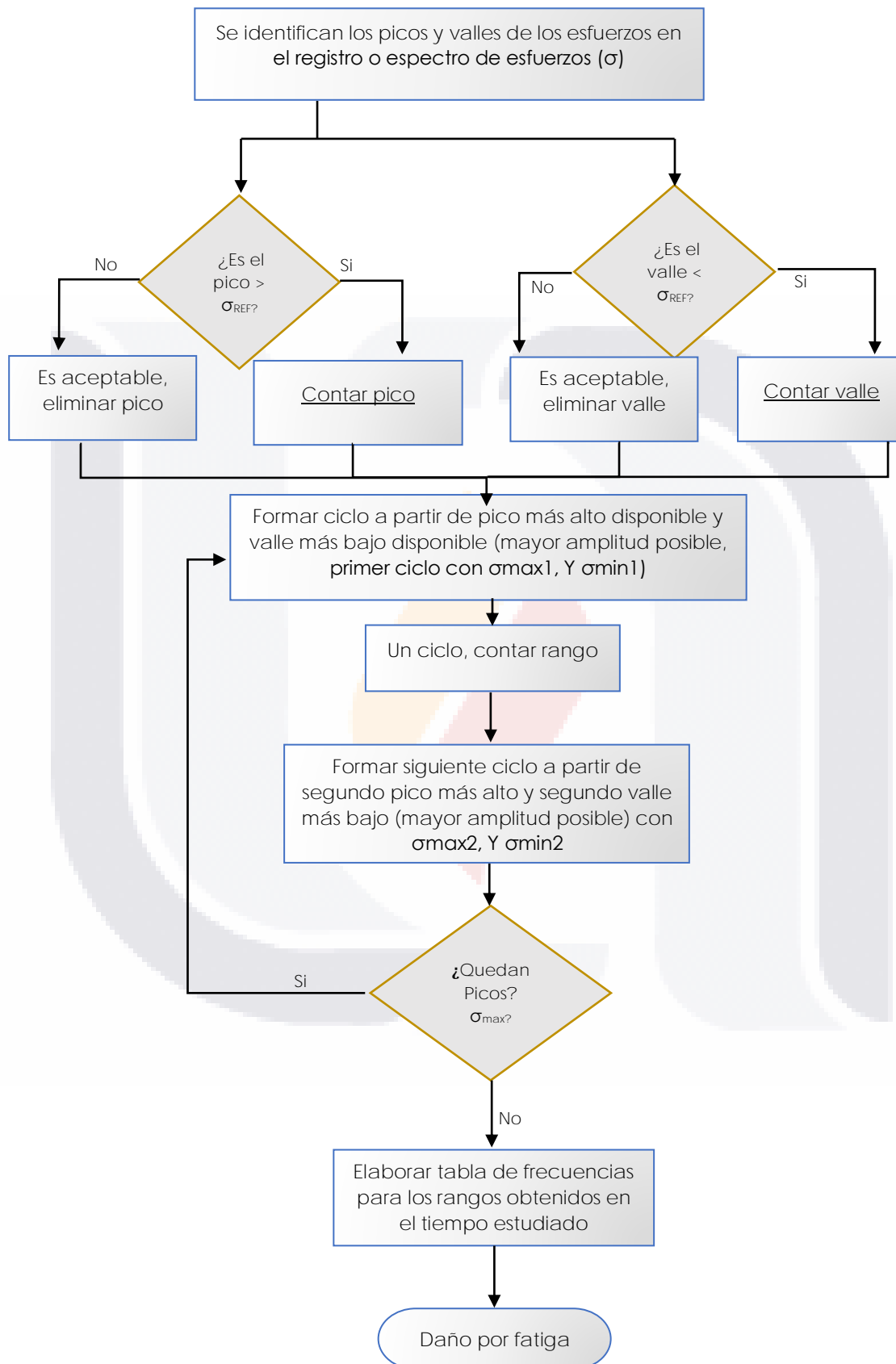
La alternativa de conteo de ciclos por Peak-Counting, identifica la ocurrencia de valores de carga máximos o mínimos relativos, esto es, contando todos los picos por encima de un nivel de carga de referencia, y a su vez, contando todos los valles por debajo del mismo nivel de referencia. Así, todos los valles por encima del nivel de referencia y los picos por debajo del mismo, quedarán excluidos del conteo.

En este caso, el conteo de ciclos más crítico para tomar en cuenta el daño acumulado por fatiga, resulta formando el primer ciclo a partir del pico de magnitud más grande y el valle de magnitud más baja (o más alta con signo invertido respecto al pico). Posteriormente, de manera similar se elige el segundo ciclo a partir de la elección del segundo pico de magnitud más alta y el segundo valle con magnitud más baja, continuando con este proceso sucesivamente hasta terminar con todos los picos de la historia de cargas estudiada.

Es preciso notar que los ciclos pueden tomarse de la historia de esfuerzos independientemente de su posición en la sucesión de picos y valles, por lo cual la elección del orden deseado para la formación de ciclos podría tener un efecto de variación en la cuantificación del daño acumulado, dependiendo de la cantidad de datos analizada.

Diagrama 4. Algoritmo para conteo de ciclos por Peak Counting.





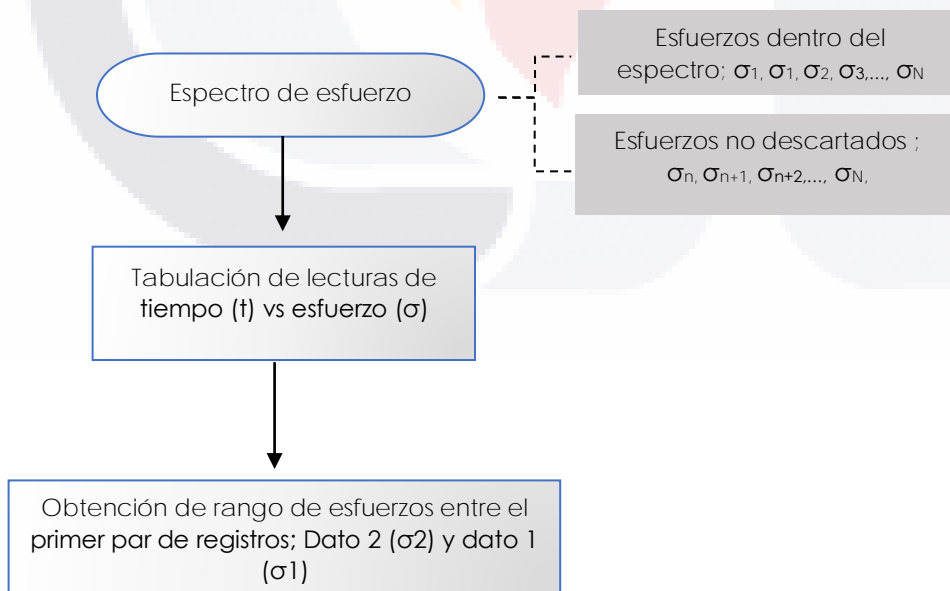
4.6.3.3. Simple-Range Counting

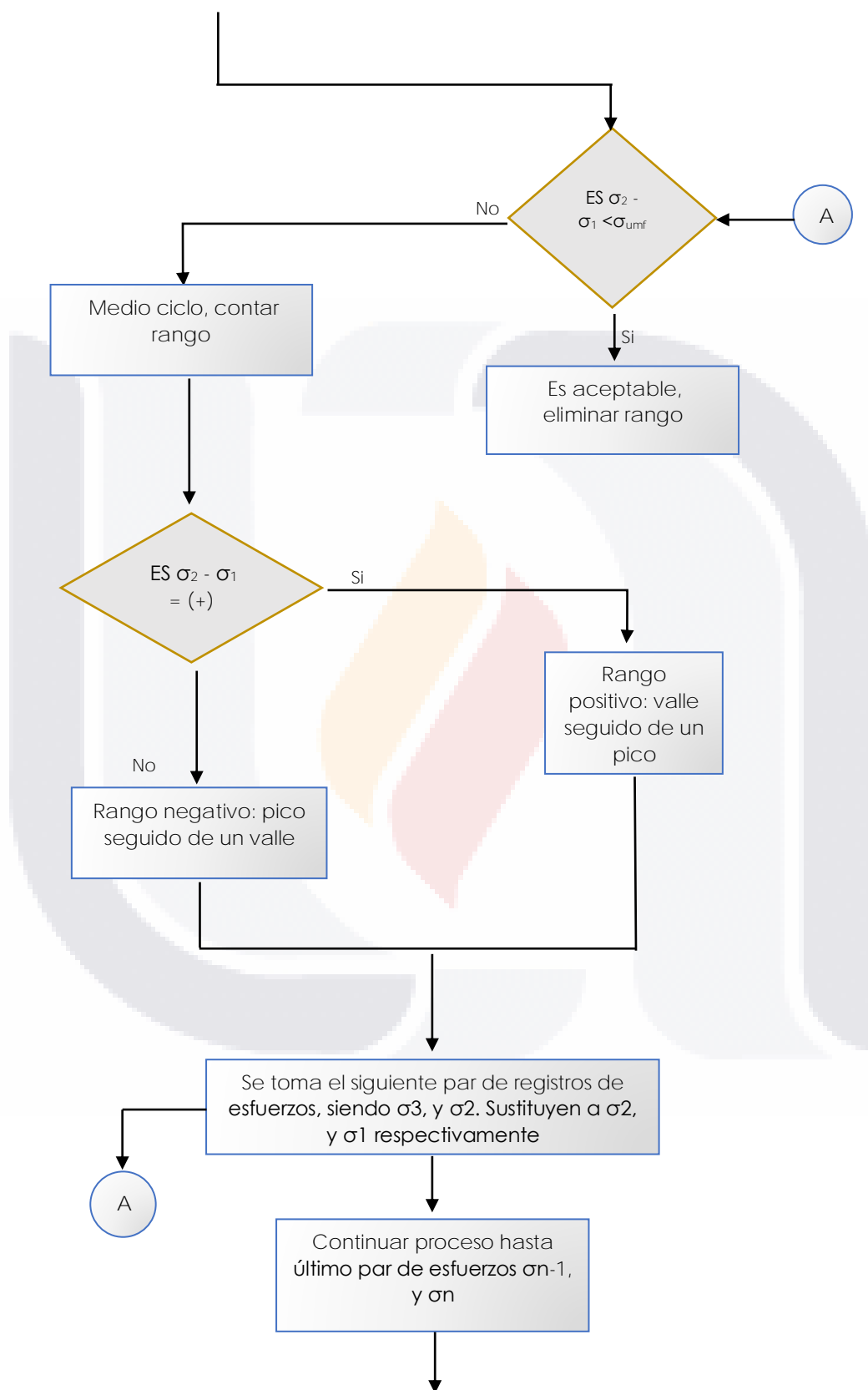
Usando este método, se define un rango como la diferencia entre dos inversiones sucesivas de la historia de cargas, es decir, entre un pico y un valle, o bien, entre un valle y un pico sucesivos. Se definirá de esta manera un rango positivo cuando después de un valle existe un pico, y se definirá un rango negativo cuando de un pico sigue un valle.

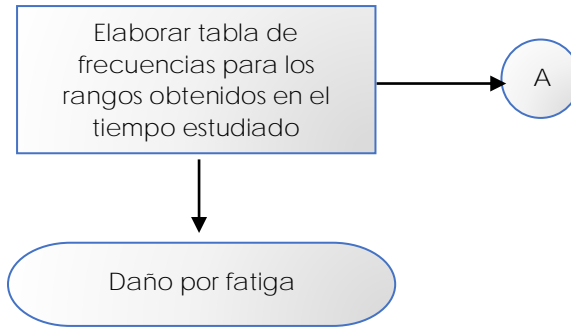
Si solo se toman en cuenta rangos positivos o negativos, lo cual es una opción para el conteo en este método, entonces cada conteo significará 1 ciclo de carga. Por otro lado, si se cuentan rangos positivos y negativos, entonces cada uno se toma en cuenta como medio ciclo.

Para evitar trabajo innecesario en el análisis por fatiga, rangos de carga menores a una magnitud establecida, se eliminan antes de realizar el conteo de ciclos

Diagrama 5. Algoritmo para conteo de ciclos por Simple-Range Counting.







4.6.4. Programación de algoritmos para conteo de ciclos

Para aplicar los métodos de simplificación de ciclos de amplitud constante descritos en los apartados 4.6.2 y 4.6.3 a una historia o bloque de esfuerzos y particularmente a nuestro caso práctico de estudio fue necesario realizar la programación de los algoritmos siguiendo el flujo mostrado para cada uno de ellos. Es importante enfatizar el hecho de que algunos de los métodos, sobre todo los de parámetro simple podrían aplicarse de una manera relativamente sencilla siguiendo un procedimiento algebraico manual, no obstante, debemos tener en mente que la aplicación de dichos algoritmos en la práctica se efectúa sobre bloques de historias de esfuerzos con alta complejidad incluyendo cientos o miles de datos en su registro. Por tanto, se utilizaron principalmente dos herramientas computacionales para la programación y aplicación semiautomatizada de los algoritmos para conteo de ciclos que evaluaríamos en nuestra investigación: La implementación de código programado en Python y el desarrollo de hojas de cálculo apoyadas por Macros en Microsoft Excel.

El lenguaje Python de código abierto, se utilizó para la programación del Rainflow Cycle Counting Method. Dado que Python es un lenguaje de programación de código abierto, existen un sinnúmero de herramientas de libre uso disponibles para facilitar una amplia variedad de aplicaciones en estadística, finanzas, ingeniería, entre otras mediante el uso de librerías (McKinney, 2022), entre ellas la librería “Rainflow” (Riker, 2015) la cual, corre una parte importante del procedimiento iterativo explicado en el apartado 4.6.2.2.

El trabajo de adaptación consistió en integrar la librería Rainflow a un código que permitiera leer una historia tiempo vs esfuerzo tabulada desde un archivo con formato del procesador de datos al que se importó la historia de esfuerzos derivada del modelo del caso práctico de estudio de ETABS, en este caso a Excel. Así mismo, ajustes en la parte de información gráfica otorgada por el código como la gráfica de la historia de esfuerzos y la información de salida únicamente definida para los datos de nuestro interés, como los rangos de esfuerzos, valor de la media y el conteo de ciclos fueron definidos en el código finalmente adaptado (figura 4-24). En la figura 4-25 se muestra la primer parte del conteo de ciclos arrojado por el código señalado como información de salida.

```
import pandas as pd
import matplotlib.pyplot as plt
import rainflow
import numpy as np

df = pd.read_csv("esfuerzo.csv", sep = ",")
signal = np.array([df])

#La función count_cycles devuelve una lista ordenada de rangos
# y el número correspondiente de ciclos:

rainflow.count_cycles(signal)

#define los titulos de los ejes para la grafica
df.plot(x='tiempo', y='momento')

# Dibujar grafica
plt.figure(1,figsize=(6.5,3.5))
plt.grid('on')
plt.xlabel('Tiempo(seg)')
plt.ylabel('Esfuerzo(kg/cm2)')
plt.title('Historia de esfuerzos - conexión viga / columna')
plt.tight_layout()

print("rng, mean, count")
print("-----")
for rng, mean, count, i_start, i_end in rainflow.extract_cycles(signal):
    print('{:7.1f}{:8.3f}{:8.1f}'.format( rng,mean,count))
```

Figura 4 - 24. Fragmento de código en Python para conteo de ciclos por el método “Rainflow Cycle Counting”.


```

IPython 7.34.0 -- An enhanced Interactive Python.

In [1]: runfile('C:/Users/gabri/Documents/pythonproject/rainflowJunio202
rainflow-main/rainflow-main/src/datos.py', wdir='C:/Users/gabri/
Documents/pythonproject/rainflowJunio2023/rainflow-main/rainflow-main/
src')
Rango, Media, Ciclos
-----
118.4 -59.185 0.5
162.0 -37.380 0.5
324.7-118.720 0.5
29.2 -7.105 1.0
109.5 -54.075 1.0
19.5 0.705 1.0
126.4 -62.005 1.0
3.8 -0.575 1.0
29.5 -13.155 1.0
131.7 -64.145 1.0
161.2 -58.570 1.0
165.3 -57.805 1.0
218.4 -52.115 1.0
65.1 -9.774 1.0
48.6 -22.124 1.0
10.0 -2.493 1.0
33.0 -13.897 1.0
27.8 -11.191 1.0
219.9 -93.697 1.0
11.9 -2.959 1.0
68.7 -31.268 1.0
1.8 4.224 1.0
6.3 0.352 1.0
112.6 -52.716 1.0
    
```

Figura 4 - 25. Fragmento de datos de salida para el conteo de ciclos obtenido por Rainflow Cycle Counting, a partir de código de Python.

Paralelamente, se desarrollaron en Excel hojas de cálculo con la capacidad de correr los algoritmos de conteo de ciclos restantes; es decir, el Peak Counting, el Simple Range Counting y el Range Pair Counting, esto para historias de esfuerzos de cualquier extensión y características que cumplan con las recomendaciones y limitaciones dictadas por los estándares ASTM E1049-85. Las herramientas fueron desarrolladas a partir de funciones disponibles en la base de datos del programa y de la integración de algunas macros que permitieron correr parte de los procesos cíclicos de los algoritmos de manera más sencilla.

Durante los trabajos de programación de las hojas, se valoró la posibilidad de trabajarlas en otro tipo de procesador de matemáticas para la ingeniería, como lo

es Mathcad, sin embargo, se consideró que al formar parte de la paquetería Office, el Excel sigue siendo hoy en día la herramienta para procesamiento de datos de mayor alcance entre los ingenieros civiles en México. Consecuentemente, a partir del desarrollo del presente trabajo, las hojas programadas usando dicho programa, el cual es de fácil acceso para cualquier profesional podrían ser entendidas por la mayoría de las personas desde sus entrañas si se conocen los estándares en los que están basadas, con la posibilidad de fungir como base para adaptarlas y mejorarlas en cualquier otro software como Mathcad.

El resultado permitió primeramente la ubicación visual y rápida de errores e inconsistencias durante el trabajo de programación, hasta lograr un producto terminado que permitió la entrada de datos de la historia de esfuerzos y la manipulación de los resultados de manera sencilla y clara, logrando finalmente la estimación de ciclos de amplitud constante mediante los cuales podrá efectuarse la revisión del detalle estudiado estimando el tiempo necesario para su falla por fatiga (figura 4-26).

En resumen, los códigos y hojas de cálculo generados permiten sintetizar numerosas series de bloques de historia de esfuerzos, simplificando, cuantificando y tabulando los resultados derivados de cada procedimiento para el conteo de ciclos de amplitud variable que pueden ser aprovechados en diversas aplicaciones; para nuestro caso, la estimación de la fatiga en la estructura estudiada.

TRATAMIENTO DE HISTORIA DE ESFUERZOS MÉTODO RANGE PAIR - COUNTING (ASTM E1049-85-2017) MACRO COMPARATIVA													REV: 04		FECHA: JUN 23	
m	Paso	# Dato P1	P1	P2	# Dato P2	P3	# Dato P3	Y (Rango)	X	¿X>Y?	# Ciclos	Discard Pick/Valley	# Next P1	P1 Pend	P1 Pend es ¿1/2 CICLO?	# Ciclos
-	1	1	-3.948	1.4433	2	-9.4536	3	5.39	10.90	S	1	1	2	3		
+	2	3	-9.454	1.217	4	-1.9033	5	10.67	3.12	N	0		4	3	S	0
+	3	4	1.217	-1.9033	5	-1.2397	6	3.12	0.66	N	0		5	4	N	0
+	4	5	-1.903	-1.2397	6	-8.3708	7	0.66	7.13	S	1	5	6	3		0
+	5	3	-9.454	1.217	4	-8.3708	7	10.67	9.59	N	0		4	3	S	0.5
+	6	4	1.217	-8.3708	7	3.5208	8	9.59	11.89	S	1	4	7	8		0
+	7	8	3.521	-2.2451	9	1.7199	10	5.77	3.97	N	0		9	8	S	0
+	8	9	-2.245	1.7199	10	-5.3498	11	3.97	7.07	S	1	9	10	8		0
+	9	8	3.521	-5.3498	11	1.3153	12	8.87	6.67	N	0		11	8	S	0.5
+	10	11	-5.350	1.3153	12	-0.9129	13	6.67	2.23	N	0		12	11	N	0
+	11	12	1.315	-0.9129	13	1.0346	14	2.23	1.95	N	0		13	12	N	0
+	12	13	-0.913	1.0346	14	-6.2338	15	1.95	7.27	S	1	13	14	11		0
+	13	11	-5.350	1.3153	12	-6.2338	15	6.67	7.55	S	1	11	12	15		0
+	14	15	-6.234	1.1892	16	-0.7348	17	7.42	1.92	N	0		16	15	N	0
+	15	16	1.189	-0.7348	17	0.2343	18	1.92	0.97	N	0		17	16	N	0
+	16	17	-0.735	0.2343	18	-6.7021	19	0.97	6.94	S	1	17	18	15		0
+	17	15	-6.234	1.1892	16	-6.7021	19	7.42	7.89	S	1	15	16	19		0
+	18	19	-6.702	1.8314	20	-1.43	21	8.53	3.26	N	0		20	19	N	0
+	19	20	1.831	-1.43	21	0.0361	22	3.26	1.47	N	0		21	20	N	0
+	20	21	-1.430	0.0361	22	-7.6593	23	1.47	7.70	S	1	21	22	19		0
+	21	19	-6.702	1.8314	20	-7.6593	23	8.53	9.49	S	1	19	20	23		0
+	22	23	-7.659	1.0696	24	-7.8212	25	8.73	8.89	S	1	23	24	25		0
+	23	25	-7.821	1.3201	26	-0.4717	27	9.14	1.79	N	0		26	25	S	0

Figura 4 - 26. Fragmento de programación en Excel para conteo de ciclos (Método Range Pair). Los pasos y resultados del algoritmo pueden visualizarse paso a paso y pueden aplicarse a extensos registros de historia de esfuerzos.

4.7. APROXIMACIONES USADAS PARA ESTIMAR DAÑO ACUMULADO

4.7.1. Consideraciones preliminares

El objetivo fundamental del análisis por fatiga en estructuras y componentes mecánicos es el de poder llegar a estimar de manera confiable el tiempo de vida útil esperado para el elemento revisado según las condiciones de cargas de amplitud variable bajo las cuales esté sometido el detalle durante su operación o uso. En términos sencillos, "el daño por fatiga en materiales y componentes aumenta de forma acumulativa en relación con el número de ciclos de carga aplicados hasta conducir a la falla" (Luna et al., 2017).

Como se explicó en el apartado 3.5., los códigos estandarizados de diseño de mayor alcance en México y la región como las NTC Acero 2020 o el AISC 360-16 (ANSI/AISC, 2016) han presentado metodologías para estimar la acumulación del daño y el tiempo de vida para diversos detalles estructurales, basados en curvas S-N disponibles combinados con la aplicación de la regla de Palmgreen-Miner (en adelante referida como regla de Miner) para la estimación del daño acumulado linealmente (Souto et al., 2019). Como se detallará en el siguiente apartado, la regla de Miner para estimar el daño por fatiga tiene la característica de proponer cálculos simples y por tanto es de fácil uso y aplicación, por lo que ha sido ampliamente usada en la predicción de vida esperada por fatiga en componentes y estructuras. Sin embargo, esta estimación ignora la secuencia de cargas y la interacción entre ellas en la historia de esfuerzos, de manera que no puede garantizar la exactitud en la predicción de la vida por fatiga y por tanto, podría no ser adecuada para algunos problemas de ingeniería (Huang et al., 2021).

Así, con el propósito de superar algunas de las deficiencias inherentes a las consideraciones de la estimación de daño por la regla de Miner, han surgido diversas teorías para estimar la acumulación de daño no linealmente. Como explica Huang (2021), de acuerdo con las investigaciones disponibles, las teorías de daño por fatiga no lineal se dividen en tres categorías: aquellas que consideran la interacción entre las cargas, aquellas basadas en el método de la curva de daño y finalmente, las basadas en métodos energéticos.

En este trabajo de investigación, se decidió aplicar al menos un método de acumulación de daño no lineal, con el propósito de poder esbozar una idea cuando menos general, sobre los posibles beneficios, o quizás perjuicios que pudiera tener incursionar en estas teorías ni siquiera mencionadas en las NTC o en el AISC como alternativas a aplicar en el diseño de estructuras de ingeniería civil a la tradicional regla de acumulación de daño lineal de Miner.

Así, se optó por aplicar el método de Manson-Halford tradicional, el cual se desarrollará más adelante conocido también como el “Enfoque de Curva de Acumulación de Daño” (DCA), ya que se encuentra dentro de las metodologías más aplicadas en trabajos comparativos y de investigación recientes en la materia (Huang et al., 2021) y (Luna et al., 2017).

4.7.2. Daño acumulado linealmente. Regla de Palmgreen-Miner

Para las carreras de esfuerzos (rangos) obtenidos a partir de la aplicación de los algoritmos de conteo de ciclos de amplitud constante de las cuatro aproximaciones estudiadas en esta investigación, se estimó el daño linealmente acumulado aplicando la regla de Palmgreen-Miner (Miner, 1945) la cual se resume en la Ecuación (5). En la figura 4-27, podemos observar de manera gráfica la concepción principal de esta propuesta, basada en el principio de independencia mutua del daño por fatiga, donde el daño de cada ciclo individual de esfuerzos n_i/N_i es acumulado linealmente integrando un daño total que define el estado del detalle revisado (Huang et al., 2021).

$$D = \sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_i} = 1 \tag{5}$$

Donde:

D = Daño acumulado linealmente por regla de Palmgreen-Miner

n_i = Número de ciclos estimados para el rango de esfuerzos "i" (derivados del total de historias de esfuerzos actuando sobre el detalle revisado).

N_i = Número de ciclos requeridos para la falla por fatiga dentro del rango de esfuerzos "i".

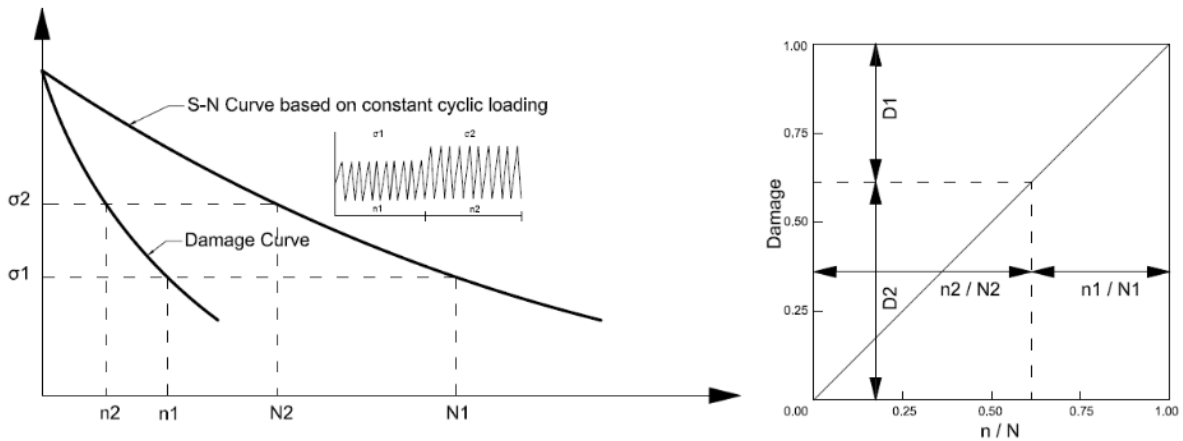


Figura 4 - 27. Regla de Palmgreen-Miner para daño acumulado linealmente. (Eljufout et al., 2019).

Los ciclos n_i corresponden a cada uno de los bloques de amplitud constante obtenidos a través del conteo y simplificación de ciclos para cada aproximación estudiada, mientras que los ciclos N_i para un rango de esfuerzos dado, refieren el número de ciclos necesarios para llevar un detalle particular a la falla por fatiga bajo cargas cíclicas de amplitud constante de la misma magnitud del rango revisado.

Como se analizó previamente, las curvas S-N que encontramos en diversos códigos y normativas de ingeniería y fichas técnicas de materiales ya han sometido desde probetas de acero hasta detalles estructurales o componentes mecánicos a pruebas experimentales mediante las cuales se obtiene el valor N_i . Por tanto, los datos que se usaron para obtener los ciclos N_i se obtuvieron por medio de las curvas S-N disponibles en las NTC (figura 3-2).

Finalmente, para la estimación del daño n_i , se empleó la ecuación D.2.1 de las NTC mostrada en la Ecuación (6). Para aplicar la ecuación D.2.1, se obtuvieron los parámetros para diseño por fatiga aplicables al detalle de conexión revisado en

nuestro caso práctico de estudio (figura 4-18 y figura 4-19) de la tabla D.2.2 de las NTC (figura 4-28) calculando el daño n_i/N_i generado por cada bloque de esfuerzos de amplitud constante.

$$F_{SR} = \left(\frac{C_f}{n_{SR}} \right)^{\frac{1}{m}} \times 70.3 \geq F_{TH} \quad (6)$$

Donde:

C_f = Constante tomada de la Tabla D.2.1 a D.2.7 (NTC Acero, 2020) (figura 4-28).

F_{SR} = Amplitud de esfuerzos permisibles (Kg/cm^2).

F_{TH} = Umbral de amplitud de esfuerzos permisibles máximo para el que la vida de diseño no está controlada por fatiga (Kg/cm^2) (figura 4-28).

n_{SR} = Número de ciclos de esfuerzos de amplitud constante durante el tiempo de uso o el total de la vida útil contemplada en el análisis.

m = Exponente que depende de la categoría en estudio (3 para todas las categorías excepto la F, será 6 para esta).

Tabla D.2.2 Parámetros para diseño por fatiga

Descripción	Categoría de esfuerzos	Constante C_f	Umbral F_{TH} MPa (kg/cm ²)	Punto potencial de iniciación de la grieta
SECCIÓN 3 – CONEXIONES SOLDADAS ENTRE COMPONENTES DE MIEMBROS ARMADOS				
3.1 Metal base y metal de soldadura en miembros sin elementos unidos a ellos, formados por placas o perfiles conectados con soldaduras longitudinales de penetración completa, con la raíz preparada para colocar una soldadura por el lado opuesto ("back gouged"), o unidas con soldaduras de filete continuas.	B	120×10^8	110 (1120)	La superficie o discontinuidades internas en la soldadura lejos de su extremo.
3.2 Metal base y metal de soldadura en miembros sin elementos unidos a ellos, formados por placas o perfiles conectados entre si con soldaduras longitudinales de penetración completa sin remoción de las placas de respaldo, o unidos con soldadura continua de penetración parcial.	B'	61×10^8	83 (840)	La superficie o discontinuidades internas en la soldadura, incluyendo la que liga las barras de respaldo.
3.3 Metal base en los extremos del metal de soldadura en agujeros de acceso para soldaduras longitudinales en uniones entre elementos que forman parte de miembros compuestos.	D	22×10^8	48 (490)	Desde la terminación de la soldadura hacia adentro del alma patin.
3.4 Metal base en extremos de segmentos longitudinales de soldadura de filete intermitentes.	E	11×10^8	31 (315)	En el material conectado, en los lugares de inicio y terminación de cualquier depósito de soldadura.
3.5 Metal base en los extremos de cubreplacas con soldadura de longitud parcial, más angostas que el patin, con extremos cuadrados o trapezoidales, con o sin soldaduras transversales en los extremos, y cubreplacas, más anchas que el patin, con soldaduras transversales en los extremos. Grueso del patin ≤ 20 mm	E	11×10^8	31 (315)	En el patin al pie de la soldadura en el extremo, en el patin en la terminación de soldaduras longitudinales o en el borde del patin con cubreplacas anchas.
Grueso del patin > 20 mm	E'	3.9×10^8	18 (180)	
3.6 Metal base en extremos de cubreplacas con soldadura de longitud parcial, más anchas que el patin, sin soldadura transversal en los extremos.	E'	3.9×10^8	18 (180)	En el borde del patin en el extremo de la soldadura de la cubreplaca.

Figura 4 - 28, Tabla D.2.2 Parámetros de diseño por fatiga para distintos detalles estructurales y categorías de esfuerzos (NTC,2020.)

4.7.3. Daño acumulado no lineal. Manson-Halford

Para poder realizar un análisis comparativo entre el método tradicional de estimación de daño lineal de Miner, se optó por aplicar también el método de "la Curva de Acumulación de Daño" de Manson y Halford (Manson & Halford, 1981). Esta aproximación tomó en cuenta el efecto de la secuencia los ciclos previos en la degradación del detalle de conexión estudiado.

Como ha sido descrito y estudiado en diversas investigaciones, es un hecho que los efectos que provocan la secuencia en que se aplican las cargas de operación y la interacción que se da entre estas en la vida útil de materiales metálicos, representa un problema esencial para el diseño de componentes de estructuras y maquinaria sometidos a cargas de amplitud variable (Luna et al., 2017).

En la figura 4-29 observamos la propuesta del método descrita por la Curva de Acumulación de Daño, que refleja el efecto del daño debido al ciclo n_1/N_1 en la curva de daño por fatiga (0 – A – B) para el material en el momento de ese ciclo, a un reajuste de la misma curva para el ciclo siguiente n_2/N_2 a (0 – A' – B') tomando en cuenta la degradación de la capacidad de la curva original por el daño previo.

La expresión del método se muestra en la Ecuación 7.

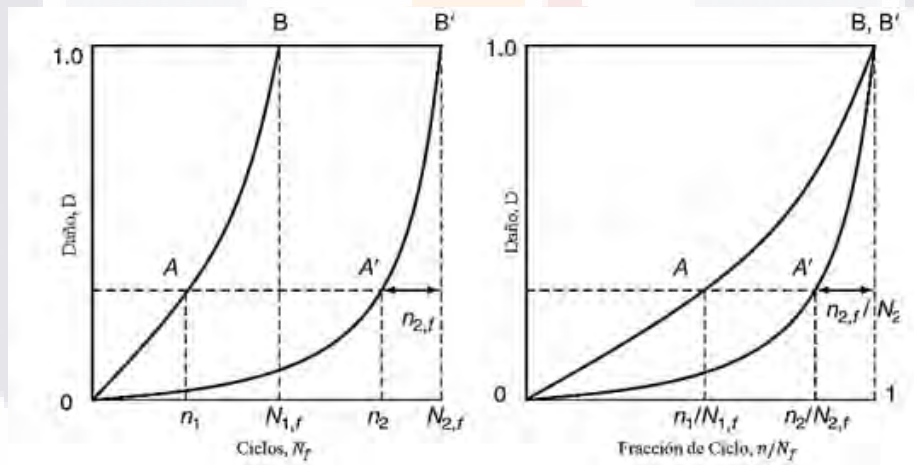


Figura 4 - 29. Curva de Acumulación de Daño. Método no lineal de Manson-Halford. (tomada de Luna, 2017.)

$$D_n = \left(\left(\left(\frac{n_1}{N_{f1}} \right)^{\left(\frac{N_{f1}}{N_{f2}} \right)^{0.4}} + \frac{n_2}{N_{f2}} \right)^{\left(\frac{N_{f2}}{N_{f3}} \right)^{0.4}} + \dots + \frac{n_{i-1}}{N_{f(i-1)}} \right)^{\left(\frac{N_{f(i-1)}}{N_{fi}} \right)^{0.4}} + \frac{n_i}{N_{fi}} \quad (7)$$

Donde:

n_i = Número de ciclos de esfuerzos de amplitud constante para el rango de esfuerzos i .

N_{fi} = Número de ciclos necesarios para llevar a la falla por fatiga el detalle revisado bajo el nivel de esfuerzos de amplitud constante n_i .

Más de 50 modelos de daño por fatiga han sido propuestos desde la introducción del concepto de acumulación de daño y la regla de Palmgreen-Miner. Sin embargo, en la actualidad ninguno de ellos goza de aceptación generalizada. Debido a la complejidad del comportamiento del fenómeno de fatiga, hasta ahora los modelos de predicción evalúan solamente uno o varios factores fenomenológicos inherentes al proceso de fatiga. Por tanto, la LDR sigue siendo el modelo más utilizado en el diseño de componentes, a pesar de sus notables deficiencias.

4.7.4. Programación de herramientas para cálculo de daño por fatiga

De manera similar a lo trabajado para los algoritmos de conteo de ciclos, se programaron hojas de cálculo en Microsoft Excel para calcular el daño acumulado para las dos aproximaciones abordadas en esta investigación; es decir, para el método de acumulación de daño lineal por la regla de Miner, como para la aproximación del método de la Curva de Acumulación de Daño de Manson-Halford.

Ambos códigos se desarrollaron integrándolos a las hojas de cálculo base sobre las que se programaron los métodos de conteo y simplificación de ciclos, partiendo justamente de los rangos definidos en el conteo y aislando únicamente aquellos cuyas magnitudes resultaron estar por encima del umbral mínimo de tensión necesaria para incidir en un daño por fatiga (F_{TH}) sobre el detalle estudiado en el caso de estudio.

Finalmente, las hojas de cálculo generadas permitieron aplicar la estimación del daño y revisar la acumulación del mismo derivado de toda la historia de esfuerzos,

contando con la capacidad de aplicar la metodología a registros extensos de rangos de esfuerzos, tabulando posteriormente los resultados derivados de cada procedimiento individual hasta obtener finalmente una estimación del daño acumulado al cabo de un año de uso de la estructura bajo las consideraciones explicadas en el apartado 4.7.5. y, por consiguiente, se pudo obtener la estimación del tiempo en años hasta esperar una eventual falla en el detalle particular estudiado.

En la figura 4-30 se anexa un fragmento del cálculo para la estimación del daño y daño acumulado no lineal para los ciclos derivados del método Peak Counting.

DAÑO ACUMULADO POR FATIGA - MANSON Y HALFORD (PEAK COUNTING)										
RESUMEN RANGOS (TON-M)		RESUMEN RANGOS (KG-CM2)		CICLOS NI A LA FALLA		DAÑO ni/Ni		RESUMEN ESFUERZOS > F _{th} -> ACUMULA FATIGA		DAÑO NO LINEAL
Rangos 1 Ciclo (Ton-m) Rangos 0.5 Ciclo (Ton-n)		Rangos 1 Ciclo (Kg/cm2) Rangos 0.5 Ciclo (Kg/cm)		#Dato Daño - Ni - ni / Ni		Secuencia		Ciclos Ni a la falla		Daño ni / Ni
Rangos Ciclo = 1	Rangos Ciclo = 0.5	Rangos Ciclo = 1	Rangos Ciclo = 0.5							Daño (DCA)
1	12.974	388.416		1	2.3123E+06	3.134E-03	1	2.312E+06	3.134E-03	1.096E-02
2	10.580	316.747		2	4.2638E+06	1.700E-03	2	4.264E+06	1.700E-03	1.266E-02
3	10.088	302.000		3	4.9194E+06	1.473E-03	3	4.919E+06	1.473E-03	1.761E-02
4	10.067	301.380		4	4.9498E+06	1.464E-03	4	4.950E+06	1.464E-03	1.925E-02
5	10.066	301.335		5	4.9520E+06	1.463E-03	5	4.952E+06	1.463E-03	2.073E-02
6	10.066	301.335		6	4.9520E+06	1.463E-03	6	4.952E+06	1.463E-03	2.219E-02
7	10.066	301.335		7	4.9520E+06	1.463E-03	7	4.952E+06	1.463E-03	2.366E-02
8	10.066	301.335		8	4.9520E+06	1.463E-03	8	4.952E+06	1.463E-03	2.512E-02
9	10.066	301.335		9	4.9520E+06	1.463E-03	9	4.952E+06	1.463E-03	2.658E-02
10	10.066	301.335		10	4.9520E+06	1.463E-03	10	4.952E+06	1.463E-03	2.805E-02
11	10.065	301.329		11	4.9523E+06	1.463E-03	11	4.952E+06	1.463E-03	2.951E-02
12	10.064	301.284		12	4.9545E+06	1.463E-03	12	4.955E+06	1.463E-03	3.099E-02
13	9.997	299.284		13	5.0545E+06	1.434E-03	13	5.055E+06	1.434E-03	3.329E-02
14	9.952	297.931		14	5.1237E+06	1.414E-03	14	5.124E+06	1.414E-03	3.533E-02
15	9.816	293.860		15	5.3396E+06	1.357E-03	15	5.340E+06	1.357E-03	3.867E-02
16	9.815	293.845		16	5.3404E+06	1.357E-03	16	5.340E+06	1.357E-03	4.004E-02
17	9.815	293.839		17	5.3408E+06	1.357E-03	17	5.341E+06	1.357E-03	4.140E-02
18	9.815	293.839		18	5.3408E+06	1.357E-03	18	5.341E+06	1.357E-03	4.276E-02
19	9.815	293.839		19	5.3408E+06	1.357E-03	19	5.341E+06	1.357E-03	4.411E-02
20	9.815	293.839		20	5.3408E+06	1.357E-03	20	5.341E+06	1.357E-03	4.547E-02
21	9.815	293.839		21	5.3408E+06	1.357E-03	21	5.341E+06	1.357E-03	4.683E-02
22	9.815	293.836		22	5.3409E+06	1.357E-03	22	5.341E+06	1.357E-03	4.818E-02
23	9.794	293.210		23	5.3752E+06	1.348E-03	23	5.375E+06	1.348E-03	4.991E-02
24	9.514	284.828		24	5.8639E+06	1.236E-03	24	5.864E+06	1.236E-03	5.653E-02
25	9.379	280.786		25	6.1207E+06	1.184E-03	25	6.121E+06	1.184E-03	6.055E-02

Figura 4 - 30. Fragmento de programación en Excel para estimación de daño acumulado no lineal por Manson-Halford (datos de Peak Counting). Los pasos y resultados del algoritmo pueden visualizarse paso a paso y pueden aplicarse a extensos registros de rangos de esfuerzos derivados de otros métodos para conteo de ciclos.

4.7.5. Consideraciones para la aproximación de daño por fatiga

En este punto de la metodología, resulta evidente el hecho de que, para poder llegar a una estimación de daño por fatiga, y por tanto a la predicción aproximada de la vida útil estimada para una estructura, como lo es la del caso de estudio desarrollado en este trabajo, es indispensable que la historia de esfuerzos haya sido obtenida de la manera más confiable posible. Por este motivo para la aplicación

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

y búsqueda de la metodología que se pretende proponer a partir de esta investigación se trabajó en la modelación del caso de estudio descrito en los apartados 4.2 a 4.4 de este documento.

No obstante, fue necesario suponer información referente al número de veces que el bloque de esfuerzos de la actividad rítmica tipo aeróbica obtenido a partir del modelo estructural estaría siendo replicado sobre la estructura y, por tanto, incrementando por este mismo factor el daño acumulado en el tiempo de análisis deseado (por ejemplo, al cabo de 1 año).

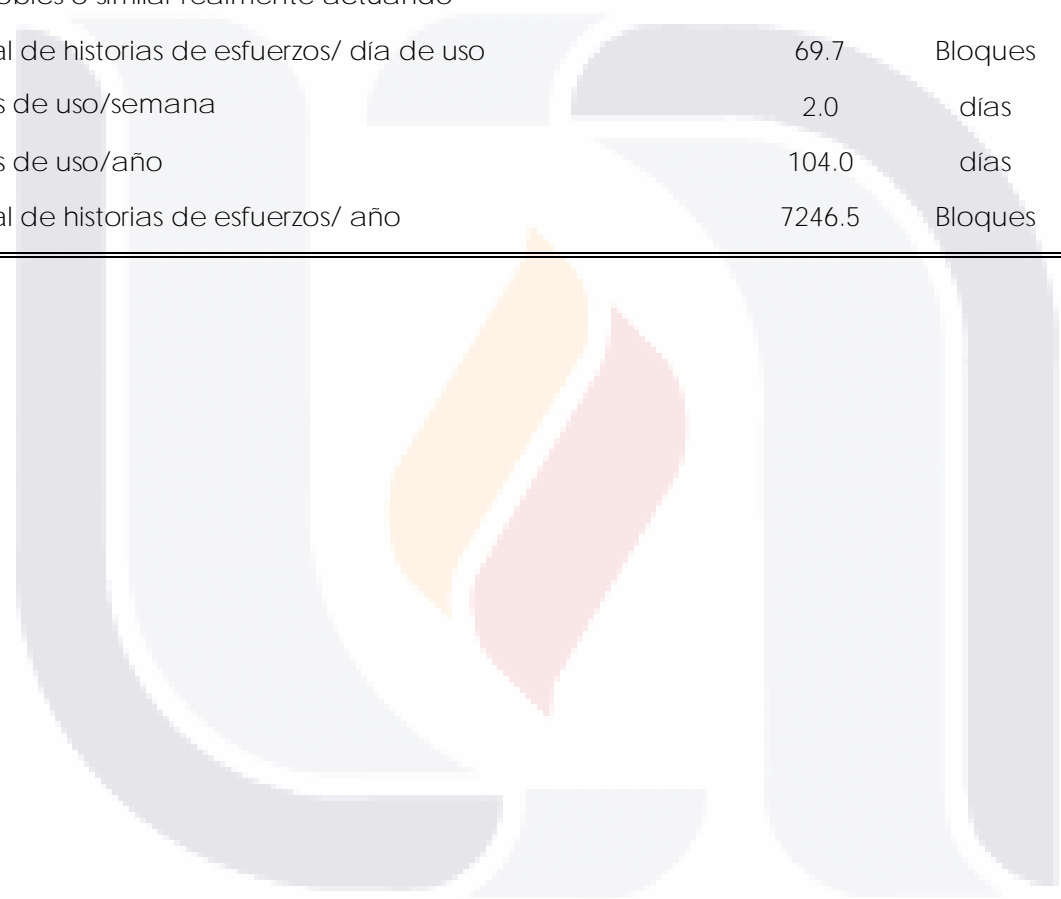
En este sentido, si bien este trabajo de investigación parte de un caso práctico de estudio desde el punto de vista académico, es justo aclarar que a falta de información estadística fiable o recomendaciones oficiales disponibles en la normativa, códigos y/o reglamentos de diseño aplicables para considerar el tiempo de uso del tipo de estructuras revisadas bajo la condición particular de carga que se revisa, como lo representa la acción dinámica de actividades humanas de tipo rítmicas tratadas aquí, el ingeniero tiene invariablemente que aplicar un criterio profesional lógico referente a una serie de consideraciones al respecto al momento de tener que revisar un caso similar al aquí presentado a lo largo de su vida profesional.

Por tanto, el comentario en este respecto consiste en exhortar a los ingenieros estructurales a definir las consideraciones pertinentes en conjunto con propietarios y/o administradores de las estructuras y del tipo de servicios que se pretenden brindar en ellas, así como con los arquitectos encargados del proyecto ejecutivo, con el perito especializado en estructuras y sobre todo junto con las autoridades responsables de la administración municipal y/o estatal de autorizar y revisar el cumplimiento de la normatividad de los proyectos estructurales durante el proceso de cálculo de las estimaciones por fatiga.

En la tabla 2, se muestran las consideraciones tomadas en cuenta para la estimación de los bloques de esfuerzo actuando sobre el detalle estructural revisado en un periodo de 1 año.

Tabla 2 Criterios considerados para la estimación de historias de esfuerzos en 1 año.

CONSIDERACIÓN		UNIDAD
Duración Historia de Esfuerzos del modelo estructural	31.0	Seg.
Horas de utilización de la estructura/ día de uso destinado a eventos involucrando actividades rítmicas	4.0	Hrs.
% de tiempo de utilización con actividad rítmica tipo aeróbics o similar realmente actuando	15.0	%
Total de historias de esfuerzos/ día de uso	69.7	Bloques
Días de uso/semana	2.0	días
Días de uso/año	104.0	días
Total de historias de esfuerzos/ año	7246.5	Bloques





CAPÍTULO V. RESULTADOS

5.1. RESUMEN DE RESULTADOS

A partir de los algoritmos y metodologías programadas para la cuantificación de ciclos derivados de la historia de esfuerzos, así como las estimaciones del daño acumulado efectuados a cada algoritmo, fue posible obtener ocho combinaciones metodológicas mediante las cuales se pudo llegar finalmente a la estimación del daño acumulado al cabo de un año de uso de la estructura bajo las consideraciones explicadas en el apartado 4.7.5., y por ende, obtener una estimación de la vida útil del detalle estructural ejemplificado y revisado en esta investigación. Dicho detalle se particularizó a partir del caso práctico de estudio seleccionado y descrito en este documento.

Los rangos de esfuerzos obtenidos del conteo de ciclos a partir del Peak Counting, Simple Range Counting, Range Pair Counting y Rainflow Cycle Counting, fueron empleados para estimar el daño acumulado mediante la Regla lineal de Palmgreen-Miner y el método de aproximación no lineal de la Curva de Acumulación de Daño desarrollado por Manson-Halford, definiendo así ocho aproximaciones distintas según la combinación metodológica entre las cuatro opciones para conteo de ciclos y las dos aproximaciones para daño acumulado aplicadas.

A continuación, se presentan primeramente a manera de resumen mediante tablas de frecuencias los resultados obtenidos para la cuantificación de ciclos en cada algoritmo para un bloque de historia de esfuerzos obtenido a partir del modelo estructural, particularmente obtenido del detalle estructural revisado. Se utilizaron clases según la regla de Sturges, con la intención de poder visualizar de manera gráfica en qué intervalos de magnitudes se concentran los espectros de esfuerzos.

Posteriormente se muestra el resumen de resultados para la estimación de daño por fatiga al cabo de un año de uso, y la vida estimada en años en la que se podría presentar una falla frágil por fatiga en el detalle de conexión. En este caso se

visualizan los resultados para cada combinación como se comentó anteriormente, permitiendo observar las diferencias entre cada metodología.

Finalmente se anexan las corridas completas de los métodos para cuantificación de ciclos y la posterior estimación del daño acumulado, que justifican los resultados resumidos presentados.

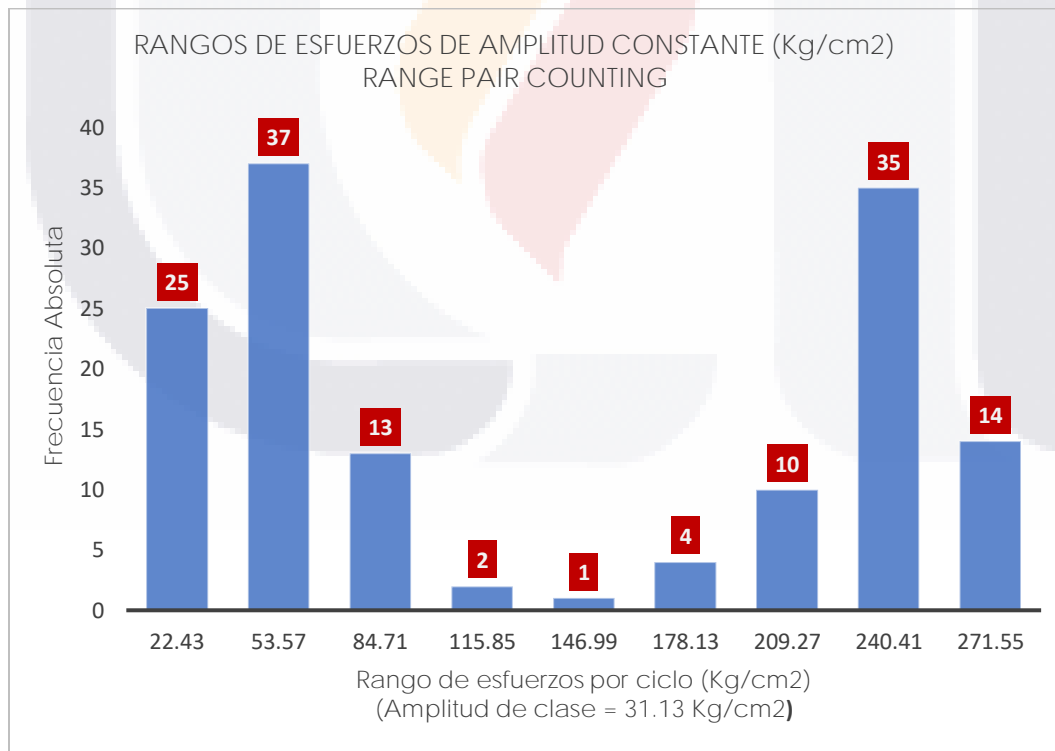


5.1.1. Resumen de resultados algoritmos para conteo de ciclos

5.1.1.1. Range Pair Counting

Tabla 3 Tabla de frecuencias para rangos de ciclos (Range-Pair Counting).

Límite Inferior (Kg/cm ²)	Límite superior (Kg/cm ²)	Marca Clase (Kg/cm ²)	Frecuencia Absoluta	Frecuencia Acumulada	Frecuencia Relativa	Frec. Rel. Acumulada
6.86	37.99	22.43	25	25	0.177	0.177
38.00	69.13	53.57	37	62	0.262	0.440
69.14	100.27	84.71	13	75	0.092	0.532
100.28	131.41	115.85	2	77	0.014	0.546
131.42	162.55	146.99	1	78	0.007	0.553
162.56	193.69	178.13	4	82	0.028	0.582
193.70	224.83	209.27	10	92	0.071	0.652
224.84	255.97	240.41	35	127	0.248	0.901
255.98	287.11	271.55	14	141	0.099	1.000
Total			141		1.00	

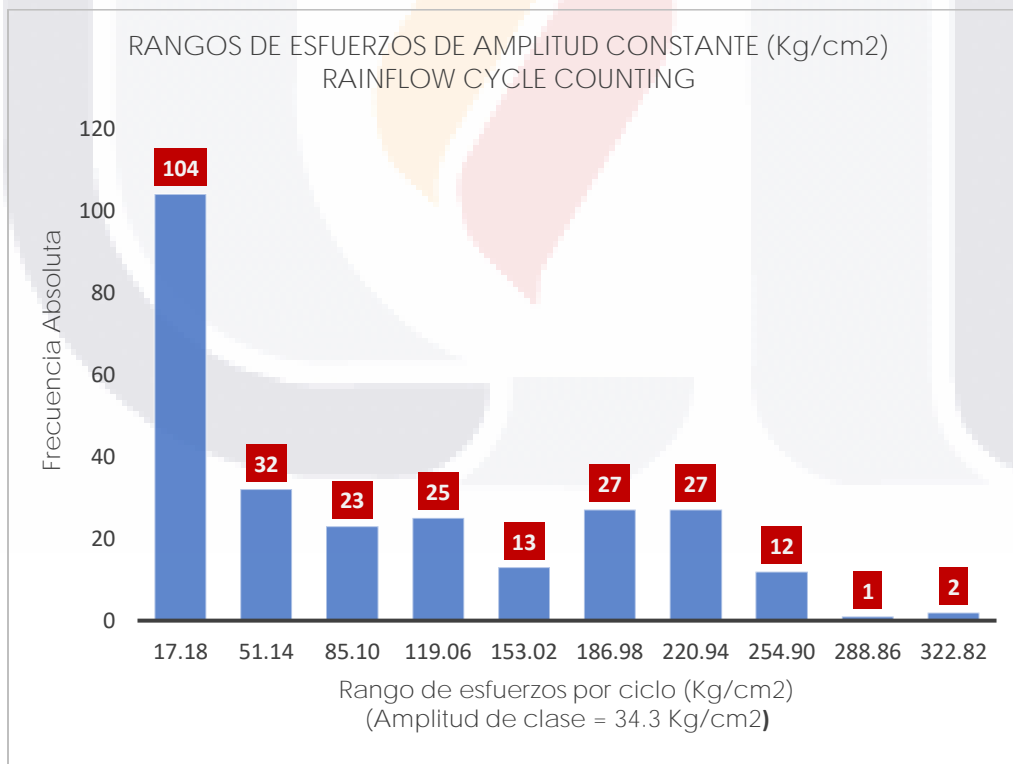


Gráfica 1. Frecuencias de rangos de esfuerzos derivados del conteo de ciclos por el método Range-Pair Counting.

5.1.1.2. Rainflow Cycle Counting

Tabla 4 Tabla de frecuencias para rangos de ciclos (Rainflow Cycle Counting)

Límite Inferior (Kg/cm ²)	Limite Superior (Kg/cm ²)	Marca Clase (Kg/cm ²)	Frecuencia Absoluta	Frecuencia Acumulada	Frecuencia Relativa	Frec. Rel Acumulada
0.20	34.15	17.18	104	104	0.391	0.391
34.16	68.11	51.14	32	136	0.120	0.511
68.12	102.07	85.10	23	159	0.086	0.598
102.08	136.03	119.06	25	184	0.094	0.692
136.04	169.99	153.02	13	197	0.049	0.741
170.00	203.95	186.98	27	224	0.102	0.842
203.96	237.91	220.94	27	251	0.102	0.944
237.92	271.87	254.90	12	263	0.045	0.989
271.88	305.83	288.86	1	264	0.004	0.992
305.84	339.79	322.82	2	266	0.008	1.000
Total			266		1.00	

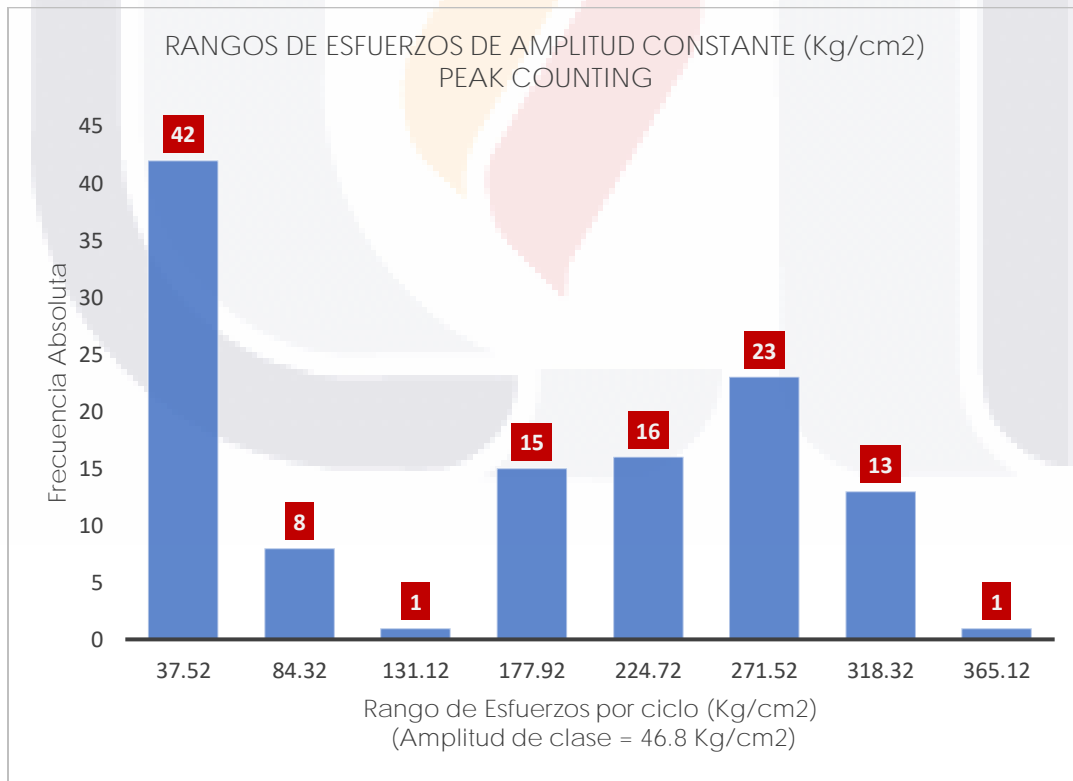


Gráfica 2. Frecuencias de rangos de esfuerzos derivados del conteo de ciclos por el método Rainflow Cycle Counting.

5.1.1.3. Peak Counting

Tabla 5 Tabla de frecuencias para rangos de ciclos (Peak Counting)

Límite Inferior (Kg/cm ²)	Límite Superior (Kg/cm ²)	Marca Clase (Kg/cm ²)	Frecuencia Absoluta	Frecuencia Acumulada	Frecuencia Relativa	Frec. Rel Acumulada
14.12	60.91	37.52	42	42	0.353	0.353
60.92	107.71	84.32	8	50	0.067	0.420
107.72	154.51	131.12	1	51	0.008	0.429
154.52	201.31	177.92	15	66	0.126	0.555
201.32	248.11	224.72	16	82	0.134	0.689
248.12	294.91	271.52	23	105	0.193	0.882
294.92	341.71	318.32	13	118	0.109	0.992
341.72	388.51	365.12	1	119	0.008	1.000
Total			119		1.00	

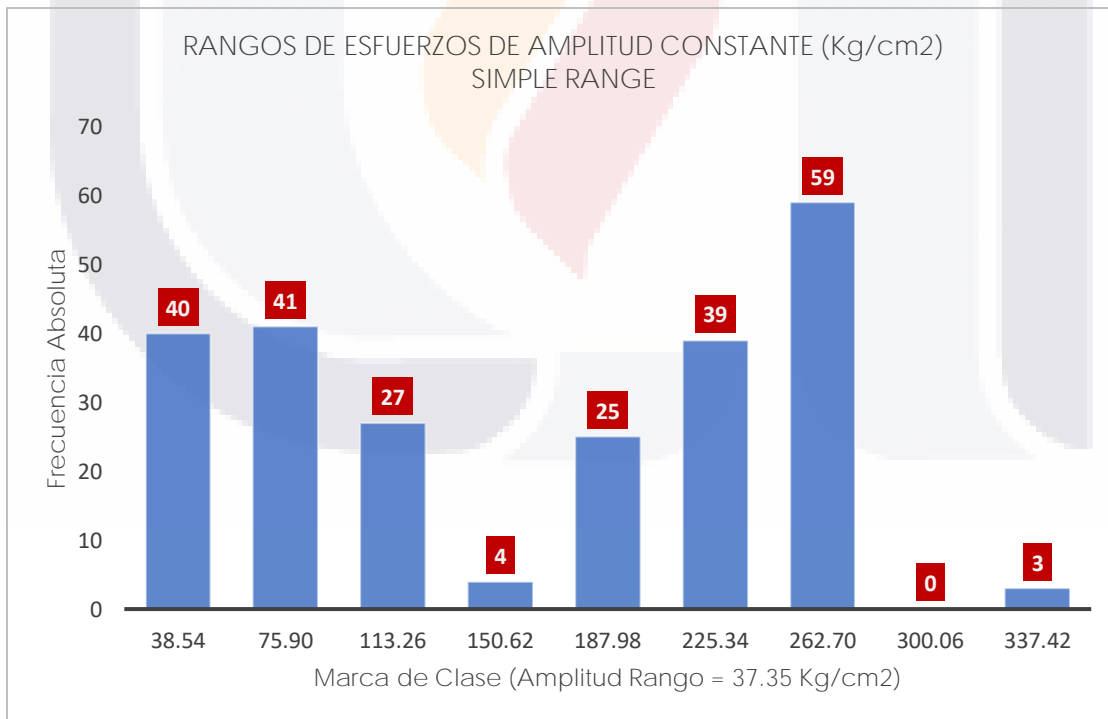


Gráfica 3. Frecuencias de rangos de esfuerzos derivados del conteo de ciclos por el método Peak Counting.

5.1.1.4. Simple Range Counting

Tabla 6 Tabla de frecuencias para rangos de ciclos (Simple Range Counting)

Límite Inferior	Límite Superior (Kg/cm ²)	Marca Clase (Kg/cm ²)	Frecuencia Absoluta	Frecuencia Acumulada	Frecuencia Relativa	Frec. Rel Acumulada
19.87	57.22	38.54	40	40	0.168	0.168
57.23	94.58	75.90	41	81	0.172	0.340
94.59	131.94	113.26	27	108	0.113	0.454
131.95	169.30	150.62	4	112	0.017	0.471
169.31	206.66	187.98	25	137	0.105	0.576
206.67	244.02	225.34	39	176	0.164	0.739
244.03	281.38	262.70	59	235	0.248	0.987
281.39	318.74	300.06	0	235	0.000	0.987
318.75	356.10	337.42	3	238	0.013	1.000
Total			238		1.00	



Gráfica 4. Frecuencias de rangos de esfuerzos derivados del conteo de ciclos por el método Simple Range Counting.

5.1.2. Resumen de resultados estimación de daño acumulado

Los resultados de la vida estimada en años por fatiga del detalle de conexión investigado se resumen en la tabla 7. En color verde podemos observar la proporción de daño acumulado al cabo de un año de que el detalle estructural revisado se supone sometido a los efectos de la acción dinámica reflejada en la historia de esfuerzos. Dado que el daño estimado por un ciclo de carga se expresa como una fracción de la unidad, representando la unidad la llegada a la falla por fatiga debido a la acumulación de daño, los valores que observamos por encima de 1, suponen que al cabo del año, se alcanzaría teóricamente la falla del detalle por fatiga en el número de veces equivalente a las unidades alcanzadas.

Tabla 7 Resumen daño acumulado por fatiga en 1 año para cada combinación de conteo de ciclos y aproximación de daño acumulado.

		<i>DA Lineal (Miner) ni/Ni</i>	<i>DA No Lineal (Manson-Halford)</i>
Tipo	Método de conteo de ciclos	Daño acumulado /Años a la falla por fatiga	Daño acumulado /Años a la falla por fatiga
Parámetro simple	PEAK COUNTING	0.064 15.7	5.21 0.19
	SIMPLE RANGE COUNTING	0.048 20.8	6.03 0.17
Doble parámetro	RAINFLOW COUNTING	0.032 31.68	2.17 0.46
	RANGE PAIR COUNTING	0.037 26.7	1.77 0.57

Por tanto, los años esperados a la fatiga para cada combinación metodológica mostrados en color rojo, representan el número proporcional de años que tendría que someterse la estructura a las acciones o cargas que se tomaron en cuenta en el bloque de esfuerzos para llegar a la falla. Para el caso del daño no lineal, congruentemente al daño que se alcanza en un año, los valores mostrados representan la fracción de un año teóricamente necesaria para alcanzar la falla por fatiga.

5.2. CORRIDAS COMPLETAS DE ALGORITMOS PARA CUANTIFICACIÓN DE CICLOS Y DAÑO ACUMULADO

5.2.1. Range Pair Counting

Tabla 8

Conteo de ciclos para la historia de esfuerzos del detalle estructural estudiado por el método de Range-Pair Counting (Diagrama 1). Picos, valles y rangos en Ton-m.

m	Paso	# Dato	P1	P2	# Dato	P3	Y (Rango)	X	$\Delta X > Y?$	# Ciclos	Pick/Valley Descartar	# Prox. P1	P1 Pend	P1 Pend es $\geq 1/2$ CICLO?	# Ciclos	Rangos Ciclo = 1	Rangos Ciclo = 0.5
-	1	1	-3.948	1.443	2	-9.454	3	5.391	10.90	S	1	1	2	3		5.39	
+	2	3	-9.454	1.217	4	-1.903	5	10.671	3.12	N	0	4	3	S	0		
+	3	4	1.217	1.903	5	-1.240	6	3.120	0.66	N	0	5	4	N	0		
+	4	5	-1.903	1.240	6	-8.371	7	0.664	7.13	S	1	5	6		0	0.66	
+	5	3	-9.454	1.217	4	-8.371	7	10.671	9.59	N	0	4	3	S	0.5		9.45
+	6	4	1.217	8.371	7	3.521	8	9.588	11.89	S	1	4	7		0	9.59	
+	7	8	3.521	2.245	9	1.720	10	5.766	3.97	N	0	9	8	S	0		
+	8	9	-2.245	1.720	10	-5.350	11	3.965	7.07	S	1	9	10		0	3.97	
+	9	8	3.521	5.350	11	1.315	12	8.871	6.67	N	0	11	8	S	0.5		3.52
+	10	11	-5.350	1.315	12	-0.913	13	6.665	2.23	N	0	12	11	N	0		
+	11	12	1.315	0.913	13	1.035	14	2.228	1.95	N	0	13	12	N	0		
+	12	13	-0.913	1.035	14	-6.234	15	1.948	7.27	S	1	13	14		0	1.95	
+	13	11	-5.350	1.315	12	-6.234	15	6.665	7.55	S	1	11	12		0	6.67	
+	14	15	-6.234	1.189	16	-0.735	17	7.423	1.92	N	0	16	15	N	0		
+	15	16	1.189	0.735	17	0.234	18	1.924	0.97	N	0	17	16	N	0		
+	16	17	-0.735	0.234	18	-6.702	19	0.969	6.94	S	1	17	18		0	0.97	
+	17	15	-6.234	1.189	16	-6.702	19	7.423	7.89	S	1	15	16		0	7.42	
+	18	19	-6.702	1.831	20	-1.430	21	8.534	3.26	N	0	20	19	N	0		

m	Paso	# Dato	P1	P2	# Dato	P3	# Dato	Y (Rango)	X	X > Y?	# Ciclos	Pick/Valley Descartar	# Prox. P1	P1 Pend	P1 Pend es $\geq 1/2$ CICLO?	# Ciclos	Rangos Ciclo = 1	Rangos Ciclo = 0.5
+	19	20	1.831	-1.430	21	0.036	22	3.261	1.47	N	0		21	20	N	0		
+	20	21	-1.430	0.036	22	-7.659	23	1.466	7.70	S	1	21	22	19		0	1.47	
+	21	19	-6.702	1.831	20	-7.659	23	8.534	9.49	S	1	19	20	23		0	8.53	
+	22	23	-7.659	1.070	24	-7.821	25	8.729	8.89	S	1	23	24	25		0	8.73	
+	23	25	-7.821	1.320	26	-0.472	27	9.141	1.79	N	0		26	25	S	0		
+	24	26	1.320	-0.472	27	0.216	28	1.792	0.69	N	0		27	26	N	0		
+	25	27	-0.472	0.216	28	-6.509	29	0.688	6.73	S	1	27	28	25		0	0.69	
+	26	25	-7.821	1.320	26	-6.509	29	9.141	7.83	N	0		26	25	S	0.5		7.82
+	27	26	1.320	-6.509	29	2.210	30	7.829	8.72	S	1	26	29	30		0	7.83	
+	28	30	2.210	-1.420	31	1.010	32	3.630	2.43	N	0		31	30	S	0		
+	29	31	-1.420	1.010	32	-5.687	33	2.430	6.70	S	1	31	32	30		0	2.43	
+	30	30	2.210	-5.687	33	2.109	34	7.897	7.80	N	0		33	30	S	0.5		2.21
+	31	33	-5.687	2.109	34	-1.539	35	7.795	3.65	N	0		34	33	N	0		
+	32	34	2.109	-1.539	35	0.868	36	3.648	2.41	N	0		35	34	N	0		
+	33	35	-1.539	0.868	36	-7.180	37	2.407	8.05	S	1	35	36	33		0	2.41	
+	34	33	-5.687	2.109	34	-7.180	37	7.795	9.29	S	1	33	34	37		0	7.80	
+	35	37	-7.180	1.483	38	-1.173	39	8.663	2.66	N	0		38	37	N	0		
+	36	38	1.483	-1.173	39	-0.027	40	2.656	1.15	N	0		39	38	N	0		
+	37	39	-1.173	0.027	40	-7.851	41	1.145	7.82	S	1	39	40	37		0	1.15	
+	38	37	-7.180	1.483	38	-7.851	41	8.663	9.33	S	1	37	38	41		0	8.66	
+	39	41	-7.851	0.533	42	-7.642	43	8.384	8.18	N	0		42	41	S	0		
+	40	42	0.533	-7.642	43	1.294	44	8.175	8.94	S	1	42	43	41		0	8.18	
+	41	41	-7.851	1.294	44	-0.517	45	9.145	1.81	N	0		44	41	S	0.5		7.85
+	42	44	1.294	-0.517	45	0.267	46	1.811	0.78	N	0		45	44	S	0.5		1.29

m	Paso	# Dato	P1	P2	# Dato	P2	P3	# Dato	P3	Y (Rango)	X	X > Y?	# Ciclos	Pick/Valley Descartar	# Prox. P1	P1 Pend	P1 Pend es $\geq 1/2$ CICLO?	# Ciclos	Rangos Ciclo = 1	Rangos Ciclo = 0.5
+	43	45	-0.517	0.267	46	-6.481	47	0.783	6.75	S	1	45	46	47				0	0.78	
+	44	47	-6.481	2.146	48	-1.298	49	8.627	3.44	N	0			48	47	S		0		
+	45	48	2.146	-1.298	49	0.841	50	3.445	2.14	N	0			49	48	N		0		
+	46	49	-1.298	0.841	50	-5.513	51	2.139	6.35	S	1	49	50	47				0	2.14	
+	47	47	-6.481	2.146	48	-5.513	51	8.627	7.66	N	0			48	47	S		0.5	6.48	
+	48	48	2.146	-5.513	51	2.174	52	7.659	7.69	S	1	48	51	52				0	7.66	
+	49	52	2.174	-1.539	53	0.825	54	3.713	2.36	N	0			53	52	S		0		
+	50	53	-1.539	0.825	54	-7.125	55	2.364	7.95	S	1	53	54	52				0	2.36	
+	51	52	2.174	-7.125	55	1.527	56	9.299	8.65	N	0			55	52	S		0.5	2.17	
+	52	55	-7.125	1.527	56	-1.219	57	8.652	2.75	N	0			56	55	N		0		
+	53	56	1.527	-1.219	57	0.029	58	2.746	1.25	N	0			57	56	N		0		
+	54	57	-1.219	0.029	58	-7.912	59	1.248	7.94	S	1	57	58	55				0	1.25	
+	55	55	-7.125	1.527	56	-7.912	59	8.652	9.44	S	1	55	56	59				0	8.65	
+	56	59	-7.912	0.221	60	0.505	61	7.691	0.73	N	0			60	59	N		0		
+	57	60	-0.221	0.505	61	-7.683	62	0.726	8.19	S	1	60	61	59				0	0.73	
+	58	59	-7.912	-7.683	62	1.328	63	0.229	9.01	S	1	59	62	63				0	0.23	
+	59	63	1.328	-0.536	64	0.272	65	1.864	0.81	N	0			64	63	N		0		
+	60	64	-0.536	0.272	65	-6.474	66	0.808	6.75	S	1	64	65	63				0	0.81	
+	61	63	1.328	-6.474	66	2.131	67	7.802	8.60	S	1	63	66	67				0	7.80	
+	62	67	2.131	-1.278	68	0.827	69	3.409	2.11	N	0			68	67	N		0		
+	63	68	-1.278	0.827	69	-5.511	70	2.105	6.34	S	1	68	69	67				0	2.11	
+	64	67	2.131	-5.511	70	2.154	71	7.642	7.66	S	1	67	70	71				0	7.64	
+	65	71	2.154	-1.518	72	0.811	73	3.672	2.33	N	0			72	71	S		0		

m	Paso	# Dato	P1	P2	# Dato	P3	# Dato	Y (Rango)	X	¿X > Y?	# Ciclos	Pick/Valley Descartar	# Prox. P1	P1 Pend	P1 Pend es $\geq 1/2$ CICLO?	# Ciclos	Rangos Ciclo = 1	Rangos Ciclo = 0.5
+	66	72	-1.518	0.811	73	-7.120	74	2.330	7.93	S	1	72	73	71		0	2.33	
+	67	71	2.154	7.120	74	1.524	75	9.274	8.64	N	0		74	71	S	0.5		2.15
+	68	74	-7.120	1.524	75	-1.218	76	8.644	2.74	N	0		75	74	N	0		
+	69	75	1.524	1.218	76	0.030	77	2.741	1.25	N	0		76	75	N	0		
+	70	76	-1.218	0.030	77	-7.913	78	1.247	7.94	S	1	76	77	74		0	1.25	
+	71	74	-7.120	1.524	75	-7.913	78	8.644	9.44	S	1	74	75	78		0	8.64	
+	72	78	-7.913	0.509	79	-7.686	80	8.423	8.20	N	0		79	78	S	0		
+	73	79	0.509	7.686	80	1.328	81	8.196	9.01	S	1	79	80	78		0	8.20	
+	74	78	-7.913	1.328	81	-0.534	82	9.242	1.86	N	0		81	78	S	0.5		7.91
+	75	81	1.328	0.534	82	0.270	83	1.862	0.80	N	0		82	81	S	0.5		1.33
+	76	82	-0.534	0.270	83	-6.473	84	0.804	6.74	S	1	82	83	84		0	0.80	
+	77	84	-6.473	2.130	85	-1.299	86	8.603	3.43	N	0		85	84	S	0		
+	78	85	2.130	1.299	86	0.828	87	3.429	2.13	N	0		86	85	N	0		
+	79	86	-1.299	0.828	87	-5.515	88	2.127	6.34	S	1	86	87	84		0	2.13	
+	80	84	-6.473	2.130	85	-5.515	88	8.603	7.64	N	0		85	84	S	0.5		6.47
+	81	85	2.130	5.515	88	2.152	89	7.644	7.67	S	1	85	88	89		0	7.64	
+	82	89	2.152	1.519	90	0.813	91	3.670	2.33	N	0		90	89	S	0		
+	83	90	-1.519	0.813	91	-7.122	92	2.332	7.94	S	1	90	91	89		0	2.33	
+	84	89	2.152	7.122	92	1.523	93	9.274	8.65	N	0		92	89	S	0.5		2.15
+	85	92	-7.122	1.523	93	-1.218	94	8.645	2.74	N	0		93	92	N	0		
+	86	93	1.523	1.218	94	0.030	95	2.741	1.25	N	0		94	93	N	0		
+	87	94	-1.218	0.030	95	-7.914	96	1.248	7.94	S	1	94	95	92		0	1.25	
+	88	92	-7.122	1.523	93	-7.914	96	8.645	9.44	S	1	92	93	96		0	8.65	
+	89	96	-7.914	0.510	97	-7.686	98	8.424	8.20	N	0		97	96	S	0		

m	Paso	# Dato P1	P1	P2	# Dato P2	P3	# Dato P3	Y (Rango)	X	¿X > Y?	# Ciclos	Pick/Valley Descartar	# Prox. P1	P1 Pend	P1 Pend es 1/2 CICLO?	# Ciclos	Rangos Ciclo = 1	Rangos Ciclo = 0.5
+	90	97	0.510	-7.686	98	1.328	99	8.196	9.01	S	1	97	98	96		0	8.20	
+	91	96	-7.914	1.328	99	-0.533	100	9.241	1.86	N	0		99	96	S	0.5		7.91
+	92	99	1.328	-0.533	100	0.270	101	1.861	0.80	N	0		100	99	S	0.5		1.33
+	93	100	-0.533	0.270	101	-6.480	102	0.803	6.75	S	1	100	101	102		0	0.80	
+	94	102	-6.480	2.129	103	-1.285	104	8.609	3.41	N	0		103	102	S	0		
+	95	103	2.129	-1.285	104	0.829	105	3.414	2.11	N	0		104	103	N	0		
+	96	104	-1.285	0.829	105	-5.515	106	2.114	6.34	S	1	104	105	102		0	2.11	
+	97	102	-6.480	2.129	103	-5.515	106	8.609	7.64	N	0		103	102	S	0.5		6.48
+	98	103	2.129	-5.515	106	2.160	107	7.644	7.67	S	1	103	106	107		0	7.64	
+	99	107	2.160	-1.519	108	0.813	109	3.679	2.33	N	0		108	107	S	0		
+	100	108	-1.519	0.813	109	-7.150	110	2.332	7.96	S	1	108	109	107		0	2.33	
+	101	107	2.160	-7.150	110	1.524	111	9.310	8.67	N	0		110	107	S	0.5		2.16
+	102	110	-7.150	1.524	111	-1.218	112	8.674	2.74	N	0		111	110	N	0		
+	103	111	1.524	-1.218	112	0.030	113	2.742	1.25	N	0		112	111	N	0		
+	104	112	-1.218	0.030	113	-7.931	114	1.249	7.96	S	1	112	113	110		0	1.25	
+	105	110	-7.150	1.524	111	-7.931	114	8.674	9.45	S	1	110	111	114		0	8.67	
+	106	114	-7.931	0.510	115	-7.675	116	8.441	8.19	N	0		115	114	S	0		
+	107	115	0.510	-7.675	116	1.328	117	8.185	9.00	S	1	115	116	114		0	8.19	
+	108	114	-7.931	1.328	117	-0.545	118	9.259	1.87	N	0		117	114	S	0.5		7.93
+	109	117	1.328	-0.545	118	0.270	119	1.873	0.82	N	0		118	117	S	0.5		1.33
+	110	118	-0.545	0.270	119	-6.473	120	0.815	6.74	S	1	118	119	120		0	0.82	
+	111	120	-6.473	2.151	121	-1.291	122	8.624	3.44	N	0		121	120	S	0		
+	112	121	2.151	-1.291	122	0.829	123	3.442	2.12	N	0		122	121	N	0		
+	113	122	-1.291	0.829	123	-5.515	124	2.120	6.34	S	1	122	123	120		0	2.12	

m	Paso	# Dato	P1	P2	# Dato	P2	P3	# Dato	P3	Y (Rango)	X	X > Y?	# Ciclos	Pick/Valley Descartar	# Prox. P1	P1 Pend	P1 Pend es $\geq 1/2$ CICLO?	# Ciclos	Rangos Ciclo = 1	Rangos Ciclo = 0.5
+	114	120	-6.473	2.151	121	-5.515	124	8.624	7.67	N	0			121	120	S	0.5		6.47	
+	115	121	2.151	5.515	124	2.160	125	7.666	7.67	S	1	121	124	125				0	7.67	
+	116	125	2.160	1.520	126	0.820	127	3.680	2.34	N	0			126	125	S	0			
+	117	126	-1.520	0.820	127	-7.130	128	2.340	7.95	S	1	126	127	125				0	2.34	
+	118	125	2.160	7.130	128	1.530	129	9.290	8.66	N	0			128	125	S	0.5			2.16
+	119	128	-7.130	1.530	129	-1.219	130	8.660	2.75	N	0			129	128	N	0			
+	120	129	1.530	1.219	130	0.031	131	2.749	1.25	N	0			130	129	N	0			
+	121	130	-1.219	0.031	131	-7.900	132	1.250	7.93	S	1	130	131	128				0	1.25	
+	122	128	-7.130	1.530	129	-7.900	132	8.660	9.43	S	1	128	129	132				0	8.66	
+	123	132	-7.900	0.512	133	-7.690	134	8.412	8.20	N	0			133	132	S	0			
+	124	133	0.512	7.690	134	1.320	135	8.202	9.01	S	1	133	134	132				0	8.20	
+	125	132	-7.900	1.320	135	-0.533	136	9.220	1.85	N	0			135	132	S	0.5			7.90
+	126	135	1.320	0.533	136	0.280	137	1.853	0.81	N	0			136	135	S	0.5			1.32
+	127	136	-0.533	0.280	137	-6.460	138	0.813	6.74	S	1	136	137	138				0	0.81	
+	128	138	-6.460	2.120	139	-1.289	140	8.580	3.41	N	0			139	138	S	0			
+	129	139	2.120	1.289	140	0.828	141	3.409	2.12	N	0			140	139	N	0			
+	130	140	-1.289	0.828	141	-5.514	142	2.117	6.34	S	1	140	141	138				0	2.12	
+	131	138	-6.460	2.120	139	-5.514	142	8.580	7.63	N	0			139	138	S	0.5			6.46
+	132	139	2.120	5.514	142	2.153	143	7.634	7.67	S	1	139	142	143				0	7.63	
+	133	143	2.153	1.558	144	0.850	145	3.711	2.41	N	0			144	143	S	0			
+	134	144	-1.558	0.850	145	-7.140	146	2.408	7.99	S	1	144	145	143				0	2.41	
+	135	143	2.153	7.140	146	1.545	147	9.293	8.69	N	0			146	143	S	0.5			2.15
+	136	146	-7.140	1.545	147	-1.230	148	8.685	2.78	N	0			147	146	N	0			

m	Paso	# Dato P1	P1	P2	# Dato P2	P3	# Dato P3	Y (Rango)	X	X > Y?	# Ciclos	Pick/Valley Descartar	# Prox. P1	P1 Pend	P1 Pend es $\leq 1/2$ CICLO?	# Ciclos	Rangos Ciclo = 1	Rangos Ciclo = 0.5
+	137	147	1.545	-1.230	148	0.040	149	2.775	1.27	N	0		148	147	N	0		
+	138	148	-1.230	0.040	149	-7.920	150	1.270	7.96	S	1	148	149	146		0	1.27	
+	139	146	-7.140	1.545	147	-7.920	150	8.685	9.47	S	1	146	147	150		0	8.69	
+	140	150	-7.920	0.514	151	-7.701	152	8.434	8.22	N	0		151	150	S	0		
+	141	151	0.514	-7.701	152	1.330	153	8.215	9.03	S	1	151	152	150		0	8.22	
+	142	150	-7.920	1.330	153	-0.533	154	9.250	1.86	N	0		153	150	S	0.5		7.92
+	143	153	1.330	-0.533	154	0.290	155	1.863	0.82	N	0		154	153	S	0.5		1.33
+	144	154	-0.533	0.290	155	-6.495	156	0.823	6.79	S	1	154	155	156		0	0.82	
+	145	156	-6.495	2.119	157	-1.281	158	8.614	3.40	N	0		157	156	S	0		
+	146	157	2.119	-1.281	158	0.835	159	3.400	2.12	N	0		158	157	N	0		
+	147	158	-1.281	0.835	159	-5.515	160	2.116	6.35	S	1	158	159	156		0	2.12	
+	148	156	-6.495	2.119	157	-5.515	160	8.614	7.63	N	0		157	156	S	0.5		6.50
+	149	157	2.119	-5.515	160	2.150	161	7.634	7.66	S	1	157	160	161		0	7.63	
+	150	161	2.150	-1.600	162	0.800	163	3.750	2.40	N	0		162	161	S	0		
+	151	162	-1.600	0.800	163	-7.100	164	2.400	7.90	S	1	162	163	161		0	2.40	
+	152	161	2.150	-7.100	164	1.509	165	9.250	8.61	N	0		164	161	S	0.5		2.15
+	153	164	-7.100	1.509	165	-1.195	166	8.609	2.70	N	0		165	164	N	0		
+	154	165	1.509	-1.195	166	0.031	167	2.704	1.23	N	0		166	165	N	0		
+	155	166	-1.195	0.031	167	-7.909	168	1.226	7.94	S	1	166	167	164		0	1.23	
+	156	164	-7.100	1.509	165	-7.909	168	8.609	9.42	S	1	164	165	168		0	8.61	
+	157	168	-7.909	0.516	169	-7.681	170	8.425	8.20	N	0		169	168	S	0		
+	158	169	0.516	-7.681	170	1.329	171	8.197	9.01	S	1	169	170	168		0	8.20	
+	159	168	-7.909	1.329	171	-0.543	172	9.238	1.87	N	0		171	168	S	0.5		7.91
+	160	171	1.329	-0.543	172	0.300	173	1.872	0.84	N	0		172	171	S	0.5		1.33

m	Paso	# Dato	P1	P2	# Dato	P2	P3	# Dato	P3	Y (Rango)	X	X > Y?	# Ciclos	Pick/Valley Descartar	# Prox. P1	P1 Pend	P1 Pend es $\geq 1/2$ CICLO?	# Ciclos	Rangos Ciclo = 1	Rangos Ciclo = 0.5
+	161	172	-0.543	0.300	173	-6.471	174	0.843	6.77	S	1	172	173	174				0	0.84	
+	162	174	-6.471	2.130	175	-1.292	176	8.601	3.42	N	0			175	174	S		0		
+	163	175	2.130	-1.292	176	0.819	177	3.422	2.11	N	0			176	175	N		0		
+	164	176	-1.292	0.819	177	-5.505	178	2.111	6.32	S	1	176	177	174				0	2.11	
+	165	174	-6.471	2.130	175	-5.505	178	8.601	7.64	N	0			175	174	S		0.5		6.47
+	166	175	2.130	-5.505	178	2.153	179	7.635	7.66	S	1	175	178	179				0	7.64	
+	167	179	2.153	-1.490	180	0.825	181	3.643	2.32	N	0			180	179	S		0		
+	168	180	-1.490	0.825	181	-7.250	182	2.315	8.08	S	1	180	181	179				0	2.32	
+	169	179	2.153	-7.250	182	1.549	183	9.403	8.80	N	0			182	179	S		0.5		2.15
+	170	182	-7.250	1.549	183	-1.208	184	8.799	2.76	N	0			183	182	N		0		
+	171	183	1.549	-1.208	184	0.029	185	2.757	1.24	N	0			184	183	N		0		
+	172	184	-1.208	0.029	185	-7.895	186	1.237	7.92	S	1	184	185	182				0	1.24	
+	173	182	-7.250	1.549	183	-7.895	186	8.799	9.44	S	1	182	183	186				0	8.80	
+	174	186	-7.895	0.518	187	-7.680	188	8.413	8.20	N	0			187	186	S		0		
+	175	187	0.518	-7.680	188	1.319	189	8.198	9.00	S	1	187	188	186				0	8.20	
+	176	186	-7.895	1.319	189	-0.553	190	9.214	1.87	N	0			189	186	S		0.5		7.90
+	177	189	1.319	-0.553	190	0.259	191	1.872	0.81	N	0			190	189	S		0.5		1.32
+	178	190	-0.553	0.259	191	-6.473	192	0.812	6.73	S	1	190	191	192				0	0.81	
+	179	192	-6.473	2.115	193	-1.263	194	8.588	3.38	N	0			193	192	S		0		
+	180	193	2.115	-1.263	194	0.825	195	3.378	2.09	N	0			194	193	N		0		
+	181	194	-1.263	0.825	195	-5.495	196	2.088	6.32	S	1	194	195	192				0	2.09	
+	182	192	-6.473	2.115	193	-5.495	196	8.588	7.61	N	0			193	192	S		0.5		6.47
+	183	193	2.115	-5.495	196	2.149	197	7.610	7.64	S	1	193	196	197				0	7.61	
+	184	197	2.149	-1.550	198	0.868	199	3.699	2.42	N	0			198	197	S		0		

m	Paso	# Dato	P1	P2	# Dato	P3	# Dato	Y (Rango)	X	X > Y?	# Ciclos	Pick/Valley Descartar	# Prox. P1	P1 Pend	P1 Pend es $\geq 1/2$ CICLO?	# Ciclos	Rangos Ciclo = 1	Rangos Ciclo = 0.5
+	185	198	-1.550	0.868	199	-7.160	200	2.418	8.03	S	1	198	199	197		0	2.42	
+	186	197	2.149	7.160	200	1.566	201	9.309	8.73	N	0		200	197	S	0.5		2.15
+	187	200	-7.160	1.566	201	-1.251	202	8.726	2.82	N	0		201	200	N	0		
+	188	201	1.566	1.251	202	0.035	203	2.817	1.29	N	0		202	201	N	0		
+	189	202	-1.251	0.035	203	-7.956	204	1.286	7.99	S	1	202	203	200		0	1.29	
+	190	200	-7.160	1.566	201	-7.956	204	8.726	9.52	S	1	200	201	204		0	8.73	
+	191	204	-7.956	0.521	205	-7.690	206	8.477	8.21	N	0		205	204	S	0		
+	192	205	0.521	7.690	206	1.321	207	8.210	9.01	S	1	205	206	204		0	8.21	
+	193	204	-7.956	1.321	207	-0.513	208	9.277	1.83	N	0		207	204	S	0.5		7.96
+	194	207	1.321	0.513	208	0.320	209	1.834	0.83	N	0		208	207	S	0.5		1.32
+	195	208	-0.513	0.320	209	-6.477	210	0.833	6.80	S	1	208	209	210		0	0.83	
+	196	210	-6.477	2.141	211	-1.275	212	8.618	3.42	N	0		211	210	S	0		
+	197	211	2.141	1.275	212	0.840	213	3.416	2.12	N	0		212	211	N	0		
+	198	212	-1.275	0.840	213	-5.535	214	2.115	6.38	S	1	212	213	210		0	2.12	
+	199	210	-6.477	2.141	211	-5.535	214	8.618	7.68	N	0		211	210	S	0.5		6.48
+	200	211	2.141	5.535	214	2.152	215	7.676	7.69	S	1	211	214	215		0	7.68	
+	201	215	2.152	1.580	216	0.805	217	3.732	2.39	N	0		216	215	S	0		
+	202	216	-1.580	0.805	217	-7.146	218	2.385	7.95	S	1	216	217	215		0	2.39	
+	203	215	2.152	7.146	218	1.524	219	9.298	8.67	N	0		218	215	S	0.5		2.15
+	204	218	-7.146	1.524	219	-1.225	220	8.670	2.75	N	0		219	218	N	0		
+	205	219	1.524	1.225	220	0.040	221	2.749	1.27	N	0		220	219	N	0		
+	206	220	-1.225	0.040	221	-7.914	222	1.265	7.95	S	1	220	221	218		0	1.27	
+	207	218	-7.146	1.524	219	-7.914	222	8.670	9.44	S	1	218	219	222		0	8.67	
+	208	222	-7.914	0.511	223	-7.693	224	8.425	8.20	N	0		223	222	S	0		

m	Paso	# Dato P1	P1	P2	# Dato P2	P3	# Dato P3	Y (Rango)	X	$\epsilon X > Y?$	# Ciclos	Pick/Valley Descartar	# Prox. P1	P1 Pend	P1 Pend es $\epsilon 1/2$ CICLO?	# Ciclos	Rangos Ciclo = 1	Rangos Ciclo = 0.5	
+	209	223	0.511	-7.693	224	1.341	225	8.204	9.03	S	1	223 224	222			0	8.20		
+	210	222	-7.914	1.341	225	-0.529	226	9.255	1.87	N	0		225	222	S	0.5		7.91	
+	211	225	1.341	-0.529	226	0.330	227	1.870	0.86	N	0		226	225	S	0.5		1.34	
+	212	226	-0.529	0.330	227	-6.470	228	0.859	6.80	S	1	226 227	228			0	0.86		
+	213	228	-6.470	1.436	229	-6.340	230	5.034	4.90	N	0		229	228	S	0.5		6.47	
+	214	229	-1.436	-6.340	230	-1.865	231	4.905	4.48	N	0		230	229	S	0.5		1.44	
+	215	230	-6.340	1.865	231	-5.919	232	4.475	4.05	N	0		231	230	S	0.5		6.34	
+	216	231	-1.865	5.919	232	-2.339	233	4.054	3.58	N	0		232	231	S	0.5		1.87	
+	217	232	-5.919	2.339	233	-5.112	234	3.580	2.77	N	0		233	232	S	0.5		5.92	
+	218	233	-2.339	5.112	234	-3.495	235	2.772	1.62	N	0		234	233	S	0.5		2.34	
																Total de ciclos completos		92.00	
																Total medios ciclos			49.00

Tabla 9

Reorganización de conteo de ciclos de mayor a menor magnitud de rango de momentos, para ciclos completos y medios ciclos. método de Range-Pair Counting. Rangos en Ton-m.

Rangos 1 Ciclo		Rangos 1/2 Ciclo		Rangos 1 Ciclo		Rangos 1/2 Ciclo	
#	σ	#	σ	#	σ	#	σ
Rango	(Ton-m)	Rango	(Ton-m)	Rango	(Ton-m)	Rango	(Ton-m)
1	9.588	1	9.454	30	7.659	30	2.160
2	8.799	2	7.956	31	7.644	31	2.154
3	8.729	3	7.931	32	7.644	32	2.153
4	8.726	4	7.920	33	7.642	33	2.153
5	8.685	5	7.914	34	7.635	34	2.152
6	8.674	6	7.914	35	7.634	35	2.152
7	8.670	7	7.913	36	7.634	36	2.150
8	8.663	8	7.909	37	7.610	37	2.149
9	8.660	9	7.900	38	7.423	38	1.865
10	8.652	10	7.895	39	6.665	39	1.436
11	8.645	11	7.851	40	5.391	40	1.341
12	8.644	12	7.821	41	3.965	41	1.330
13	8.609	13	6.495	42	2.430	42	1.329
14	8.534	14	6.481	43	2.418	43	1.328
15	8.215	15	6.480	44	2.408	44	1.328
16	8.210	16	6.477	45	2.407	45	1.328
17	8.204	17	6.473	46	2.400	46	1.321
18	8.202	18	6.473	47	2.385	47	1.320
19	8.198	19	6.473	48	2.364	48	1.319
20	8.197	20	6.471	49	2.340	49	1.294
21	8.196	21	6.470	50	2.332		
22	8.196	22	6.460	51	2.332		
23	8.185	23	6.340	52	2.330		
24	8.175	24	5.919	53	2.315		
25	7.829	25	3.521	54	2.139		
26	7.802	26	2.339	55	2.127		
27	7.795	27	2.210	56	2.120		
28	7.676	28	2.174	57	2.117		
29	7.666	29	2.160	58	2.116		
				59	2.115		

Rangos 1 Ciclo		Rangos 1/2 Ciclo		Rangos 1 Ciclo		Rangos 1/2 Ciclo	
#	σ	#	σ	#	σ	#	σ
Rango	(Ton-m)	Rango	(Ton-m)	Rango	(Ton-m)	Rango	(Ton-m)
60	2.114			77	0.969		
61	2.111			78	0.859		
62	2.105			79	0.843		
63	2.088			80	0.833		
64	1.948			81	0.823		
65	1.466			82	0.815		
66	1.286			83	0.813		
67	1.270			84	0.812		
68	1.265			85	0.808		
69	1.250			86	0.804		
70	1.249			87	0.803		
71	1.248			88	0.783		
72	1.248			89	0.726		
73	1.247			90	0.688		
74	1.237			91	0.664		
75	1.226			92	0.229		
76	1.145						

Tabla 10

Resumen conteo de ciclos transformados a esfuerzos en Kg/cm². Range Pair Counting.

Rangos 1 Ciclo		Rangos 1/2 Ciclo		Rangos 1 Ciclo		Rangos 1/2 Ciclo	
#	Rangos 1	#	Rangos	#	Rangos 1	#	Rangos
Rango	(Kg/cm ²)	Rango	1/2 Ciclo	Rango	(Kg/cm ²)	Rango	1/2 Ciclo
	(Kg/cm ²)		(Kg/cm ²)		(Kg/cm ²)		(Kg/cm ²)
1	287.03	1	283.01	10	259.010	10	236.353
2	263.417	2	238.180	11	258.818	11	235.033
3	261.318	3	237.416	12	258.761	12	234.144
4	261.231	4	237.102	13	257.729	13	194.442
5	260.004	5	236.922	14	255.468	14	194.016
6	259.668	6	236.910	15	245.933	15	193.992
7	259.555	7	236.901	16	245.784	16	193.903
8	259.351	8	236.773	17	245.604	17	193.786
9	259.255	9	236.503	18	245.544	18	193.783

Rangos 1 Ciclo		Rangos 1/2 Ciclo		Rangos 1 Ciclo		Rangos 1/2 Ciclo	
# Rango	Rangos 1 Ciclo (Kg/cm2)	# Rango	Rangos 1/2 Ciclo (Kg/cm2)	# Rango	Rangos 1 Ciclo (Kg/cm2)	# Rango	Rangos 1/2 Ciclo (Kg/cm2)
19	245.424	19	193.774	56	63.461		
20	245.397	20	193.723	57	63.377		
21	245.368	21	193.693	58	63.347		
22	245.353	22	193.394	59	63.320		
23	245.044	23	189.810	60	63.278		
24	244.748	24	177.195	61	63.197		
25	234.390	25	105.403	62	63.018		
26	233.572	26	70.035	63	62.494		
27	233.372	27	66.149	64	58.303		
28	229.797	28	65.089	65	43.891		
29	229.492	29	64.664	66	38.511		
30	229.297	30	64.661	67	38.020		
31	228.842	31	64.473	68	37.873		
32	228.842	32	64.452	69	37.406		
33	228.779	33	64.440	70	37.382		
34	228.570	34	64.419	71	37.373		
35	228.540	35	64.413	72	37.350		
36	228.540	36	64.353	73	37.332		
37	227.821	37	64.344	74	37.032		
38	222.223	38	55.836	75	36.703		
39	199.534	39	42.981	76	34.284		
40	161.391	40	40.146	77	29.012		
41	118.701	41	39.816	78	25.719		
42	72.753	42	39.786	79	25.237		
43	72.388	43	39.768	80	24.938		
44	72.089	44	39.756	81	24.638		
45	72.053	45	39.747	82	24.399		
46	71.849	46	39.532	83	24.345		
47	71.400	47	39.517	84	24.309		
48	70.783	48	39.487	85	24.186		
49	70.053	49	38.742	86	24.066		
50	69.819			87	24.039		
51	69.798			88	23.447		
52	69.738			89	21.728		
53	69.304			90	20.585		
54	64.035			91	19.866		
55	63.688			92	6.865		

Tabla 11

Daño acumulado por la Regla de Palmgreen-Miner, esfuerzos en Kg/cm² (>F_{TH}). Ciclos a partir del Range Pair Counting.

Rango de esfuerzos > F _{th} --> Acumula fatiga		Daño acumulado Palmgreen-Miner /Range Pair (1 año)			
σ 1 ciclo (Kg/cm ²) > F _{th}	σ 1/2 ciclo (Kg/cm ²) > F _{th}	Rangos 1 Ciclo # Rango	Daño n i/Ni	Rangos 1/2 Ciclo # Rango	Daño n i/Ni
287.03	283.01	1	1.26E-03	1	6.06E-04
263.42	238.18	2	9.78E-04	2	3.61E-04
261.32	237.42	3	9.54E-04	3	3.58E-04
261.23	237.10	4	9.53E-04	4	3.56E-04
260.00	236.92	5	9.40E-04	5	3.56E-04
259.67	236.91	6	9.36E-04	6	3.56E-04
259.55	236.90	7	9.35E-04	7	3.56E-04
259.35	236.77	8	9.33E-04	8	3.55E-04
259.26	236.50	9	9.32E-04	9	3.54E-04
259.01	236.35	10	9.29E-04	10	3.53E-04
258.82	235.03	11	9.27E-04	11	3.47E-04
258.76	234.14	12	9.27E-04	12	3.43E-04
257.73	194.44	13	9.16E-04	13	1.97E-04
255.47	194.02	14	8.92E-04	14	1.95E-04
245.93	193.99	15	7.96E-04	15	1.95E-04
245.78	193.90	16	7.94E-04	16	1.95E-04
245.60	193.79	17	7.92E-04	17	1.95E-04
245.54	193.78	18	7.92E-04	18	1.95E-04
245.42	193.77	19	7.91E-04	19	1.95E-04
245.40	193.72	20	7.90E-04	20	1.94E-04
245.37	193.69	21	7.90E-04	21	1.94E-04
245.35	193.39	22	7.90E-04	22	1.93E-04
245.04	189.81	23	7.87E-04	23	1.83E-04
244.75		24	7.84E-04	24	
234.39		25	6.89E-04		
233.57		26	6.81E-04		
233.37		27	6.80E-04		
229.80		28	6.49E-04		
229.49		29	6.46E-04		

Rango de esfuerzos > F _{th} --> Acumula fatiga		Daño acumulado Palmgreen-Miner /Range Pair (1 año)	
σ 1 ciclo (Kg/cm ²) > F _{th}	σ 1/2 ciclo (Kg/cm ²) > F _{th}	Rangos 1 Ciclo	Rangos 1/2 Ciclo
229.30		30	6.45E-04
228.84		31	6.41E-04
228.84		32	6.41E-04
228.78		33	6.40E-04
228.57		34	6.39E-04
228.54		35	6.38E-04
228.54		36	6.38E-04
227.82		37	6.32E-04
222.22		38	5.87E-04
199.53		39	4.25E-04
Sub total daño acum/ año		0.031	0.007
Sub daño acum 1 ciclos + 1/2 ciclos		0.037	
Años esperados a la falla		26.72	

Tabla 12

Daño acumulado no lineal por método de Manson-Halford, esfuerzos en Kg/cm² (>F_{TH}). Ciclos a partir del Range Pair Counting.

	Rangos 1 Ciclo (Ton-m)	Rangos 0.5 Ciclo (Ton-m)	Rangos 1 Ciclo (Kg/cm ²)	Rangos 0.5 Ciclo (Kg/cm ²)	#Dato	Daño - N _i - ni / Ni
1	5.39		161.39		0	0.00E+00 0.00E+00
2	0.66		19.87		0	0.00E+00 0.00E+00
3		9.45		283	1	5.98E+06 6.06E-04
4	9.59		287.03		2	5.73E+06 1.26E-03
5	3.97		118.70		0	0.00E+00 0.00E+00
6		3.52		105	0	0.00E+00 0.00E+00
7	1.95		58.30		0	0.00E+00 0.00E+00
8	6.67		199.53		3	1.71E+07 4.25E-04
9	0.97		29.01		0	0.00E+00 0.00E+00

	Rangos 1 Ciclo (Ton-m)	Rangos 0.5 Ciclo (Ton- m)	Rangos 1 Ciclo (Kg/cm2)	Rangos 0.5 Ciclo (Kg/cm2)	#Dato Daño - Ni - ni / Ni	
10	7.42		222.22		4	1.23E+07 5.87E-04
11	1.47		43.89			0.00E+00 0.00E+00
12	8.53		255.47		5	8.13E+06 8.92E-04
13	8.73		261.32		6	7.59E+06 9.54E-04
14	0.69		20.58			0.00E+00 0.00E+00
15		7.82		234	7	1.06E+07 3.43E-04
16	7.83		234.39		8	1.05E+07 6.89E-04
17	2.43		72.75			0.00E+00 0.00E+00
18		2.21		66		0.00E+00 0.00E+00
19	2.41		72.05			0.00E+00 0.00E+00
20	7.80		233.37		9	1.07E+07 6.80E-04
21	1.15		34.28			0.00E+00 0.00E+00
22	8.66		259.35		10	7.77E+06 9.33E-04
23	8.18		244.75		11	9.24E+06 7.84E-04
24		7.85		235	12	1.04E+07 3.47E-04
25		1.29		39		0.00E+00 0.00E+00
26	0.78		23.45			0.00E+00 0.00E+00
27	2.14		64.04			0.00E+00 0.00E+00
28		6.48		194	13	1.86E+07 1.95E-04
29	7.66		229.30		14	1.12E+07 6.45E-04
30	2.36		70.78			0.00E+00 0.00E+00
31		2.17		65		0.00E+00 0.00E+00
32	1.25		37.35			0.00E+00 0.00E+00
33	8.65		259.01		15	7.80E+06 9.29E-04
34	0.73		21.73			0.00E+00 0.00E+00
35	0.23		6.86			0.00E+00 0.00E+00

	Rangos 1 Ciclo (Ton-m)	Rangos 0.5 Ciclo (Ton- m)	Rangos 1 Ciclo (Kg/cm2)	Rangos 0.5 Ciclo (Kg/cm2)	#Dato Daño - Ni - ni / Ni	
36	0.81		24.19		0.00E+00	0.00E+00
37	7.80		233.57	16	1.06E+07	6.81E-04
38	2.11		63.02		0.00E+00	0.00E+00
39	7.64		228.78	17	1.13E+07	6.40E-04
40	2.33		69.74		0.00E+00	0.00E+00
41		2.15		64	0.00E+00	0.00E+00
42	1.25		37.33		0.00E+00	0.00E+00
43	8.64		258.76	18	7.82E+06	9.27E-04
44	8.20		245.35	19	9.17E+06	7.90E-04
45		7.91		237	20 1.02E+07	3.56E-04
46		1.33		40	0.00E+00	0.00E+00
47	0.80		24.07		0.00E+00	0.00E+00
48	2.13		63.69		0.00E+00	0.00E+00
49		6.47		194	21 1.86E+07	1.95E-04
50	7.64		228.84	22	1.13E+07	6.41E-04
51	2.33		69.80		0.00E+00	0.00E+00
52		2.15		64	0.00E+00	0.00E+00
53	1.25		37.37		0.00E+00	0.00E+00
54	8.65		258.82	23	7.82E+06	9.27E-04
55	8.20		245.37	24	9.17E+06	7.90E-04
56		7.91		237	25 1.02E+07	3.56E-04
57		1.33		40	0.00E+00	0.00E+00
58	0.80		24.04		0.00E+00	0.00E+00
59	2.11		63.28		0.00E+00	0.00E+00
60		6.48		194	26 1.86E+07	1.95E-04
61	7.64		228.84	27	1.13E+07	6.41E-04
62	2.33		69.82		0.00E+00	0.00E+00

	Rangos 1 Ciclo (Ton-m)	Rangos 0.5 Ciclo (Ton- m)	Rangos 1 Ciclo (Kg/cm2)	Rangos 0.5 Ciclo (Kg/cm2)	#Dato Daño - Ni - ni / Ni	
63		2.16		65	0.00E+00	0.00E+00
64	1.25		37.38		0.00E+00	0.00E+00
65	8.67		259.67		28 7.74E+06	9.36E-04
66	8.19		245.04		29 9.21E+06	7.87E-04
67		7.93		237	30 1.01E+07	3.58E-04
68		1.33		40	0.00E+00	0.00E+00
69	0.82		24.40		0.00E+00	0.00E+00
70	2.12		63.46		0.00E+00	0.00E+00
71		6.47		194	31 1.86E+07	1.95E-04
72	7.67		229.49		32 1.12E+07	6.46E-04
73	2.34		70.05		0.00E+00	0.00E+00
74		2.16		65	0.00E+00	0.00E+00
75	1.25		37.41		0.00E+00	0.00E+00
76	8.66		259.26		33 7.78E+06	9.32E-04
77	8.20		245.54		34 9.15E+06	7.92E-04
78		7.90		237	35 1.02E+07	3.54E-04
79		1.32		40	0.00E+00	0.00E+00
80	0.81		24.34		0.00E+00	0.00E+00
81	2.12		63.38		0.00E+00	0.00E+00
82		6.46		193	36 1.87E+07	1.93E-04
83	7.63		228.54		37 1.14E+07	6.38E-04
84	2.41		72.09		0.00E+00	0.00E+00
85		2.15		64	0.00E+00	0.00E+00
86	1.27		38.02		0.00E+00	0.00E+00
87	8.69		260.00		38 7.71E+06	9.40E-04
88	8.22		245.93		39 9.11E+06	7.96E-04
89		7.92		237	40 1.02E+07	3.56E-04

	Rangos 1 Ciclo (Ton-m)	Rangos 0.5 Ciclo (Ton- m)	Rangos 1 Ciclo (Kg/cm2)	Rangos 0.5 Ciclo (Kg/cm2)	#Dato Daño - Ni - ni / Ni	
90		1.33		40	0.00E+00	0.00E+00
91	0.82		24.64		0.00E+00	0.00E+00
92	2.12		63.35		0.00E+00	0.00E+00
93		6.50		194	41 1.84E+07	1.97E-04
94	7.63		228.54	42	1.14E+07	6.38E-04
95	2.40		71.85		0.00E+00	0.00E+00
96		2.15		64	0.00E+00	0.00E+00
97	1.23		36.70		0.00E+00	0.00E+00
98	8.61		257.73	43	7.91E+06	9.16E-04
99	8.20		245.40	44	9.17E+06	7.90E-04
100		7.91		237	45 1.02E+07	3.55E-04
101		1.33		40	0.00E+00	0.00E+00
102	0.84		25.24		0.00E+00	0.00E+00
103	2.11		63.20		0.00E+00	0.00E+00
104		6.47		194	46 1.86E+07	1.94E-04
105	7.64		228.57	47	1.13E+07	6.39E-04
106	2.32		69.30		0.00E+00	0.00E+00
107		2.15		64	0.00E+00	0.00E+00
108	1.24		37.03		0.00E+00	0.00E+00
109	8.80		263.42	48	7.41E+06	9.78E-04
110	8.20		245.42	49	9.17E+06	7.91E-04
111		7.90		236	50 1.03E+07	3.53E-04
112		1.32		39	0.00E+00	0.00E+00
113	0.81		24.31		0.00E+00	0.00E+00
114	2.09		62.49		0.00E+00	0.00E+00
115		6.47		194	51 1.86E+07	1.95E-04
116	7.61		227.82	52	1.15E+07	6.32E-04

	Rangos 1 Ciclo (Ton-m)	Rangos 0.5 Ciclo (Ton- m)	Rangos 1 Ciclo (Kg/cm2)	Rangos 0.5 Ciclo (Kg/cm2)	#Dato Daño - Ni - ni / Ni		
117	2.42		72.39		0.00E+00	0.00E+00	
118		2.15		64	0.00E+00	0.00E+00	
119	1.29		38.51		0.00E+00	0.00E+00	
120	8.73		261.23	53	7.60E+06	9.53E-04	
121	8.21		245.78	54	9.13E+06	7.94E-04	
122		7.96		238	55	1.00E+07	3.61E-04
123		1.32		40	0.00E+00	0.00E+00	
124	0.83		24.94		0.00E+00	0.00E+00	
125	2.12		63.32		0.00E+00	0.00E+00	
126		6.48		194	56	1.86E+07	1.95E-04
127	7.68		229.80	57	1.12E+07	6.49E-04	
128	2.39		71.40		0.00E+00	0.00E+00	
129		2.15		64	0.00E+00	0.00E+00	
130	1.27		37.87		0.00E+00	0.00E+00	
131	8.67		259.55	58	7.75E+06	9.35E-04	
132	8.20		245.60	59	9.15E+06	7.92E-04	
133		7.91		237	60	1.02E+07	3.56E-04
134		1.34		40	0.00E+00	0.00E+00	
135	0.86		25.72		0.00E+00	0.00E+00	
136		6.47		194	61	1.86E+07	1.94E-04
137		1.44		43	0.00E+00	0.00E+00	
138		6.34		190	62	1.98E+07	1.83E-04
139		1.87		56	0.00E+00	0.00E+00	
140		5.92		177	0.00E+00	0.00E+00	
141		2.34		70	0.00E+00	0.00E+00	
Total ciclos completos			92.00				
Total medios ciclos			49.00				
Total ciclos acumulan daños			62.00				

Tabla 13

Resumen daño acumulado no lineal por método de Manson-Halford, esfuerzos en Kg/cm² (>F_{TH}). Ciclos a partir del Range Pair Counting.

Secuencia	Ciclos Ni a la falla	Daño ni / Ni	Acumulación de Daño (DCA)
1	5.98E+06	6.06E-04	5.34E-04
2	5.73E+06	1.26E-03	1.80E-03
3	1.71E+07	4.25E-04	1.72E-02
4	1.23E+07	5.87E-04	1.04E-02
5	8.13E+06	8.92E-04	5.44E-03
6	7.59E+06	9.54E-04	5.66E-03
7	1.06E+07	3.43E-04	1.11E-02
8	1.05E+07	6.89E-04	1.17E-02
9	1.07E+07	6.80E-04	1.26E-02
10	7.77E+06	9.33E-04	7.94E-03
11	9.24E+06	7.84E-04	1.18E-02
12	1.04E+07	3.47E-04	1.49E-02
13	1.86E+07	1.95E-04	3.55E-02
14	1.12E+07	6.45E-04	1.76E-02
15	7.80E+06	9.29E-04	1.02E-02
16	1.06E+07	6.81E-04	1.82E-02
17	1.13E+07	6.40E-04	2.07E-02
18	7.82E+06	9.27E-04	1.21E-02
19	9.17E+06	7.90E-04	1.67E-02
20	1.02E+07	3.56E-04	2.01E-02
21	1.86E+07	1.95E-04	4.66E-02
22	1.13E+07	6.41E-04	2.43E-02
23	7.82E+06	9.27E-04	1.44E-02
24	9.17E+06	7.90E-04	1.95E-02
25	1.02E+07	3.56E-04	2.33E-02
26	1.86E+07	1.95E-04	5.21E-02
27	1.13E+07	6.41E-04	2.79E-02
28	7.74E+06	9.36E-04	1.65E-02
29	9.21E+06	7.87E-04	2.25E-02
30	1.01E+07	3.58E-04	2.62E-02
31	1.86E+07	1.95E-04	5.79E-02
32	1.12E+07	6.46E-04	3.11E-02
33	7.78E+06	9.32E-04	1.89E-02
34	9.15E+06	7.92E-04	2.51E-02
35	1.02E+07	3.54E-04	2.99E-02
36	1.87E+07	1.93E-04	6.37E-02

Secuencia	Ciclos N i a la falla	Daño n i / N i	Acumulación de Daño (DCA)
37	1.14E+07	6.38E-04	3.52E-02
38	7.71E+06	9.40E-04	2.11E-02
39	9.11E+06	7.96E-04	2.78E-02
40	1.02E+07	3.56E-04	3.28E-02
41	1.84E+07	1.97E-04	6.78E-02
42	1.14E+07	6.38E-04	3.88E-02
43	7.91E+06	9.16E-04	2.43E-02
44	9.17E+06	7.90E-04	3.09E-02
45	1.02E+07	3.55E-04	3.61E-02
46	1.86E+07	1.94E-04	7.37E-02
47	1.13E+07	6.39E-04	4.22E-02
48	7.41E+06	9.78E-04	2.44E-02
49	9.17E+06	7.91E-04	3.38E-02
50	1.03E+07	3.53E-04	3.96E-02
51	1.86E+07	1.95E-04	7.88E-02
52	1.15E+07	6.32E-04	4.63E-02
53	7.60E+06	9.53E-04	2.77E-02
54	9.13E+06	7.94E-04	3.65E-02
55	1.00E+07	3.61E-04	4.16E-02
56	1.86E+07	1.95E-04	8.36E-02
57	1.12E+07	6.49E-04	4.84E-02
58	7.75E+06	9.35E-04	3.10E-02
59	9.15E+06	7.92E-04	3.95E-02
60	1.02E+07	3.56E-04	4.56E-02
61	1.86E+07	1.94E-04	
62	1.98E+07	1.83E-04	
Sub total daño acumulado/año			1.77E+00
Años esperados a la falla			0.57

5.2.2. Rainflow Cycle Counting

Tabla 14

Resultados del conteo de ciclos para la historia de esfuerzos del detalle estructural a partir del Rainflow Cycle Counting corrido en Python (Diagrama 2). Rangos en Kg/cm².

Rangos 1 Ciclo (Kg-cm2)		Rangos 1/2 Ciclo (Kg-cm2)		Rangos 1 Ciclo (Kg-cm2)		Rangos 1/2 Ciclo (Kg-cm2)	
# Rango	σ Rango	# Rango	σ Rango	# Rango	σ Rango	# Rango	σ Rango
1	118.4	1	339.7	34	33.2		
2	162	2	275.7	35	220.9		
3	324.7	3	251.8	36	28.9		
4	29.2	4	238.4	37	11		
5	109.5	5	238.3	38	73.1		
6	19.5	6	238.2	39	1.1		
7	126.4	7	234.7	40	6.2		
8	3.8	8	167.8	41	121.8		
9	29.5			42	169.6		
10	131.7			43	209.7		
11	161.2			44	0.2		
12	165.3			45	18		
13	218.4			46	122.5		
14	65.1			47	186.9		
15	48.6			48	235.7		
16	10			49	10.2		
17	33			50	24.1		
18	27.8			51	74.1		
19	219.9			52	20.6		
20	11.9			53	36.6		
21	68.7			54	220.7		
22	1.8			55	30.9		
23	6.3			56	12.1		
24	112.6			57	76.6		
25	171.8			58	4		
26	211.6			59	8.4		
27	25.5			60	123.5		
28	115.8			61	170.2		
29	9.4			62	208		
30	19.1			63	2.1		
31	194.7			64	21.2		
32	72.6			65	124.8		
33	19.5						

Rangos 1 Ciclo (Kg-cm2)		Rangos 1/2 Ciclo (Kg-cm2)	
# Rango	σ Rango	# Rango	σ Rango
66	188.1		
67	12.9		
68	26.2		
69	76.6		
70	22.9		
71	39.1		
72	220.4		
73	33.3		
74	14.6		
75	78.9		
76	1		
77	10.7		
78	6.2		
79	125.8		
80	171.8		
81	208.1		
82	4.5		
83	23.9		
84	127.3		
85	188		
86	238.1		
87	15.3		
88	28.6		
89	79		
90	25.3		
91	41.5		
92	220.4		
93	35.7		
94	17		
95	81.3		
96	3.4		
97	13.1		
98	8.7		
99	128.2		
100	174.2		
101	208.1		
102	6.9		
103	26		
104	129.7		
105	188		
106	17.7		

Rangos 1 Ciclo (Kg-cm2)		Rangos 1/2 Ciclo (Kg-cm2)	
# Rango	σ Rango	# Rango	σ Rango
107	31		
108	81.4		
109	27.7		
110	43.9		
111	220.4		
112	38.1		
113	20.7		
114	83.7		
115	5.7		
116	15.5		
117	11.1		
118	208.1		
119	130.6		
120	176.6		
121	9.3		
122	28.4		
123	132.1		
124	188		
125	20.1		
126	33.4		
127	83.8		
128	30.1		
129	46.3		
130	220.4		
131	238.2		
132	238.2		
133	40.5		
134	1.7		
135	21.8		
136	86		
137	210.3		
138	8.2		
139	17.9		
140	13.5		
141	133		
142	179		
143	11.7		
144	30.8		
145	134.5		
146	188		
147	238.2		

Rangos 1 Ciclo (Kg-cm2)		Rangos 1/2 Ciclo (Kg-cm2)	
#	σ	#	σ
Rango	Rango	Rango	Rango
148	22.5		
149	35.8		
150	86.2		
151	32.5		
152	48.7		
153	220.4		
154	42.8		
155	4.1		
156	24.6		
157	88.5		
158	214.2		
159	10.6		
160	20.3		
161	15.8		
162	135.4		
163	181.4		
164	14.1		
165	33.2		
166	136.9		
167	188.1		
168	238.2		
169	24.9		
170	38.2		
171	88.6		
172	34.9		
173	51.1		
174	220.4		
175	45.5		
176	6.5		
177	26.5		
178	90.9		
179	216.9		
180	13		
181	22.7		
182	18.2		
183	137.8		
184	183.8		
185	16.5		
186	35.7		
187	139.3		
188	188.1		

Rangos 1 Ciclo (Kg-cm2)		Rangos 1/2 Ciclo (Kg-cm2)	
#	σ	#	σ
Rango	Rango	Rango	Rango
189	238.2		
190	27.3		
191	40.7		
192	91		
193	37.3		
194	53.5		
195	220.4		
196	48.1		
197	8.9		
198	29.3		
199	93.5		
200	220.8		
201	15.3		
202	25.1		
203	20.6		
204	140.2		
205	186.3		
206	18.8		
207	38.1		
208	141.7		
209	188.1		
210	238.2		
211	29.7		
212	43		
213	93.4		
214	39.7		
215	55.9		
216	220.5		
217	50.7		
218	11.3		
219	32		
220	96.3		
221	220.4		
222	17.8		
223	27.5		
224	23		
225	142.6		
226	188.7		
227	21.2		
228	40.5		
229	144.1		

Rangos 1 Ciclo (Kg-cm2)		Rangos 1/2 Ciclo (Kg-cm2)		Rangos 1 Ciclo (Kg-cm2)		Rangos 1/2 Ciclo (Kg-cm2)	
#	σ	#	σ	#	σ	#	σ
Rango	Rango	Rango	Rango	Rango	Rango	Rango	Rango
230	188.1			245	25.4		
231	238.2			246	145		
232	32.1			247	191.1		
233	45.4			248	115.1		
234	95.8			249	173.2		
235	42.1			250	123.1		
236	58.4			251	179.9		
237	220.5			252	109.5		
238	52.2			253	193		
239	13.7			254	103		
240	33.9			255	189.8		
241	98.1			256	113.8		
242	224			257	177.1		
243	20.1			258	126.1		
244	29.9						

Tabla 15

Daño acumulado por la Regla de Palmgreen-Miner, esfuerzos en Kg/cm² (>F_{TH}). Ciclos a partir del Rainflow Cycle Counting.

Resumen de Rangos > F _{th}				Daño acumulado Palmgreen Miner/Rainflow Counting (1 año)			
	σ 1 ciclo > F _{th}	σ 1/2 ciclo > F _{th}	# Rango	Rangos 1 Ciclo	Rangos 1/2 Ciclo	Daño n _i /Ni	Daño n _i /Ni
1	324.7	340	1.0	1.83E-03	1.0	1.05E-03	
2	238.2	276	2.0	7.23E-04	2.0	5.60E-04	
3	238.2	252	3.0	7.23E-04	3.0	4.27E-04	
4	238.2	238	4.0	7.23E-04	4.0	3.62E-04	
5	238.2	238	5.0	7.23E-04	5.0	3.62E-04	
6	238.2	238	6.0	7.23E-04	6.0	3.61E-04	
7	238.2	235	7.0	7.23E-04	7.0	3.46E-04	
8	238.2		8.0	7.23E-04			
9	238.1		9.0	7.22E-04			
10	235.7		10.0	7.00E-04			

Resumen de Rangos > F th			Daño acumulado Palmgreen Miner/Rainflow Counting (1 año)	
	σ 1 ciclo > F th	σ 1/2 ciclo > F th	Rangos 1 Ciclo	Rangos 1/2 Ciclo
11	224	11.0	6.01E-04	
12	220.9	12.0	5.76E-04	
13	220.8	13.0	5.76E-04	
14	220.7	14.0	5.75E-04	
15	220.5	15.0	5.73E-04	
16	220.5	16.0	5.73E-04	
17	220.4	17.0	5.73E-04	
18	220.4	18.0	5.73E-04	
19	220.4	19.0	5.73E-04	
20	220.4	20.0	5.73E-04	
21	220.4	21.0	5.73E-04	
22	220.4	22.0	5.73E-04	
23	220.4	23.0	5.73E-04	
24	220.4	24.0	5.73E-04	
25	219.9	25.0	5.69E-04	
26	218.4	26.0	5.57E-04	
27	216.9	27.0	5.46E-04	
28	214.2	28.0	5.26E-04	
29	211.6	29.0	5.07E-04	
30	210.3	30.0	4.97E-04	
31	209.7	31.0	4.93E-04	
32	208.1	32.0	4.82E-04	
33	208.1	33.0	4.82E-04	
34	208.1	34.0	4.82E-04	
35	208	35.0	4.81E-04	
36	194.7	36.0	3.95E-04	
37	193	37.0	3.84E-04	
38	191.1	38.0	3.73E-04	
39	189.8	39.0	3.66E-04	
40	188.7	40.0	3.59E-04	
41	188.1	41.0	3.56E-04	
42	188.1	42.0	3.56E-04	
43	188.1	43.0	3.56E-04	
44	188.1	44.0	3.56E-04	
45	188.1	45.0	3.56E-04	
46	188	46.0	3.55E-04	
47	188	47.0	3.55E-04	
48	188	48.0	3.55E-04	
49	188	49.0	3.55E-04	
50	186.9	50.0	3.49E-04	

Resumen de Rangos > F _{th}			Daño acumulado Palmgreen Miner/Rainflow Counting (1 año)	
	σ 1 ciclo > F _{th}	σ 1/2 ciclo > F _{th}	Rangos 1 Ciclo	Rangos 1/2 Ciclo
51	186.3	51.0	3.46E-04	
52	183.8	52.0	3.32E-04	
Daño acumulado / año			0.028	0.003
Total daño acumulado / año			0.032	
Años para la falla			31.68	

Tabla 16

Daño acumulado no lineal por método de Manson-Halford, esfuerzos en Kg/cm² (>F_{TH}). Ciclos a partir del Rainflow Cycle Counting.

RESUMEN RANGOS (KG-CM2)				CICLOS A LA FALLA		DAÑO ni/Ni
Rangos 1 Ciclo (Ton-m)	Rangos 0.5 Ciclo (Ton-m)	Rangos 1 Ciclo (Kg/cm2)	Rangos 0.5 Ciclo (Kg/cm2)	#Dato Daño - Ni - ni / Ni		
				0		
1	118.4	118.4			0.00E+00	0.00E+00
2	162	162.0			0.00E+00	0.00E+00
3	324.7	324.7		1	3.96E+06	1.83E-03
4	29.2	29.2			0.00E+00	0.00E+00
5	109.5	109.5			0.00E+00	0.00E+00
6	19.5	19.5			0.00E+00	0.00E+00
7	126.4	126.4			0.00E+00	0.00E+00
8	3.8	3.8			0.00E+00	0.00E+00
9	29.5	29.5			0.00E+00	0.00E+00
10	131.7	131.7			0.00E+00	0.00E+00
11	161.2	161.2			0.00E+00	0.00E+00
12	165.3	165.3			0.00E+00	0.00E+00
13	218.4	218.4		2	1.30E+07	5.57E-04
14	65.1	65.1			0.00E+00	0.00E+00
15	48.6	48.6			0.00E+00	0.00E+00
16	10	10.0			0.00E+00	0.00E+00
17	33	33.0			0.00E+00	0.00E+00
18	27.8	27.8			0.00E+00	0.00E+00
19	219.9	219.9		3	1.27E+07	5.69E-04

	RESUMEN RANGOS (KG-CM2)				CICLOS A LA FALLA	DAÑO ni/Ni
	Rangos 1 Ciclo (Ton- m)	Rangos 0.5 Ciclo (Ton- m)	Rangos 1 Ciclo (Kg/cm2)	Rangos 0.5 Ciclo (Kg/cm2)		
20	11.9		11.9			0.00E+00 0.00E+00
21	68.7		68.7			0.00E+00 0.00E+00
22	1.8		1.8			0.00E+00 0.00E+00
23	6.3		6.3			0.00E+00 0.00E+00
24	112.6		112.6			0.00E+00 0.00E+00
25	171.8		171.8			0.00E+00 0.00E+00
26	211.6		211.6		4	1.43E+07 5.07E-04
27	25.5		25.5			0.00E+00 0.00E+00
28	115.8		115.8			0.00E+00 0.00E+00
29	9.4		9.4			0.00E+00 0.00E+00
30	19.1		19.1			0.00E+00 0.00E+00
31	194.7		194.7		5	1.84E+07 3.95E-04
32	72.6		72.6			0.00E+00 0.00E+00
33	19.5		19.5			0.00E+00 0.00E+00
34	33.2		33.2			0.00E+00 0.00E+00
35	220.9		220.9		6	1.26E+07 5.76E-04
36	28.9		28.9			0.00E+00 0.00E+00
37	11		11.0			0.00E+00 0.00E+00
38	73.1		73.1			0.00E+00 0.00E+00
39	1.1		1.1			0.00E+00 0.00E+00
40	6.2		6.2			0.00E+00 0.00E+00
41	121.8		121.8			0.00E+00 0.00E+00
42	169.6		169.6			0.00E+00 0.00E+00
43	209.7		209.7		7	1.47E+07 4.93E-04
44	0.2		0.2			0.00E+00 0.00E+00
45	18		18.0			0.00E+00 0.00E+00
46	122.5		122.5			0.00E+00 0.00E+00
47	186.9		186.9		8	2.08E+07 3.49E-04
48	235.7		235.7		9	1.03E+07 7.00E-04
49	10.2		10.2			0.00E+00 0.00E+00
50	24.1		24.1			0.00E+00 0.00E+00
51	74.1		74.1			0.00E+00 0.00E+00
52	20.6		20.6			0.00E+00 0.00E+00
53	36.6		36.6			0.00E+00 0.00E+00
54	220.7		220.7		10	1.26E+07 5.75E-04
55	30.9		30.9			0.00E+00 0.00E+00
56	12.1		12.1			0.00E+00 0.00E+00
57	76.6		76.6			0.00E+00 0.00E+00
58	4		4.0			0.00E+00 0.00E+00
59	8.4		8.4			0.00E+00 0.00E+00

	RESUMEN RANGOS (KG-CM2)				CICLOS A LA FALLA		DAÑO
	Rangos 1 Ciclo (Ton- m)	Rangos 0.5 Ciclo (Ton- m)	Rangos 1 Ciclo (Kg/cm2)	Rangos 0.5 Ciclo (Kg/cm2)	#Dato Daño - N i - ni / Ni		ni/Ni
60	123.5		123.5			0.00E+00	0.00E+00
61	170.2		170.2			0.00E+00	0.00E+00
62	208		208.0		11	1.51E+07	4.81E-04
63	2.1		2.1			0.00E+00	0.00E+00
64	21.2		21.2			0.00E+00	0.00E+00
65	124.8		124.8			0.00E+00	0.00E+00
66	188.1		188.1		12	2.04E+07	3.56E-04
67	12.9		12.9			0.00E+00	0.00E+00
68	26.2		26.2			0.00E+00	0.00E+00
69	76.6		76.6			0.00E+00	0.00E+00
70	22.9		22.9			0.00E+00	0.00E+00
71	39.1		39.1			0.00E+00	0.00E+00
72	220.4		220.4		13	1.27E+07	5.73E-04
73	33.3		33.3			0.00E+00	0.00E+00
74	14.6		14.6			0.00E+00	0.00E+00
75	78.9		78.9			0.00E+00	0.00E+00
76	1		1.0			0.00E+00	0.00E+00
77	10.7		10.7			0.00E+00	0.00E+00
78	6.2		6.2			0.00E+00	0.00E+00
79	125.8		125.8			0.00E+00	0.00E+00
80	171.8		171.8			0.00E+00	0.00E+00
81	208.1		208.1		14	1.50E+07	4.82E-04
82	4.5		4.5			0.00E+00	0.00E+00
83	23.9		23.9			0.00E+00	0.00E+00
84	127.3		127.3			0.00E+00	0.00E+00
85	188		188.0		15	2.04E+07	3.55E-04
86	238.1		238.1		16	1.00E+07	7.22E-04
87	15.3		15.3			0.00E+00	0.00E+00
88	28.6		28.6			0.00E+00	0.00E+00
89	79		79.0			0.00E+00	0.00E+00
90	25.3		25.3			0.00E+00	0.00E+00
91	41.5		41.5			0.00E+00	0.00E+00
92	220.4		220.4		17	1.27E+07	5.73E-04
93	35.7		35.7			0.00E+00	0.00E+00
94	17		17.0			0.00E+00	0.00E+00
95	81.3		81.3			0.00E+00	0.00E+00
96	3.4		3.4			0.00E+00	0.00E+00
97	13.1		13.1			0.00E+00	0.00E+00
98	8.7		8.7			0.00E+00	0.00E+00
99	128.2		128.2			0.00E+00	0.00E+00

	RESUMEN RANGOS (KG-CM2)				CICLOS A LA FALLA	DAÑO ni/Ni
	Rangos 1 Ciclo (Ton- m)	Rangos 0.5 Ciclo (Ton- m)	Rangos 1 Ciclo (Kg/cm2)	Rangos 0.5 Ciclo (Kg/cm2)	#Dato Daño - N i - ni / Ni	
100	174.2		174.2			0.00E+00 0.00E+00
101	208.1		208.1		18	1.50E+07 4.82E-04
102	6.9		6.9			0.00E+00 0.00E+00
103	26		26.0			0.00E+00 0.00E+00
104	129.7		129.7			0.00E+00 0.00E+00
105	188		188.0		19	2.04E+07 3.55E-04
106	17.7		17.7			0.00E+00 0.00E+00
107	31		31.0			0.00E+00 0.00E+00
108	81.4		81.4			0.00E+00 0.00E+00
109	27.7		27.7			0.00E+00 0.00E+00
110	43.9		43.9			0.00E+00 0.00E+00
111	220.4		220.4		20	1.27E+07 5.73E-04
112	38.1		38.1			0.00E+00 0.00E+00
113	20.7		20.7			0.00E+00 0.00E+00
114	83.7		83.7			0.00E+00 0.00E+00
115	5.7		5.7			0.00E+00 0.00E+00
116	15.5		15.5			0.00E+00 0.00E+00
117	11.1		11.1			0.00E+00 0.00E+00
118	208.1		208.1		21	1.50E+07 4.82E-04
119	130.6		130.6			0.00E+00 0.00E+00
120	176.6		176.6			0.00E+00 0.00E+00
121	9.3		9.3			0.00E+00 0.00E+00
122	28.4		28.4			0.00E+00 0.00E+00
123	132.1		132.1			0.00E+00 0.00E+00
124	188		188.0		22	2.04E+07 3.55E-04
125	20.1		20.1			0.00E+00 0.00E+00
126	33.4		33.4			0.00E+00 0.00E+00
127	83.8		83.8			0.00E+00 0.00E+00
128	30.1		30.1			0.00E+00 0.00E+00
129	46.3		46.3			0.00E+00 0.00E+00
130	220.4		220.4		23	1.27E+07 5.73E-04
131	238.2		238.2		24	1.00E+07 7.23E-04
132	238.2		238.2		25	1.00E+07 7.23E-04
133	40.5		40.5			0.00E+00 0.00E+00
134	1.7		1.7			0.00E+00 0.00E+00
135	21.8		21.8			0.00E+00 0.00E+00
136	86		86.0			0.00E+00 0.00E+00
137	210.3		210.3		26	1.46E+07 4.97E-04
138	8.2		8.2			0.00E+00 0.00E+00
139	17.9		17.9			0.00E+00 0.00E+00

	RESUMEN RANGOS (KG-CM2)				CICLOS A LA FALLA		DAÑO
	Rangos 1 Ciclo (Ton- m)	Rangos 0.5 Ciclo (Ton- m)	Rangos 1 Ciclo (Kg/cm2)	Rangos 0.5 Ciclo (Kg/cm2)	#Dato Daño - N i - ni / Ni		ni/Ni
140	13.5		13.5			0.00E+00	0.00E+00
141	133		133.0			0.00E+00	0.00E+00
142	179		179.0			0.00E+00	0.00E+00
143	11.7		11.7			0.00E+00	0.00E+00
144	30.8		30.8			0.00E+00	0.00E+00
145	134.5		134.5			0.00E+00	0.00E+00
146	188		188.0		27	2.04E+07	3.55E-04
147	238.2		238.2		28	1.00E+07	7.23E-04
148	22.5		22.5			0.00E+00	0.00E+00
149	35.8		35.8			0.00E+00	0.00E+00
150	86.2		86.2			0.00E+00	0.00E+00
151	32.5		32.5			0.00E+00	0.00E+00
152	48.7		48.7			0.00E+00	0.00E+00
153	220.4		220.4		29	1.27E+07	5.73E-04
154	42.8		42.8			0.00E+00	0.00E+00
155	4.1		4.1			0.00E+00	0.00E+00
156	24.6		24.6			0.00E+00	0.00E+00
157	88.5		88.5			0.00E+00	0.00E+00
158	214.2		214.2		30	1.38E+07	5.26E-04
159	10.6		10.6			0.00E+00	0.00E+00
160	20.3		20.3			0.00E+00	0.00E+00
161	15.8		15.8			0.00E+00	0.00E+00
162	135.4		135.4			0.00E+00	0.00E+00
163	181.4		181.4			0.00E+00	0.00E+00
164	14.1		14.1			0.00E+00	0.00E+00
165	33.2		33.2			0.00E+00	0.00E+00
166	136.9		136.9			0.00E+00	0.00E+00
167	188.1		188.1		31	2.04E+07	3.56E-04
168	238.2		238.2		32	1.00E+07	7.23E-04
169	24.9		24.9			0.00E+00	0.00E+00
170	38.2		38.2			0.00E+00	0.00E+00
171	88.6		88.6			0.00E+00	0.00E+00
172	34.9		34.9			0.00E+00	0.00E+00
173	51.1		51.1			0.00E+00	0.00E+00
174	220.4		220.4		33	1.27E+07	5.73E-04
175	45.5		45.5			0.00E+00	0.00E+00
176	6.5		6.5			0.00E+00	0.00E+00
177	26.5		26.5			0.00E+00	0.00E+00
178	90.9		90.9			0.00E+00	0.00E+00
179	216.9		216.9		34	1.33E+07	5.46E-04

	RESUMEN RANGOS (KG-CM2)				CICLOS A LA FALLA	DAÑO ni/Ni
	Rangos 1 Ciclo (Ton- m)	Rangos 0.5 Ciclo (Ton- m)	Rangos 1 Ciclo (Kg/cm2)	Rangos 0.5 Ciclo (Kg/cm2)	#Dato Daño - N i - ni / Ni	
180	13		13.0			0.00E+00 0.00E+00
181	22.7		22.7			0.00E+00 0.00E+00
182	18.2		18.2			0.00E+00 0.00E+00
183	137.8		137.8			0.00E+00 0.00E+00
184	183.8		183.8		35	2.18E+07 3.32E-04
185	16.5		16.5			0.00E+00 0.00E+00
186	35.7		35.7			0.00E+00 0.00E+00
187	139.3		139.3			0.00E+00 0.00E+00
188	188.1		188.1			0.00E+00 0.00E+00
189	238.2		238.2			0.00E+00 0.00E+00
190	27.3		27.3			0.00E+00 0.00E+00
191	40.7		40.7			0.00E+00 0.00E+00
192	91		91.0			0.00E+00 0.00E+00
193	37.3		37.3			0.00E+00 0.00E+00
194	53.5		53.5			0.00E+00 0.00E+00
195	220.4		220.4		36	1.27E+07 5.73E-04
196	48.1		48.1			0.00E+00 0.00E+00
197	8.9		8.9			0.00E+00 0.00E+00
198	29.3		29.3			0.00E+00 0.00E+00
199	93.5		93.5			0.00E+00 0.00E+00
200	220.8		220.8		37	1.26E+07 5.76E-04
201	15.3		15.3			0.00E+00 0.00E+00
202	25.1		25.1			0.00E+00 0.00E+00
203	20.6		20.6			0.00E+00 0.00E+00
204	140.2		140.2			0.00E+00 0.00E+00
205	186.3		186.3		38	2.10E+07 3.46E-04
206	18.8		18.8			0.00E+00 0.00E+00
207	38.1		38.1			0.00E+00 0.00E+00
208	141.7		141.7			0.00E+00 0.00E+00
209	188.1		188.1		39	2.04E+07 3.56E-04
210	238.2		238.2		40	1.00E+07 7.23E-04
211	29.7		29.7			0.00E+00 0.00E+00
212	43		43.0			0.00E+00 0.00E+00
213	93.4		93.4			0.00E+00 0.00E+00
214	39.7		39.7			0.00E+00 0.00E+00
215	55.9		55.9			0.00E+00 0.00E+00
216	220.5		220.5		41	1.26E+07 5.73E-04
217	50.7		50.7			0.00E+00 0.00E+00
218	11.3		11.3			0.00E+00 0.00E+00
219	32		32.0			0.00E+00 0.00E+00

	RESUMEN RANGOS (KG-CM2)				CICLOS A LA FALLA	DAÑO ni/Ni
	Rangos 1 Ciclo (Ton- m)	Rangos 0.5 Ciclo (Ton- m)	Rangos 1 Ciclo (Kg/cm2)	Rangos 0.5 Ciclo (Kg/cm2)	#Dato Daño - N i - ni / Ni	
220	96.3		96.3			0.00E+00 0.00E+00
221	220.4		220.4		42	1.27E+07 5.73E-04
222	17.8		17.8			0.00E+00 0.00E+00
223	27.5		27.5			0.00E+00 0.00E+00
224	23		23.0			0.00E+00 0.00E+00
225	142.6		142.6			0.00E+00 0.00E+00
226	188.7		188.7		43	2.02E+07 3.59E-04
227	21.2		21.2			0.00E+00 0.00E+00
228	40.5		40.5			0.00E+00 0.00E+00
229	144.1		144.1			0.00E+00 0.00E+00
230	188.1		188.1		44	2.04E+07 3.56E-04
231	238.2		238.2		45	1.00E+07 7.23E-04
232	32.1		32.1			0.00E+00 0.00E+00
233	45.4		45.4			0.00E+00 0.00E+00
234	95.8		95.8			0.00E+00 0.00E+00
235	42.1		42.1			0.00E+00 0.00E+00
236	58.4		58.4			0.00E+00 0.00E+00
237	220.5		220.5		46	1.26E+07 5.73E-04
238	52.2		52.2			0.00E+00 0.00E+00
239	13.7		13.7			0.00E+00 0.00E+00
240	33.9		33.9			0.00E+00 0.00E+00
241	98.1		98.1			0.00E+00 0.00E+00
242	224		224.0		47	1.21E+07 6.01E-04
243	20.1		20.1			0.00E+00 0.00E+00
244	29.9		29.9			0.00E+00 0.00E+00
245	25.4		25.4			0.00E+00 0.00E+00
246	145		145.0			0.00E+00 0.00E+00
247	191.1		191.1		48	1.94E+07 3.73E-04
248	115.1		115.1			0.00E+00 0.00E+00
249	173.2		173.2			0.00E+00 0.00E+00
250	123.1		123.1			0.00E+00 0.00E+00
251	179.9		179.9			0.00E+00 0.00E+00
252	109.5		109.5			0.00E+00 0.00E+00
253	193		193.0		49	1.88E+07 3.84E-04
254	103		103.0			0.00E+00 0.00E+00
255	189.8		189.8		50	1.98E+07 3.66E-04
256	113.8		113.8			0.00E+00 0.00E+00
257	177.1		177.1			0.00E+00 0.00E+00
258	126.1		126.1			0.00E+00 0.00E+00
259		340		3.40E+02	51	3.46E+06 1.05E-03

RESUMEN RANGOS (KG-CM2)				CICLOS A LA FALLA		DAÑO ni/Ni
Rangos 1 Ciclo (Ton-m)	Rangos 0.5 Ciclo (Ton-m)	Rangos 1 Ciclo (Kg/cm2)	Rangos 0.5 Ciclo (Kg/cm2)	#Dato Daño - Ni - ni / Ni		
260	276		2.76E+02	52	6.47E+06	5.60E-04
261	252		2.52E+02	53	8.49E+06	4.27E-04
262	238		2.38E+02	54	1.00E+07	3.62E-04
263	238		2.38E+02	55	1.00E+07	3.62E-04
264	238		2.38E+02	56	1.00E+07	3.61E-04
265	235		2.35E+02	57	1.05E+07	3.46E-04
266	168		1.68E+02		0.00E+00	0.00E+00

Tabla 17

Resumen daño acumulado no lineal por método de Manson-Halford, esfuerzos en Kg/cm² (>F_{TH}). Ciclos a partir del Rainflow Cycle Counting.

RESUMEN ESFUERZOS > F _{th} --> ACUMULA FATIGA			DAÑO NO LINEAL
Secuencia	Ciclos Ni a la falla	Daño ni / Ni	Acumulación de Daño (DCA)
1	3.96E+06	1.83E-03	1.99E-02
2	1.30E+07	5.57E-04	2.05E-02
3	1.27E+07	5.69E-04	2.04E-02
4	1.43E+07	5.07E-04	2.48E-02
5	1.84E+07	3.95E-04	3.57E-02
6	1.26E+07	5.76E-04	2.12E-02
7	1.47E+07	4.93E-04	2.73E-02
8	2.08E+07	3.49E-04	4.38E-02
9	1.03E+07	7.00E-04	1.68E-02
10	1.26E+07	5.75E-04	2.34E-02
11	1.51E+07	4.81E-04	3.08E-02
12	2.04E+07	3.56E-04	4.61E-02
13	1.27E+07	5.73E-04	2.48E-02
14	1.50E+07	4.82E-04	3.22E-02
15	2.04E+07	3.55E-04	4.81E-02
16	1.00E+07	7.22E-04	1.85E-02
17	1.27E+07	5.73E-04	2.69E-02
18	1.50E+07	4.82E-04	3.47E-02
19	2.04E+07	3.55E-04	5.14E-02
20	1.27E+07	5.73E-04	2.81E-02
21	1.50E+07	4.82E-04	3.62E-02

RESUMEN ESFUERZOS > F DAÑO NO
th --> ACUMULA FATIGA LINEAL

Secuencia	Ciclos N i a la falla	Daño n i / N i	Acumulación de Daño (DCA)
22	2.04E+07	3.55E-04	5.33E-02
23	1.27E+07	5.73E-04	2.93E-02
24	1.00E+07	7.23E-04	2.15E-02
25	1.00E+07	7.23E-04	2.22E-02
26	1.46E+07	4.97E-04	3.82E-02
27	2.04E+07	3.55E-04	5.80E-02
28	1.00E+07	7.23E-04	2.35E-02
29	1.27E+07	5.73E-04	3.34E-02
30	1.38E+07	5.26E-04	3.79E-02
31	2.04E+07	3.56E-04	6.12E-02
32	1.00E+07	7.23E-04	2.52E-02
33	1.27E+07	5.73E-04	3.56E-02
34	1.33E+07	5.46E-04	3.84E-02
35	2.18E+07	3.32E-04	6.95E-02
36	1.27E+07	5.73E-04	3.69E-02
37	1.26E+07	5.76E-04	3.72E-02
38	2.10E+07	3.46E-04	6.86E-02
39	2.04E+07	3.56E-04	6.68E-02
40	1.00E+07	7.23E-04	2.83E-02
41	1.26E+07	5.73E-04	3.93E-02
42	1.27E+07	5.73E-04	4.00E-02
43	2.02E+07	3.59E-04	6.95E-02
44	2.04E+07	3.56E-04	7.05E-02
45	1.00E+07	7.23E-04	3.03E-02
46	1.26E+07	5.73E-04	4.19E-02
47	1.21E+07	6.01E-04	4.00E-02
48	1.94E+07	3.73E-04	7.03E-02
49	1.88E+07	3.84E-04	6.85E-02
50	1.98E+07	3.66E-04	7.26E-02
51	3.46E+06	1.05E-03	6.18E-03
52	6.47E+06	5.60E-04	1.96E-02
53	8.49E+06	4.27E-04	2.99E-02
54	1.00E+07	3.62E-04	3.77E-02
55	1.00E+07	3.62E-04	3.81E-02
56	1.00E+07	3.61E-04	3.85E-02
57	1.05E+07	3.46E-04	4.12E-02
Sub total daño acumulado/ año			2.17
Años esperados de la falla			0.46

5.2.3. Peak Counting

Tabla 18

Definición de picos y valles de la historia de momentos del detalle estructural revisado, como procedimiento inicial para el conteo de ciclos por Peak Counting (Diagrama 4). Picos y valles en Ton-m.

Peak-Counting – Def. picos y valles				Peak-Counting – Def. picos y valles			
# Dato P1	σn	Picos	Valles	# Dato P1	σn	Picos	Valles
1	-3.95		-3.95	31	-1.15		
2	1.44	1.44		32	-7.82		-7.82
3	-9.45		-9.45	33	1.32	1.32	
4	1.22	1.22		34	-0.47		-0.47
5	1.07			35	0.22	0.22	
6	-1.90		-1.90	36	-3.45		
7	-1.24			37	-6.51		-6.51
8	-8.37		-8.37	38	2.21	2.21	
9	3.52	3.52		39	-1.42		-1.42
10	-2.25		-2.25	40	1.01	1.01	
11	1.72	1.72		41	-5.69		-5.69
12	-4.82			42	-4.42		
13	-5.35		-5.35	43	2.11	2.11	
14	1.32	1.32		44	-1.54		-1.54
15	-0.91		-0.91	45	0.87	0.87	
16	1.03	1.03		46	-7.18		-7.18
17	-6.23		-6.23	47	-2.26		
18	-3.55			48	1.48	1.48	
19	1.19	1.19		49	-1.17		-1.17
20	-0.73		-0.73	50	-0.03		
21	0.23	0.23		51	-7.85		-7.85
22	-6.70		-6.70	52	-0.27		
23	-2.65			53	0.53	0.53	
24	1.83	1.83		54	-0.52		
25	-1.43		-1.43	55	-1.52		
26	0.04	0.04		56	-7.64		-7.64
27	-7.66		-7.66	57	1.29	1.29	
28	-0.69			58	-0.52		-0.52
29	1.07	1.07		59	0.27	0.27	
30	-1.03			60	-3.48		

Peak-Counting – Def. picos y valles

# Dato P1	σn	Picos	Valles
61	-6.48		-6.48
62	2.15	2.15	
63	-1.30		-1.30
64	0.84	0.84	
65	-5.51		-5.51
66	-4.55		
67	2.17	2.17	
68	-1.54		-1.54
69	0.83	0.83	
70	-7.13		-7.13
71	-2.31		
72	1.53	1.53	
73	-1.22		-1.22
74	0.03	0.03	
75	-7.91		-7.91
76	-0.22		
77	0.51	0.51	
78	-0.52		
79	-1.49		
80	-7.68		-7.68
81	1.33	1.33	
82	-0.54		-0.54
83	0.27	0.27	
84	-3.48		
85	-6.47		-6.47
86	2.13	2.13	
87	-1.28		-1.28
88	0.83	0.83	
89	-5.51		-5.51
90	-4.54		
91	2.15	2.15	
92	-1.52		-1.52
93	0.81	0.81	
94	-7.12		-7.12
95	-2.30		
96	1.52	1.52	
97	-1.22		-1.22
98	0.03	0.03	
99	-7.91		-7.91
100	-0.22		

Peak-Counting – Def. picos y valles

# Dato P1	σn	Picos	Valles
101	0.51	0.51	
102	-0.53		
103	-1.49		
104	-7.69		-7.69
105	1.33	1.33	
106	-0.53		-0.53
107	0.27	0.27	
108	-3.48		
109	-6.47		-6.47
110	2.13	2.13	
111	-1.28		-1.28
112	0.83	0.83	
113	-5.51		-5.51
114	-4.54		
115	2.15	2.15	
116	-1.52		-1.52
117	0.81	0.81	
118	-7.12		-7.12
119	-2.30		
120	1.52	1.52	
121	-1.22		-1.22
122	0.03	0.03	
123	-7.91		-7.91
124	-0.22		
125	0.51	0.51	
126	-0.53		
127	-1.49		
128	-7.69		-7.69
129	1.33	1.33	
130	-0.53		-0.53
131	0.27	0.27	
132	-3.48		
133	-6.47		-6.47
134	2.13	2.13	
135	-1.28		-1.28
136	0.83	0.83	
137	-5.51		-5.51
138	-4.54		
139	2.15	2.15	
140	-1.52		-1.52

Peak-Counting – Def. picos y valles

# Dato P1	σn	Picos	Valles
141	0.81	0.81	
142	-7.12		-7.12
143	-2.30		
144	1.52	1.52	
145	-1.22		-1.22
146	0.03	0.03	
147	-7.91		-7.91
148	-0.22		
149	0.51	0.51	
150	-0.53		
151	-1.49		
152	-7.69		-7.69
153	1.33	1.33	
154	-0.53		-0.53
155	0.27	0.27	
156	-3.48		
157	-6.47		-6.47
158	2.13	2.13	
159	-1.28		-1.28
160	0.83	0.83	
161	-5.51		-5.51
162	-4.54		
163	2.15	2.15	
164	-1.52		-1.52
165	0.81	0.81	
166	-7.12		-7.12
167	-2.30		
168	1.52	1.52	
169	-1.22		-1.22
170	0.03	0.03	
171	-7.91		-7.91
172	-0.22		
173	0.51	0.51	
174	-0.53		
175	-1.49		
176	-7.69		-7.69
177	1.33	1.33	
178	-0.53		-0.53
179	0.27	0.27	
180	-3.48		

Peak-Counting – Def. picos y valles

# Dato P1	σn	Picos	Valles
181	-6.47		-6.47
182	2.13	2.13	
183	-1.28		-1.28
184	0.83	0.83	
185	-5.51		-5.51
186	-4.54		
187	2.15	2.15	
188	-1.52		-1.52
189	0.81	0.81	
190	-7.12		-7.12
191	-2.30		
192	1.52	1.52	
193	-1.22		-1.22
194	0.03	0.03	
195	-7.91		-7.91
196	-0.22		
197	0.51	0.51	
198	-0.53		
199	-1.49		
200	-7.69		-7.69
201	1.33	1.33	
202	-0.53		-0.53
203	0.27	0.27	
204	-3.48		
205	-6.47		-6.47
206	2.13	2.13	
207	-1.28		-1.28
208	0.83	0.83	
209	-5.51		-5.51
210	-4.54		
211	2.15	2.15	
212	-1.52		-1.52
213	0.81	0.81	
214	-7.12		-7.12
215	-2.30		
216	1.52	1.52	
217	-1.22		-1.22
218	0.03	0.03	
219	-7.91		-7.91
220	-0.22		

Peak-Counting – Def. picos y valles

# Dato P1	σn	Picos	Valles
221	0.51	0.51	
222	-0.53		
223	-1.49		
224	-7.69		-7.69
225	1.33	1.33	
226	-0.53		-0.53
227	0.27	0.27	
228	-3.48		
229	-6.47		-6.47
230	2.13	2.13	
231	-1.28		-1.28
232	0.83	0.83	
233	-5.51		-5.51
234	-4.54		
235	2.15	2.15	
236	-1.52		-1.52
237	0.81	0.81	
238	-7.12		-7.12
239	-2.30		
240	1.52	1.52	
241	-1.22		-1.22
242	0.03	0.03	
243	-7.91		-7.91
244	-0.22		
245	0.51	0.51	
246	-0.53		
247	-1.49		
248	-7.69		-7.69
249	1.33	1.33	
250	-0.53		-0.53
251	0.27	0.27	
252	-3.48		
253	-6.47		-6.47
254	2.13	2.13	
255	-1.28		-1.28
256	0.83	0.83	
257	-5.51		-5.51
258	-4.54		
259	2.15	2.15	
260	-1.52		-1.52

Peak-Counting – Def. picos y valles

# Dato P1	σn	Picos	Valles
261	0.81	0.81	
262	-7.12		-7.12
263	-2.30		
264	1.52	1.52	
265	-1.22		-1.22
266	0.03	0.03	
267	-7.91		-7.91
268	-0.22		
269	0.51	0.51	
270	-0.53		
271	-1.49		
272	-7.69		-7.69
273	1.33	1.33	
274	-0.53		-0.53
275	0.27	0.27	
276	-3.48		
277	-6.47		-6.47
278	2.13	2.13	
279	-1.28		-1.28
280	0.83	0.83	
281	-5.51		-5.51
282	-4.54		
283	2.15	2.15	
284	-1.52		-1.52
285	0.81	0.81	
286	-7.12		-7.12
287	-2.30		
288	1.52	1.52	
289	-1.22		-1.22
290	0.03	0.03	
291	-7.91		-7.91
292	-0.22		
293	0.51	0.51	
294	-0.53		
295	-1.49		
296	-7.69		-7.69
297	1.33	1.33	
298	-0.53		-0.53
299	0.27	0.27	
300	-3.48		

Peak-Counting – Def. picos y valles				Peak-Counting – Def. picos y valles			
# Dato P1	σn	Picos	Valles	# Dato P1	σn	Picos	Valles
301	-6.47		-6.47	309	-3.78		
302	-1.44			310	-4.79		-4.79
303	-6.34		-6.34	311	-2.78		
304	-1.87			312	-5.31		-5.31
305	-5.92		-5.92	313	-2.75		
306	-2.34						
307	-5.11		-5.11				
308	-3.49						
				Total			
				Picos/Valles		111	119

Tabla 19

Resultados del conteo de ciclos para la historia de esfuerzos del detalle estructural a partir del algoritmo Peak Counting (Diagrama 4). Rangos finales de esfuerzos en Kg/cm².

# Pico máx	σ Pico	# Valle máx	σ Valle	Abs Rango (Ton-m)	Rango (Kg/cm2)	CICLOS	¿Contar?
1	3.521	1	-9.45	12.974	388.416	1.0	SI
2	2.210	2	-8.37	10.580	316.747	1.0	SI
3	2.174	3	-7.91	10.088	302.000	1.0	SI
4	2.154	4	-7.91	10.067	301.380	1.0	SI
5	2.152	5	-7.91	10.066	301.335	1.0	SI
6	2.152	6	-7.91	10.066	301.335	1.0	SI
7	2.152	7	-7.91	10.066	301.335	1.0	SI
8	2.152	8	-7.91	10.066	301.335	1.0	SI
9	2.152	9	-7.91	10.066	301.335	1.0	SI
10	2.152	10	-7.91	10.066	301.335	1.0	SI
11	2.152	11	-7.91	10.065	301.329	1.0	SI
12	2.152	12	-7.91	10.064	301.284	1.0	SI
13	2.146	13	-7.85	9.997	299.284	1.0	SI
14	2.131	14	-7.82	9.952	297.931	1.0	SI
15	2.130	15	-7.69	9.816	293.860	1.0	SI
16	2.130	16	-7.69	9.815	293.845	1.0	SI
17	2.130	17	-7.69	9.815	293.839	1.0	SI
18	2.130	18	-7.69	9.815	293.839	1.0	SI

# Pico máx	σ Pico	# Valle máx	σ Valle	Abs Rango (Ton-m)	Rango (Kg/cm2)	CICLOS	¿Contar?
19	2.130	19	-7.69	9.815	293.839	1.0	SI
20	2.130	20	-7.69	9.815	293.839	1.0	SI
21	2.130	21	-7.69	9.815	293.839	1.0	SI
22	2.129	22	-7.69	9.815	293.836	1.0	SI
23	2.109	23	-7.69	9.794	293.210	1.0	SI
24	1.831	24	-7.68	9.514	284.828	1.0	SI
25	1.720	25	-7.66	9.379	280.786	1.0	SI
26	1.527	26	-7.64	9.169	274.493	1.0	SI
27	1.524	27	-7.18	8.703	260.555	1.0	SI
28	1.524	28	-7.13	8.649	258.917	1.0	SI
29	1.524	29	-7.12	8.646	258.827	1.0	SI
30	1.524	30	-7.12	8.646	258.827	1.0	SI
31	1.524	31	-7.12	8.646	258.827	1.0	SI
32	1.524	32	-7.12	8.646	258.827	1.0	SI
33	1.524	33	-7.12	8.646	258.827	1.0	SI
34	1.524	34	-7.12	8.646	258.827	1.0	SI
35	1.523	35	-7.12	8.645	258.818	1.0	SI
36	1.483	36	-7.12	8.606	257.627	1.0	SI
37	1.443	37	-7.12	8.563	256.357	1.0	SI
38	1.328	38	-6.70	8.031	240.410	1.0	SI
39	1.328	39	-6.51	7.838	234.632	1.0	SI
40	1.328	40	-6.48	7.809	233.764	1.0	SI
41	1.328	41	-6.47	7.802	233.554	1.0	SI
42	1.328	42	-6.47	7.801	233.530	1.0	SI
43	1.328	43	-6.47	7.800	233.521	1.0	SI
44	1.328	44	-6.47	7.800	233.521	1.0	SI
45	1.328	45	-6.47	7.800	233.521	1.0	SI
46	1.328	46	-6.47	7.800	233.521	1.0	SI
47	1.328	47	-6.47	7.800	233.521	1.0	SI
48	1.320	48	-6.47	7.793	233.297	1.0	SI
49	1.315	49	-6.47	7.788	233.153	1.0	SI
50	1.294	50	-6.47	7.767	232.516	1.0	SI
51	1.217	51	-6.34	7.557	226.244	1.0	SI
52	1.189	52	-6.23	7.423	222.223	1.0	SI
53	1.070	53	-5.92	6.989	209.215	1.0	SI
54	1.035	54	-5.69	6.722	201.222	1.0	SI
55	1.010	55	-5.51	6.525	195.328	1.0	SI
56	0.868	56	-5.51	6.382	191.068	1.0	SI
57	0.841	57	-5.51	6.356	190.265	1.0	SI
58	0.829	58	-5.51	6.344	189.909	1.0	SI
59	0.829	59	-5.51	6.344	189.909	1.0	SI
60	0.829	60	-5.51	6.344	189.909	1.0	SI

# Pico máx	σ Pico	# Valle máx	σ Valle	Abs Rango (Ton-m)	Rango (Kg/cm ²)	CICLOS	¿Contar?
61	0.829	61	-5.51	6.344	189.906	1.0	SI
62	0.829	62	-5.51	6.343	189.900	1.0	SI
63	0.829	63	-5.51	6.342	189.858	1.0	SI
64	0.829	64	-5.51	6.340	189.801	1.0	SI
65	0.828	65	-5.35	6.178	184.957	1.0	SI
66	0.827	66	-5.31	6.138	183.754	1.0	SI
67	0.825	67	-5.11	5.937	177.737	1.0	NO
68	0.813	68	-4.79	5.599	167.609	1.0	NO
69	0.813	69	-3.95	4.761	142.531	1.0	NO
70	0.813	70	-2.25	3.058	91.560	1.0	NO
71	0.813	71	-1.90	2.717	81.327	1.0	NO
72	0.813	72	-1.54	2.353	70.430	1.0	NO
73	0.813	73	-1.54	2.352	70.424	1.0	NO
74	0.813	74	-1.52	2.332	69.819	1.0	NO
75	0.813	75	-1.52	2.332	69.810	1.0	NO
76	0.811	76	-1.52	2.330	69.756	1.0	NO
77	0.533	77	-1.52	2.052	61.428	1.0	NO
78	0.510	78	-1.52	2.029	60.748	1.0	NO
79	0.510	79	-1.52	2.029	60.748	1.0	NO
80	0.510	80	-1.52	2.029	60.748	1.0	NO
81	0.510	81	-1.52	2.029	60.736	1.0	NO
82	0.510	82	-1.52	2.029	60.730	1.0	NO
83	0.510	83	-1.43	1.940	58.087	1.0	NO
84	0.510	84	-1.42	1.931	57.800	1.0	NO
85	0.510	85	-1.30	1.809	54.141	1.0	NO
86	0.509	86	-1.28	1.789	53.543	1.0	NO
87	0.505	87	-1.28	1.784	53.417	1.0	NO
88	0.272	88	-1.28	1.551	46.444	1.0	NO
89	0.270	89	-1.28	1.549	46.382	1.0	NO
90	0.270	90	-1.28	1.549	46.379	1.0	NO
91	0.270	91	-1.28	1.549	46.379	1.0	NO
92	0.270	92	-1.28	1.549	46.376	1.0	NO
93	0.270	93	-1.28	1.549	46.376	1.0	NO
94	0.270	94	-1.28	1.549	46.373	1.0	NO
95	0.270	95	-1.22	1.489	44.573	1.0	NO
96	0.270	96	-1.22	1.488	44.555	1.0	NO
97	0.270	97	-1.22	1.488	44.552	1.0	NO
98	0.267	98	-1.22	1.485	44.451	1.0	NO
99	0.234	99	-1.22	1.453	43.487	1.0	NO
100	0.216	100	-1.22	1.434	42.936	1.0	NO
101	0.036	101	-1.22	1.254	37.553	1.0	NO

# Pico máx	σ Pico	# Valle máx	σ Valle	Abs Rango (Ton-m)	Rango (Kg/cm ²)	CICLOS	¿Contar?
102	0.030	102	-1.22	1.249	37.382	1.0	NO
103	0.030	103	-1.22	1.248	37.373	1.0	NO
104	0.030	104	-1.22	1.248	37.356	1.0	NO
105	0.030	105	-1.17	1.203	36.008	1.0	NO
106	0.030	106	-0.91	0.943	28.237	1.0	NO
107	0.030	107	-0.73	0.765	22.905	1.0	NO
108	0.030	108	-0.54	0.566	16.944	1.0	NO
109	0.030	109	-0.53	0.564	16.888	1.0	NO
110	0.030	110	-0.53	0.563	16.846	1.0	NO
111	0.029	111	-0.53	0.562	16.822	1.0	NO
		112	-0.53	0.533	15.962	0.5	NO
		113	-0.53	0.533	15.962	0.5	NO
		114	-0.53	0.533	15.962	0.5	NO
		115	-0.53	0.533	15.962	0.5	NO
		116	-0.53	0.533	15.959	0.5	NO
		117	-0.53	0.533	15.959	0.5	NO
		118	-0.52	0.517	15.469	0.5	NO
		119	-0.47	0.472	14.121	0.5	NO
Total datos para daño acumulado							66

Tabla 20

Daño acumulado por la Regla de Palmgreen-Miner, esfuerzos en Kg/cm² (>F_{TH}). Ciclos a partir del Peak Counting.

DAÑO ACUMULADO PALMGREEN-MINER /NTC 2020 (1 año)		DAÑO ACUMULADO PALMGREEN-MINER /NTC 2020 (1 año)	
# Dato	Daño por Fatiga	# Dato	Daño por Fatiga
1	3.13E-03	10	1.46E-03
2	1.70E-03	11	1.46E-03
3	1.47E-03	12	1.46E-03
4	1.46E-03	13	1.43E-03
5	1.46E-03	14	1.41E-03
6	1.46E-03	15	1.36E-03
7	1.46E-03	16	1.36E-03
8	1.46E-03	17	1.36E-03
9	1.46E-03	18	1.36E-03

DAÑO ACUMULADO PALMGREEN-MINER /NTC 2020 (1 año)

# Dato	Daño por Fatiga	Daño n i/Ni
19		1.36E-03
20		1.36E-03
21		1.36E-03
22		1.36E-03
23		1.35E-03
24		1.24E-03
25		1.18E-03
26		1.11E-03
27		9.46E-04
28		9.28E-04
29		9.27E-04
30		9.27E-04
31		9.27E-04
32		9.27E-04
33		9.27E-04
34		9.27E-04
35		9.27E-04
36		9.14E-04
37		9.01E-04
38		7.43E-04
39		6.91E-04
40		6.83E-04
41		6.81E-04
42		6.81E-04
43		6.81E-04

DAÑO ACUMULADO PALMGREEN-MINER /NTC 2020 (1 año)

# Dato	Daño por Fatiga	Daño n i/Ni
44		6.81E-04
45		6.81E-04
46		6.81E-04
47		6.81E-04
48		6.79E-04
49		6.78E-04
50		6.72E-04
51		6.19E-04
52		5.87E-04
53		4.90E-04
54		4.36E-04
55		3.99E-04
56		3.73E-04
57		3.68E-04
58		3.66E-04
59		3.66E-04
60		3.66E-04
61		3.66E-04
62		3.66E-04
63		3.66E-04
64		3.66E-04
65		3.38E-04
66		3.32E-04
Total daño acum/ año		<u>0.064</u> <u>15.71</u>

Tabla 21

Resumen rangos daño acumulado no lineal por método de Manson-Halford, esfuerzos en Kg/cm². Ciclos a partir del Peak Counting.

	Resumen rangos (ton-m)		Resumen rangos (Kg-Cm2)	
	Rangos 1 Ciclo (Ton-m)	Rangos 0.5 Ciclo (Ton-m)	Rangos 1 Ciclo (Kg/cm2)	Rangos 0.5 Ciclo (Kg/cm2)
1	12.974		388.416	
2	10.580		316.747	
3	10.088		302.000	
4	10.067		301.380	
5	10.066		301.335	
6	10.066		301.335	
7	10.066		301.335	
8	10.066		301.335	
9	10.066		301.335	
10	10.066		301.335	
11	10.065		301.329	
12	10.064		301.284	
13	9.997		299.284	
14	9.952		297.931	
15	9.816		293.860	
16	9.815		293.845	
17	9.815		293.839	
18	9.815		293.839	
19	9.815		293.839	
20	9.815		293.839	
21	9.815		293.839	
22	9.815		293.836	
23	9.794		293.210	
24	9.514		284.828	
25	9.379		280.786	
26	9.169		274.493	
27	8.703		260.555	
28	8.649		258.917	
29	8.646		258.827	
30	8.646		258.827	
31	8.646		258.827	
32	8.646		258.827	
33	8.646		258.827	
34	8.646		258.827	

	Resumen rangos (ton-m)		Resumen rangos (Kg-Cm2)	
	Rangos 1 Ciclo (Ton- m)	Rangos 0.5 Ciclo (Ton- m)	Rangos 1 Ciclo (Kg/cm2)	Rangos 0.5 Ciclo (Kg/cm2)
35	8.645		258.818	
36	8.606		257.627	
37	8.563		256.357	
38	8.031		240.410	
39	7.838		234.632	
40	7.809		233.764	
41	7.802		233.554	
42	7.801		233.530	
43	7.800		233.521	
44	7.800		233.521	
45	7.800		233.521	
46	7.800		233.521	
47	7.800		233.521	
48	7.793		233.297	
49	7.788		233.153	
50	7.767		232.516	
51	7.557		226.244	
52	7.423		222.223	
53	6.989		209.215	
54	6.722		201.222	
55	6.525		195.328	
56	6.382		191.068	
57	6.356		190.265	
58	6.344		189.909	
59	6.344		189.909	
60	6.344		189.909	
61	6.344		189.906	
62	6.343		189.900	
63	6.342		189.858	
64	6.340		189.801	
65	6.178		184.957	
66	6.138		183.754	
67	5.937		177.737	
68	5.599		167.609	
69	4.761		142.531	
70	3.058		91.560	
71	2.717		81.327	
72	2.353		70.430	
73	2.352		70.424	
74	2.332		69.819	

	Resumen rangos (ton-m)		Resumen rangos (Kg-Cm2)	
	Rangos 1 Ciclo (Ton-m)	Rangos 0.5 Ciclo (Ton-m)	Rangos 1 Ciclo (Kg/cm2)	Rangos 0.5 Ciclo (Kg/cm2)
75	2.332		69.810	
76	2.330		69.756	
77	2.052		61.428	
78	2.029		60.748	
79	2.029		60.748	
80	2.029		60.748	
81	2.029		60.736	
82	2.029		60.730	
83	1.940		58.087	
84	1.931		57.800	
85	1.809		54.141	
86	1.789		53.543	
87	1.784		53.417	
88	1.551		46.444	
89	1.549		46.382	
90	1.549		46.379	
91	1.549		46.379	
92	1.549		46.376	
93	1.549		46.376	
94	1.549		46.373	
95	1.489		44.573	
96	1.488		44.555	
97	1.488		44.552	
98	1.485		44.451	
99	1.453		43.487	
100	1.434		42.936	
101	1.254		37.553	
102	1.249		37.382	
103	1.248		37.373	
104	1.248		37.356	
105	1.203		36.008	
106	0.943		28.237	
107	0.765		22.905	
108	0.566		16.944	
109	0.564		16.888	
110	0.563		16.846	
111		0.533		15.962
112		0.533		15.962
113		0.533		15.962
114		0.533		15.962

Resumen rangos (ton-m)		Resumen rangos (Kg-Cm2)	
Rangos 1 Ciclo (Ton- m)	Rangos 0.5 Ciclo (Ton- m)	Rangos 1 Ciclo (Kg/cm2)	Rangos 0.5 Ciclo (Kg/cm2)
115	0.533		15.959
116	0.533		15.959
117	0.517		15.469
118	0.472		14.121

Tabla 22

Daño acumulado no lineal por método de Manson-Halford, esfuerzos en Kg/cm² (>F_{TH}). ciclos a partir del Peak Counting.

#Dato Daño - Ni - ni / Ni	Ciclos a la falla		Daño ni/Ni		Resumen esfuerzos > F _{th} - -> Acumula fatiga		Daño no lineal
	Secuencia		Secuencia		Ciclos Ni a la falla	Daño ni / N i	Acumulación de Daño (DCA)
	2.31E+06	3.13E-03	1		4.26E+06	1.70E-03	2.42E-03
1	4.26E+06	1.70E-03	2		4.92E+06	1.47E-03	3.90E-03
2	4.92E+06	1.47E-03	3		4.95E+06	1.46E-03	5.41E-03
3	4.95E+06	1.46E-03	4		4.95E+06	1.46E-03	6.88E-03
4	4.95E+06	1.46E-03	5		4.95E+06	1.46E-03	8.35E-03
5	4.95E+06	1.46E-03	6		4.95E+06	1.46E-03	9.81E-03
6	4.95E+06	1.46E-03	7		4.95E+06	1.46E-03	1.13E-02
7	4.95E+06	1.46E-03	8		4.95E+06	1.46E-03	1.27E-02
8	4.95E+06	1.46E-03	9		4.95E+06	1.46E-03	1.42E-02
9	4.95E+06	1.46E-03	10		4.95E+06	1.46E-03	1.57E-02
10	4.95E+06	1.46E-03	11		4.95E+06	1.46E-03	1.71E-02
11	4.95E+06	1.46E-03	12		5.05E+06	1.43E-03	1.91E-02
12	5.05E+06	1.43E-03	13		5.12E+06	1.41E-03	2.10E-02
13	5.12E+06	1.41E-03	14		5.34E+06	1.36E-03	2.37E-02
14	5.34E+06	1.36E-03	15		5.34E+06	1.36E-03	2.51E-02
15	5.34E+06	1.36E-03	16		5.34E+06	1.36E-03	2.64E-02
16	5.34E+06	1.36E-03	17		5.34E+06	1.36E-03	2.78E-02
17	5.34E+06	1.36E-03	18		5.34E+06	1.36E-03	2.91E-02
18	5.34E+06	1.36E-03	19		5.34E+06	1.36E-03	3.05E-02
19	5.34E+06	1.36E-03	20		5.34E+06	1.36E-03	3.18E-02
20	5.34E+06	1.36E-03	21		5.34E+06	1.36E-03	3.32E-02
21	5.34E+06	1.36E-03	22		5.38E+06	1.35E-03	3.48E-02
22	5.38E+06	1.35E-03	23		5.86E+06	1.24E-03	4.03E-02
23	5.86E+06	1.24E-03	24		6.12E+06	1.18E-03	4.38E-02
24	6.12E+06	1.18E-03	25		6.55E+06	1.11E-03	4.87E-02

#Dato	Ciclos a la falla		Daño ni/Ni		Resumen esfuerzos > F th - -> Acumula fatiga		Daño no lineal
	Daño - Ni - ni / Ni		Secuencia	Ciclos Ni a la falla	Daño ni / Ni		Acumulación de Daño (DCA)
25	6.55E+06	1.11E-03	26	7.66E+06	9.46E-04		5.94E-02
26	7.66E+06	9.46E-04	27	7.81E+06	9.28E-04		6.16E-02
27	7.81E+06	9.28E-04	28	7.81E+06	9.27E-04		6.26E-02
28	7.81E+06	9.27E-04	29	7.81E+06	9.27E-04		6.36E-02
29	7.81E+06	9.27E-04	30	7.81E+06	9.27E-04		6.45E-02
30	7.81E+06	9.27E-04	31	7.81E+06	9.27E-04		6.54E-02
31	7.81E+06	9.27E-04	32	7.81E+06	9.27E-04		6.63E-02
32	7.81E+06	9.27E-04	33	7.81E+06	9.27E-04		6.73E-02
33	7.81E+06	9.27E-04	34	7.82E+06	9.27E-04		6.82E-02
34	7.82E+06	9.27E-04	35	7.92E+06	9.14E-04		7.01E-02
35	7.92E+06	9.14E-04	36	8.04E+06	9.01E-04		7.22E-02
36	8.04E+06	9.01E-04	37	9.75E+06	7.43E-04		8.84E-02
37	9.75E+06	7.43E-04	38	1.05E+07	6.91E-04		9.55E-02
38	1.05E+07	6.91E-04	39	1.06E+07	6.83E-04		9.72E-02
39	1.06E+07	6.83E-04	40	1.06E+07	6.81E-04		9.81E-02
40	1.06E+07	6.81E-04	41	1.06E+07	6.81E-04		9.88E-02
41	1.06E+07	6.81E-04	42	1.06E+07	6.81E-04		9.95E-02
42	1.06E+07	6.81E-04	43	1.06E+07	6.81E-04		1.00E-01
43	1.06E+07	6.81E-04	44	1.06E+07	6.81E-04		1.01E-01
44	1.06E+07	6.81E-04	45	1.06E+07	6.81E-04		1.02E-01
45	1.06E+07	6.81E-04	46	1.06E+07	6.81E-04		1.02E-01
46	1.06E+07	6.81E-04	47	1.07E+07	6.79E-04		1.03E-01
47	1.07E+07	6.79E-04	48	1.07E+07	6.78E-04		1.04E-01
48	1.07E+07	6.78E-04	49	1.08E+07	6.72E-04		1.05E-01
49	1.08E+07	6.72E-04	50	1.17E+07	6.19E-04		1.14E-01
50	1.17E+07	6.19E-04	51	1.23E+07	5.87E-04		1.20E-01
51	1.23E+07	5.87E-04	52	1.48E+07	4.90E-04		1.40E-01
52	1.48E+07	4.90E-04	53	1.66E+07	4.36E-04		1.53E-01
53	1.66E+07	4.36E-04	54	1.82E+07	3.99E-04		1.64E-01
54	1.82E+07	3.99E-04	55	1.94E+07	3.73E-04		1.72E-01
55	1.94E+07	3.73E-04	56	1.97E+07	3.68E-04		1.74E-01
56	1.97E+07	3.68E-04	57	1.98E+07	3.66E-04		1.75E-01
57	1.98E+07	3.66E-04	58	1.98E+07	3.66E-04		1.76E-01
58	1.98E+07	3.66E-04	59	1.98E+07	3.66E-04		1.76E-01
59	1.98E+07	3.66E-04	60	1.98E+07	3.66E-04		1.76E-01
60	1.98E+07	3.66E-04	61	1.98E+07	3.66E-04		1.77E-01
61	1.98E+07	3.66E-04	62	1.98E+07	3.66E-04		1.77E-01
62	1.98E+07	3.66E-04	63	1.98E+07	3.66E-04		1.78E-01
63	1.98E+07	3.66E-04	64	2.14E+07	3.38E-04		1.88E-01
64	2.14E+07	3.38E-04	65	2.18E+07	3.32E-04		1.90E-01

Ciclos a la falla	Daño ni/Ni		Resumen esfuerzos > F _{th} - -> Acumula fatiga	Daño no lineal
#Dato				Acumulación de Daño (DCA)
Daño - Ni - ni / Ni		Secuencia	Ciclos N i a la falla	Daño ni / N i
65	2.18E+07	3.32E-04		
Sub total daño acumulado/ año				5.211
Años esperados a la falla				0.19

5.2.4. Simple Range Counting

Tabla 23

Identificación de cambios de pendiente en la historia de momentos del detalle estructural revisado, como procedimiento inicial para el conteo de ciclos por Simple Range Counting (Diagrama 5). Picos y valles en Ton-m.

SIMPLE RANGE – IDENTIFICACIÓN DE CAMBIO DE PENDIENTE			SIMPLE RANGE – IDENTIFICACIÓN DE CAMBIO DE PENDIENTE			SIMPLE RANGE – IDENTIFICACIÓN DE CAMBIO DE PENDIENTE		
DATO (Simple Range)	Pend (m)	Esfuerzo	DATO (Simple Range)	Pend (m)	Esfuerzo	DATO (Simple Range)	Pend (m)	Esfuerzo
1	+	-3.948	18	+	0.234	33	-	-5.687
2	+	1.443	19	-	-6.702	33	+	
3	-	-9.454	19	+		34	+	2.109
4	+	1.217	20	+	1.831	35	-	-1.539
4	-		21	-	-1.430	36	+	0.868
5	-	-1.903	22	+	0.036	37	-	-7.180
6	+	-1.240	23	-	-7.659	37	+	
7	-	-8.371	23	+		38	+	1.483
8	+	3.521	24	+	1.070	39	-	-1.173
9	-	-2.245	24	-		40	+	-0.027
10	+	1.720	24	-		41	-	-7.851
10	-		25	-	-7.821	41	+	
11	-	-5.350	26	+	1.320	42	+	0.533
12	+	1.315	27	-	-0.472	42	-	
13	-	-0.913	28	+	0.216	42	-	
14	+	1.035	28	-		43	-	-7.642
15	-	-6.234	29	-	-6.509	44	+	1.294
15	+		30	+	2.210	45	-	-0.517
16	+	1.189	31	-	-1.420	46	+	0.267
17	-	-0.735	32	+	1.010	46	-	

SIMPLE RANGE – IDENTIFICACIÓN DE CAMBIO DE PENDIENTE

DATO (Simple Range)	Pend (m)	Esfuerzo
47	-	-6.481
48	+	2.146
49	-	-1.298
50	+	0.841
51	-	-5.513
51	+	
52	+	2.174
53	-	-1.539
54	+	0.825
55	-	-7.125
55	+	
56	+	1.527
57	-	-1.219
58	+	0.029
59	-	-7.912
59	+	
60	+	0.505
60	-	
60	-	
61	-	-7.683
62	+	1.328
63	-	-0.536
64	+	0.272
64	-	
65	-	-6.474
66	+	2.131
67	-	-1.279
68	+	0.827
69	-	-5.511
69	+	
70	+	2.154
71	-	-1.518
72	+	0.811
73	-	-7.120
73	+	
74	+	1.524
75	-	-1.218
76	+	0.030
77	-	-7.913

SIMPLE RANGE – IDENTIFICACIÓN DE CAMBIO DE PENDIENTE

DATO (Simple Range)	Pend (m)	Esfuerzo
77	+	
78	+	0.509
78	-	
78	-	
79	-	-7.686
80	+	1.328
81	-	-0.534
82	+	0.270
82	-	
83	-	-6.473
84	+	2.130
85	-	-1.279
86	+	0.828
87	-	-5.515
87	+	
88	+	2.152
89	-	-1.519
90	+	0.813
91	-	-7.122
91	+	
92	+	1.523
93	-	-1.218
94	+	0.030
95	-	-7.914
95	+	
96	+	0.510
96	-	
96	-	
97	-	-7.686
98	+	1.328
99	-	-0.533
100	+	0.270
100	-	
101	-	-6.473
102	+	2.129
103	-	-1.279
104	+	0.829
105	-	-5.515
105	+	

SIMPLE RANGE – IDENTIFICACIÓN DE CAMBIO DE PENDIENTE

DATO (Simple Range)	Pend (m)	Esfuerzo
106	+	2.152
107	-	-1.519
108	+	0.813
109	-	-7.122
109	+	
110	+	1.524
111	-	-1.218
112	+	0.030
113	-	-7.914
113	+	
114	+	0.510
114	-	
114	-	
115	-	-7.686
116	+	1.328
117	-	-0.533
118	+	0.270
118	-	
119	-	-6.473
120	+	2.130
121	-	-1.279
122	+	0.829
123	-	-5.515
123	+	
124	+	2.152
125	-	-1.519
126	+	0.813
127	-	-7.122
127	+	
128	+	1.524
129	-	-1.218
130	+	0.030
131	-	-7.914
131	+	
132	+	0.510
132	-	
132	-	
133	-	-7.686
134	+	1.328

SIMPLE RANGE –
IDENTIFICACIÓN DE
CAMBIO DE PENDIENTE

DATO (Simple Range)	Pend (m)	Esfuerzo
135	-	-0.533
136	+	0.270
136	-	
137	-	-6.473
138	+	2.130
139	-	-1.279
140	+	0.829
141	-	-5.515
141	+	
142	+	2.152
143	-	-1.519
144	+	0.813
145	-	-7.122
145	+	
146	+	1.524
147	-	-1.218
148	+	0.030
149	-	-7.914
149	+	
150	+	0.510
150	-	
150	-	
151	-	-7.686
152	+	1.328
153	-	-0.533
154	+	0.270
154	-	
155	-	-6.473
156	+	2.130
157	-	-1.279
158	+	0.829
159	-	-5.515
159	+	
160	+	2.152
161	-	-1.519
162	+	0.813
163	-	-7.122
163	+	
164	+	1.524

SIMPLE RANGE –
IDENTIFICACIÓN DE
CAMBIO DE PENDIENTE

DATO (Simple Range)	Pend (m)	Esfuerzo
165	-	-1.218
166	+	0.030
167	-	-7.914
167	+	
168	+	0.510
168	-	
168	-	
169	-	-7.686
170	+	1.328
171	-	-0.533
172	+	0.270
172	-	
173	-	-6.473
174	+	2.130
175	-	-1.279
176	+	0.829
177	-	-5.515
177	+	
178	+	2.152
179	-	-1.519
180	+	0.813
181	-	-7.122
181	+	
182	+	1.524
183	-	-1.218
184	+	0.030
185	-	-7.914
185	+	
186	+	0.510
186	-	
186	-	
187	-	-7.686
188	+	1.328
189	-	-0.533
190	+	0.270
190	-	
191	-	-6.473
192	+	2.130
193	-	-1.279

SIMPLE RANGE –
IDENTIFICACIÓN DE
CAMBIO DE PENDIENTE

DATO (Simple Range)	Pend (m)	Esfuerzo
194	+	0.829
195	-	-5.515
195	+	
196	+	2.152
197	-	-1.519
198	+	0.813
199	-	-7.122
199	+	
200	+	1.524
201	-	-1.218
202	+	0.030
203	-	-7.914
203	+	
204	+	0.510
204	-	
204	-	
205	-	-7.686
206	+	1.328
207	-	-0.533
208	+	0.270
208	-	
209	-	-6.473
210	+	2.130
211	-	-1.279
212	+	0.829
213	-	-5.515
213	+	
214	+	2.152
215	-	-1.519
216	+	0.813
217	-	-7.122
217	+	
218	+	1.524
219	-	-1.218
220	+	0.030
221	-	-7.914
221	+	
222	+	0.510
222	-	

SIMPLE RANGE – IDENTIFICACIÓN DE CAMBIO DE PENDIENTE			SIMPLE RANGE – IDENTIFICACIÓN DE CAMBIO DE PENDIENTE			SIMPLE RANGE – IDENTIFICACIÓN DE CAMBIO DE PENDIENTE		
DATO (Simple Range)	Pend (m)	Esfuerzo	DATO (Simple Range)	Pend (m)	Esfuerzo	DATO (Simple Range)	Pend (m)	Esfuerzo
222	-		228	+	-1.436	234	-	
223	-	-7.686	229	-	-6.340	235	-	-4.785
224	+	1.328	230	+	-1.865	236	+	-2.775
225	-	-0.533	231	-	-5.919	237	-	-5.311
226	+	0.270	232	+	-2.339	238	+	-2.751
226	-		233	-	-5.112			238.000
227	-	-6.473	234	+	-3.495			

Tabla 24

Resultados del conteo de ciclos para la historia de esfuerzos del detalle estructural a partir del algoritmo Simple Range Counting (Diagrama 5). Rangos finales de esfuerzos en Kg/cm².

# Dato	σ_n	Rango	Tipo	Rango (T-m)	Rango (Kg-cm)	¿Contar?	Rango Daño
1	-3.948	-3.948	N/A	3.948	118.18	No	
2	1.443	5.391	Positivo	5.391	161.39	No	
3	-9.454	-10.897	Negativo	10.897	326.22	Si	326
4	1.217	10.671	Positivo	10.671	319.45	Si	319
5	-1.903	-3.120	Negativo	3.120	93.41	No	
6	-1.240	0.664	Positivo	0.664	19.87	No	
7	-8.371	-7.131	Negativo	7.131	213.48	Si	213
8	3.521	11.892	Positivo	11.892	356.00	Si	356
9	-2.245	-5.766		5.766	172.61	No	
10	1.720	3.965	Positivo	3.965	118.70	No	
11	-5.350	-7.070	Negativo	7.070	211.65	Si	212
12	1.315	6.665	Positivo	6.665	199.53	Si	200
13	-0.913	-2.228	Negativo	2.228	66.71	No	
14	1.035	1.948	Positivo	1.948	58.30	No	
15	-6.234	-7.268	Negativo	7.268	217.59	Si	218
16	1.189	7.423	Positivo	7.423	222.22	Si	222
17	-0.735	-1.924	Negativo	1.924	57.60	No	
18	0.234	0.969	Positivo	0.969	29.01	No	
19	-6.702	-6.936	Negativo	6.936	207.66	Si	208
20	1.831	8.534	Positivo	8.534	255.47	Si	255

#	Dato P1	σ_n	Rango	Tipo	Rango (T-m)	Rango (Kg-cm)	¿Contra?	Rango Daño
21	-1.430	-3.261	Negativo	3.261	97.64	No		
22	0.036	1.466	Positivo	1.466	43.89	No		
23	-7.659	-7.695	Negativo	7.695	230.38	Si	230	
24	1.070	8.729	Positivo	8.729	261.32	Si	261	
25	-7.821	-8.891	Negativo	8.891	266.16	Si	266	
26	1.320	9.141	Positivo	9.141	273.66	Si	274	
27	-0.472	-1.792	Negativo	1.792	53.64	No		
28	0.216	0.688	Positivo	0.688	20.58	No		
29	-6.509	-6.725	Negativo	6.725	201.33	Si	201	
30	2.210	8.719	Positivo	8.719	261.02	Si	261	
31	-1.420	-3.630	Negativo	3.630	108.67	No		
32	1.010	2.430	Positivo	2.430	72.75	No		
33	-5.687	-6.697	Negativo	6.697	200.48	Si	200	
34	2.109	7.795	Positivo	7.795	233.37	Si	233	
35	-1.539	-3.648	Negativo	3.648	109.20	No		
36	0.868	2.407	Positivo	2.407	72.05	No		
37	-7.180	-8.047	Negativo	8.047	240.91	Si	241	
38	1.483	8.663	Positivo	8.663	259.35	Si	259	
39	-1.173	-2.656	Negativo	2.656	79.51	No		
40	-0.027	1.145	Positivo	1.145	34.28	No		
41	-7.851	-7.824	Negativo	7.824	234.22	Si	234	
42	0.533	8.384	Positivo	8.384	250.99	Si	251	
43	-7.642	-8.175	Negativo	8.175	244.75	Si	245	
44	1.294	8.937	Positivo	8.937	267.53	Si	268	
45	-0.517	-1.811	Negativo	1.811	54.21	No		
46	0.267	0.783	Positivo	0.783	23.45	No		
47	-6.481	-6.747	Negativo	6.747	201.99	Si	202	
48	2.146	8.627	Positivo	8.627	258.27	Si	258	
49	-1.298	-3.445	Negativo	3.445	103.12	No		
50	0.841	2.139	Positivo	2.139	64.04	No		
51	-5.513	-6.354	Negativo	6.354	190.21	Si	190	
52	2.174	7.687	Positivo	7.687	230.14	Si	230	
53	-1.539	-3.713	Negativo	3.713	111.17	No		
54	0.825	2.364	Positivo	2.364	70.78	No		
55	-7.125	-7.951	Negativo	7.951	238.01	Si	238	
56	1.527	8.652	Positivo	8.652	259.01	Si	259	
57	-1.219	-2.746	Negativo	2.746	82.19	No		
58	0.029	1.248	Positivo	1.248	37.35	No		
59	-7.912	-7.941	Negativo	7.941	237.72	Si	238	
60	0.505	8.417	Positivo	8.417	251.99	Si	252	
61	-7.683	-8.188	Negativo	8.188	245.12	Si	245	
62	1.328	9.011	Positivo	9.011	269.76	Si	270	

#	Dato P1	σn	Rango	Tipo	Rango (T-m)	Rango (Kg-cm)	¿Contra?	Rango Daño
63	-0.536	-1.864	Negativo	1.864	55.80	No		
64	0.272	0.808	Positivo	0.808	24.19	No		
65	-6.474	-6.746	Negativo	6.746	201.96	Si	202	
66	2.131	8.605	Positivo	8.605	257.60	Si	258	
67	-1.279	-3.410	Negativo	3.410	102.08	No		
68	0.827	2.106	Positivo	2.106	63.04	No		
69	-5.511	-6.338	Negativo	6.338	189.74	Si	190	
70	2.154	7.665	Positivo	7.665	229.46	Si	229	
71	-1.518	-3.672	Negativo	3.672	109.93	No		
72	0.811	2.330	Positivo	2.330	69.74	No		
73	-7.120	-7.931	Negativo	7.931	237.43	Si	237	
74	1.524	8.644	Positivo	8.644	258.76	Si	259	
75	-1.218	-2.741	Negativo	2.741	82.06	No		
76	0.030	1.247	Positivo	1.247	37.33	No		
77	-7.913	-7.943	Negativo	7.943	237.78	Si	238	
78	0.509	8.423	Positivo	8.423	252.15	Si	252	
79	-7.686	-8.196	Negativo	8.196	245.35	Si	245	
80	1.328	9.015	Positivo	9.015	269.87	Si	270	
81	-0.534	-1.862	Negativo	1.862	55.75	No		
82	0.270	0.804	Positivo	0.804	24.07	No		
83	-6.473	-6.743	Negativo	6.743	201.87	Si	202	
84	2.130	8.603	Positivo	8.603	257.54	Si	258	
85	-1.279	-3.409	Negativo	3.409	102.04	No		
86	0.828	2.107	Positivo	2.107	63.09	No		
87	-5.515	-6.343	Negativo	6.343	189.89	Si	190	
88	2.152	7.666	Positivo	7.666	229.51	Si	230	
89	-1.519	-3.670	Negativo	3.670	109.88	No		
90	0.813	2.332	Positivo	2.332	69.80	No		
91	-7.122	-7.935	Negativo	7.935	237.56	Si	238	
92	1.523	8.645	Positivo	8.645	258.82	Si	259	
93	-1.218	-2.741	Negativo	2.741	82.07	No		
94	0.030	1.248	Positivo	1.248	37.37	No		
95	-7.914	-7.944	Negativo	7.944	237.82	Si	238	
96	0.510	8.424	Positivo	8.424	252.18	Si	252	
97	-7.686	-8.196	Negativo	8.196	245.37	Si	245	
98	1.328	9.014	Positivo	9.014	269.84	Si	270	
99	-0.533	-1.861	Negativo	1.861	55.71	No		
100	0.270	0.803	Positivo	0.803	24.04	No		
101	-6.473	-6.743	Negativo	6.743	201.86	Si	202	
102	2.129	8.602	Positivo	8.602	257.52	Si	258	
103	-1.279	-3.409	Negativo	3.409	102.04	No		
104	0.829	2.108	Positivo	2.108	63.10	No		

#	Dato P1	σn	Rango	Tipo	Rango (T-m)	Rango (Kg-cm)	¿Contra?	Rango Daño
105	-5.515	-6.343	Negativo	6.343	189.90	Si	190	
106	2.152	7.667	Positivo	7.667	229.52	Si	230	
107	-1.519	-3.671	Negativo	3.671	109.90	No		
108	0.813	2.332	Positivo	2.332	69.82	No		
109	-7.122	-7.936	Negativo	7.936	237.57	Si	238	
110	1.524	8.646	Positivo	8.646	258.83	Si	259	
111	-1.218	-2.742	Negativo	2.742	82.08	No		
112	0.030	1.249	Positivo	1.249	37.38	No		
113	-7.914	-7.944	Negativo	7.944	237.82	Si	238	
114	0.510	8.424	Positivo	8.424	252.18	Si	252	
115	-7.686	-8.196	Negativo	8.196	245.36	Si	245	
116	1.328	9.013	Positivo	9.013	269.83	Si	270	
117	-0.533	-1.861	Negativo	1.861	55.70	No		
118	0.270	0.803	Positivo	0.803	24.04	No		
119	-6.473	-6.743	Negativo	6.743	201.86	Si	202	
120	2.130	8.602	Positivo	8.602	257.52	Si	258	
121	-1.279	-3.409	Negativo	3.409	102.05	No		
122	0.829	2.108	Positivo	2.108	63.11	No		
123	-5.515	-6.344	Negativo	6.344	189.91	Si	190	
124	2.152	7.667	Positivo	7.667	229.52	Si	230	
125	-1.519	-3.671	Negativo	3.671	109.90	No		
126	0.813	2.332	Positivo	2.332	69.82	No		
127	-7.122	-7.936	Negativo	7.936	237.57	Si	238	
128	1.524	8.646	Positivo	8.646	258.83	Si	259	
129	-1.218	-2.742	Negativo	2.742	82.08	No		
130	0.030	1.249	Positivo	1.249	37.38	No		
131	-7.914	-7.944	Negativo	7.944	237.81	Si	238	
132	0.510	8.424	Positivo	8.424	252.18	Si	252	
133	-7.686	-8.196	Negativo	8.196	245.36	Si	245	
134	1.328	9.013	Positivo	9.013	269.83	Si	270	
135	-0.533	-1.861	Negativo	1.861	55.71	No		
136	0.270	0.803	Positivo	0.803	24.05	No		
137	-6.473	-6.743	Negativo	6.743	201.86	Si	202	
138	2.130	8.602	Positivo	8.602	257.53	Si	258	
139	-1.279	-3.409	Negativo	3.409	102.05	No		
140	0.829	2.108	Positivo	2.108	63.11	No		
141	-5.515	-6.344	Negativo	6.344	189.91	Si	190	
142	2.152	7.667	Positivo	7.667	229.52	Si	230	
143	-1.519	-3.671	Negativo	3.671	109.90	No		
144	0.813	2.332	Positivo	2.332	69.82	No		
145	-7.122	-7.936	Negativo	7.936	237.57	Si	238	
146	1.524	8.646	Positivo	8.646	258.83	Si	259	

#	Dato P1	σn	Rango	Tipo	Rango (T-m)	Rango (Kg-cm)	¿Contra?	Rango Daño
147	-1.218	-2.742	Negativo	2.742	82.08	No		
148	0.030	1.249	Positivo	1.249	37.38	No		
149	-7.914	-7.944	Negativo	7.944	237.81	Si	238	
150	0.510	8.424	Positivo	8.424	252.18	Si	252	
151	-7.686	-8.196	Negativo	8.196	245.36	Si	245	
152	1.328	9.013	Positivo	9.013	269.83	Si	270	
153	-0.533	-1.861	Negativo	1.861	55.71	No		
154	0.270	0.803	Positivo	0.803	24.05	No		
155	-6.473	-6.743	Negativo	6.743	201.86	Si	202	
156	2.130	8.602	Positivo	8.602	257.53	Si	258	
157	-1.279	-3.409	Negativo	3.409	102.05	No		
158	0.829	2.108	Positivo	2.108	63.11	No		
159	-5.515	-6.344	Negativo	6.344	189.91	Si	190	
160	2.152	7.667	Positivo	7.667	229.52	Si	230	
161	-1.519	-3.671	Negativo	3.671	109.90	No		
162	0.813	2.332	Positivo	2.332	69.82	No		
163	-7.122	-7.936	Negativo	7.936	237.57	Si	238	
164	1.524	8.646	Positivo	8.646	258.83	Si	259	
165	-1.218	-2.742	Negativo	2.742	82.08	No		
166	0.030	1.249	Positivo	1.249	37.38	No		
167	-7.914	-7.944	Negativo	7.944	237.81	Si	238	
168	0.510	8.424	Positivo	8.424	252.18	Si	252	
169	-7.686	-8.196	Negativo	8.196	245.36	Si	245	
170	1.328	9.013	Positivo	9.013	269.83	Si	270	
171	-0.533	-1.861	Negativo	1.861	55.71	No		
172	0.270	0.803	Positivo	0.803	24.05	No		
173	-6.473	-6.743	Negativo	6.743	201.86	Si	202	
174	2.130	8.602	Positivo	8.602	257.53	Si	258	
175	-1.279	-3.409	Negativo	3.409	102.05	No		
176	0.829	2.108	Positivo	2.108	63.11	No		
177	-5.515	-6.344	Negativo	6.344	189.91	Si	190	
178	2.152	7.667	Positivo	7.667	229.52	Si	230	
179	-1.519	-3.671	Negativo	3.671	109.90	No		
180	0.813	2.332	Positivo	2.332	69.82	No		
181	-7.122	-7.936	Negativo	7.936	237.57	Si	238	
182	1.524	8.646	Positivo	8.646	258.83	Si	259	
183	-1.218	-2.742	Negativo	2.742	82.08	No		
184	0.030	1.249	Positivo	1.249	37.38	No		
185	-7.914	-7.944	Negativo	7.944	237.81	Si	238	
186	0.510	8.424	Positivo	8.424	252.18	Si	252	
187	-7.686	-8.196	Negativo	8.196	245.36	Si	245	
188	1.328	9.013	Positivo	9.013	269.83	Si	270	

#	Dato P1	σ_n	Rango	Tipo	Rango (T-m)	Rango (Kg-cm)	¿Contra?	Rango Daño
189	-0.533	-1.861	Negativo	1.861	55.71	No		
190	0.270	0.803	Positivo	0.803	24.05	No		
191	-6.473	-6.743	Negativo	6.743	201.86	Si	202	
192	2.130	8.602	Positivo	8.602	257.53	Si	258	
193	-1.279	-3.409	Negativo	3.409	102.05	No		
194	0.829	2.108	Positivo	2.108	63.11	No		
195	-5.515	-6.344	Negativo	6.344	189.91	Si	190	
196	2.152	7.667	Positivo	7.667	229.52	Si	230	
197	-1.519	-3.671	Negativo	3.671	109.90	No		
198	0.813	2.332	Positivo	2.332	69.82	No		
199	-7.122	-7.936	Negativo	7.936	237.57	Si	238	
200	1.524	8.646	Positivo	8.646	258.83	Si	259	
201	-1.218	-2.742	Negativo	2.742	82.08	No		
202	0.030	1.249	Positivo	1.249	37.38	No		
203	-7.914	-7.944	Negativo	7.944	237.81	Si	238	
204	0.510	8.424	Positivo	8.424	252.18	Si	252	
205	-7.686	-8.196	Negativo	8.196	245.36	Si	245	
206	1.328	9.013	Positivo	9.013	269.83	Si	270	
207	-0.533	-1.861	Negativo	1.861	55.71	No		
208	0.270	0.803	Positivo	0.803	24.05	No		
209	-6.473	-6.743	Negativo	6.743	201.86	Si	202	
210	2.130	8.602	Positivo	8.602	257.53	Si	258	
211	-1.279	-3.409	Negativo	3.409	102.05	No		
212	0.829	2.108	Positivo	2.108	63.11	No		
213	-5.515	-6.344	Negativo	6.344	189.91	Si	190	
214	2.152	7.667	Positivo	7.667	229.52	Si	230	
215	-1.519	-3.671	Negativo	3.671	109.90	No		
216	0.813	2.332	Positivo	2.332	69.82	No		
217	-7.122	-7.936	Negativo	7.936	237.57	Si	238	
218	1.524	8.646	Positivo	8.646	258.83	Si	259	
219	-1.218	-2.742	Negativo	2.742	82.08	No		
220	0.030	1.249	Positivo	1.249	37.38	No		
221	-7.914	-7.944	Negativo	7.944	237.81	Si	238	
222	0.510	8.424	Positivo	8.424	252.18	Si	252	
223	-7.686	-8.196	Negativo	8.196	245.36	Si	245	
224	1.328	9.013	Positivo	9.013	269.83	Si	270	
225	-0.533	-1.861	Negativo	1.861	55.71	No		
226	0.270	0.803	Positivo	0.803	24.05	No		
227	-6.473	-6.743	Negativo	6.743	201.86	Si	202	
228	-1.436	5.037	Positivo	5.037	150.80	No		
229	-6.340	-4.905	Negativo	4.905	146.83	No		
230	-1.865	4.475	Positivo	4.475	133.97	No		

# Dato	σ_n	Rango	Tipo	Rango (T-m)	Rango (Kg-cm)	¿Contra?	Rango Daño
231	-5.919	-4.054	Negativo	4.054	121.36	No	
232	-2.339	3.580	Positivo	3.580	107.16	No	
233	-5.112	-2.772	Negativo	2.772	82.99	No	
234	-3.495	1.617	Positivo	1.617	48.41	No	
235	-4.785	-1.291	Negativo	1.291	38.64	No	
236	-2.775	2.010	Positivo	2.010	60.19	No	
237	-5.311	-2.536	Negativo	2.536	75.93	No	
238	-2.751	2.561	Positivo	2.561	76.65	No	
Total datos daño fatiga						125.00	

Tabla 25

Daño acumulado por la Regla de Palmgreen-Miner, esfuerzos en Kg/cm² (>F_{TH}). Ciclos a partir del Simple Range Counting.

DAÑO ACUMULADO PALMGREEN-MINER /NTC 2020 (1 año)			DAÑO ACUMULADO PALMGREEN-MINER /NTC 2020 (1 año)		
# Dato Daño por Fatiga	σ (Kg/cm2)	Daño n i/Ni	# Dato Daño por Fatiga	σ (Kg/cm2)	Daño n i/Ni
1	356.00	1.21E-03	18	261.02	4.76E-04
2	326.22	9.28E-04	19	259.35	4.66E-04
3	319.45	8.72E-04	20	259.01	4.65E-04
4	273.66	5.48E-04	21	258.83	4.64E-04
5	269.87	5.26E-04	22	258.83	4.64E-04
6	269.84	5.25E-04	23	258.83	4.64E-04
7	269.83	5.25E-04	24	258.83	4.64E-04
8	269.83	5.25E-04	25	258.83	4.64E-04
9	269.83	5.25E-04	26	258.83	4.64E-04
10	269.83	5.25E-04	27	258.83	4.64E-04
11	269.83	5.25E-04	28	258.82	4.64E-04
12	269.83	5.25E-04	29	258.76	4.63E-04
13	269.83	5.25E-04	30	258.27	4.61E-04
14	269.76	5.25E-04	31	257.60	4.57E-04
15	267.53	5.12E-04	32	257.54	4.57E-04
16	266.16	5.04E-04	33	257.53	4.57E-04
17	261.32	4.77E-04	34	257.53	4.57E-04

DAÑO ACUMULADO PALMGREEN-MINER /NTC 2020 (1 año)

# Dato	σ (Kg/cm2)	Daño n i/Ni
35	257.53	4.57E-04
36	257.53	4.57E-04
37	257.53	4.57E-04
38	257.52	4.57E-04
39	257.52	4.57E-04
40	255.47	4.46E-04
41	252.18	4.29E-04
42	252.18	4.29E-04
43	252.18	4.29E-04
44	252.18	4.29E-04
45	252.18	4.29E-04
46	252.18	4.29E-04
47	252.18	4.29E-04
48	252.18	4.29E-04
49	252.15	4.29E-04
50	251.99	4.28E-04
51	250.99	4.23E-04
52	245.37	3.95E-04
53	245.36	3.95E-04
54	245.36	3.95E-04
55	245.36	3.95E-04
56	245.36	3.95E-04
57	245.36	3.95E-04
58	245.36	3.95E-04
59	245.36	3.95E-04
60	245.35	3.95E-04
61	245.12	3.94E-04
62	244.75	3.92E-04
63	240.91	3.74E-04
64	238.01	3.61E-04
65	237.82	3.60E-04
66	237.82	3.60E-04
67	237.81	3.60E-04
68	237.81	3.60E-04
69	237.81	3.60E-04
70	237.81	3.60E-04
71	237.81	3.60E-04
72	237.81	3.60E-04
73	237.78	3.60E-04

DAÑO ACUMULADO PALMGREEN-MINER /NTC 2020 (1 año)

# Dato	σ (Kg/cm2)	Daño n i/Ni
74	237.72	3.59E-04
75	237.57	3.59E-04
76	237.57	3.59E-04
77	237.57	3.59E-04
78	237.57	3.59E-04
79	237.57	3.59E-04
80	237.57	3.59E-04
81	237.57	3.59E-04
82	237.56	3.58E-04
83	237.43	3.58E-04
84	234.22	3.44E-04
85	233.37	3.40E-04
86	230.38	3.27E-04
87	230.14	3.26E-04
88	229.52	3.23E-04
89	229.52	3.23E-04
90	229.52	3.23E-04
91	229.52	3.23E-04
92	229.52	3.23E-04
93	229.52	3.23E-04
94	229.52	3.23E-04
95	229.51	3.23E-04
96	229.46	3.23E-04
97	222.22	2.93E-04
98	217.59	2.75E-04
99	213.48	2.60E-04
100	211.65	2.54E-04
101	207.66	2.39E-04
102	201.99	2.20E-04
103	201.96	2.20E-04
104	201.87	2.20E-04
105	201.86	2.20E-04
106	201.86	2.20E-04
107	201.86	2.20E-04
108	201.86	2.20E-04
109	201.86	2.20E-04
110	201.86	2.20E-04
111	201.86	2.20E-04
112	201.86	2.20E-04

DAÑO ACUMULADO PALMGREEN-MINER /NTC 2020 (1 año)			DAÑO ACUMULADO PALMGREEN-MINER /NTC 2020 (1 año)		
# Dato			# Dato		
Daño por Fatiga	σ (Kg/cm2)	Daño n i/Ni	Daño por Fatiga	σ (Kg/cm2)	Daño n i/Ni
113	201.33	2.18E-04	121	189.91	1.83E-04
114	200.48	2.15E-04	122	189.91	1.83E-04
115	199.53	2.12E-04	123	189.90	1.83E-04
116	190.21	1.84E-04	124	189.89	1.83E-04
117	189.91	1.83E-04	125	189.74	1.83E-04
118	189.91	1.83E-04			
119	189.91	1.83E-04			
120	189.91	1.83E-04			
			Total daño acum/año		
			<u>0.048</u>		
			<u>20.8</u>		

Tabla 26

Daño acumulado no lineal por método de Manson-Halford, esfuerzos en Kg/cm² (>F_{TH}). Ciclos a partir del método Simple Range.

	Resumen rangos (ton-m)		Resumen rangos (kg-cm2)		Ciclos a la falla	DAÑO ni/Ni
	Rangos 1 Ciclo (Ton-m)	Rangos 0.5 Ciclo (Ton-m)	Rangos 1 Ciclo (Kg/cm2)	Rangos 0.5 Ciclo (Kg/cm2)		
		3.948		118.183	0.00E+00	0.00E+00
1		5.391		161.391	0.00E+00	0.00E+00
2		10.897		326.222	1 3.90E+06	9.28E-04
3		10.671		319.447	2 4.16E+06	8.72E-04
4		3.120		93.413	0.00E+00	0.00E+00
5		0.664		19.866	0.00E+00	0.00E+00
6		7.131		213.485	3 1.39E+07	2.60E-04
7		11.892		356.000	4 3.00E+06	1.21E-03
8		5.766		172.614	0.00E+00	0.00E+00
9		3.965		118.701	0.00E+00	0.00E+00
10		7.070		211.646	5 1.43E+07	2.54E-04
11		6.665		199.534	6 1.71E+07	2.12E-04
12		2.228		66.706	0.00E+00	0.00E+00
13		1.948		58.303	0.00E+00	0.00E+00
14		7.268		217.595	7 1.32E+07	2.75E-04
15		7.423		222.223	8 1.23E+07	2.93E-04
16		1.924		57.599	0.00E+00	0.00E+00
17		0.969		29.012	0.00E+00	0.00E+00
18		6.936		207.656	9 1.51E+07	2.39E-04

	Resumen rangos (ton-m)		Resumen rangos (kg-cm2)		Ciclos a la falla	DAÑO ni/Ni
	Rangos 1 Ciclo (Ton-m)	Rangos 0.5 Ciclo (Ton-m)	Rangos 1 Ciclo (Kg/cm2)	Rangos 0.5 Ciclo (Kg/cm2)		
19		8.534		255.468	10	8.13E+06 4.46E-04
20		3.261		97.637		0.00E+00 0.00E+00
21		1.466		43.891		0.00E+00 0.00E+00
22		7.695		230.378	11	1.11E+07 3.27E-04
23		8.729		261.318	12	7.59E+06 4.77E-04
24		8.891		266.165	13	7.19E+06 5.04E-04
25		9.141		273.664	14	6.61E+06 5.48E-04
26		1.792		53.641		0.00E+00 0.00E+00
27		0.688		20.585		0.00E+00 0.00E+00
28		6.725		201.333	15	1.66E+07 2.18E-04
29		8.719		261.019	16	7.62E+06 4.76E-04
30		3.630		108.672		0.00E+00 0.00E+00
31		2.430		72.753		0.00E+00 0.00E+00
32		6.697		200.480	17	1.68E+07 2.15E-04
33		7.795		233.372	18	1.07E+07 3.40E-04
34		3.648		109.205		0.00E+00 0.00E+00
35		2.407		72.053		0.00E+00 0.00E+00
36		8.047		240.913	19	9.69E+06 3.74E-04
37		8.663		259.351	20	7.77E+06 4.66E-04
38		2.656		79.510		0.00E+00 0.00E+00
39		1.145		34.284		0.00E+00 0.00E+00
40		7.824		234.216	21	1.05E+07 3.44E-04
41		8.384		250.990	22	8.57E+06 4.23E-04
42		8.175		244.748	23	9.24E+06 3.92E-04
43		8.937		267.533	24	7.08E+06 5.12E-04
44		1.811		54.210		0.00E+00 0.00E+00
45		0.783		23.447		0.00E+00 0.00E+00
46		6.747		201.995	25	1.64E+07 2.20E-04
47		8.627		258.267	26	7.87E+06 4.61E-04
48		3.445		103.118		0.00E+00 0.00E+00
49		2.139		64.035		0.00E+00 0.00E+00
50		6.354		190.214	27	1.97E+07 1.84E-04
51		7.687		230.136	28	1.11E+07 3.26E-04
52		3.713		111.165		0.00E+00 0.00E+00
53		2.364		70.783		0.00E+00 0.00E+00
54		7.951		238.015	29	1.00E+07 3.61E-04
55		8.652		259.010	30	7.80E+06 4.65E-04
56		2.746		82.192		0.00E+00 0.00E+00
57		1.248		37.350		0.00E+00 0.00E+00

Resumen rangos (ton-m)		Resumen rangos (kg-cm2)		Ciclos a la falla	DAÑO ni/Ni
Rangos 1 Ciclo (Ton-m)	Rangos 0.5 Ciclo (Ton-m)	Rangos 1 Ciclo (Kg/cm2)	Rangos 0.5 Ciclo (Kg/cm2)	#Dato	Daño - Ni - ni / Ni
58	7.941		237.725	31	1.01E+07 3.59E-04
59	8.417		251.987	32	8.47E+06 4.28E-04
60	8.188		245.122	33	9.20E+06 3.94E-04
61	9.011		269.763	34	6.90E+06 5.25E-04
62	1.864		55.800		0.00E+00 0.00E+00
63	0.808		24.186		0.00E+00 0.00E+00
64	6.746		201.959	35	1.64E+07 2.20E-04
65	8.605		257.597	36	7.93E+06 4.57E-04
66	3.410		102.080		0.00E+00 0.00E+00
67	2.106		63.039		0.00E+00 0.00E+00
68	6.338		189.738	37	1.98E+07 1.83E-04
69	7.665		229.465	38	1.12E+07 3.23E-04
70	3.672		109.926		0.00E+00 0.00E+00
71	2.330		69.738		0.00E+00 0.00E+00
72	7.931		237.434	39	1.01E+07 3.58E-04
73	8.644		258.761	40	7.82E+06 4.63E-04
74	2.741		82.061		0.00E+00 0.00E+00
75	1.247		37.332		0.00E+00 0.00E+00
76	7.943		237.784	41	1.01E+07 3.60E-04
77	8.423		252.148	42	8.45E+06 4.29E-04
78	8.196		245.353	43	9.17E+06 3.95E-04
79	9.015		269.874	44	6.89E+06 5.26E-04
80	1.862		55.749		0.00E+00 0.00E+00
81	0.804		24.066		0.00E+00 0.00E+00
82	6.743		201.872	45	1.65E+07 2.20E-04
83	8.603		257.540	46	7.93E+06 4.57E-04
84	3.409		102.044		0.00E+00 0.00E+00
85	2.107		63.089		0.00E+00 0.00E+00
86	6.343		189.888	47	1.98E+07 1.83E-04
87	7.666		229.507	48	1.12E+07 3.23E-04
88	3.670		109.878		0.00E+00 0.00E+00
89	2.332		69.798		0.00E+00 0.00E+00
90	7.935		237.557	49	1.01E+07 3.58E-04
91	8.645		258.818	50	7.82E+06 4.64E-04
92	2.741		82.067		0.00E+00 0.00E+00
93	1.248		37.373		0.00E+00 0.00E+00
94	7.944		237.817	51	1.01E+07 3.60E-04
95	8.424		252.184	52	8.45E+06 4.29E-04
96	8.196		245.368	53	9.17E+06 3.95E-04

Resumen rangos (ton-m)		Resumen rangos (kg-cm2)		Ciclos a la falla	DAÑO ni/Ni
Rangos 1 Ciclo (Ton-m)	Rangos 0.5 Ciclo (Ton-m)	Rangos 1 Ciclo (Kg/cm2)	Rangos 0.5 Ciclo (Kg/cm2)	#Dato	Daño - Ni - ni / Ni
97	9.014		269.841	54	6.90E+06 5.25E-04
98	1.861		55.707		0.00E+00 0.00E+00
99	0.803		24.039		0.00E+00 0.00E+00
100	6.743		201.857	55	1.65E+07 2.20E-04
101	8.602		257.525	56	7.93E+06 4.57E-04
102	3.409		102.041		0.00E+00 0.00E+00
103	2.108		63.101		0.00E+00 0.00E+00
104	6.343		189.903	57	1.98E+07 1.83E-04
105	7.667		229.522	58	1.12E+07 3.23E-04
106	3.671		109.899		0.00E+00 0.00E+00
107	2.332		69.819		0.00E+00 0.00E+00
108	7.936		237.566	59	1.01E+07 3.59E-04
109	8.646		258.827	60	7.81E+06 4.64E-04
110	2.742		82.082		0.00E+00 0.00E+00
111	1.249		37.382		0.00E+00 0.00E+00
112	7.944		237.817	61	1.01E+07 3.60E-04
113	8.424		252.184	62	8.45E+06 4.29E-04
114	8.196		245.365	63	9.17E+06 3.95E-04
115	9.013		269.832	64	6.90E+06 5.25E-04
116	1.861		55.704		0.00E+00 0.00E+00
117	0.803		24.042		0.00E+00 0.00E+00
118	6.743		201.857	65	1.65E+07 2.20E-04
119	8.602		257.525	66	7.93E+06 4.57E-04
120	3.409		102.047		0.00E+00 0.00E+00
121	2.108		63.107		0.00E+00 0.00E+00
122	6.344		189.909	67	1.98E+07 1.83E-04
123	7.667		229.525	68	1.12E+07 3.23E-04
124	3.671		109.899		0.00E+00 0.00E+00
125	2.332		69.819		0.00E+00 0.00E+00
126	7.936		237.566	69	1.01E+07 3.59E-04
127	8.646		258.827	70	7.81E+06 4.64E-04
128	2.742		82.082		0.00E+00 0.00E+00
129	1.249		37.379		0.00E+00 0.00E+00
130	7.944		237.814	71	1.01E+07 3.60E-04
131	8.424		252.184	72	8.45E+06 4.29E-04
132	8.196		245.365	73	9.17E+06 3.95E-04
133	9.013		269.832	74	6.90E+06 5.25E-04
134	1.861		55.707		0.00E+00 0.00E+00
135	0.803		24.045		0.00E+00 0.00E+00

Resumen rangos (ton-m)		Resumen rangos (kg-cm2)		Ciclos a la falla	DAÑO ni/Ni	
Rangos 1 Ciclo (Ton-m)	Rangos 0.5 Ciclo (Ton-m)	Rangos 1 Ciclo (Kg/cm2)	Rangos 0.5 Ciclo (Kg/cm2)	#Dato	Daño - Ni	ni / Ni
136	6.743		201.860	75	1.65E+07	2.20E-04
137	8.602		257.528	76	7.93E+06	4.57E-04
138	3.409		102.047		0.00E+00	0.00E+00
139	2.108		63.107		0.00E+00	0.00E+00
140	6.344		189.909	77	1.98E+07	1.83E-04
141	7.667		229.525	78	1.12E+07	3.23E-04
142	3.671		109.899		0.00E+00	0.00E+00
143	2.332		69.819		0.00E+00	0.00E+00
144	7.936		237.566	79	1.01E+07	3.59E-04
145	8.646		258.827	80	7.81E+06	4.64E-04
146	2.742		82.082		0.00E+00	0.00E+00
147	1.249		37.379		0.00E+00	0.00E+00
148	7.944		237.814	81	1.01E+07	3.60E-04
149	8.424		252.184	82	8.45E+06	4.29E-04
150	8.196		245.365	83	9.17E+06	3.95E-04
151	9.013		269.832	84	6.90E+06	5.25E-04
152	1.861		55.707		0.00E+00	0.00E+00
153	0.803		24.045		0.00E+00	0.00E+00
154	6.743		201.860	85	1.65E+07	2.20E-04
155	8.602		257.528	86	7.93E+06	4.57E-04
156	3.409		102.047		0.00E+00	0.00E+00
157	2.108		63.107		0.00E+00	0.00E+00
158	6.344		189.909	87	1.98E+07	1.83E-04
159	7.667		229.525	88	1.12E+07	3.23E-04
160	3.671		109.899		0.00E+00	0.00E+00
161	2.332		69.819		0.00E+00	0.00E+00
162	7.936		237.566	89	1.01E+07	3.59E-04
163	8.646		258.827	90	7.81E+06	4.64E-04
164	2.742		82.082		0.00E+00	0.00E+00
165	1.249		37.379		0.00E+00	0.00E+00
166	7.944		237.814	91	1.01E+07	3.60E-04
167	8.424		252.184	92	8.45E+06	4.29E-04
168	8.196		245.365	93	9.17E+06	3.95E-04
169	9.013		269.832	94	6.90E+06	5.25E-04
170	1.861		55.707		0.00E+00	0.00E+00
171	0.803		24.045		0.00E+00	0.00E+00
172	6.743		201.860	95	1.65E+07	2.20E-04
173	8.602		257.528	96	7.93E+06	4.57E-04
174	3.409		102.047		0.00E+00	0.00E+00

	Resumen rangos (ton-m)		Resumen rangos (kg-cm2)		Ciclos a la falla	DAÑO ni/Ni
	Rangos 1 Ciclo (Ton-m)	Rangos 0.5 Ciclo (Ton-m)	Rangos 1 Ciclo (Kg/cm2)	Rangos 0.5 Ciclo (Kg/cm2)		
175		2.108		63.107		0.00E+00
176		6.344		189.909	97	1.98E+07
177		7.667		229.525	98	1.12E+07
178		3.671		109.899		0.00E+00
179		2.332		69.819		0.00E+00
180		7.936		237.566	99	1.01E+07
181		8.646		258.827	100	7.81E+06
182		2.742		82.082		0.00E+00
183		1.249		37.379		0.00E+00
184		7.944		237.814	101	1.01E+07
185		8.424		252.184	102	8.45E+06
186		8.196		245.365	103	9.17E+06
187		9.013		269.832	104	6.90E+06
		1.861		55.707		0.00E+00
		0.803		24.045		0.00E+00
		6.743		201.860	105	1.65E+07
		8.602		257.528	106	7.93E+06
		3.409		102.047		0.00E+00
		2.108		63.107		0.00E+00
		6.344		189.909	107	1.98E+07
		7.667		229.525	108	1.12E+07
		3.671		109.899		0.00E+00
		2.332		69.819		0.00E+00
		7.936		237.566	109	1.01E+07
		8.646		258.827	110	7.81E+06
		2.742		82.082		0.00E+00
		1.249		37.379		0.00E+00
		7.944		237.814	111	1.01E+07
		8.424		252.184	112	8.45E+06
		8.196		245.365	113	9.17E+06
		9.013		269.832	114	6.90E+06
		1.861		55.707		0.00E+00
		0.803		24.045		0.00E+00
		6.743		201.860	115	1.65E+07
		8.602		257.528	116	7.93E+06
		3.409		102.047		0.00E+00
		2.108		63.107		0.00E+00
		6.344		189.909	117	1.98E+07
		7.667		229.525		1.83E-04

Resumen rangos (ton-m)		Resumen rangos (kg-cm2)		Ciclos a la falla		DAÑO ni/Ni	
Rangos 1 Ciclo (Ton-m)	Rangos 0.5 Ciclo (Ton-m)	Rangos 1 Ciclo (Kg/cm2)	Rangos 0.5 Ciclo (Kg/cm2)	#Dato	Daño	Ni	ni / Ni
	3.671		109.899		0.00E+00		0.00E+00
	2.332		69.819		0.00E+00		0.00E+00
	7.936		237.566	118	1.01E+07		3.59E-04
	8.646		258.827	119	7.81E+06		4.64E-04
	2.742		82.082		0.00E+00		0.00E+00
	1.249		37.379		0.00E+00		0.00E+00
	7.944		237.814	120	1.01E+07		3.60E-04
	8.424		252.184	121	8.45E+06		4.29E-04
	8.196		245.365	122	9.17E+06		3.95E-04
	9.013		269.832	123	6.90E+06		5.25E-04
	1.861		55.707		0.00E+00		0.00E+00
	0.803		24.045		0.00E+00		0.00E+00
	6.743		201.860	124	1.65E+07		2.20E-04
	5.037		150.796		0.00E+00		0.00E+00
	4.905		146.830		0.00E+00		0.00E+00
	4.475		133.975		0.00E+00		0.00E+00
	4.054		121.359		0.00E+00		0.00E+00
	3.580		107.160		0.00E+00		0.00E+00
	2.772		82.995		0.00E+00		0.00E+00
	1.617		48.411		0.00E+00		0.00E+00
	1.291		38.643		0.00E+00		0.00E+00
	2.010		60.186		0.00E+00		0.00E+00
	2.536		75.932		0.00E+00		0.00E+00
	2.561		76.654		0.00E+00		0.00E+00
Total rangos acumulado daño				124			
Total ciclos completos				0			
Total medios ciclos				238			

Tabla 27

Resumen daño acumulado no lineal por método de Manson-Halford, esfuerzos en Kg/cm² (>F_{TH}). Ciclos a partir del método Simple Range.

Resumen esfuerzos > F _{th} --> Acumula			
	fatiga		Daño no lineal
Secuencia	Ciclos N i a la falla	Daño n i / N i	Acumulación de Daño (DCA)
1	3.90E+06	9.28E-04	1.10E-03
2	4.16E+06	8.72E-04	1.98E-03
3	1.39E+07	2.60E-04	2.18E-02
4	3.00E+06	1.21E-03	2.06E-03
5	1.43E+07	2.54E-04	3.66E-02
6	1.71E+07	2.12E-04	4.61E-02
7	1.32E+07	2.75E-04	3.32E-02
8	1.23E+07	2.93E-04	3.07E-02
9	1.51E+07	2.39E-04	4.05E-02
10	8.13E+06	4.46E-04	1.68E-02
11	1.11E+07	3.27E-04	2.75E-02
12	7.59E+06	4.77E-04	1.57E-02
13	7.19E+06	5.04E-04	1.49E-02
14	6.61E+06	5.48E-04	1.34E-02
15	1.66E+07	2.18E-04	5.09E-02
16	7.62E+06	4.76E-04	1.76E-02
17	1.68E+07	2.15E-04	5.29E-02
18	1.07E+07	3.40E-04	2.97E-02
19	9.69E+06	3.74E-04	2.63E-02
20	7.77E+06	4.66E-04	1.93E-02
21	1.05E+07	3.44E-04	3.07E-02
22	8.57E+06	4.23E-04	2.31E-02
23	9.24E+06	3.92E-04	2.63E-02
24	7.08E+06	5.12E-04	1.79E-02
25	1.64E+07	2.20E-04	5.69E-02
26	7.87E+06	4.61E-04	2.18E-02
27	1.97E+07	1.84E-04	7.07E-02
28	1.11E+07	3.26E-04	3.61E-02
29	1.00E+07	3.61E-04	3.19E-02
30	7.80E+06	4.65E-04	2.25E-02
31	1.01E+07	3.59E-04	3.30E-02
32	8.47E+06	4.28E-04	2.62E-02
33	9.20E+06	3.94E-04	2.99E-02
34	6.90E+06	5.25E-04	2.00E-02
35	1.64E+07	2.20E-04	6.33E-02

Resumen esfuerzos > F th --> Acumula
fatiga Daño no lineal

Secuencia	Ciclos N i a la falla	Daño n i / N i	Acumulación de Daño (DCA)
36	7.93E+06	4.57E-04	2.53E-02
37	1.98E+07	1.83E-04	7.84E-02
38	1.12E+07	3.23E-04	4.12E-02
39	1.01E+07	3.58E-04	3.64E-02
40	7.82E+06	4.63E-04	2.58E-02
41	1.01E+07	3.60E-04	3.71E-02
42	8.45E+06	4.29E-04	2.96E-02
43	9.17E+06	3.95E-04	3.36E-02
44	6.89E+06	5.26E-04	2.28E-02
45	1.65E+07	2.20E-04	6.96E-02
46	7.93E+06	4.57E-04	2.86E-02
47	1.98E+07	1.83E-04	8.51E-02
48	1.12E+07	3.23E-04	4.57E-02
49	1.01E+07	3.58E-04	4.05E-02
50	7.82E+06	4.64E-04	2.91E-02
51	1.01E+07	3.60E-04	4.13E-02
52	8.45E+06	4.29E-04	3.31E-02
53	9.17E+06	3.95E-04	3.74E-02
54	6.90E+06	5.25E-04	2.57E-02
55	1.65E+07	2.20E-04	7.56E-02
56	7.93E+06	4.57E-04	3.19E-02
57	1.98E+07	1.83E-04	9.18E-02
58	1.12E+07	3.23E-04	5.02E-02
59	1.01E+07	3.59E-04	4.46E-02
60	7.81E+06	4.64E-04	3.23E-02
61	1.01E+07	3.60E-04	4.54E-02
62	8.45E+06	4.29E-04	3.66E-02
63	9.17E+06	3.95E-04	4.12E-02
64	6.90E+06	5.25E-04	2.85E-02
65	1.65E+07	2.20E-04	8.14E-02
66	7.93E+06	4.57E-04	3.52E-02
67	1.98E+07	1.83E-04	9.83E-02
68	1.12E+07	3.23E-04	5.47E-02
69	1.01E+07	3.59E-04	4.87E-02
70	7.81E+06	4.64E-04	3.56E-02
71	1.01E+07	3.60E-04	4.95E-02
72	8.45E+06	4.29E-04	4.02E-02
73	9.17E+06	3.95E-04	4.50E-02
74	6.90E+06	5.25E-04	3.14E-02

Resumen esfuerzos > F th --> Acumula
fatiga Daño no lineal

Secuencia	Ciclos N i a la falla	Daño n i / N i	Acumulación de Daño (DCA)
75	1.65E+07	2.20E-04	8.72E-02
76	7.93E+06	4.57E-04	3.85E-02
77	1.98E+07	1.83E-04	1.05E-01
78	1.12E+07	3.23E-04	5.91E-02
79	1.01E+07	3.59E-04	5.28E-02
80	7.81E+06	4.64E-04	3.89E-02
81	1.01E+07	3.60E-04	5.36E-02
82	8.45E+06	4.29E-04	4.37E-02
83	9.17E+06	3.95E-04	4.88E-02
84	6.90E+06	5.25E-04	3.44E-02
85	1.65E+07	2.20E-04	9.28E-02
86	7.93E+06	4.57E-04	4.19E-02
87	1.98E+07	1.83E-04	1.11E-01
88	1.12E+07	3.23E-04	6.35E-02
89	1.01E+07	3.59E-04	5.69E-02
90	7.81E+06	4.64E-04	4.22E-02
91	1.01E+07	3.60E-04	5.76E-02
92	8.45E+06	4.29E-04	4.72E-02
93	9.17E+06	3.95E-04	5.25E-02
94	6.90E+06	5.25E-04	3.73E-02
95	1.65E+07	2.20E-04	9.84E-02
96	7.93E+06	4.57E-04	4.52E-02
97	1.98E+07	1.83E-04	1.17E-01
98	1.12E+07	3.23E-04	6.79E-02
99	1.01E+07	3.59E-04	6.10E-02
100	7.81E+06	4.64E-04	4.55E-02
101	1.01E+07	3.60E-04	6.17E-02
102	8.45E+06	4.29E-04	5.08E-02
103	9.17E+06	3.95E-04	5.63E-02
104	6.90E+06	5.25E-04	4.03E-02
105	1.65E+07	2.20E-04	1.04E-01
106	7.93E+06	4.57E-04	4.86E-02
107	1.98E+07	1.83E-04	1.23E-01
108	1.12E+07	3.23E-04	7.23E-02
109	1.01E+07	3.59E-04	6.50E-02
110	7.81E+06	4.64E-04	4.88E-02
111	1.01E+07	3.60E-04	6.57E-02
112	8.45E+06	4.29E-04	5.43E-02
113	9.17E+06	3.95E-04	6.01E-02

Resumen esfuerzos > F th --> Acumula
 fatiga Daño no lineal

Secuencia	Ciclos N i a la falla	Daño n i / N i	Acumulación de Daño (DCA)
114	6.90E+06	5.25E-04	4.33E-02
115	1.65E+07	2.20E-04	1.09E-01
116	7.93E+06	4.57E-04	5.20E-02
117	1.98E+07	1.83E-04	1.29E-01
118	1.01E+07	3.59E-04	6.88E-02
119	7.81E+06	4.64E-04	5.19E-02
120	1.01E+07	3.60E-04	6.95E-02
121	8.45E+06	4.29E-04	5.76E-02
122	9.17E+06	3.95E-04	6.36E-02
123	6.90E+06	5.25E-04	4.61E-02
124	1.65E+07	2.20E-04	1.14E-01
Sub total daño acumulado/ año			6.03E+00
Años esperados a la falla			0.17





CAPÍTULO VI

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

CAPÍTULO VI. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

6.1. COMBINACIONES DE DAÑO ACUMULADO LINEALMENTE

De acuerdo con el resumen de resultados para el daño acumulado linealmente por fatiga aplicando la regla de Miner mostrado en la tabla 7, se obtuvo en términos generales que la vida esperada en años del detalle estructural mostrado en la figura 4-19, se estima considerablemente menor para los métodos de parámetro simple con respecto a los métodos de doble parámetro, es decir, los primeros son más conservadores.

El método que estimó una vida más corta debido a la acumulación de daño por fatiga fue el calculado mediante Peak Counting, con 15.7 años, mientras que el método menos conservador para el detalle revisado, resultó ser el derivado del Rainflow Cycle Counting, con 31.7 años, es decir prácticamente se estima el doble de la vida útil en años hasta esperar una falla por fatiga.

Esta diferencia en las estimaciones, si bien pudiera sugerir un criterio mal aplicado, observamos más bien una congruencia con las consideraciones que cada algoritmo integra en su metodología, ya que la formación de rangos a partir de la historia de esfuerzos por el método de Peak Counting, deliberadamente forma ciclos emparejando los picos de mayor magnitud con los valles de mayor magnitud (diagrama 4), llevando a un daño acumulado más conservador. Por otro lado, el Rainflow Cycle Counting, cuenta ciclos siguiendo el orden más o menos natural y progresivo de la historia de esfuerzos (diagrama 2), lo que no lleva a los resultados más conservadores posibles.

Las estimaciones derivadas del Simple Range Counting y del Range Pair Counting arrojaron 20.8 y 26.7 años de vida útil esperados a la falla por fatiga respectivamente, lo cual las coloca como las aproximaciones más apegadas a la media aritmética obtenida a partir de las cuatro combinaciones efectuadas, la cual es de 23.7 años a la falla por fatiga. Asimismo, comparando los resultados con sus pares de simple o doble parámetro, estas aproximaciones difieren aproximadamente en cinco años con respecto a los resultados para el Peak Counting y Rainflow Cycle Counting respectivamente.

En términos de certeza ingenieril, podemos comparar los resultados obtenidos del conteo de ciclos y la posterior estimación de daño acumulado con aquellos que se obtienen por ejemplo, al estimar la capacidad de carga en el desplante de una cimentación. En el diseño por fatiga, como en el cálculo de la capacidad de carga en un estrato de suelo según la teoría de la mecánica de suelos, existe un alto grado de incertidumbre de los resultados, por lo que los códigos de diseño exigen la implementación de factores de seguridad que oscilan entre 2.5 y 3.5.

Este factor de seguridad para el caso de la fatiga impacta mucho más de lo que representan las diferencias obtenidas en los resultados discutidos sobre la estimación del daño acumulado que se obtuvo para las cuatro combinaciones realizadas, independientemente de que algunas sean más conservadores que otras. Es así que de manera práctica y recordando que cada uno de los métodos aquí aplicados para el conteo de ciclos es estandarizado y aceptado en la práctica, todos los resultados pueden darse como buenos con un nivel similar de exactitud en los mismos.

En lo referente a la programación de los algoritmos que permitieron el cálculo automatizado del conteo de ciclos y la estimación del daño por fatiga, procedimientos mostrados en las tablas del apartado 5.2, es preciso señalar que los algoritmos de parámetro simple para el conteo de ciclos resultaron ser considerablemente más sencillos en su desarrollo y generación de interfaz para su aplicación en software de dominio general como lo es Microsoft Excel. Por otro lado, para una ejecución adecuada de los métodos, los algoritmos de doble parámetro presentaron una mayor complejidad que requiere idealmente el uso de software de desarrollo como Python o Matlab para poder generar una herramienta confiable y aplicable a cualquier caso de historia de esfuerzos contemplado en un análisis.

En este aspecto, los cálculos y trabajo necesario para culminar la programación del Range Pair, resultaron ser particularmente complicados en varios puntos del proceso de desarrollo, con una inversión importante de tiempo y recursos para poder cumplir el objetivo de tener una herramienta de cálculo aplicable no solo al caso de estudio, si no a cualquier otra historia de esfuerzos. El trabajo realizado para Rainflow Counting por otro lado, resultó beneficiado de librerías disponibles en

código abierto para Python que facilitaron parte de la integración de la herramienta de cálculo adaptada a las necesidades de la investigación.

6.2. COMBINACIONES DE DAÑO ACUMULADO NO LINEAL

Retomando el resumen de resultados mostrado en la tabla 7, específicamente en la columna que indica el daño acumulado por fatiga derivado de la aplicación de la aproximación no lineal propuesta por Manson y Halford, se obtuvo congruentemente a lo discutido en el apartado 6.1, que los métodos de parámetro simple con respecto a los métodos de doble parámetro obtuvieron estimaciones de vida útil por fatiga menores, resultando más conservadores. La estimación partiendo del Peak Counting definió nuevamente la estimación de vida útil por fatiga más conservadora, de 0.19 años y en este caso, Range Pair Counting la menos conservadora con 0.57 años.

Evidentemente las cuatro aproximaciones de daño acumulado no lineal presentaron la llamativa característica de haber estimado una vida útil esperada por fatiga menor al año de uso, y en los casos de parámetro simple, bastante menor que el año. Estos datos, resultan sin duda altamente conservadores y concuerdan con las observaciones realizadas por autores como Luna (2017) respecto a las aproximaciones de estimación no lineal de la fatiga disponibles en la actualidad, apuntando que dichos modelos no logran estimaciones de vida a la fatiga con una aproximación aceptable cuando se les compara con los resultados experimentales. Por tanto, los resultados obtenidos son poco realistas y no son congruentes a lo que la experiencia profesional en el área de estructuras ha identificado en lo referente a fallas en estructuras de tipo edificación.

La principal fortaleza del método de acumulación de daño no lineal por la Curva de Daño Acumulado de Manson-Halford, es el hecho de tomar en cuenta la degradación debida a cada ciclo previo de carga. En este respecto, es preciso señalar que algunos de los métodos para conteo de ciclos modifican en mayor o menor medida la secuencia de las cargas buscando un efecto más crítico del daño, como lo es el Peak Counting. No obstante, esta situación altera

directamente los resultados de Manson-Halford, posiblemente llevando a resultados más críticos. Por otro lado, en los métodos que no alteran el orden de los rangos de esfuerzos, como el Rainflow Cycle Counting tampoco varió demasiado el resultado final, por lo que para fines de aplicación en estructuras tipo edificación similares a nuestro caso práctico estudiado sometidas a cargas dinámicas rítmicas, la aproximación de daño acumulado por fatiga no lineal empleada podría no ser una buena alternativa, ya que arrojó resultados no confiables.





CAPÍTULO VII

CONCLUSIONES

CAPÍTULO VII. CONCLUSIONES

7.1. CONCLUSION GENERAL Y METODOLOGÍA RECOMENDADA

Esta investigación abordó una propuesta metodológica para la evaluación integral de falla por fatiga en un caso práctico de estudio que consistió en un tablero de losa compuesta tipo deck acero-concreto de una estructura tipo edificación, particularmente en el detalle de conexión viga principal a columna de uno de sus marcos principales.

El modelo investigado fue sometido a la acción dinámica de actividades humanas de tipo rítmicas (aeróbics), generando efectos de mayoración de las cargas vivas derivando en rangos importantes de esfuerzos de tensión de magnitud variable actuando en los diferentes elementos de la estructura.

La metodología empleada permitió visualizar y aplicar algunas alternativas disponibles para abordar los pasos necesarios desde la modelación misma de los efectos dinámicos, hasta el tratamiento de la historia de esfuerzos y el daño acumulado generado en la estructura.

Así, de acuerdo a los resultados obtenidos y discutidos en el capítulo VII, fue posible concluir que la combinación metodológica recomendada para llevar a cabo un análisis por fatiga en un elemento o detalle particular de una estructura tipo edificación con características similares a las presentadas en el caso de estudio analizado en este trabajo, consiste primeramente en el uso de los algoritmos "Simple Range Counting" o bien el "Rainflow Cycle Counting" como métodos para realizar el conteo y simplificación de ciclos derivados de una historia de esfuerzos de amplitud variable, bajo las siguientes consideraciones particulares:

- 1) Si se pretende obtener un conteo de ciclos del lado conservador y empleando la menor cantidad de recursos, el algoritmo Simple Range Counting es el más destacado por su simpleza y sencillez de aplicación con ayuda de hojas de cálculo relativamente sencillas. Los resultados arrojados para el caso del daño acumulado linealmente a partir de este método se consideran en términos prácticos de diseño igualmente válidos que cualquiera de los otros métodos

analizados, resultando ser una estimación más conservadora con respecto a los métodos de doble parámetro, pero menos conservadora con respecto al método Peak Counting.

- 2) En caso de contar con la experiencia en el uso de software de matemáticas para ingeniería como Matcad o de lenguajes de programación como Python, se recomienda emplear el algoritmo Rainflow Cycle Counting, ya que tiene la ventaja de ser el método más aplicado en la actualidad, por lo que existen diversas herramientas de código abierto que facilitan su aplicación. Adicionalmente con este método se obtienen datos referentes al valor del esfuerzo medio para cada ciclo, por lo que podría ser útil contar con esta información.

Posteriormente, para la estimación del daño acumulado por fatiga, esta investigación recomienda el uso de la regla de Palmgreen-Miner en conjunto con la aplicación de las curvas S-N disponibles en códigos y reglamentos en la materia, pues en conjunto con factores de seguridad adecuados, define una estimación conservadora para el daño acumulado en componentes y estructuras.

7.2. CONCLUSIONES PARTICULARES

Como quedó evidenciado en los resultados de esta investigación, en referencia a la aplicación de métodos no lineales para la estimación del daño acumulado, la metodología de Manson-Halford, denotó la necesidad de estudios más profundos que permitan contemplar más de un parámetro de daño entre ciclos, evitando los resultados o muy conservadores o que sobrestimen el daño de manera exagerada como ocurrió en esta investigación.

EL desarrollo de la investigación hizo en cada momento evidente que la historia de esfuerzos debe ser altamente confiable y provenir de una modelación en software adecuada y precisa, o de la instrumentación y registro de esfuerzos en el detalle a revisar de la estructura real. Si esto no se cumple, por muy robustos y certeros que sean los algoritmos y herramientas para el conteo de ciclos y para la aproximación del daño acumulado, todas las estimaciones serán erróneas.

A partir de los resultados obtenidos, y empleando la metodología propuesta es posible generar programas de mantenimiento preventivo consistentes en la reparación o sustitución de los detalles revisados, que puedan evitar con un margen adecuado de confiabilidad la falla por fatiga en las estructuras donde el fenómeno se subestima, como en el caso de edificaciones sujetas a acciones dinámicas humanas del tipo rítmicas.

El presente trabajo de investigación considera válida la aplicación de la metodología aquí mostrada en estructuras sujetas a acciones similares al caso práctico de estudio aquí mostrado, como pueden ser losas a base de estructura metálica y marcos de grúas viajeras.

7.3. NICHOS DE INVESTIGACIÓN

Este proyecto presenta las siguientes posibilidades de investigación para futuros trabajos:

- A. Ampliar la aplicación de la metodología a otras aproximaciones no lineales para la estimación del daño acumulado en estructuras, pudiendo encontrar alguna propuesta cuyos resultados sean más realistas según los parámetros que tomen en cuenta en sus estimaciones.
- B. Profundizar en una metodología enfocada exclusivamente en criterios y parámetros a tomar en cuenta para estimar las características del uso u ocupación de la estructura durante su vida útil, y por tanto llegar a una estimación justificada de tiempos de uso por actividad y por ende, del bloque de esfuerzos a tomar en cuenta para conteo de rangos de esfuerzos y la posterior estimación del daño acumulado en un tiempo dado.
- C. Proponer métodos y técnicas alternativas para la modelación en software especializado de la acción dinámica debida a actividades rítmicas humanas u otras acciones que puedan generar fluctuaciones de los esfuerzos de tensión sobre la estructura, dada la dificultad en términos

prácticos que representa la instrumentación de estructuras reales que permitan obtener una historia de esfuerzos de algún elemento o detalle en particular que se pretenda revisar a fatiga.



FUENTES DE REFERENCIA

- AISC (2016). American Institute of Steel Construction. *ANSI/AISC 3660-16, Specification for Structural Steel Buildings*, United States.
- Avilés, R. (2005). *Análisis de fatiga en máquinas*. Ediciones Paraninfo, S.A. España.
- Alacero. (2018). Asociación Latinoamericana del Acero. *Proyecto por fatiga*. Boletín N°41, Chile. Recuperado de <https://alacero.org./sobre>
- Campista y Da Silva. (2018). Vibration analysis of steel–concrete composite floors when subjected to rhythmic human activities, *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, Brazil.
- CSI (2022). Computers and Structures, Inc. *ETABS, Building Analysis and Design*. Recuperado de <https://www.csiamerica.com/products/etabs>
- CEN/TC 250/SC 3. (2020). *Eurocode 3 - Design of steel structures, Final Draft of EN 1993-1-9 FATIGUE*, Berlin, Germany.
- Da Silva, A., et al. (2021) Vibration Analysis and Fatigue Assessment of Floors. Part I: Human Rhythmic Activities, *Journal of Civil Engineering and Architecture* 15, Brazil.
- Ewing, J.A. and Humfrey, J.C.W. (1903) The fracture of metals under repeated alternations of stress. *Phil.Trans. Roy. Soc.*, Vol.A200, pp.241-250.
- E08 Committee. (2017). *Practices for Cycle Counting in Fatigue Analysis*. ASTM International, United States.
- Eljufout, T., Toutanji, H., & Al-Qaralleh, M. (2019). *Fatigue Stress-Life Model of RC Beams Based on an Accelerated Fatigue Method*. *Infrastructures*, 4, 16, Switzerland.
- Faisca, R. G. (2003). *Characterization of Dynamic Loads Due to Human Activities*. *Ph.D. thesis*, Federal University of Rio de Janeiro (in Portuguese), Brazil.
- Heywood, R.B. (1962). *Designing against fatigue*. Chapman and Hall, London, England.
- Homan, J. (2018). *Difference between Low & High Cycle Fatigue*. Recuperado de <https://www.fatec-engineering.com/2018/08/23/what-is-the-difference-between-low-high-cycle-fatigue/>

- Huang, B., Wang, S., Geng, S., & Liu, X. (2021). *Improved numerical model for fatigue cumulative damage of mechanical structure considering load sequence and interaction*, *Advances in Mechanical Engineering* 13(2), USA.
- ITEA (s. f.). Instituto Técnico de la Construcción en Acero. *Tomo 14. Diseño por Fatiga*. Recuperado de https://www.webaero.net/ingenieria/estructuras/metallica/bibliografia_documentacion/itea/TOMO14.pdf.
- Lakshmi, S., & Prabha, C. (2017). A Review on Low Cycle Fatigue Failure, *IJSTE. International Journal of Science Technology & Engineering*, Volume 3, Issue 11, India.
- Luna, G., Abúndez, A., Mayén, J., Navarro Torres, J., González, B., & Colin, J. (2017). *Análisis comparativo de la estimación de vida útil a fatiga bajo cargas de amplitud variable por métodos de acumulación de daño*, Cuernavaca, México.
- McKinney, W. (2022). *Python for Data Analysis*, third edition. Open Access HTML version <https://wesmckinney.com/book>
- Manson, S. S., & Halford, G. R. (1981). *Practical implementation of the double linear damage rule and damage curve approach for treating cumulative fatigue damage*. *International Journal of Fracture*, 17(2), 169-192, Netherlands.
- Miner, M.A. (1945), *Cumulative Damage in Fatigue*, ASME, *J. Appl. Mech*, vol 67, USA.
- NTC Acero. (2020). *Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Acero con Comentarios*. Gaceta Oficial de la Ciudad de México.
- Peterson, R.E. (1950). *Discussion of a century ago concerning the nature of fatigue, and review of some of the subsequent researches concerning the mechanism of fatigue*. *ASTM Bulletin*, No.164, pp.50-56.
- Reiling, B., & Laird, G. (2022). *High-Cycle Fatigue Analysis*. Recuperado de <https://www.predictiveengineering.com/sites/default/files/High-Cycle-Fatigue-Analysis-Stress-Life-Made-Easy-White-Paper.pdf>
- Rinker, Jeniffer (2015). Open Code Rainflow library for Python applications. Recuperado de <https://gist.github.com/jennirinker/688a917ccb7a9c14e78f>.

Schijve, J. (2003). *Fatigue of Structures and Materials in the 20th Century and the State of the Art*. Materials Science, 39(3), 307-333, Netherlands.

Segui, W. (2013). *Steel Design, fifth edition*. Cengage Learning. USA.

Souto, C. D. S., Correia, J. A. F. O., De Jesus, A. M. P., & Calçada, R. A. B. (2019). *Fatigue Damage Tool (FDT)—A tool for fatigue damage assessment according to design codes*. Procedia Structural Integrity, 22, 376-385, Portugal.

Timetoast timelines. (2021). *Antecedentes históricos de las fallas por fatiga timeline*. Recuperado de: <https://www.timetoast.com/timelines/antecedentes-historicos-de-las-fallas-por-fatiga>.

Timoshenko, S. (1954). *Stress concentration in the history of strength of materials*. The William M. Murray Lecture. Proc. SESA, Vol.12, pp.1-12.

