



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA  
INGENIERÍA CIVIL – ESTRUCTURAS

**ANÁLISIS DE FATIGA DE UN PUENTE ATIRANTADO**

**TESIS**

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:  
MAESTRO EN INGENIERÍA

**PRESENTA**

JUAN SEBASTIÁN MALDONADO NOBOA

**TUTOR**

ROBERTO GÓMEZ MARTÍNEZ, DR.  
INSTITUTO DE INGENIERÍA

CIUDAD DE MÉXICO, DICIEMBRE DE 2016



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

**Presidente:** **Dr. Escobar Sánchez José Alberto**

**Secretario:** **Dr. López Bátiz Oscar Alberto**

**Vocal:** **Dr. Gómez Martínez Roberto**

**1 er. Suplente:** **Dr. Pozos Estrada Adrián**

**2 do. Suplente:** **Dr. García Pérez Jaime**

**CIUDAD DE MÉXICO**

TUTOR DE TESIS:

**DR. GÓMEZ MARTÍNEZ ROBERTO**

-----  
FIRMA

**Dedico esta investigación,**  
**A mi familia que siempre me apoyo desde, el comienzo**  
**A mis profesores por su paciencia y dedicación,**  
**A mis compañeros por su apoyo incondicional**  
**Al senescyt por el apoyo económico y**  
**A mi tutor y su equipo de trabajo**  
**por sus consejos y soporte en este proyecto.**

## Resumen

La definición de fatiga que proporciona la norma ASTM<sup>1</sup> es: "El proceso de alteración estructural permanente, progresivo y localizado, que se produce en un material sometido a condiciones que originan tensiones cíclicas y deformaciones en algún punto o puntos y que puede culminar en fisuras o en rotura total tras un número suficiente de oscilaciones", es el mecanismo mediante el cual las fisuras se incrementan en una estructura o elemento estructural, este crecimiento se produce bajo tensiones cíclicas, la falla total se produce en zonas sometidas a tracción cuando la sección transversal reducida es incapaz de soportar las cargas máximas. Este efecto es imperceptible en estructuras donde en condiciones de servicio la carga es estacionaria como edificios sin embargo puede ser crítico para otras estructuras como plataformas marinas puentes o grúas donde la carga dinámica representa la mayor proporción de la carga total.

El estudio de fatiga en conexiones tan complejas como las de un puente atirantado es de suma importancia pero debido a su naturaleza tan compleja difícil de estudiar se debe tomar en cuenta, ciclos de carga, el comportamiento no lineal en cables, incluso factores externos como vientos turbulentos o sismos, entre otros.

El siguiente trabajo intenta simular condiciones extremas de servicio en el puente atirantado "La Concordia" en construcción en el estado de Chiapas, se utilizarán modelos matemáticos computacionales para estimar pesos factores de tráfico, frecuencias, modos de vibrar, carga viva carga muerta, no linealidad en cables, líneas de influencia, y encontrar zonas de esfuerzos máximos para poder comprender mejor la conexión entre los cables y las dovelas metálicas que forman el puente. Esto con la ayuda de los avances en instrumentación en los últimos años y un enfoque teórico-práctico del problema facilitará el monitoreo de la estructura a lo largo de su vida útil.

Se realiza una revisión mediante reglamento AASHTO, con el EUROCODIGO, y se hace una comparación detallada entre los reglamentos con un análisis del aforo vehicular más cercano al sitio en construcción, considerando variables como crecimiento vehicular, rango de esfuerzos y poder estimar un tiempo de vida de las conexiones del puente y los cables que lo soportan.

## **Abstract**

The definition of fatigue that provides ASTM is: the progressive process of continuous, and localized structural alteration that occurs in a material under conditions that occur in a material subjected to repeated fluctuating strains which cause cyclic stresses, at some point or points and that may culminate in cracks or total rupture after a sufficient number of oscillations, is the mechanism whereby cracks are increased in a structure or structural element, this growth occurs under cyclic stresses, total failure occurs in areas subjected to tension when the cross section become unable to withstand the maximum loads. This effect is imperceptible in structures under service conditions where the load is stationary as buildings but can be critical to other structures such as bridges or offshore platforms where dynamic loading cranes represents the largest proportion of the total load.

The study of fatigue in such complex connections such as a cable-stayed bridge is of utmost importance but because of its complex nature difficult to study, and to estimate charging cycles, the nonlinear behavior in cables, including external factors such as wind turbulent or earthquakes, among others.

This paper aims to simulate extreme conditions of service in the cable-stayed bridge "La Concordia" under construction in the state of Chiapas, computational mathematical models were used to estimate weights factors of traffic, frequencies, modes of vibration, live load dead load, behavior in cables, lines of influence, and find areas of maximum stress range.

A review by regulations AASHTO is performed, with the truck-type fatigue, with EUROCODE posed a story in time of stress, with an analysis of traffic density closer to the construction site, considering variables such as vehicular growth range SCT standards efforts and by estimating a lifetime of bridge connections and cables that support it.

# Contenido

Resumen .....	iii
Abstract.....	iv
Contenido.....	v
Indice de Figuras .....	vii
Indice de Tablas .....	ix
1.Introducción .....	1
1.1Objetivo General .....	2
1.1.1Objetivos Específicos .....	2
1.2Alcances de la investigación .....	2
2Estado del arte.....	3
2.1.Introducción .....	3
2.2.Definiciones básicas .....	5
2.3.Factores que afectan a la vida del elemento ante Fatiga.....	11
2.4.Comportamiento de los tirantes.....	19
2.5.Reglamento AASHTO (2012).....	20
2.6.Eurocódigo .....	29
2.6.1Determinación del rango de esfuerzos.....	29
2.6.1.1Regla de Palmgren-Miner .....	33
2.7.Evaluación de la fatiga por distorsión inducida .....	34
2.8.Clasificación de las uniones de acuerdo al Eurocodigo (Eurocodigo, 2010).....	35
2.9.Procedimientos de recuento de ciclos de carga.....	38
2.10.Método del diagrama de Superposición.....	40
2.11.Método de elemento finito computacional empleado.....	41
3.Desarrollo de la investigación.....	42
3.1Descripción de la Estructura .....	42
3.1.1La superestructura:.....	43
3.1.2Subestructura:.....	46
3.1.3Ubicación del Puente: .....	49
3.1.4Materiales .....	50
3.1.4.1Concreto .....	50
3.1.4.2Acero de refuerzo .....	51
3.1.4.3Acero estructural.....	51
3.1.4.4Acero de presfuerzo en cables de baja relajación.....	51
4.Descripción del modelo matemático .....	54
4.1Introducción .....	54
4.2Descripción de los análisis.....	58
4.2.1Análisis estático de Carga muerta .....	58
4.2.2Análisis de líneas de influencia .....	59
4.2.3Análisis dinámico carga viva .....	59
4.2.4Análisis del Aforo Vehicular.....	60
4.2.5Condiciones de Carga .....	60
4.2.6Clasificación Vehicular.....	60
4.2.7Peso total Vehicular .....	62

4.2.8Crecimiento tráfico promedio vehicular .....	63
4.2.9Carga viva distribuida .....	64
4.2.10Esfuerzos obtenidos .....	65
4.2.11Comparación entre reglamentos .....	66
5.Resultados .....	67
5.1 Revisión reglamento AASHTO 2012 .....	67
5.1.1Revisión de la conexión entre el alma y el patín inferior en la   dovela de cierre ....	68
5.1.2Cálculo de la resistencia de la soldadura .....	69
5.1.3Evaluación de la vida de la conexión fatigada .....	70
5.2Revisión reglamento Eurocódigo .....	71
5.2.1Evaluación de la vida de la conexión fatigada Eurocódigo .....	78
5.3Revisión con vehículos sobrecargados reglamento Eurocódigo .....	79
5.4Revisión atiesadores .....	84
5.4.1Revisión Eurocódigo.....	84
5.4.2Evaluación de la vida de atiesadores fatigados .....	85
6Conclusiones y Recomendaciones .....	87
7Referencias.....	88
Anexo 1 Análisis de Peso Propio.....	90
Anexo 2 Mecánica de la fractura del cable.....	112
Anexo 3Clasificación de las uniones.....	128



## Índice de Figuras

Figura N.- 1 Zonas de concentración de esfuerzos [Eurocódigo, 2010] .....	3
Figura N.- 2 Propagación de fisura [Eurocódigo, 2010] .....	5
Figura N.- 3 Rango de Tensión [Eurocódigo, 2010].....	6
Figura N.- 4 Superficie de Falla [Eurocódigo, 2010].....	7
Figura N.- 5 historia de tensiones en el tiempo [Eurocódigo, 2010] .....	8
Figura N.- 6 Calculo del Daño [Eurocódigo, 2010].....	9
Figura N.- 7 Curva S-N [Eurocódigo, 2010] .....	9
Figura N.- 8 Rango de coeficientes de tensión y velocidad de propagación de la fisura [Eurocódigo, 2010].....	10
Figura N.- 9 Desviación de la resistencia a la fatiga con la resistencia a la tracción [Eurocódigo, 2010].....	11
Figura N.- 10 tamaño de grieta a [Eurocódigo, 2010].....	12
Figura N.- 11 Variación de la amplitud del factor de concentración de esfuerzos [Eurocódigo, 2010].....	13
Figura N.- 12 Propagación de fisuras para 3 tipos de acero [Eurocódigo, 2010] .....	14
Figura N.- 13 efecto del gradiente en tensiones [Eurocódigo, 2010].....	14
Figura N.- 14 Efectos de la tensión media [Eurocódigo, 2010].....	15
Figura N.- 15 Diagrama de Haigh [Eurocódigo, 2010].....	15
Figura N.- 16 Efecto de la entalladura [Eurocódigo, 2010].....	16
Figura N.- 17 Efectos del tamaño en uniones soldadas [Eurocódigo, 2010].....	17
Figura N.- 18 Tensiones residuales [Eurocódigo, 2010] .....	17
Figura N.- 19 Efecto de la corrosión [Eurocódigo, 2010].....	18
Figura N.- 20 Esfuerzos en un cable .....	19
Figura N.- 21 Carga viva distribuida AASHTO .....	24
Figura N.- 22 Diagrama categorizado detalles.....	26
Figura N.- 23 Resistencia nominal de una unión soldada (AASHTO, 2012).....	28
Figura N.- 24 histograma de esfuerzos.....	30
Figura N.- 25 Espectro de tensiones .....	30
Figura N.- 26 Pendientes en el espectro de tensiones (Eurocódigo, 2010) .....	31
Figura N.- 27 Limite de amplitud constante (Eurocódigo, 2010).....	32
Figura N.- 28 Zonas de cálculo de daños acumulados (Eurocódigo, 2010) .....	33
Figura N.- 29 clasificación detalles (Eurocódigo, 2010) .....	36
Figura N.- 30 Diagrama categorizado detalles (Eurocódigo, 2010) .....	37
Figura N.- 31 histograma de tensiones (Eurocódigo, 2010).....	38
Figura N.- 32 método del embalse (Eurocódigo, 2010).....	38
Figura N.- 33 método de la recogida de lluvia (Eurocódigo, 2010).....	39
Figura N.- 34 Diagrama de Superposición (Eurocódigo, 2010) .....	40
Figura N.- 35 Vista lateral Puente la Concordia .....	42
Figura N.- 36 Sistema de anclaje, planta pilas .....	43
Figura N.- 37 Sección Transversal Dovela .....	44
Figura N.- 38 Sección Transversal Trabe .....	44
Figura N.- 39 Detalle soldadura .....	45
Figura N.- 40 Planta pila Vista Lateral Cabezal .....	46
Figura N.- 41 cimentación pilas pilotes.....	47

Figura N.- 42 cimentación Puente la Concordia .....	48
Figura N.- 43 UBICACIÓN.....	49
Figura N.- 44 Vista 3D modelo Computacional del puente “La Concordia” .....	54
Figura N.- 45 Elementos estructurales Modelo Computacional .....	55
Figura N.- 46 dovela metálica modelo Computacional.....	56
Figura N.- 47 A Secciones Pilas 2 y 3 modelo Computacional .....	56
Figura N.- 48 Pilones modelo Computacional.....	57
Figura N.- 49 Vista Planta Tablero .....	57
Figura N.- 50 Camión de fatiga AASHTO .....	59
Figura N.- 51 Distribución TPDA.....	61
Figura N.- 52 Proyecciones TPDA .....	64
Figura N.- 53 Carga viva distribuida AASHTO .....	65
Figura N.- 54 Dovela metálica .....	65
Figura N.- 55 Comparación Eurocódigo vs AASHTO .....	66
Figura N.- 56 Esfuerzo generado por el camión AASHTO de fatiga .....	67
Figura N.- 57 Dovela Metálica .....	68
Figura N.- 58 detalle unión soldada alma patín .....	69
Figura N.- 59 Camión B2 .....	71
Figura N.- 60 Momento Generado por el camión B2.....	71
Figura N.- 61 Camión c3 .....	72
Figura N.- 62 Esfuerzo generado por el Camión c2.....	72
Figura N.- 63 Camión C3 .....	73
Figura N.- 64 Esfuerzo Generado por el camión C3.....	73
Figura N.- 65 Camion T3-S2 .....	74
Figura N.- 66 Esfuerzo Generado por el camión T3-S2.....	74
Figura N.- 67 Camion T3-S3 .....	75
Figura N.- 68 Esfuerzo Generado por el camión T3-S3.....	75
Figura N.- 69 Camion T3-S2-R4 .....	76
Figura N.- 70 Esfuerzo Generado Por el camión t3-S2-R4.....	76
Figura N.- 71 Histograma de esfuerzos .....	77
Figura N.- 72 detalle soldadura.....	78
Figura N.- 73 histograma de esfuerzos .....	78
Figura N.- 74 Esfuerzo generado por el camión T3-S2 sobrecargado .....	79
Figura N.- 75 Esfuerzo generado por el camión T3-S3 sobrecargado .....	80
Figura N.- 76 Esfuerzo generado por el camión T3-S2-R4 sobrecargado .....	81
Figura N.- 77 trabe principal dovela de cierre .....	83
Figura N.- 78 histograma de esfuerzos sobrecargado .....	86
Figura N.- 79 Modos de falla.....	112
Figura N.- 80 Falla dúctil.....	113
Figura N.- 81 Esfuerzos en una conexión soldada (Eurocódigo, 2010).....	114
Figura N.- 82 Ruptura Dúctil (García, 2010).....	115
Figura N.- 83 Configuración de un torón .....	116
Figura N.- 84 Esfuerzos en un torón (García, 2010).....	116
Figura N.- 85 Deformaciones en un cable (García, 2010).....	117
Figura N.- 86 Esfuerzos en un alambre (García, 2010).....	119
Figura N.- 87 Cavidades respecto a los modos de carga (Eurocódigo).....	122
Figura N.- 88 Propagación de las grietas (Eurocódigo, 2010).....	123

## Indice de Tablas

Tabla N.- 1 Factores carga parcial peso de camión y rango de esfuerzos (AASHTO, 2012)	21
Tabla N.- 2 Factor $R_r$ tipos de vida a la fatiga (AASHTO, 2012)	25
Tabla N.- 3 factor $\Delta F_{th}$ (AASHTO,2012)	27
Tabla N.- 4 Constante A (AASHTO, 2012)	27
Tabla N.- 5 TPDA de camiones equivalentes a vida infinita (AASHTO, 2012)	28
Tabla N.- 6 FTH $C_f$ categorizado (EUROCODIGO, 2010)	29
Tabla N.- 7 Clasificación uniones (Eurocódigo, 2010)	35
Tabla N.- 8 Especificaciones Concreto	50
Tabla N.- 9 Especificaciones Acero de refuerzo	51
Tabla N.- 10 Especificaciones Acero Estructural	51
Tabla N.- 11 Requerimientos químicos Acero Presfuerzo (ASTM, A 648-94)	52
Tabla N.- 12 Requisitos de resistencia a la rotura (ASTM, A416)	52
Tabla N.- 13 Resistencia a la fatiga de torones (PTI Guide Specification)	53
Tabla N.- 14 Resistencia a la fatiga de torones (PTI Guide Specification)	53
Tabla N.- 15 Comparativa Pesos Calculados y pesos	58
Tabla N.- 16 TPDA ESTACION TUXTLA	60
Tabla N.- 17 Peso total Vehicular de vehículos vacíos	62
Tabla N.- 18 Pesos individuales admisibles	62
Tabla N.- 19 Distribución Peso total Vehicular de vehículos	63
Tabla N.- 20 Proyecciones TPDA	63
Tabla N.- 21 Esfuerzo efectivo Camión AASHTO de Diseño	67
Tabla N.- 22 Propiedades de la sección I dovela de cierre	68
Tabla N.- 23 Resistencia nominal soldadura	69
Tabla N.- 24 Clasificación de la unión soldada	70
Tabla N.- 25 evaluación de la vida de la conexión fatigada	70
Tabla N.- 26 Esfuerzo efectivo camión B2	71
Tabla N.- 27 Esfuerzo efectivo camión c2	72
Tabla N.- 28 Esfuerzo efectivo camión C3	73
Tabla N.- 29 Esfuerzo efectivo camión T3-S2	74
Tabla N.- 30 Esfuerzo efectivo camión T3-S3	75
Tabla N.- 31 Esfuerzo efectivo camión T3-S2-R4	76
Tabla N.- 32 esfuerzo equivalente	77
Tabla N.- 33 Evaluación de la vida de la conexión fatigada	78
Tabla N.- 34 Esfuerzo efectivo camión T3-S2 sobrecargado	79
Tabla N.- 35 Esfuerzo efectivo camión T3-S3 sobrecargado	80
Tabla N.- 36 Esfuerzo efectivo camión T3-S2-R4 sobrecargado	81
Tabla N.- 37 Esfuerzo equivalente sobrecargado	82
Tabla N.- 38 Evaluacion de la vida de la conexión fatigada sobrecargada	83
Tabla N.- 39 Clasificación Eurocódigo Alma Patín inferior	83
Tabla N.- 40 Propiedades sección atiesadores	84
Tabla N.- 41 Clasificiacion Atiesadores	85
Tabla N.- 42 evaluación de la vida de la conexión fatigada	86
Tabla N.- 43 evaluación de la vida de la conexión fatigada camión sobrecargado	86

## 1. Introducción

La fatiga es un proceso progresivo, en el que los daños se acumulan lentamente en las primeras etapas y se aceleran rápidamente hasta la falla a través de una evolución en reducción de resistencia local produciendo micro fisuras que pueden propagarse independientemente hasta que unas de ellas se fusionan entre sí comenzando a interactuar entre ellas formando una superficie de falla. Ante una carga estable la fisura crecerá lentamente pero ésta comienza a acelerarse cuando se pierde sección transversal en el elemento ya que aumenta el campo local de tensiones cerca de la fisura.

El estado último de falla se producirá mediante una rotura inestable cuando el área restante no sea suficiente para soportar la carga, donde el daño resultante de la aplicación de esfuerzos repetitivos puede ocasionar grietas incluso muy por debajo del límite de fluencia del material.

Los puentes carreteros son estructuras susceptibles al deterioro por efectos de fatiga debido a las condiciones de carga dinámicas cíclicas a las que están sometidas, esto, sumado a efectos ambientales como la corrosión, produce un efecto degradante en la rigidez de los elementos estructurales, incluso podrían alterar los elementos mecánicos a los que están sujetos sus componentes pudiendo ocasionar el colapso.

Las cargas cíclicas más importantes que inducen fatiga en puentes son carga viva, viento y, sismo. El siguiente trabajo intenta simular condiciones extremas de servicio de carga viva, en el puente atirantado “la Concordia” en construcción en el poblado la Concordia en el estado de Chiapas, se utilizarán modelos matemáticos computacionales para revisar zonas críticas de esfuerzos máximos y así poder evaluar, el número de ciclos de carga que sus conexiones soportan antes de fallar. Es fundamental estudiar este comportamiento ante fatiga, ya que, es la fatiga una de las principales causas por las que estructuras especiales como puentes carreteros disminuyen su vida útil o requieren reparaciones costosas.

En México el utilizar el reglamento AASHTO (AASHTO, 2012) para la revisión ante fatiga de puentes, puede inducir algunas inconsistencias en las cargas de diseño, debido a que generalmente, es común que por las carreteras nacionales circulen cargas móviles que difieren de manera importante en peso y distribución de sus ejes comparadas con el camión de diseño del LRFD (AASHTO, 2012).

En esta investigación se revisan, procedimientos para estimar la vida de las conexiones ante fatiga con reglamento AASHTO de factores de carga y resistencia y un más detallado con el Eurocódigo, se muestra la importancia del control de pesos y tráfico para el monitoreo de la estructura, se recomienda remplazar los esfuerzos obtenidos en este trabajo con mediciones de campo en el futuro.

## **1.1 Objetivo General**

El objetivo general de este trabajo es realizar una revisión de los elementos estructurales ante fatiga mediante una simulación de condiciones críticas de carga viva de servicio en un puente atirantado, determinar zonas de esfuerzos máximos y así poder revisar la seguridad de algunas de sus conexiones entre los elementos que forman las dovelas metálicas y sus piezas puente transversales, así como los cables que lo sostienen, y, además, estimar su vida útil.

### **1.1.1 Objetivos Específicos**

- Encontrar las conexiones más susceptibles a la falla por fatiga mediante el uso de un modelo matemático computacional.
- Estimar esfuerzos máximos a nivel de servicio, ante carga viva, para estimar la vida útil de algunas conexiones.
- Revisar con reglamento LRFD AASHTO (AASHTO,2012) la evaluación de la vida de algunas conexiones ante fatiga.
- Revisar con el reglamento del Eurocódigo (EUROCODIGO,2010), la evaluación de la vida de algunas conexiones ante fatiga.

## **1.2 Alcances de la investigación**

- Revisar ante fatiga el puente “La Concordia” mediante reglamento de diseño por factores de carga y resistencia, LRFD del AASHTO (AASHTO, 2012), y comparar con el Manual del Instituto Técnico de la Estructura en Acero de Europa (EUROCODIGO, 2010).
- Encontrar la vida promedio de las conexiones críticas importantes del puente “Concordia” ante ciclos de fatiga, debido a carga viva.
- Realizar los modelos matemáticos que permitan modelar adecuadamente el puente para, mediante líneas de influencia, encontrar zonas de esfuerzos máximos, magnitud de esfuerzos y conexiones susceptibles a la falla.
- Con un análisis estadístico del aforo vehicular más cercano al sitio en construcción, considerando variables como crecimiento vehicular, rango de esfuerzos y mediante la norma NOM-012-SCT-2-2008 (SCT, 2008) estimar un tiempo de vida ante fatiga de las conexiones del puente y los cables que lo soportan.

## 2 Estado del arte

### 2.1. Introducción

Se define como el modo de falla por fatiga a la degradación de las propiedades mecánicas bajo cargas cíclicas de orden inferior al esfuerzo de fluencia del material, formando microgrietas. A medida que avanza el proceso de deformación las fisuras interactúan entre sí formando pequeñas micro cavidades, para al final separarse por completo.

El estudio de fatiga en conexiones tan complejas como las de un puente atirantado es de suma importancia; pero debido a su naturaleza es difícil de estudiar, se debe tomar en cuenta, ciclos de carga, el comportamiento en cables, composición química de los elementos, incluso factores externos como, análisis de tráfico, vientos turbulentos, sismos, entre otros.

Se necesita analizar la estructura su superficie de falla y sus conexiones soldadas, donde a partir de discontinuidades metalúrgicas pueden originarse las fisuras normalmente estas empiezan en los bordes en soldaduras a tope y en los bordes y primeros cordones en las soldaduras en ángulo, como se ilustra en la figura 1, así como en las cuñas en los cables de los tirantes.

Todas las conexiones soldadas son entonces susceptibles a fatigarse en una estructura metálica, sin embargo la fatiga trabaja solamente ante esfuerzos a tensión, esto puede provocar que se llegase a perder sección transversal en la soldadura.

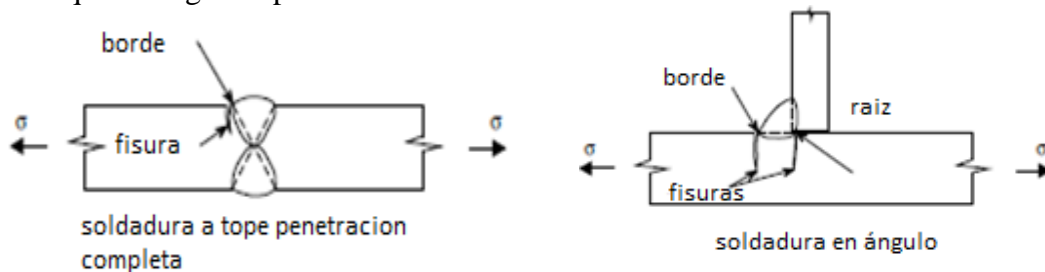


Figura N.- 1 Zonas de concentración de esfuerzos [Eurocódigo, 2010]

La superficie de falla puede formar anillos concéntricos que apuntan hacia el interior de las áreas de iniciación de la fisura creando regiones irregulares que muestran la evidencia de un comportamiento plástico no lineal del elemento.

Se divide entonces el proceso de fatiga en tres fases bien definidas como:

Fase I	Iniciación de la fisura
Fase II	Propagación de la fisura
Fase III	Rotura Final

La fase de iniciación ocurre ya cuando la superficie de falla está formada y las deformaciones plásticas se acumulan en una superficie libre como resultado de los movimientos de dislocación, este estado puede ocurrir incluso mucho antes de llegar al límite plástico del material como defectos lineales en la estructura que pueden multiplicarse

bajo la tensión tangencial, ocasionando una deformación permanente, la cantidad de deformación es mayor en una superficie libre que en el interior de materiales cristalinos debido a la ausencia de la contención de las juntas inter granulares. La deformación se producirá en planos cristalográficos que están orientados cerca de  $45^\circ$  con respecto a la dirección de la tensión de tracción. Durante ciclos adicionales la deformación de la banda de deslizamiento o zona de falla se intensifica en la superficie y se extiende al interior del grano produciendo lo que se conoce como bandas de deslizamiento persistentes; este nombre se deriva de observaciones en estudios de fatiga donde se observó que la deformación persistiría en el mismo lugar incluso después de eliminar una pequeña capa superficial del material mediante pulido, provocando acumulación de flujo plástico, así como formando surcos y senos superficiales llamados extrusiones e intrusiones respectivamente.

(Eurocódigo, 2010)

Existe cohesión entre las capas de la banda de deslizamiento, esto provoca una pérdida en sección transversal por la oxidación de las superficies recientes y por el endurecimiento del material deformado, esto provoca la formación de intrusiones o micro-fisuras las cuales pueden propagarse a lo largo de los planos de deslizamiento, un proceso promovido por la tensión tangencial este proceso se extiende por unos pocos granos y se lo define como Etapa de Propagación I, aquí se produce la fisura dominante cuando dos granos se fusionan y con una deformación adicional bajo la acción continua de tensión principal se forma la Etapa de Propagación II. El recorrido de la fisura es ahora esencialmente perpendicular al eje de tracción de tensión, sin embargo el avance de la fisura sigue influenciado por la orientación de los granos formando un zigzag a lo largo del plano de deslizamiento.

(Eurocódigo, 2010)

## 2.2. Definiciones básicas

### 2.2.1 Área de tensión

Las áreas en tensión son exactamente iguales a las que se utilizan en un análisis estático, si la fisura se inicia en el borde de la soldadura o en la unión entre placas se ocupa el área de la sección transversal del elemento a través del que se produce la propagación, como se observa en la figura 2, y si se produce en la raíz y se propaga a través de la garganta se utiliza el área de la garganta

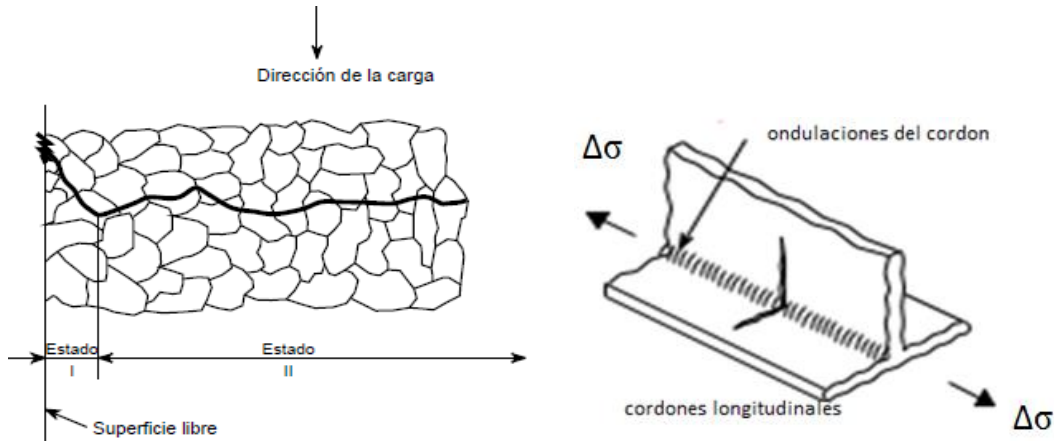


Figura N.- 2 Propagación de fisura [Eurocódigo, 2010]

A temperaturas altas o en estado corrosivo las juntas pueden hacerse más débiles aun produciendo una propagación inter cristalina adicional, es decir cualquier defecto superficial interno o externo puede reducir notablemente la vida de la fatiga. Así un elemento que presente una superficie lisa y pulida tiene generalmente una mayor resistencia a la fatiga que otra superficie sin labrar.

En estructuras metálicas soldadas es casi seguro que la superficie de falla se forme a lo largo del cordón de soldadura y no en otras uniones, ya que en la soldadura se dejan minúsculas discontinuidades metalúrgicas a partir de las que pueden propagarse las fisuras. Por lo tanto la etapa de iniciación es pequeña y la fisura pasa la mayor cantidad de su vida propagándose mediante inclusiones que se comportan como concentradores internos de tensiones. En aceros de alta resistencia una inclusión dura y frágil puede romperse simultáneamente provocando rotura de los bordes. La mayor parte de las soldaduras presentan un perfil sin pulir, y así cualquier discontinuidad lograría acelerar la propagación de las fisuras.

En mecánica de materiales en el estudio de la mecánica de la fractura se puede demostrar que la velocidad de crecimiento de una fisura es proporcional a la raíz cuadrada de su longitud y con una oscilación y grado de tensión proporcionales.



Estas consideraciones aclaran que el tiempo exacto que transcurre entre la fase I y II es muy complejo de estimar, mucho más aún si se toma en cuenta la no linealidad del material sea suelda o acero estructural debiendo estimar el daño que sufren en nuestro ejemplo los elementos estructurales que forman la dovela metálica y sus conexiones (Eurocódigo, 2010).

### 2.2.2 Rango de tensión

Se calculan las fuerzas elásticas en la estructura. La tensión sobre la sección transversal es la tensión principal en el borde de la soldadura, se mantiene la teoría de que las secciones planas permanecen planas como se indica en la figura 3, ignorando el efecto de las tensiones causadas por el efecto de la concentración de tensiones local causado por el perfil de la soldadura. Si la superficie de falla fuera por rotura en la garganta se utiliza el cordón a lo largo de la soldadura, igual que en el cálculo estático.

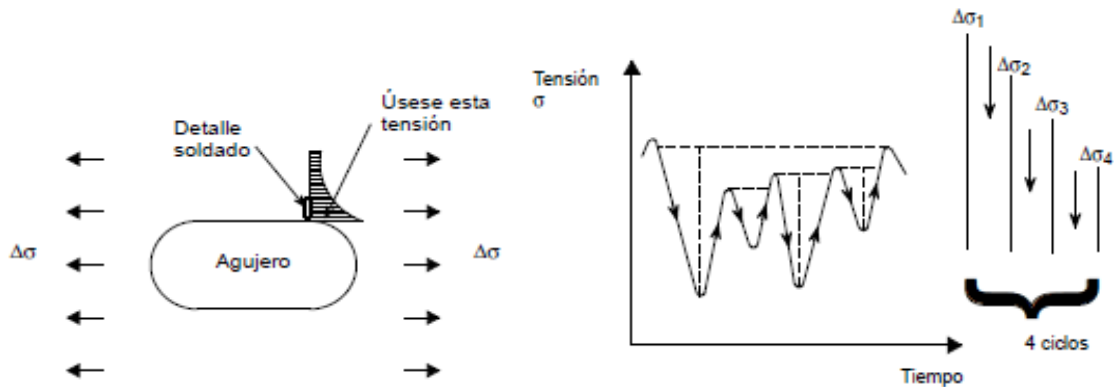


Figura N.- 3Rango de Tensión [Eurocódigo, 2010]

Se producen excepciones a esta regla en el caso de secciones especiales como tubos circulares placas con orificios entre otras en donde ya no se puede aceptar que las secciones planas permanezcan planas. Estos se conocen como efectos de concentración de tensión. Existen efectos secundarios que también pueden afectar las tensiones reales en secciones esbeltas como el anclaje de las uniones en estructuras reticulares (Eurocódigo, 2010).

### 2.2.3 Superficie de rotura

Una característica de la superficie de rotura que se puede observar es una zona plana y lisa que exhibe marcas y se propaga de modo lento y estable como se ilustra en la figura 4. En regiones irregulares muestran evidencia de deformación plástica importante en el área de fractura final las marcas forman anillos concéntricos que apuntan a el área de iniciación. El origen de la fisura puede ser difícil de identificar pudiendo producirse incluso en varios puntos simultáneamente. Si bien la presencia de cualquier defecto en el material puede señalar la superficie de falla, su sección crítica está sometida a una elevada concentración de tensiones (Eurocódigo, 2010).

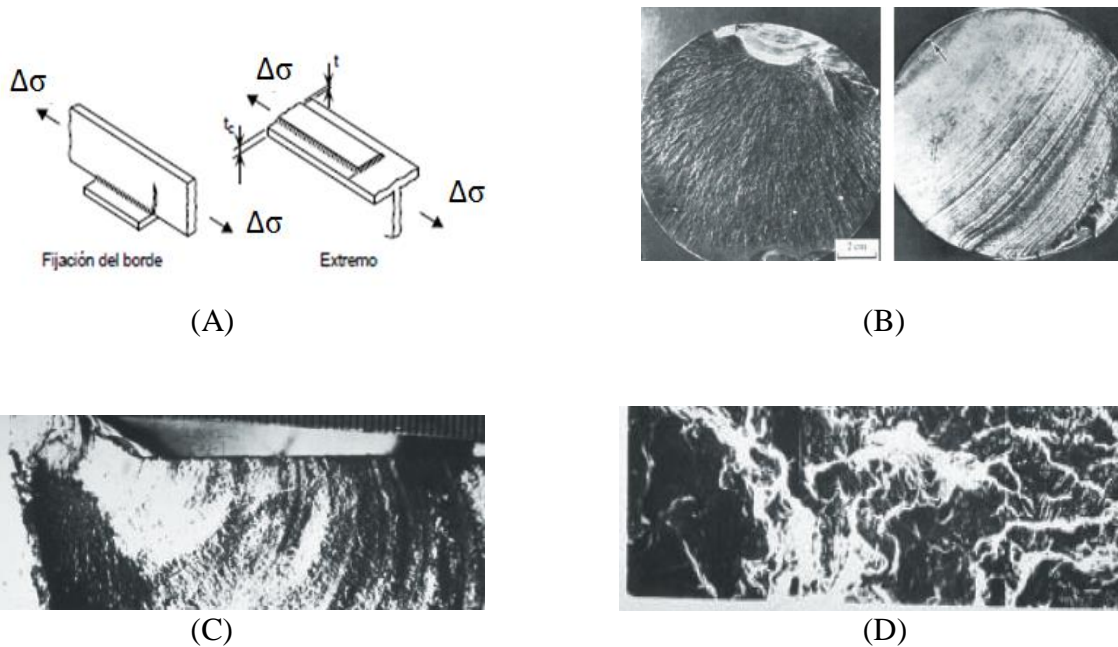


Figura N.- 4 Superficie de Falla [Eurocódigo, 2010]

Si la sección crítica está sometida a una elevada concentración de tensiones las marcas superficiales se propagan intermitentemente a diferentes velocidades bajo la influencia de un entorno corrosivo cambiante como se indica en la figura 4 D

#### 2.2.4 Carga de Fatiga

Se crea un espectro de tensiones al que se somete el elemento estructural conocido como una historia-tensión-tiempo. La forma más sencilla de representar este fenómeno es con una función sinusoidal de amplitud constante, es decir con una carga de patrón constante. Esta carga depende de 6 factores que son:

$S_{max}$	=	Tensión máxima del ciclo	
$S_{min}$	=	Tensión mínima del ciclo	
$S_m$	=	Tensión media de ciclo	= $0.5 (S_{max}+S_{min})$
$S_a$	=	Amplitud de la tensión	= $0.5 (S_{max}-S_{min})$
$\Delta S$	=	Rango de tensión	= $S_{max}-S_{min}$

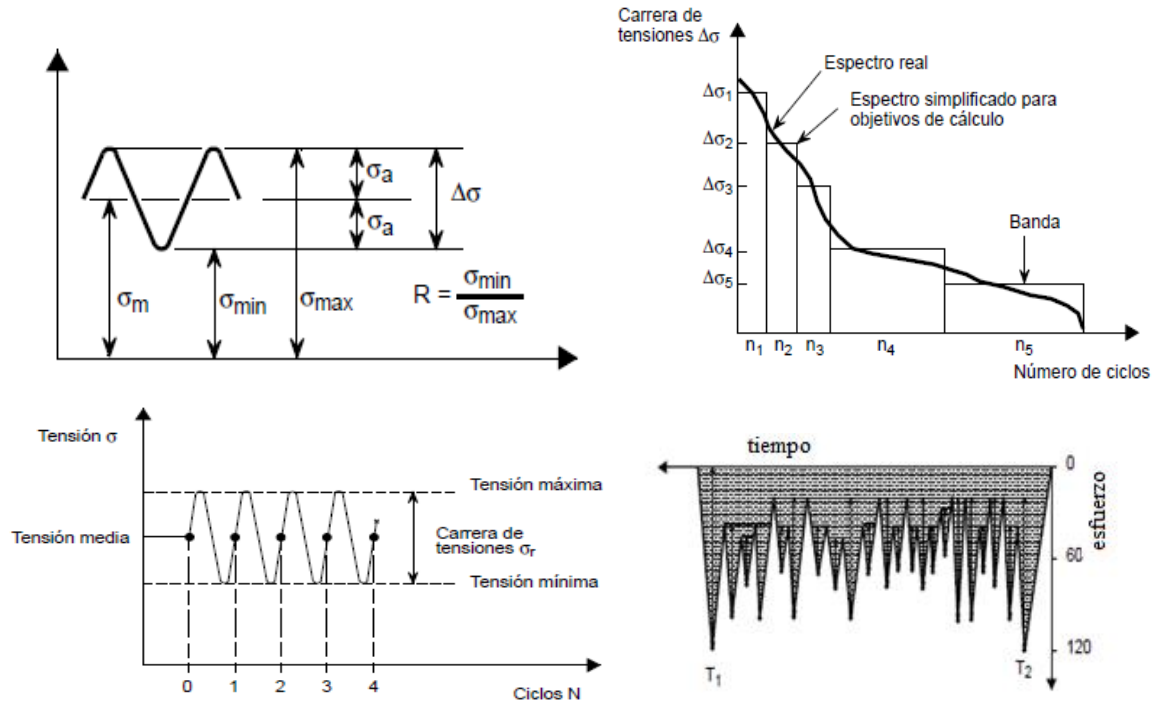


Figura N.- 5 historia de tensiones en el tiempo [Eurocódigo, 2010]

El rango de tensión es el principal parámetro que influye sobre la vida de la conexión fatigada con la tensión media como parámetro secundario. El ciclo de tensión se ve influenciado entonces por la amplitud de la tensión media y su amplitud y frecuencia, con base con la cual se crean las curvas esfuerzo número de ciclos.

Existen métodos de conteo de ciclos como el método del embalse o el método de la recogida de lluvia para facilitar este procedimiento.

La historia de la carga puede determinarse mediante un camión tipo según normativa AASHTO (AASHTO, 2012), o estimarse un espectro más detallado de tensiones en el tiempo de acuerdo con estimación del tráfico promedio diario anual que se realiza en el capítulo 6 de acuerdo al EUROCODIGO (Eurocódigo, 2010).

### 2.2.5 Vida de la fatiga

La vida de la fatiga se puede expresar en función del número de ciclos hasta el agotamiento con la siguiente expresión:

$$N_t = N_i + N_p \quad \text{[Ecuación. 1]}$$

Donde:

$N_i$  y  $N_p$  son los números de ciclos empleados en las fases de iniciación y propagación antes mencionadas.

$N_t$  es el número de ciclos hasta el agotamiento

En piezas con defectos o entalladuras se verán reflejados las fisuras prematuramente disminuyendo o eliminando así la etapa de iniciación.

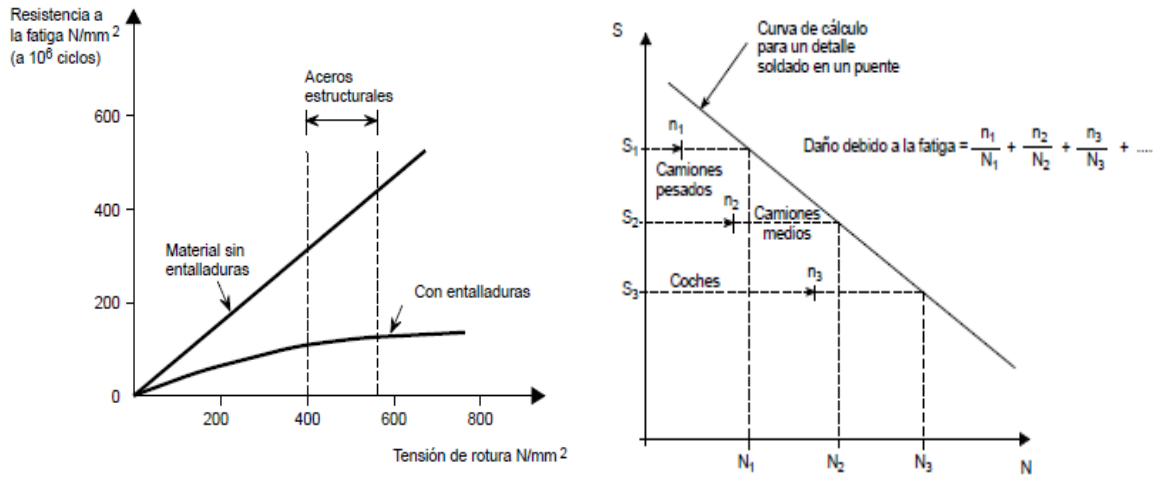


Figura N.- 6 Calculo del Daño [Eurocódigo, 2010]

### 2.2.6 Curvas de resistencia a la fatiga

Llamadas también curvas de S-N donde se traza la tensión aplicada S frente al número de ciclos total hasta el agotamiento N como se indica en la figura 7.

A medida que la tensión disminuye la vida en ciclos hasta el agotamiento aumenta hasta el límite de fatiga. Es importante observar que todos los materiales exhiben una curva relativamente plana en la zona de los ciclos grandes esto se define como el límite de fatiga con amplitud constante

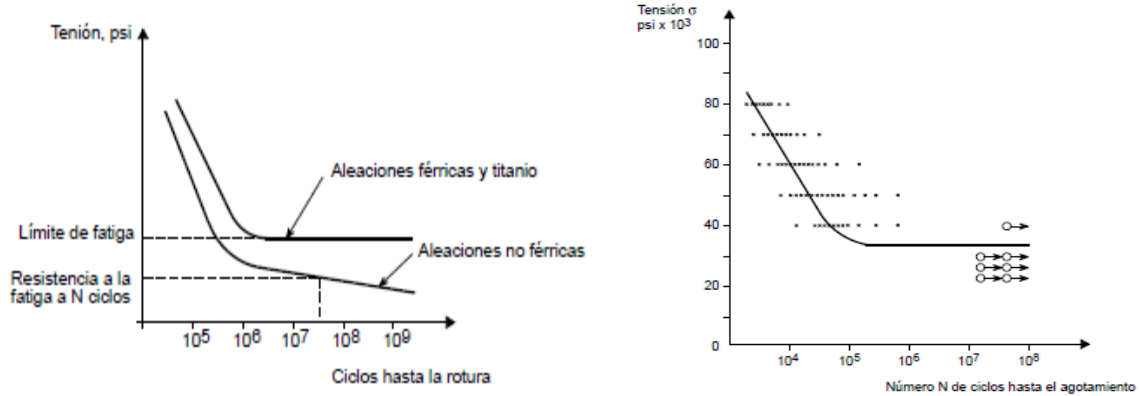


Figura N.- 7 Curva S-N [Eurocódigo, 2010]

En la curva S-N se observa una fase de iniciación, seguida por una fase de propagación de la fisura. El punto de inflexión en aceros estructurales está por arriba de los dos millones de ciclos, cifra que puede llegar a triplicarse en aleaciones sin entalladuras. La distribución en la fase de iniciación se asocia a una distribución logarítmica. Para la etapa de propagación

se pueden utilizar curvas de relación de la propagación de la fisura en donde interviene un coeficiente  $k$  de intensidad de tensión como se describen en la figura 8b donde interviene solamente la tensión cercana a la fisura y se representa en el cálculo de la rotura. Este coeficiente fue utilizado por primera vez por Paris en 1970 (Eurocódigo, 2010) quien marcó 3 regiones, una primera zona donde  $\Delta K$  disminuye por debajo de un límite por el cual no se produce ninguna propagación. (Eurocódigo, 2010)

Paris y Erdogan (Eurocódigo, 2010) graficaron la velocidad de crecimiento de grietas contra el factor de concentración de esfuerzos,  $K$  en una gráfica logarítmica como se indica en la Figura 8 donde se observan claramente las tres etapas, donde la velocidad de crecimiento de grieta se relaciona con el factor de concentración de esfuerzos mediante la ecuación 1, la simplicidad de esta ecuación permite mediante su integración desde un tamaño inicial de defecto  $a_i$ , hasta el tamaño de fisura al estudiar la “vida útil” de una estructura fisurada sometida a fatiga.

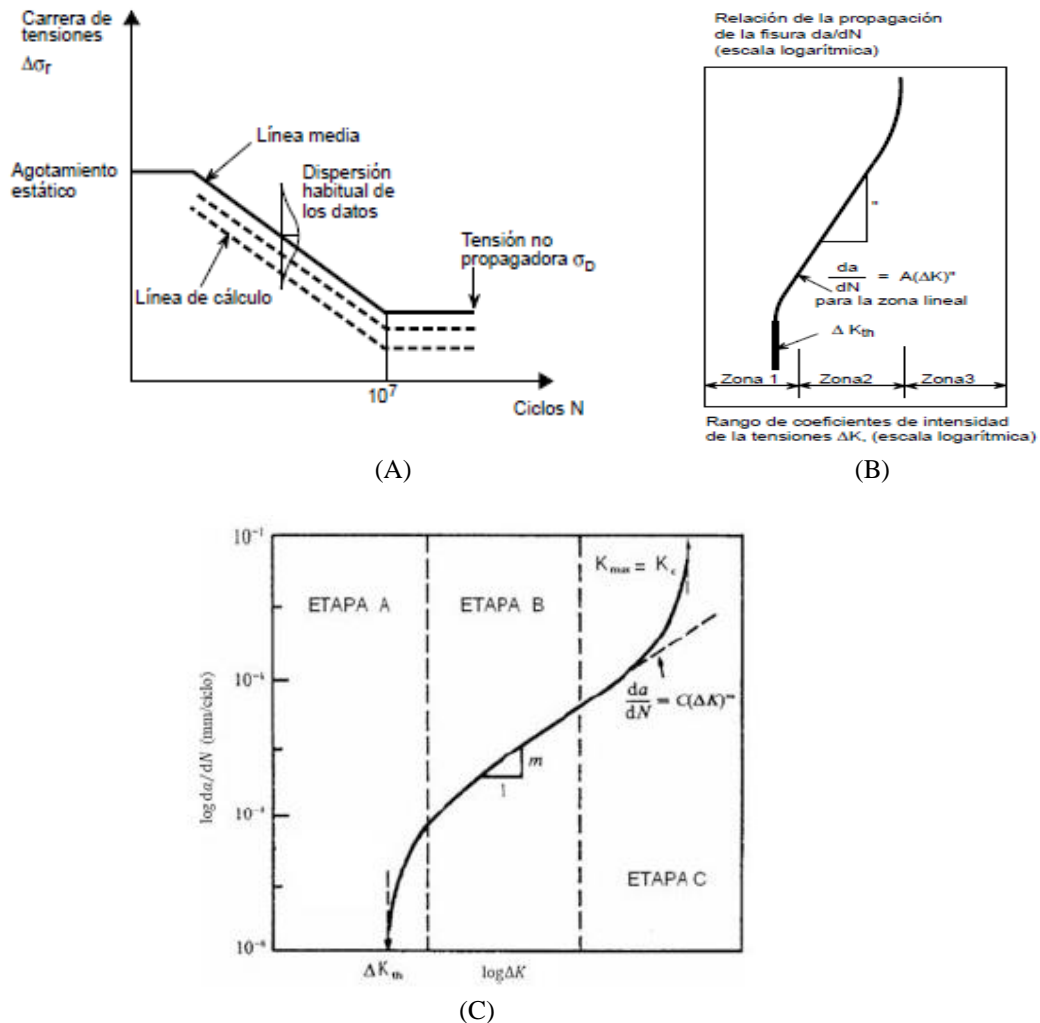


Figura N.- 8 Rango de coeficientes de tensión y velocidad de propagación de la fisura [Eurocódigo, 2010]

## 2.3. Factores que afectan a la vida del elemento ante Fatiga

Existen factores internos y externos que alteran el comportamiento de aceros estructurales en su vida útil, entre los más importantes podemos mencionar:

### 2.3.1 Alteraciones en el material

Los efectos de entalladuras, corrosión, rugosidades o temperaturas altas disminuyen la vida a la fatiga de un elemento. En uniones soldadas siempre se encuentran defectos microscópicos que dan origen a las fisuras por donde se propagan las superficies de falla, para muchos materiales de acero el umbral o límite de fatiga es aproximadamente el 50 % de la resistencia a la tracción, la mayor parte de ensayos se agrupan entre 0.6 y 0.35 como se muestra en la figura 9 b

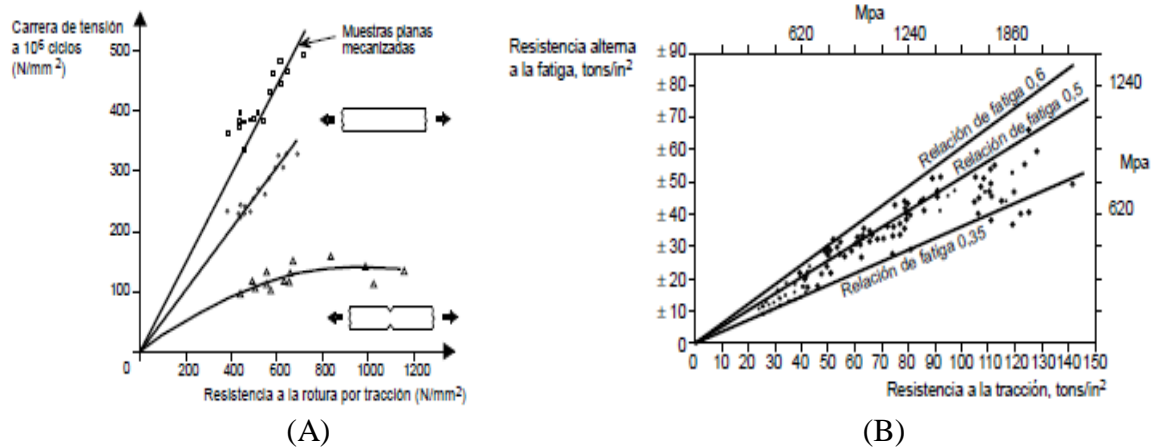


Figura N.- 9 Desviación de la resistencia a la fatiga con la resistencia a la tracción [Eurocódigo, 2010]

### 2.3.2 Crecimiento de grieta

Las velocidades de propagación de las fisuras a fatiga sujeta a amplitud constante dependen de las propiedades de resistencia estática y del material; un ejemplo importante son las conexiones soldadas que siempre poseen discontinuidades en forma de grieta, a partir de donde se forma la superficie de falla. Se ha intentado caracterizar la propagación de la fisura en base a la siguiente ecuación en términos de la longitud de la grieta por cada ciclo:

$$\frac{da}{dN} = C \cdot \left( \frac{\Delta K}{E} \right)^m \quad \text{[Ecuación 2]}$$

donde:

da es el diferencial del tamaño de grieta

dN es el diferencial de números de ciclos

C constante

$\Delta K$  diferencial del factor de concentración de esfuerzos

E módulo de elasticidad del material

m es la pendiente de la curva a la resistencia a la fatiga

### 2.3.3 Factor de concentración de esfuerzos (K)

Representa la magnitud de la intensificación del esfuerzo en la región de la punta de la grieta, este factor se basa en la hipótesis que en las cercanías de una grieta el esfuerzo efectivo sobre el material es mayor que el esfuerzo aplicado, la fisura intensifica el esfuerzo real en el material. El factor K se define como

$$K = Y \cdot \sigma \cdot \sqrt{\pi a} \quad [\text{Ecuación 3}]$$

Donde:

$\sigma$  Es el esfuerzo aplicado

Y Es un factor geométrico que depende de la relación entre la longitud de la grieta y el espesor de la placa

a Es el tamaño de la grieta, o la longitud superficial de la grieta

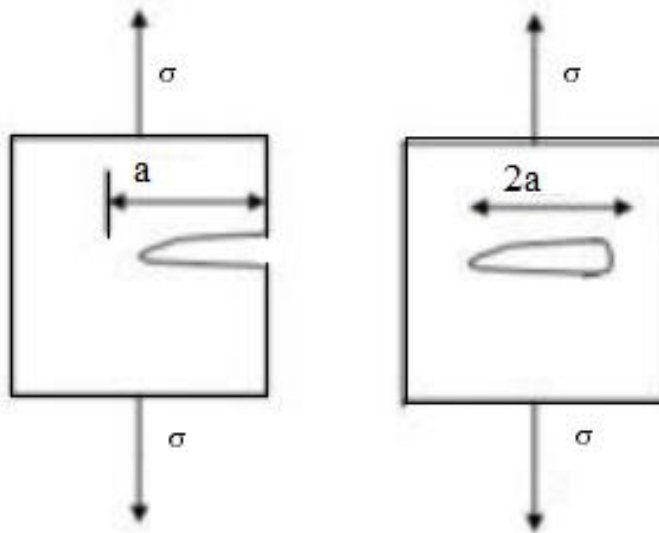


Figura N.- 10 tamaño de grieta a [Eurocódigo, 2010]

El factor de concentración de esfuerzos K es válido únicamente con esfuerzos a tensión  $\sigma$  perpendiculares a la línea de acción del esfuerzo, donde el intervalo del factor de concentración de esfuerzos definido por la diferencia de los factores de concentración máximo y mínimo como se indica en la Ecuación 3.

$$\Delta K = K_{\max} - K_{\min}$$

[Ecuación 3]

$$\Delta K = Y\sigma_{\max}\sqrt{\pi a} - Y\sigma_{\min}\sqrt{\pi a}$$

Ya iniciada la grieta esta se propaga por el efecto de la variación de esfuerzos en la punta hasta que el factor de concentración de esfuerzos iguala a la resistencia a la fractura  $K_c$  y se produce la falla final.

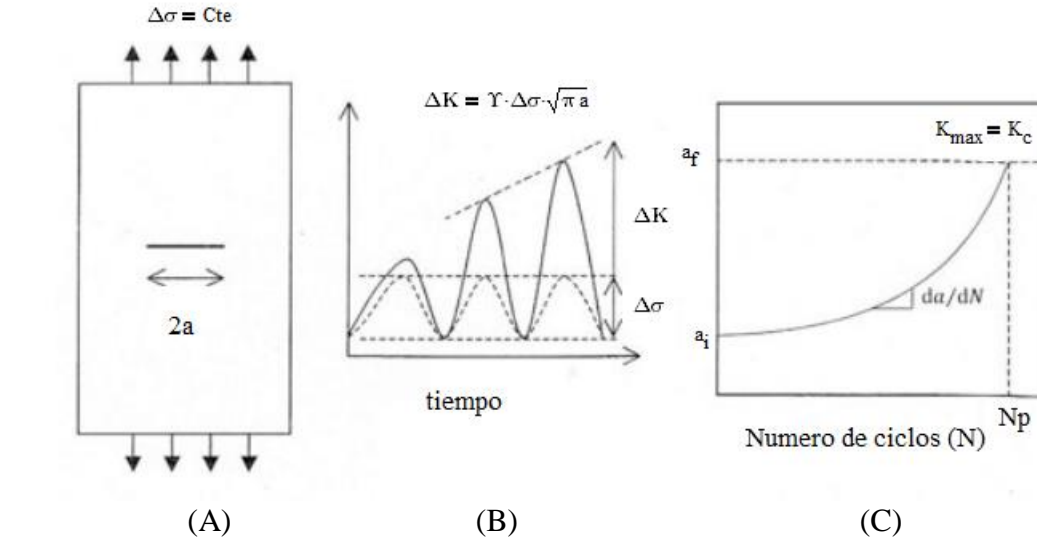


Figura N.- 11 Variación de la amplitud del factor de concentración de esfuerzos [Eurocódigo, 2010]

La ecuación de Paris, se basa en el hecho, que en un cuerpo agrietado que se deforma de manera elástica lineal, la magnitud de los esfuerzos en la punta de la grieta está definida por el factor de concentración de esfuerzos, donde por integración, se puede obtener el número de ciclos a la falla por fatiga como se indica en la ecuación 3

$$N = \int_{a_i}^{a_f} \frac{1}{C(\Delta K)^m} da$$

[Ecuación 4]

donde:

Las constantes C y m son propiedades de los materiales cuando se someten a cargas que producen fatiga, para acero estructural, fueron propuestos los siguientes valores por Barson y Rolfe (García, 2013)

$$C = 3.0642 \times 10^{-14} \quad m^{1.5}/MPa^2$$

$$m = 3$$

Para una grieta de borde simple o doble de acuerdo a Fuchs (Fuchs, 2001)

$$Y = 1.12.$$

$$a_i = 0.005 \text{ cm}$$

$$\Delta K = 1.12\Delta\sigma\sqrt{\pi a}$$

[Ecuación 3]



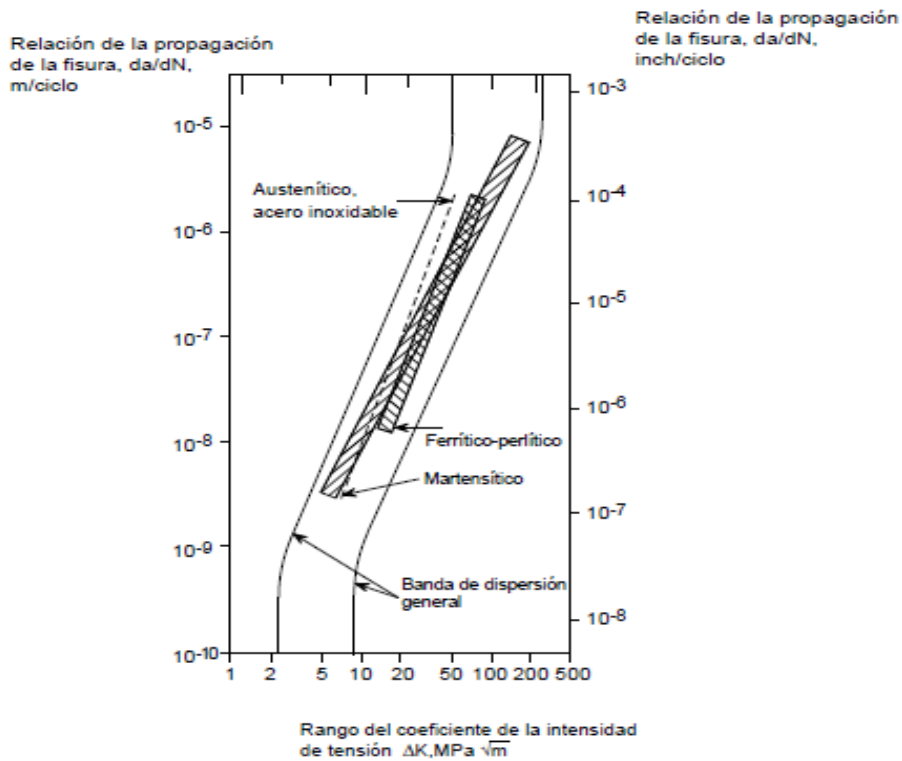


Figura N.- 12 Propagación de fisuras para 3 tipos de acero [Eurocódigo, 2010]

### 2.3.4 Efecto del tamaño

Debido a un efecto geométrico del tamaño, denominado efecto del gradiente de las tensiones, comparando secciones gruesas y delgadas, con secciones grandes y pequeñas, es más probable que en secciones grandes exista un punto débil por un defecto en forma de rascadura superficial o defecto de soldadura con diferente profundidad, el defecto en la delgada experimentará una mayor tensión que en la gruesa, debido a la diferencia en el gradiente de tensiones. La tensión local es función del rango, y del espesor de la entalladura, por lo tanto, el rango  $\Delta s = t/r$  aumenta cuando el espesor de la chapa se hace más grueso si el rango  $r$  permanece constante.

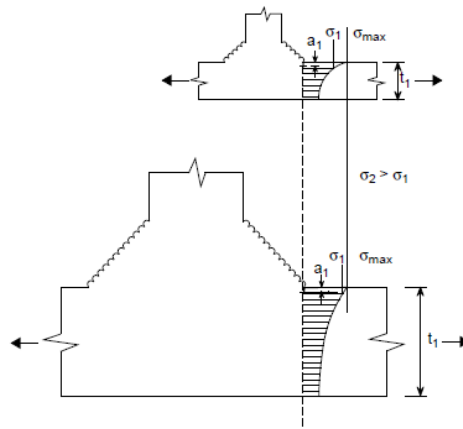


Figura N.- 13 efecto del gradiente en tensiones [Eurocódigo, 2010]

### 2.3.5 Efecto de la tensión media

La fatiga depende de la amplitud de la tensión, pero también depende de la tensión media o tensión estática. En general una tensión de tracción media reduce la vida a la fatiga, mientras que una tensión de compresión media la aumenta.

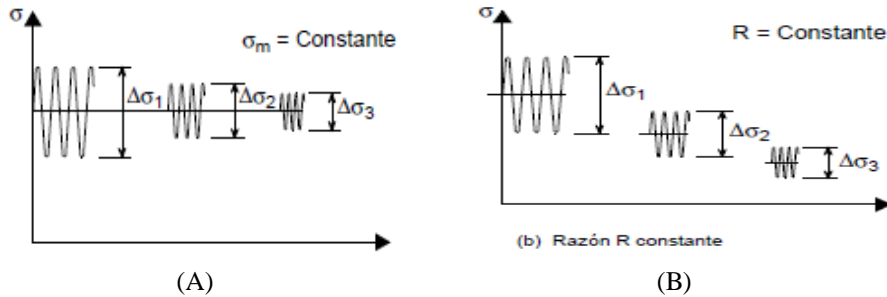


Figura N.- 14 Efectos de la tensión media [Eurocódigo, 2010]

Los efectos de la tensión media están relacionados con el rango de tensiones R mediante:

$$S_m = S_a \frac{1+R}{1-R} \quad \text{[ecuación 5]}$$

Con un valor constante de R se obtiene una mejor curva S-N que con un  $\sigma_m$  constante resultando dos curvas diferentes como las que se muestra en la figura 14A. El efecto de la tensión media sobre la vida de la fatiga se presenta con el diagrama de Haigh donde se traza  $(S_a/S_o)$  frente a  $(S_m/S_u)$  como se ilustra en la figura 15B.

Donde:

$S_o$  es la resistencia a la fatiga a una vida concreta bajo condiciones totalmente invertidas ( $S_m=0$ ;  $R= -1$ )

$S_u$  es la resistencia a la rotura por tracción.

$S_m$  es la tensión media de tracción

$S_a$  se denomina una tensión alterna

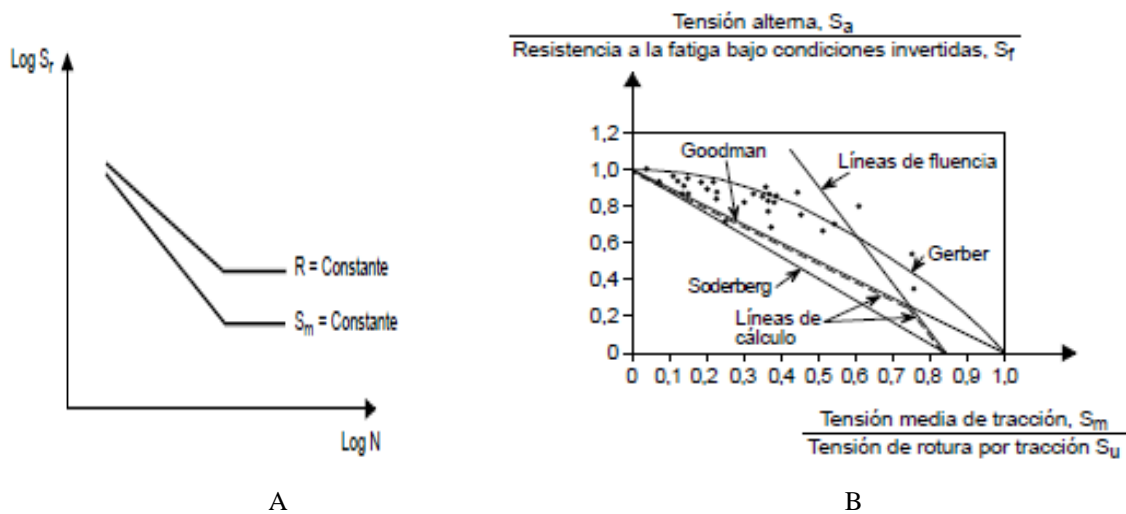


Figura N.- 15 Diagrama de Haigh [Eurocódigo, 2010]

Goodman  $\frac{S_a}{S_o} + \frac{S_m}{S_u} = 1$  [ecuación 6]

Gerber  $\frac{S_a}{S_o} + \left(\frac{S_m}{S_u}\right)^2 = 1$  [ecuación 7]

Soderberg  $\frac{S_a}{S_o} + \frac{S_m}{S_y} = 1$  [ecuación 8]

Las curvas de Gerber ofrecen un ajuste satisfactorio sin dejar de observar que algunos puntos están por debajo del lado de la inseguridad. La línea de Goodman representa una relación inferior de datos mientras que la línea de Soderberg constituye un límite inferior conservador

### 2.3.6 Efecto de la entalladura

La fatiga es un proceso que depende de la tensión local aplicada en una área muy pequeña, esto se acelera en secciones con entalladuras produciéndose un ablandamiento cíclico progresivo, además el material situado en el fondo de la entalladura experimenta un efecto de apoyo causado por la contención del material de manera que la deformación en la zona crítica es menor. En la práctica este efecto se toma en cuenta a través de un coeficiente de fatiga por entalladura. (Eurocódigo, 2010)

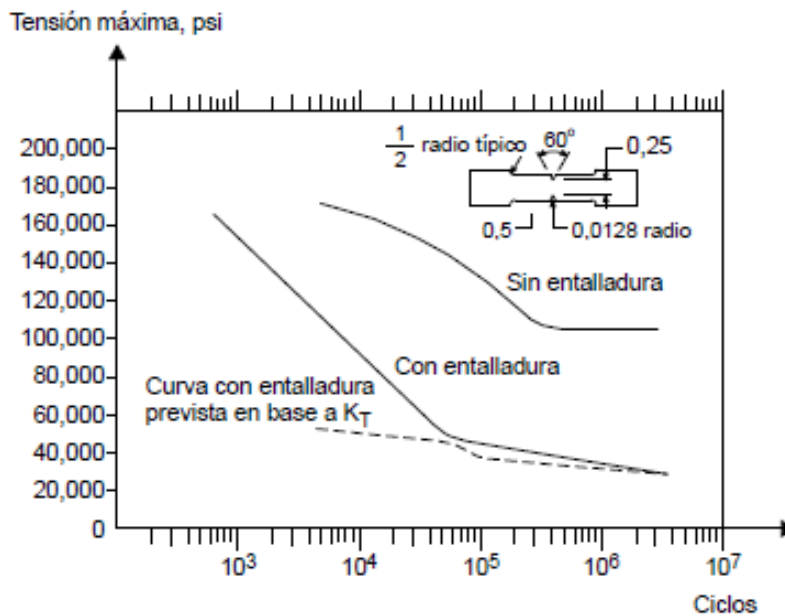


Figura N.- 16 Efecto de la entalladura [Eurocódigo, 2010]

### 2.3.7 Efecto del acabado superficial

El deslizamiento entre partículas se produce con mayor facilidad en la superficie. Por lo tanto casi todas las fisuras comienzan en esta zona. De tal manera, la condición física y la situación de tensiones en la superficie del elemento son de vital importancia para el rendimiento ante fatiga.

El acabado superficial representado comúnmente como  $R_u$  rugosidad superficial media consiste en la distancia media entre picos en una medición especificada. (Eurocódigo, 2010)

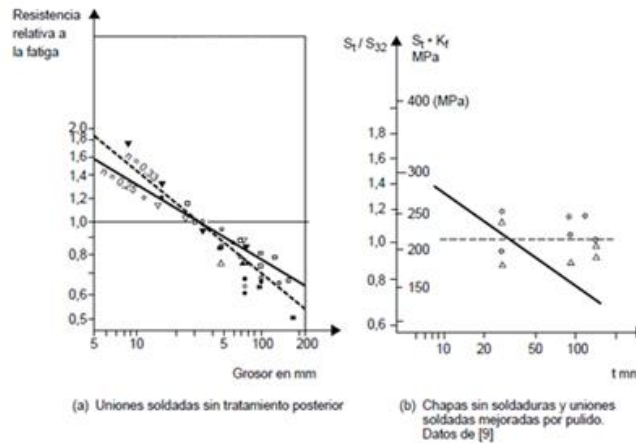


Figura N.- 17 Efectos del tamaño en uniones soldadas [Eurocódigo, 2010]

### 2.3.8 Efecto de la tensión residual

Las tensiones residuales en piezas se producen cuando una zona de esta se deforma más allá del límite elástico mientras que otras zonas lo hacen elásticamente. Cuando la carga deja de aplicarse la sección intenta regresar a su posición original, dando lugar a tensiones residuales en el material deformado plásticamente. Puede ser causada también por la dilatación térmica así como por fuerzas externas, son de signo opuesto al de la tensión aplicada. Las tensiones de soldadura que quedan confinadas cuando el material soldado se contrae durante el enfriamiento constituyen un ejemplo de tensiones residuales, estas ejercen una influencia similar a la fatiga que las tensiones medias es decir una tensión de tracción reduce la vida a la fatiga mientras que una tensión de compresión la aumenta. Las tensiones residuales pueden relajarse con el tiempo si hay fluencia local en los elementos de concentración de tensiones (Eurocódigo, 2010).

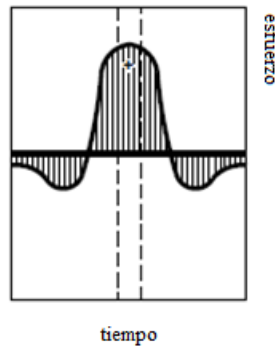


Figura N.- 18 Tensiones residuales [Eurocódigo, 2010]

### 2.3.9 Efecto de la corrosión

La corrosión introduce picaduras en forma de entalladura que actúan como concentradores de tensión en el material. La resistencia a la fatiga se ve disminuida incluso al aire libre por agua de lluvia, agua dulce, o agua salada. El efecto se reduce si se utiliza protección anticorrosiva como pintura o algún tipo de recubrimiento, por ejemplo, en estructuras submarinas se utiliza protección catódica mediante la utilización de ánodos sacrificiales con menor frecuencia de potencial eléctrico, esto recupera la resistencia a la fatiga de ciclo grande reduciendo la fragilización por absorción de hidrógeno. La figura 19 A muestra la diferencia en muestras de acero templado expuesto al aire y al agua. (Eurocódigo, 2010)

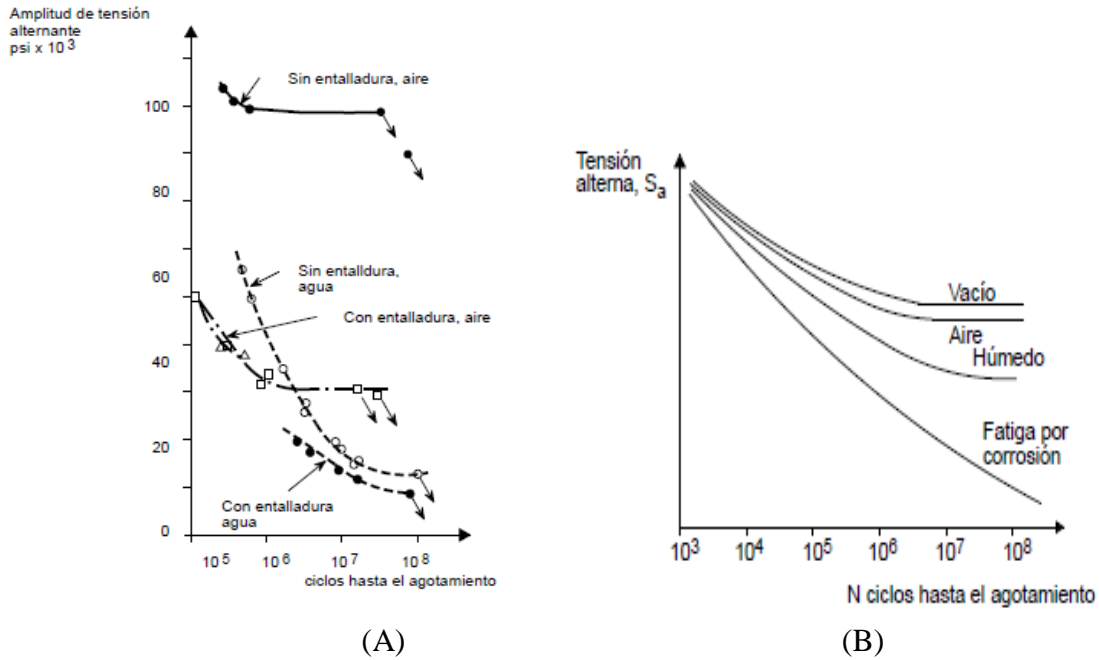


Figura N.- 19 Efecto de la corrosión [Eurocódigo, 2010]

## 2.4. Comportamiento de los tirantes

Los tirantes son elementos flexibles que soportan al tablero y se conectan en diferentes puntos a lo largo del mismo así como en los extremos opuestos a diferentes alturas en las torres.

Están constituidos por torones de acero de alta resistencia, similares a los utilizados en elementos de concreto presforzado, su sección transversal es variable en cuanto al número de torones y la tensión aplicada en cada cable a lo largo del tablero manteniendo fijo, el tipo de torón y su sistema de protección anticorrosivo

Los cables requieren de un sistema de anclaje para ser sujetados, estos sistemas están diseñados para restringir el movimiento de los torones, por medio de un tubo cónico de acero en el cual se apoya una placa en donde los torones son anclados mediante cuñas de acero, la fuerza existente en las cuñas puede provocar que los alambres de los torones se les incruste el moldeado de estas provocando una zona de concentración de esfuerzos eliminando la etapa de iniciación de la fisura llevándonos directamente a calcular la vida con las ecuaciones de propagación de grietas en mecánica de la fractura en el anexo 3.

Su peso propio y su extensa longitud hacen que el cable forme una catenaria la cual modifica su comportamiento ante esfuerzos axiales de tensión, este comportamiento no-lineal depende de la longitud del cable, así como la deformación en el centro del claro como indica la figura 20A, sin embargo algunas ecuaciones de aproximación para el cálculo de los esfuerzos en el cable se presentan en el anexo 3 de esta investigación.

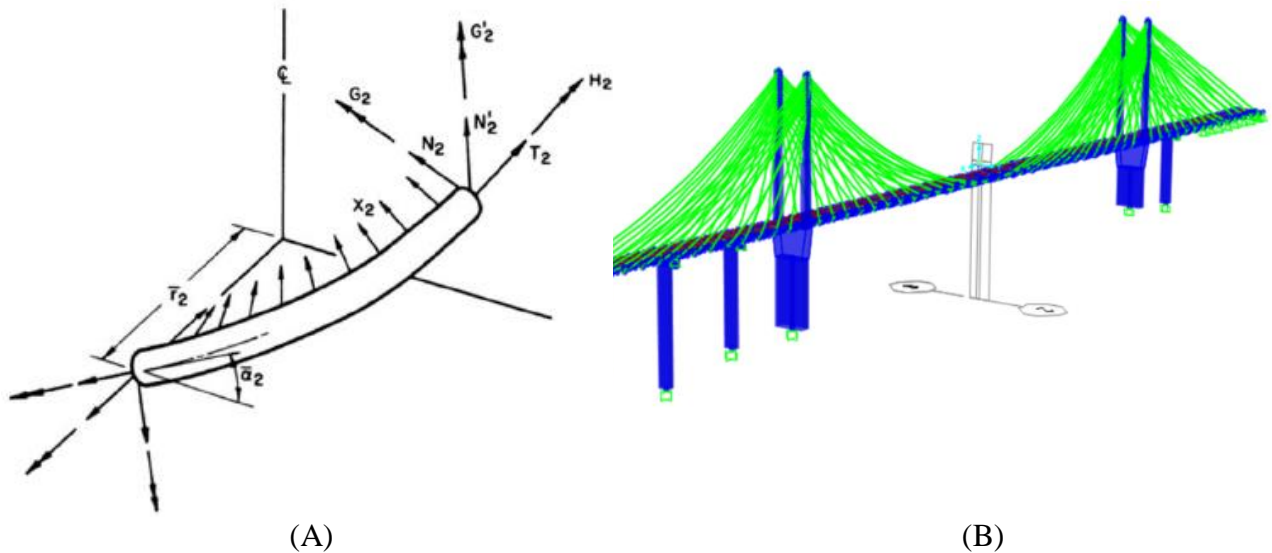


Figura N.- 20 Esfuerzos en un cable

## 2.5. Reglamento AASHTO (2012)

El AASHTO clasifica dos daños ante fatiga por carga inducida y daño por distorsión inducida. Los esfuerzos por carga inducida en placas de acero son los esfuerzos calculados en el análisis estructural, en los resultados obtenidos, que corresponden a las secciones transversales de la estructura, sin embargo los esfuerzos por distorsión inducida son un poco más complejos de obtener, debido a las tensiones secundarias en las placas de acero de las secciones transversales, debiendo contar con un modelo refinado de análisis que debe ser sustituido por los resultados de mediciones en campo en el puente en funcionamiento.

### 2.5.1 Niveles de evaluación de fatiga

- vida infinita.
- vida finita.

Sólo los detalles del puente, que no pasan la verificación a vida infinita están sujetos a la evaluación de la vida finita.

### 2.5.2 Estimación de rango de esfuerzos

El rango de tensión efectiva se calcula como:

$$\Delta f_{\text{eff}} = R_s \cdot \Delta f \quad \text{[ecuación 9]}$$

dónde:

- $R_s =$  Es el factor de carga parcial de estimación del rango de esfuerzo calculado como  $R_{sa} * R_{st}$
- $\Delta F =$  Esfuerzo medido de tensiones efectivas; o 75 por ciento del rango de tensión calculada debido al paso del camión fatiga como se especifica en el artículo Diseño LRFD 3.6.1.4, o un camión de fatiga determinado por un estudio más profundo de camiones con pesaje en sitio

#### 2.5.2.1 Cálculo de los límites estimados de esfuerzo

Dos factores de incertidumbre están presentes en el cálculo del intervalo de la tensión efectiva en un detalle a fatiga en particular

- La incertidumbre asociada con el análisis , representado por el factor de análisis de carga parcial ,  $R_{SA}$  , y
- La incertidumbre asociada con el supuesto peso del camión efectivo, representada por el camión y su factor de carga parcial,  $R_{st}$ .

Tabla N.- 1 Factores carga parcial peso de camión y rango de esfuerzos (AASHTO, 2012)

Métodos de evaluación para fatiga	Factor de carga parcial Factor, $R_{sa}$	Factor de peso de camión Factor, $R_{st}$	Factor de rango de esfuerzos Factor de carga, $R_s^a$
Para evaluación de la vida mínima ante fatiga			
Rango de esfuerzos de un análisis simplificado camión de acuerdo a LRFD Artículo 3.6.1.4 (AASHTO, 2012)	1.0	1.0	1.0
Rango de esfuerzos de un análisis simplificado, peso de camión de acuerdo a análisis de pesaje en sitio	1.0	0.95	0.95
Rango de esfuerzos de un análisis refinado camión LRFD Artículo 3.6.1.4 (AASHTO, 2012)	0.95	1.0	0.95
Rango de esfuerzos de un análisis refinado peso de camión de acuerdo a análisis de pesaje en sitio	0.95	0.95	0.90
Rango de esfuerzos con mediciones con sensores en campo	N/A	N/A	0.85
Para vida ante fatiga			
Todos los métodos	N/A	N/A	1.00

#### 2.5.2.1.1 Para la determinación de la vida de Evaluación o Fatiga mínima

En el cálculo del rango de esfuerzos efectivos para la determinación de la evaluación o la vida mínima a la fatiga, el factor de carga parcial de estimación de rango de esfuerzos se toma como el producto del factor de carga parcial del análisis y el factor de carga parcial del peso de camiones:

$$R_s = R_{sa} * R_{st}$$

[ecuación 10]



Si se calcula el rango de tensión efectiva a través de métodos de análisis refinados, como se define en el artículo 4.6.3 Diseño LRFD (AASHTO, 2012):

$$R_{sa} = 0.95$$

sino:

$$R_{sa} = 1.0$$

Si el peso efectivo del camión se calcula a través de un estudio de pesaje en sitio, o cerca del puente:

$$R_{st} = 0.95$$

sino:

$$R_{st} = 1.0$$

### 2.5.2.1.2 Para la determinación de la vida de Evaluación a Fatiga

En el cálculo del rango de esfuerzos efectivos para la determinación de la vida media ante fatiga, el factor de carga parcial de estimación de esfuerzo de tensión se toma como 1.0.

### 2.5.2.2 Estimación de Esfuerzo Medido

El rango de tensión efectiva puede estimarse mediante mediciones de campo de tensiones en el detalle de la fatiga estudiada de acuerdo con las condiciones típicas de tráfico. El rango de tensión efectiva será considerada como la raíz cúbica de la suma de los cubos de los rangos de tensión medidos, tal como aparece en:

$$\Delta f_{\text{eff}} = R_s \cdot \left( \sum \gamma_i \Delta f_i^3 \right)^{\frac{1}{3}} \quad \text{[ecuación 11]}$$

Donde:

$\gamma_i$  = Porcentaje de ciclos a un rango en particular

$\Delta f_i$  = Rango particular de esfuerzos

### 2.5.3 Determinación de fatiga en detalles propensos

Los detalles del puente que se consideran propensos a daños por fatiga, experimentan una tensión neta de tracción. Por lo tanto, los daños por fatiga sólo necesitan ser evaluados si, el detalle en la evaluación:

$$2 \cdot R_s \cdot (\Delta f)_{\text{tension}} > f_{\text{carga compresion}} \quad \text{[ecuación 12]}$$

El coeficiente dos en la ecuación representa la relación entre el alcance máximo asumido del esfuerzo de tensiones efectivas, tal como se especifica en las Especificaciones AASHTO LRFD de diseño de Puentes.

Donde:

- $R_s$  = factor de carga parcial de estimación de esfuerzos y que se resume en la Tabla 1
- $(\Delta F)$  = tensión de tracción factorizada proviene del esfuerzo debido al paso de un camión de tipo de fatiga
- $F$ (carga de compresión) = Sin considerar el esfuerzo de compresión en el detalle debido a carga muerta

#### 2.5.4 Vida infinita

Comprobar la vida infinita Si y solo si:

$$(\Delta f)_{\max} \leq (\Delta F)_{th}$$

entonces:

- $Y = \infty$

dónde:

- $(\Delta F)_{\max}$  = esfuerzo de tensión máximo esperado en el detalle propenso a fatiga, que puede ser tomado como  $2,0 (\Delta f)_{eff}$
- $(\Delta F)_{th}$  = constante de amplitud fatiga, umbral Tabla 3

#### 2.5.5 Estimación de vida finita ante fatiga

Tres niveles de vida de fatiga finita pueden estimarse:

- La vida mínima esperada ante fatiga (que es igual al diseño conservador de fatiga),
- La evaluación de la vida ante fatiga (lo que equivale a una vida fatigada conservadora), y
- La vida media ante fatiga (que es igual a la más probable vida fatigable).

La vida total de la fatiga finita de un detalle propenso, a la falla en años, se determinará como:

$$Y = \frac{R_f \cdot A}{365 \cdot n \cdot (TPDA) [(\Delta f)_{eff}]^3} \quad \text{[ecuación 13]}$$

dónde:

- $R_r$  = Factor de resistencia especificado para la evaluación, mínima, o la vida media de fatiga como se indica en la Tabla 2
- $A$  = constante de cada categoría dada en Tabla 2 (AASHTO, 2012)
- $n$  = Número de ciclos rangos de esfuerzo por el paso de camiones
- (TPDA) = Número medio de camiones por día en un solo carril.
- $\Delta f_{eff}$  = Rango de tensión efectiva 2.5.2.2

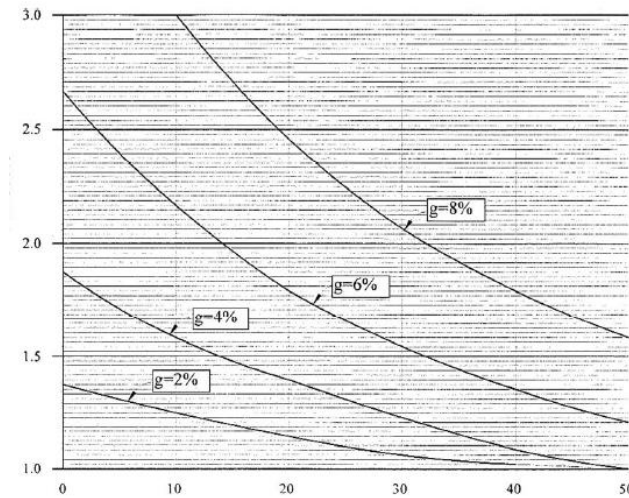


Figura N.- 21 Carga viva distribuida AASHTO

Los factores de resistencia a la vida de fatiga, especificados en la Tabla 3, representan la variabilidad de la vida ante fatiga de las diversas categorías de detalle, de la A a E. Como la estimación del esfuerzo crece más y más cerca al valor real de la tensión, la probabilidad de falla asociada con cada nivel de resistencia a la fatiga se aproxima a dos por ciento, 16 por ciento, y 50 por ciento para el mínimo, la evaluación, y la media de vida de fatiga, respectivamente. Por lo tanto, los factores de resistencia parciales, se calculan al elevar a la potencia dos veces la desviación estándar del logaritmo de la vida de la fatiga experimental para cada categoría en detalle, respectivamente.

La ecuación 13 se puede escribir en escala logarítmica donde:

- $g$  es la tasa de crecimiento anual del tráfico en nuestro ejemplo 3, 4 y 5,
- $a$  es la edad actual del puente en este caso 0

$$Y = \frac{\log \left[ \frac{R_r \cdot A}{365 \cdot n \cdot (TPDA) \cdot (\Delta f_{eff})^3} \cdot g \cdot (1 + g)^{a-1} + 1 \right]}{\log(1 + g)} \quad [\text{ecuación 14}]$$

### 2.5.5.1 Estimación del número de ciclos por el paso de camiones

El número de ciclos de esfuerzos de tensión por el paso de un camión puede estimarse de las siguientes maneras: (en orden creciente de precisión y complejidad):

Tabla N.- 2 Factor  $R_R$  tipos de vida a la fatiga (AASHTO, 2012)

Detalle de la Categoría	$R_R$		
	Evaluación de la vida	Vida mínima	Vida media
A	1.7	1.0	2.8
B	1.4	1.0	2.0
B'	1.5	1.0	2.4
C	1.2	1.0	1.3
C'	1.2	1.0	1.3
D	1.3	1.0	1.6
E	1.3	1.0	1.6
E'	1.6	1.0	2.5

- A través de la utilización de las Tablas de Diseño del LRFD
- A través de la utilización de líneas de influencia, con un modelo matemático, ó
- Mediante las mediciones de campo.

### 2.5.6 Clasificación de las uniones AASHTO:

El AASHTO (AASHTO, 2012) clasifica en 8 grupos a las uniones por fatiga donde la segunda columna de la tabla del anexo 3 se calcula mediante la siguiente formula.

$$75.\text{anos TPDA} = \frac{A}{\left[\frac{(\Delta F_{th})}{2}\right]^3 \cdot (365) \cdot (75) \cdot (n)} \quad [\text{ecuación 15}]$$

donde:

n = es el número de ciclos generados por el paso de un camión

$\Delta f_{th}$  = es la constante de amplitud de fatiga tabla 4

A = Constante A tabla 4

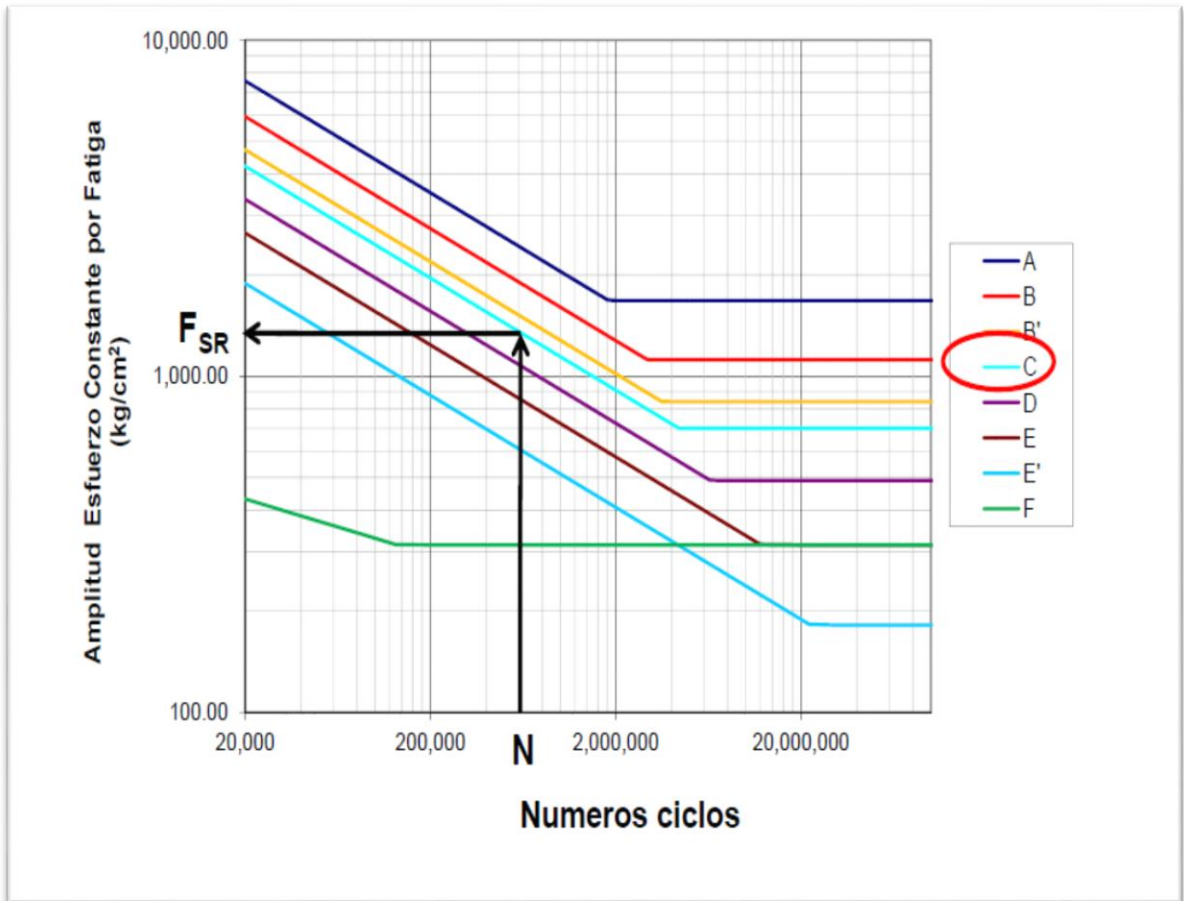


Figura N.- 22 Diagrama categorizado detalles

Tabla N.- 3 factor  $\Delta F_{th}$  (AASHTO,2012)

$\Delta F_{th}$ CONSTANTE DE AMPLITUD DE FATIGA	
CATEGORIA DEL DETALLE	CONSTANTE KSI
A	24
B	16
B'	12
C	10
C'	12
D	7
E	4.5
E'	2.6
.M 164 (A325) tornillos en tensión axial	31
m 253 (A490) tornillos en tensión axial	38

Tabla N.- 4 Constante A (AASHTO, 2012)

CONSTANTE A	
CATEGORIA DEL DETALLE	CONSTANTE A KSI <sup>3</sup> 10 <sup>8</sup>
A	250
B	120
B'	31
C	44
C'	44
D	22
E	11
E'	3.9
M 164 (A325) tornillos en tensión axial	17.1
m 253 (A490) tornillos en tensión axial	31.5

### 2.5.7 Resistencia de una unión soldada:

$$(\Delta F_o) = (\Delta F_c) \cdot \left[ \frac{0.65 - 0.59 \frac{2a}{t_p} + 0.72 \left( \frac{w}{t_p} \right)}{0.167} \right] \leq \Delta F_c \quad \text{[ecuación 16]}$$

La ecuación 16 nos da la resistencia a la fatiga de una unión soldada

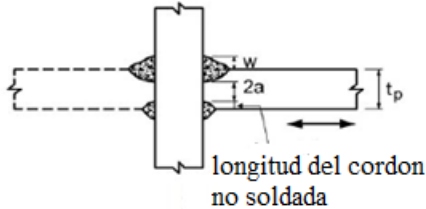


Figura N.- 23 Resistencia nominal de una unión soldada (AASHTO, 2012)

Donde:

- 2a es la longitud no soldada del cordón en la dirección del espesor de la placa en pulgadas. Para soldaduras tipo filete la cantidad  $2a/t$  será igual a 1.
- $\Delta F_c$  es la fatiga nominal para un detalle de categoría C en ksi
- $t_p$  espesor de la placa en pulgadas
- w longitud del refuerzo o contorno del filete de soldadura en la dirección del espesor de la placa en pulgadas

Utilizando los valores de A y  $\Delta F_{th}$  de las tablas 6, 7 y 8 se calculan un número de camiones de vida infinita como se indica en la siguiente tabla

Tabla N.- 5 TPDA de camiones equivalentes a vida infinita (AASHTO, 2012)

detalle de categoría	TPDA 75 años # de camiones equivalentes a vida infinita
A	530
B	860
B'	1035
C	1290
C'	745
D	1875
E	3530
E'	6485

La clasificación detallada de las uniones soldadas del reglamento AASHTO se encuentra en el anexo 3.

## 2.6.Eurocódigo

El Eurocódigo para efectos de diseño considera dos factores importantes:

- El rango de tensión ( $\Delta\sigma_R$ ) en el punto de iniciación de la fisura
- La resistencia a la fatiga de la unión en función de la geometría definida por un parámetro “d”

### 2.6.1 Determinación del rango de esfuerzos

El rango de esfuerzos no deberá exceder el calculado en la siguiente formula:

$$\left[ F_{SH} = \left( \frac{C_f \cdot 329}{N} \right) \right] \geq F_{TH}$$

[ecuación 17]

Donde:

FSH rango de esfuerzos calculados en MPa

Cf constante para cada categoría definida en la tabla 6

Fth Constante de amplitud de fatiga

Tabla N.- 6 FTH Cf categorizado (EUROCODIGO, 2010)

Categoría	C <sub>f</sub>	F <sub>th</sub> Kg/cm <sup>2</sup>
A	865 x 10 <sup>13</sup>	1680
B	410 x 10 <sup>13</sup>	1120
B'	210 x 10 <sup>13</sup>	840
C	150 x 10 <sup>13</sup>	700
D	75 x 10 <sup>13</sup>	490
E	37 x 10 <sup>13</sup>	315
E'	13.5 x 10 <sup>13</sup>	182
F	129 x 10 <sup>18</sup>	315

Este reglamento se basa en mediciones de campo, dado que representan el método más preciso para estimar la tensión efectiva que oscila en los detalles propensos a fatigarse. Se simula condiciones de servicio en esta investigación para ser remplazadas por mediciones de campo en el futuro.

No es necesario considerar los ciclos cuyas cargas sean inferiores al límite de corte, se obtiene entonces para cada carga de tensiones, el número de ciclos hasta la falla. Con las curvas S-N correspondientes a cada detalle analizado con el rango de tensión de cálculo se obtiene el número de ciclos de cada detalle para dibujar el espectro de amplitudes de cargas como se indica en la figura 24.



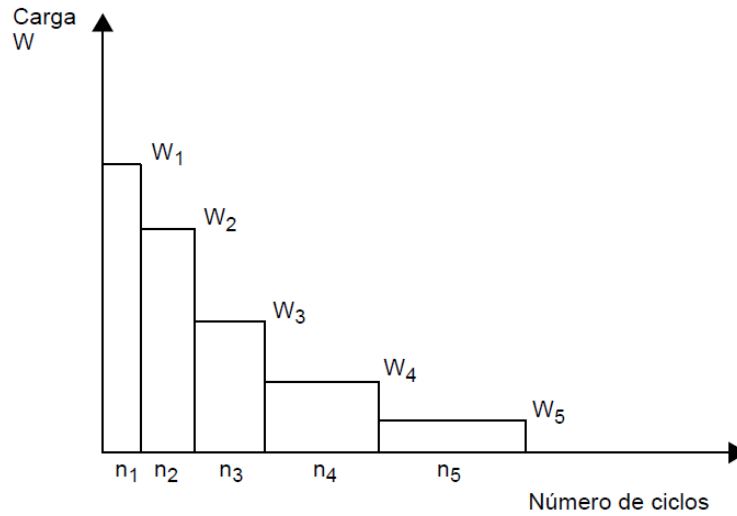


Figura N.- 24 histograma de esfuerzos

Se obtiene el daño acumulado conforme a la regla de Palmgren Miner (Garcia, 2010). Para una vez obtenido el daño total formularlo en una equivalencia menor a la unidad del rango de tensiones equivalentes

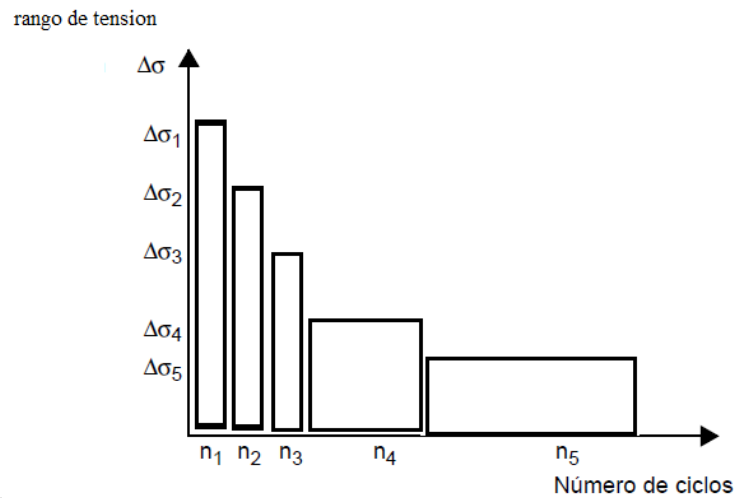


Figura N.- 25 Espectro se tensiones

$$\frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} + \dots + \frac{n_n}{N_n} \leq 1 \quad \text{[ecuación 18]}$$

donde

n representa el número necesario de n/N ciclos en la banda durante la vida de cálculo y

N representa la resistencia a la fatiga bajo ese rango de tensión

La regla de Palmgren-Miner indica que los daños efectuados por todas las bandas juntas no deben exceder a la unidad como se indica en la ecuación 18. Los daños se producen debido a que los ciclos de mayor amplitud pueden comenzar a propagar la fisura una vez que esta comienza a propagarse los ciclos inferiores se hacen efectivos, en este caso el límite de fatiga de amplitud constante horizontal  $\Delta\sigma_D$ , se reemplaza por una línea inclinada con un gradiente logarítmico de  $1/(m+2)$  como se indica en la figura 26.

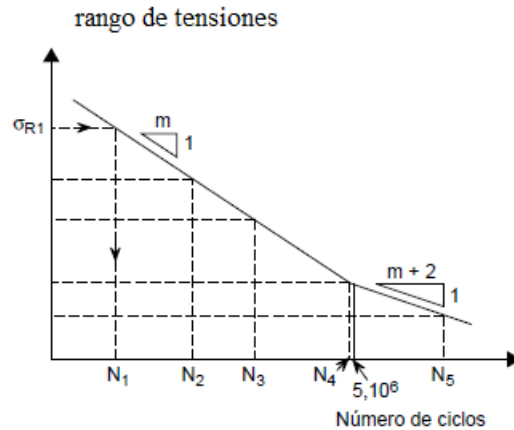


Figura N.- 26 Pendientes en el espectro de tensiones (Eurocódigo, 2010)

El Eurocódigo permite la clasificación de una categoría de detalle con una curva individual de la resistencia a la fatiga que se define de una manera convencional mediante una línea con  $m=3$  pendiente =  $(-1/3)$ . Se fija el límite de amplitud constante en 5 millones de ciclos que es un valor medio entre los 2 millones de ciclos para detalles buenos y 10 millones para detalles con efectos de entalladura considerables.

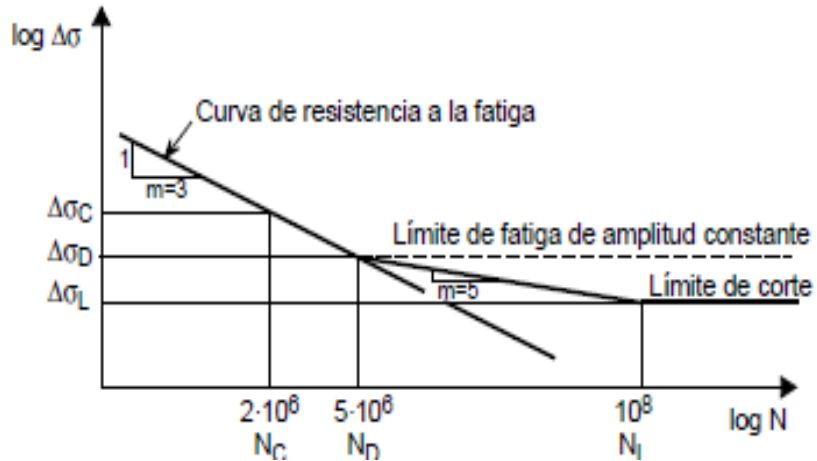
Las ECCS (European Convention for Construction Steelwork Fatigue recommendations) (ECCS, 2010) recomiendan lo siguiente:

- Si ninguno de los rangos de tensión de amplitud variable supera el límite de fatiga no es necesario efectuar ninguna evaluación de los daños por fatiga.
- Si por lo menos 1 de los bloques de rango de tensión supera el límite de fatiga se ha de efectuar la regla del daño acumulado lineal de Palmgren-Miner.

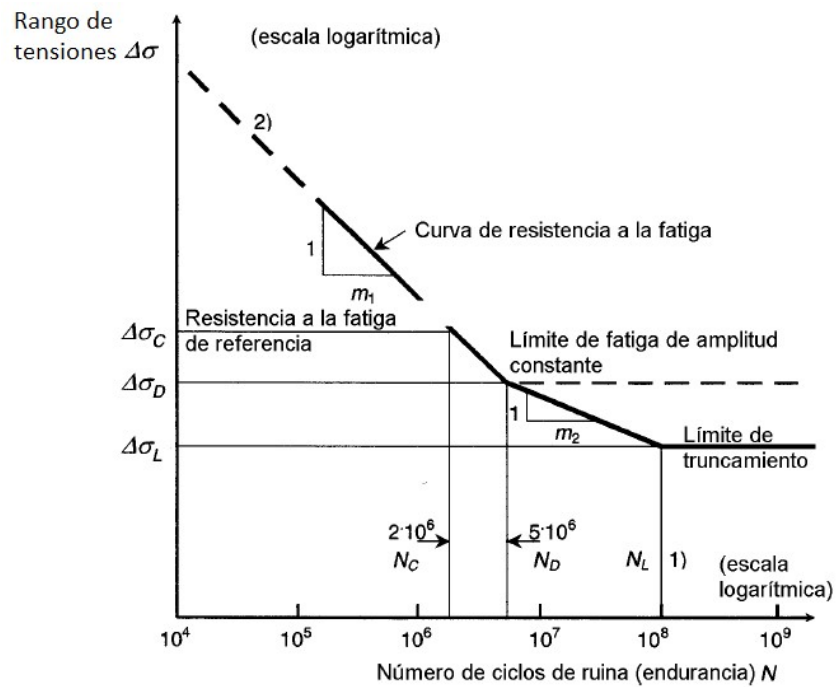
Es necesario considerar 2 casos para el cálculo de daños acumulados

- O bien el cálculo de los daños se efectúa asumiendo simplemente una curva S-N de pendiente constante  $m=3$  extendida más allá del límite de fatiga de amplitud constante
- O se efectúa el cálculo de los daños asumiendo que más allá del límite de fatiga de amplitud constante  $m=3$  se extiende mediante una línea recta de  $m=5$  la intercepción de esta línea recta con la línea vertical en 10 millones de ciclos proporciona un límite de corte. Esto trata de considerar de manera aproximada la reducción progresiva del

límite de fatiga de amplitud constante como resultado de los daños causados por los rangos de tensión por encima de ese límite de esta forma finalmente todos los rangos de tensión del espectro acabaran produciendo daños.



(A)



(B)

Figura N.- 27 Límite de amplitud constante (Eurocódigo, 2010)

### 2.6.1.1 Regla de Palmgren-Miner

Se basa en la hipótesis de que el daño total que acumula un elemento estructural bajo rangos de tensión variables se obtiene mediante la suma lineal del daño causado por cada rango de tensión individual es decir:

$$D = \frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} + \dots + \frac{n_k}{N_k} = \sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_i} \quad [\text{ecuación 19}]$$

Donde

$n_i$  es el número de ciclos de los rangos de tensión de amplitud variable  $\Delta\sigma_i$

$N_i$  es el número total de ciclos hasta el agotamiento bajo rangos de tensión de amplitud constante  $\Delta\sigma_i$

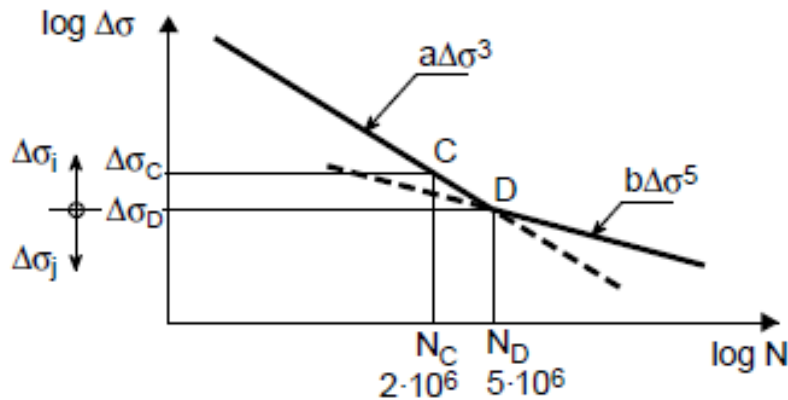


Figura N.- 28 Zonas de cálculo de daños acumulados (Eurocódigo, 2010)

No se toma en consideración ningún daño para cualquier rango de tensión variable que este por debajo del límite de corte.

#### 2.6.1.1.1 Rango de tensión equivalente

Puede decirse que el rango de tensión equivalente es una suma de Palmgren-Miner directa cuando la curva S-N es de pendiente única (-1/m) utilizando la siguiente expresión:

$$\Delta \sigma_{equ} = \left( \frac{\sum n_i \cdot \Delta \sigma_{ie}^m}{\sum n_i} \right)^{\frac{1}{m}} \quad [\text{ecuación 20}]$$

donde:

$m$ = pendiente de la recta

$n_i$ = número de ciclos equivalentes

$\Delta\sigma_{ie}$ = esfuerzo efectivo del detalle

Con  $m= 3$  o  $m=5$  según resulte apropiado

El Eurocódigo es un reglamento que considera que la estimación de la vida ante fatiga calculada se puede mejorar mediante el uso de datos más precisos como datos para la estimación de las fuentes incluyendo:

- Rango de tensión efectiva o el peso efectivo del camión,
- El tráfico promedio diario de camiones (TPDA), y
- El número de ciclos por el paso de cada camión.

Esta estrategia se basa en el logro de una mejor estimación de la vida a fatiga real.

## **2.7.Evaluación de la fatiga por distorsión inducida**

La fatiga por distorsión inducida es típicamente un fenómeno de fatiga de bajo ciclo. En otras palabras, se requieren relativamente pocos ciclos de la tensión para iniciar grietas en los detalles de fatiga propensos a distorsión. La fatiga inducida por distorsión es un problema de rigidez (más precisamente la falta de la misma) frente a un problema de carga. Los puentes existentes que han experimentado muchos ciclos de camiones, si no se han fisurado, pueden considerarse insensibles al agrietamiento por distorsión inducida, incluso con cargas más pesadas. En esta investigación no se considera la fatiga por distorsión inducida.

## 2.8. Clasificación de las uniones de acuerdo al Eurocodigo (Eurocodigo, 2010)

Existen diferencias entre el Eurocódigo y el AASHTO en cuanto a la clasificación de las uniones para análisis de fatiga

El parámetro  $d$  de diferentes uniones soldadas posee un número que representa su resistencia a la fatiga a 2 millones de ciclos en  $N/mm^2$  varía de acuerdo con la gravedad del efecto de la concentración de tensiones, estos datos se han obtenido en el manual del Eurocódigo a partir de ensayos en probetas simples que contenían diferentes tipos de uniones soldadas, clasificándolas en 14 grupos que son:

Tabla N.- 7 Clasificación uniones (Eurocódigo, 2010)

Categoría de unión $\Delta \sigma_c$ ( $N/mm^2$ )	$d$	M
160	$7.962 \cdot 10^{12}$	3
140	$5.636 \cdot 10^{12}$	3
125	$3.990 \cdot 10^{12}$	3
112	$2.825 \cdot 10^{12}$	3
100	$2.000 \cdot 10^{12}$	3
90	$1.416 \cdot 10^{12}$	3
80	$1.002 \cdot 10^{12}$	3
71	$0.710 \cdot 10^{12}$	3
63	$0.502 \cdot 10^{12}$	3
56	$0.356 \cdot 10^{12}$	3
50	$0.252 \cdot 10^{12}$	3
45	$0.178 \cdot 10^{12}$	3
40	$0.126 \cdot 10^{12}$	3
36	$0.089 \cdot 10^{12}$	3

Es posible trazar curvas S-N para cada clasificación como una familia de curvas como se muestra en la figura 30. Normalmente hay varios tipos de uniones dentro de cada clase. Cada uno de los grupos representa una descripción muy específica que se ven afectado por:

- Forma del elemento
- Emplazamiento de la iniciación anticipada de la fisura
- Geometría y dimensiones principales, proximidad al borde y cambio en sección transversal
- Requisitos de fabricación
- Requisitos de inspección

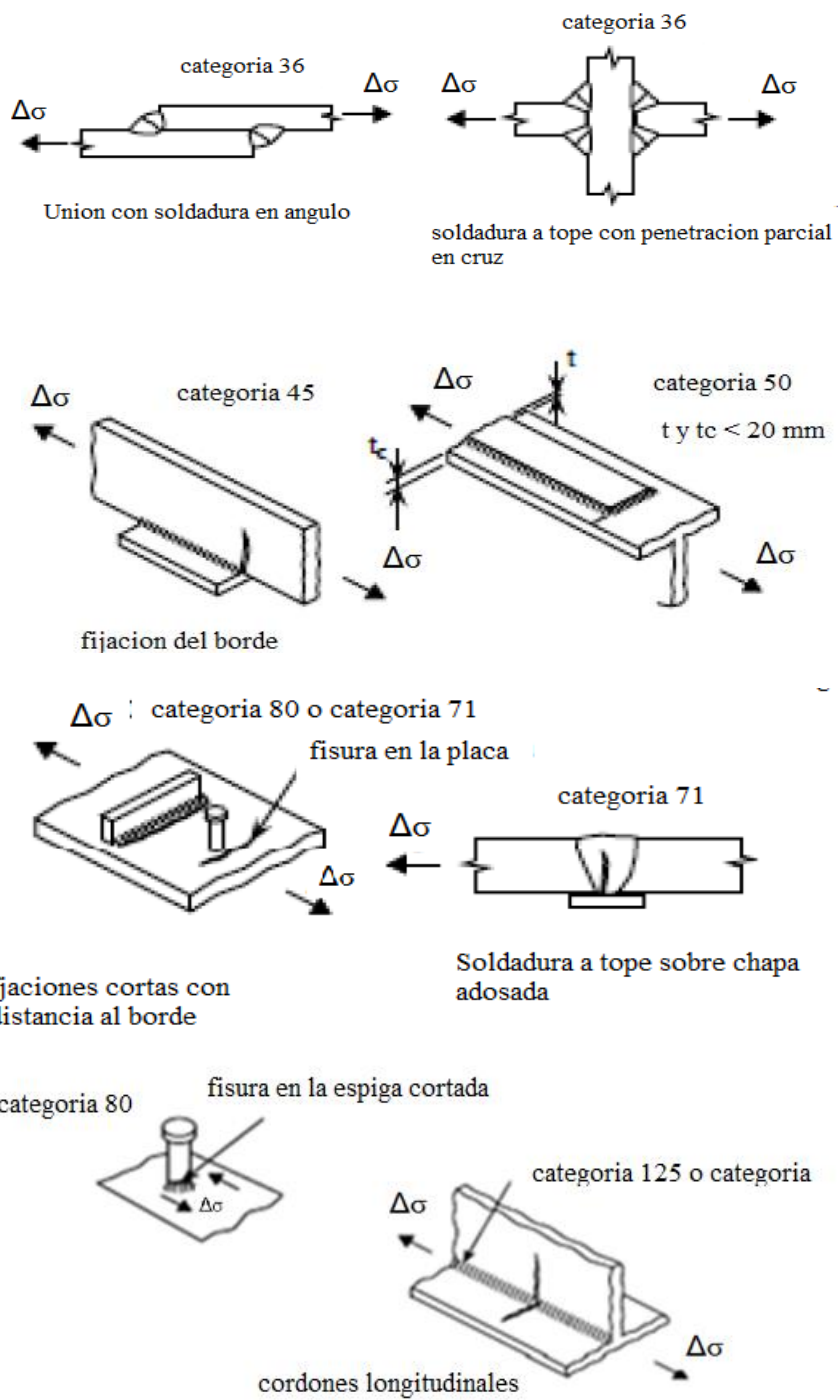


Figura N.- 29 clasificación detalles (Eurocódigo, 2010)

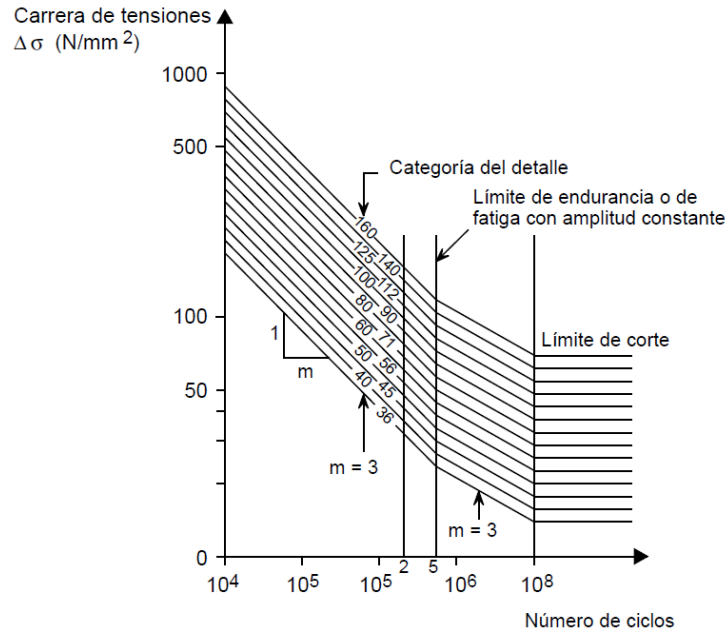


Figura N.- 30 Diagrama categorizado detalles (Eurocódigo, 2010)

Cualquier unión situada en una estructura, o en cualquier elemento estructural constituye un punto potencial de debilidad en la resistencia a la fatiga teniendo los siguientes casos potenciales de una rotura por fatiga

- En el metal base de cada una de las partes unidas adyacente a:
  - i. El extremo de la soldadura
  - ii. Un borde la soldadura
  - iii. Un camino en la dirección de la soldadura
  
- En el mismo metal de la soldadura con su inicio en:
  - i. La raíz de la soldadura
  - ii. La superficie de la soldadura
  - iii. Un defecto interno

Un trabajo insatisfactorio en la soldadura puede reducir el rendimiento de un detalle por debajo de lo que indique su categoría debido a

- a) Salpicaduras de la soldadura
- b) Golpes accidentales del arco
- c) Uniones no autorizadas
- d) Picaduras por corrosión
- e) Defectos de la soldadura
- f) Ajuste insatisfactorio
- g) Excentricidad

La tabla completa de la clasificación de las uniones se encuentra en el anexo 3



## 2.9.Procedimientos de recuento de ciclos de carga

Es probable que el patrón de la historia de las tensiones a lo largo del tiempo en un punto sea irregular y puede ser aleatorio. Un patrón de cargas más realista consistiría en una secuencia de cargas de diferente magnitud que producen una historia de la tensión a lo largo del tiempo que se puede asemejar a la de la figura 31. Se debe definir que representa un ciclo de carga y cuál es el rango de tensión correspondiente. Los métodos más comunes son:

- Método del embalse
- Método de Recogida de lluvia
- Diagrama de superposición

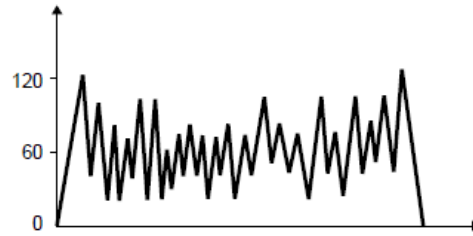


Figura N.- 31 histograma de tensiones (Eurocódigo, 2010)

### 2.9.1 Método del Embalse:

Debe partirse de que la historia tensión tiempo se ha obtenido a partir de simulación por ordenador para ser sustituidas por lo obtenido con sensores extenso-métricos a ser colocados en el puente en el futuro. Los resultados deben ser representativos del comportamiento a largo plazo del puente de manera que el nivel máximo de la tensión se repita y se traza una línea que una los valores máximos.

Se considera la zona comprendida entre esos dos picos como si estuviera llena de agua y formara un deposito, el método consiste en tomar la posición del valle más bajo e imaginar que se abre un tapón para vaciar el deposito, el agua escapa de este valle pero continua retenida en los valles adyacentes como se indica en la figura 32b El vaciado del primer valle corresponde a un ciclo de tensión  $S_1$ , se continua con el segundo pico más alto el agua liberada en esta operación corresponde a un ciclo de rango de tensión  $T_2$  obteniéndose gradualmente una serie de números de ciclos de diferentes rangos de tensión.

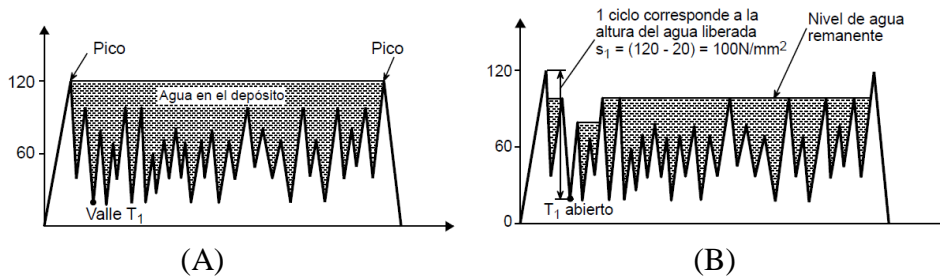


Figura N.- 32 método del embalse (Eurocódigo, 2010)

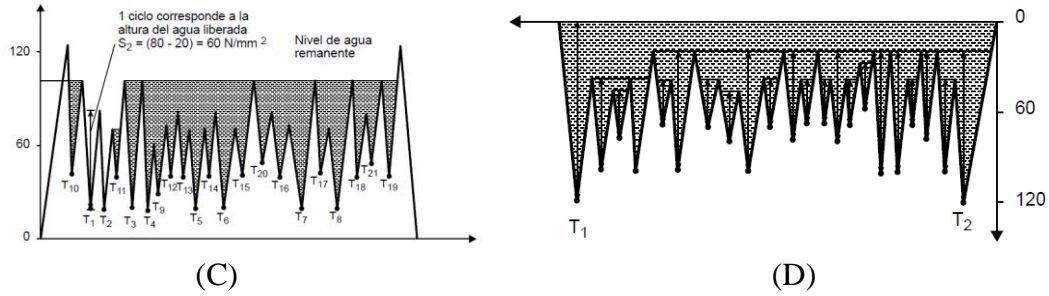


Figura N.-32 método del embalse

El procedimiento consiste en tomar la diferencia entre los niveles de tensión (valle y pico) este procedimiento se repite secuencialmente de manera que se identifican los rangos más altos en fluctuaciones aleatorias, el método del embalse asegura que se consideren las combinaciones prácticas máximos y mínimos juntos

### 2.9.2 Método de la Recogida de lluvia:

Este método trabaja de manera similar, en la imagen girada como se indica en la figura 33 se permite que el agua caiga desde arriba sobre el patrón, y se siguen los recorridos que sigue la lluvia, se debe cumplir ciertas reglas que limitan y complican el procedimiento, sometiéndolo a errores mayores que métodos alternativos.

Se sigue el flujo de agua en primer lugar para el punto de comienzo situado hacia afuera permitiendo que el agua caiga por cualquier parte del tejado situada por debajo. La anchura existente desde el nivel de tensión en el que partió el agua hasta que abandono el tejado representa la magnitud de un ciclo de tensión.

Se debe seguir esta secuencia moviéndose progresivamente hacia dentro desde los puntos que están mas al exterior, es un procedimiento más práctico pero puede acarrear errores al eliminar algunos datos al contar primero los ciclos de mayor rango.

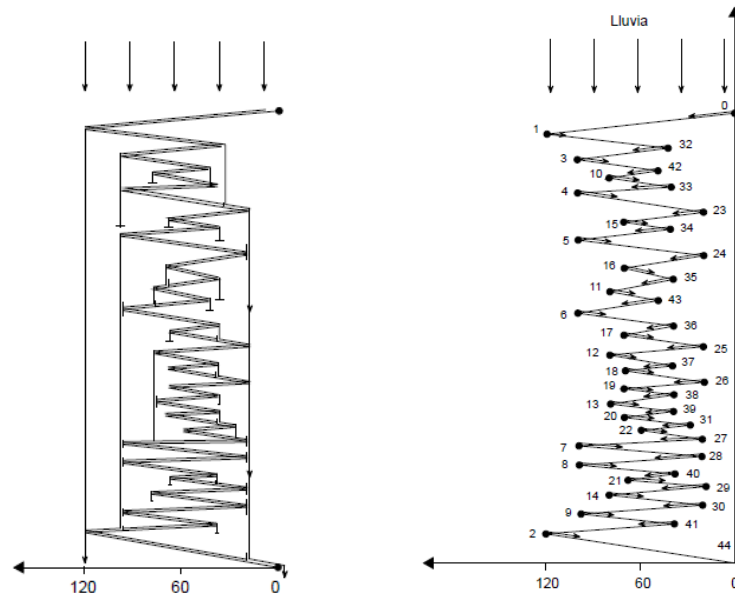


Figura N.- 33 método de la recogida de lluvia (Eurocódigo, 2010)

## 2.10. Método del diagrama de Superposición

Este método resume las cargas de fatiga presentando la magnitud de una ocurrencia frente al número de veces que se ha superado. Esta figura puede representar las tensiones causadas en un lugar en concreto en donde el número de superaciones aumenta a medida que el nivel de tensión disminuye. Con frecuencia este se asemeja a una línea tal como se muestra en la figura, utilizando la ley de Miner con el número de ciclos de cada nivel de tensión que se producen

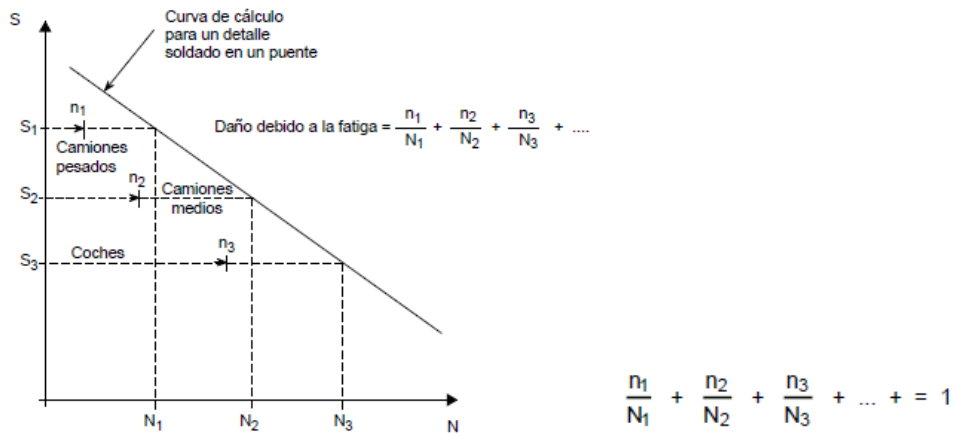


Figura N.- 34 Diagrama de Superposición (Eurocódigo, 2010)

## 2.11. Método de elemento finito computacional empleado

El método de simulación que utiliza el software por elementos finitos fue introducido por Turner,(Turner, 1956) es una poderosa herramienta computacional para aproximar soluciones a una variedad de problemas de ingeniería, teniendo dominios complejos sujetos a condiciones de frontera generales. Este método se ha posicionado como un medio fundamental en la modelación de fenómenos físicos en varias ramas de la ingeniería, el campo de variables varía de un punto a otro formando así un número infinito de soluciones en su dominio.

El método se basa en la descomposición del dominio en un número finito de subdominios (elementos), para expresar la variable desconocida en términos de las funciones de aproximación asumidas dentro de cada elemento. Estas funciones se definen en términos de los valores de las variables de campo en puntos específicos, llamados nodos, colocados a lo largo de las fronteras de los elementos y que conectan con elementos adyacentes (Madenci, 2006).

Este método utiliza una modelación de la estructura empleando pequeños elementos interconectados llamados elementos finitos.

Se asigna una función de desplazamiento a cada elemento, ligados entre sí a través de interfaces comunes, nodos o bordes. Al usar incógnitas de propiedades de materiales en donde se estudie el esfuerzo-deformación, se puede determinar el comportamiento de un nodo determinado en términos de las propiedades de cualquier otro elemento en la estructura.

Se forma una matriz total de ecuaciones que describe el comportamiento de cada nodo y cada elemento en una serie de ecuaciones algebraicas.

Se procede a aplicar al modelo computacional las diferentes cargas para analizar y encontrar momentos y esfuerzos máximos en el centro del claro del puente, en las traveses principales en flexión en su conexión inferior entre el patín inferior y el alma

### 3. Desarrollo de la investigación

#### 3.1 Descripción de la Estructura

El puente “La Concordia” se construye sobre el camino que se origina en el poblado Rizo de Oro; en dirección hacia la presa “Belisario Domínguez (La Angostura)” que conecta con el Poblado de Ignacio Zaragoza y el camino que conduce a los Poblados de Niños Héroes y La Concordia hacia la ciudad de Tuxtla Gutiérrez Chiapas y se encuentra a 200 km al sur de la capital chiapaneca.

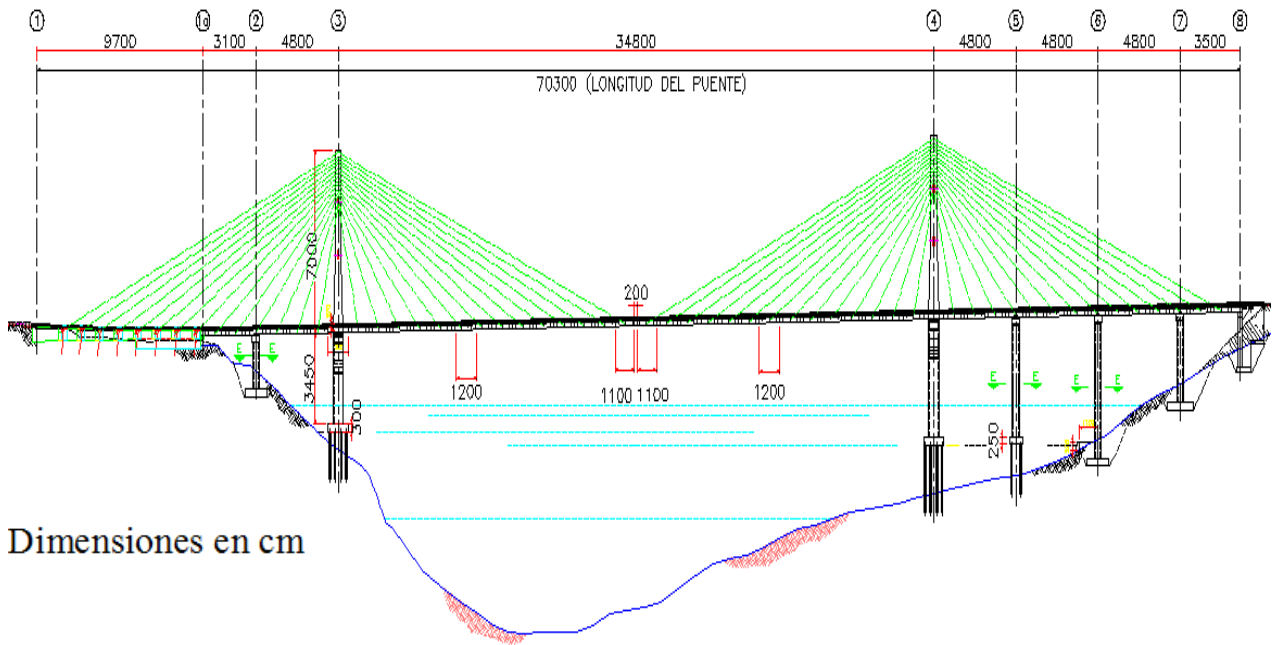


Figura N.- 35 Vista lateral Puente la Concordia

El sistema de atirantado de esta mega estructura, lo clasifica como tipo arpa, este puente pretende conectar esa vía con la frontera con Guatemala beneficiando a por lo menos un cuarto de la población del estado de Chiapas.

Esta mega estructura espera operar con un tráfico diario anual de más 13 mil vehículos al día, por carril, sus 703 metros de longitud total y su claro central de 348 metros lo ubicarían en tercer lugar en puentes atirantados en el país ya que existen dos estructuras que superan en longitud a la que está en construcción el puente “Baluarte” con 520 metros de longitud en su claro central el cual es considerado el puente atirantado más alto del mundo y el puente Tampico con una longitud central de 360 metros.

Su trazo en planta es recto, presenta una pendiente del 1.5 %, cada mástil tendrá 14 tirantes a cada lado del mismo el ancho de calzada será de 13.06 metros con pendiente transversal del 2% a cada lado

Adicionalmente el anclaje se encuentra 60 cm afuera de la calzada

Características geométricas del puente:

Longitud total del puente es de 703 metros

Claro central es de 343 metros

29 dovelas centrales

Consta de dos mástiles o pilones, de donde cuelgan 56 tirantes fijos y uno de repuesto separados 12 metros

Ancho total de 13.06 metros

Ancho de carril 3.50 metros

Acotamientos: 2 de 2 metros

Parapetos: 0.53 m

Terraplenes de accesos: 2 de 13 x 40 metros

### 3.1.1 La superestructura:

El puente será de tipo atirantado con dos mástiles o pilones centrales de concreto reforzado, de donde se tensan los cables de presfuerzo con diámetro variable promedio de 1219 x 16mm, contará con una pila adicional entre la pila 2 y 3 y entre el eje 4 y 8 contará con 3 pilas intermedias.

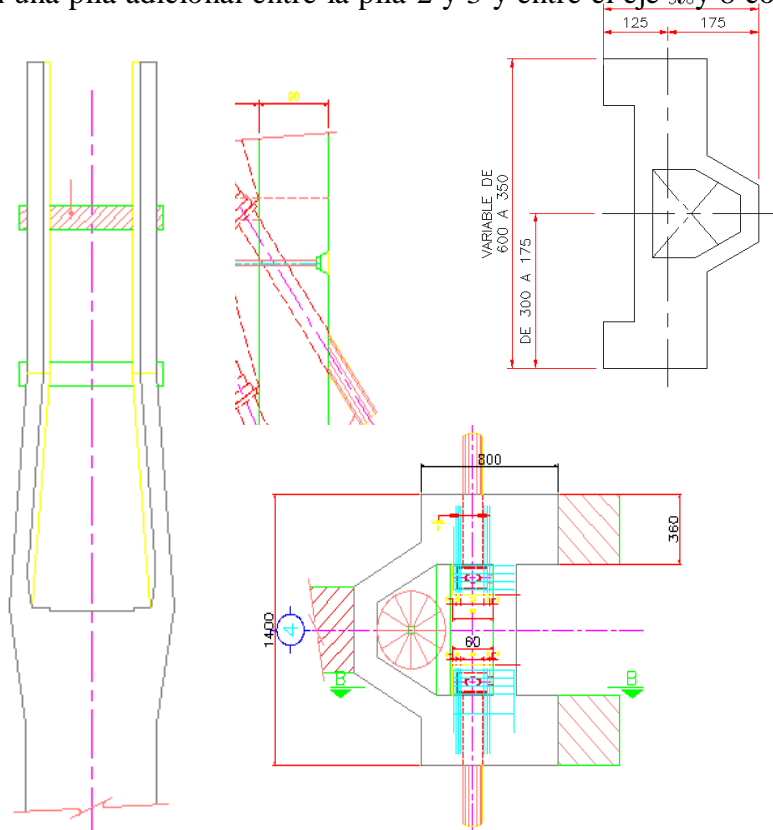
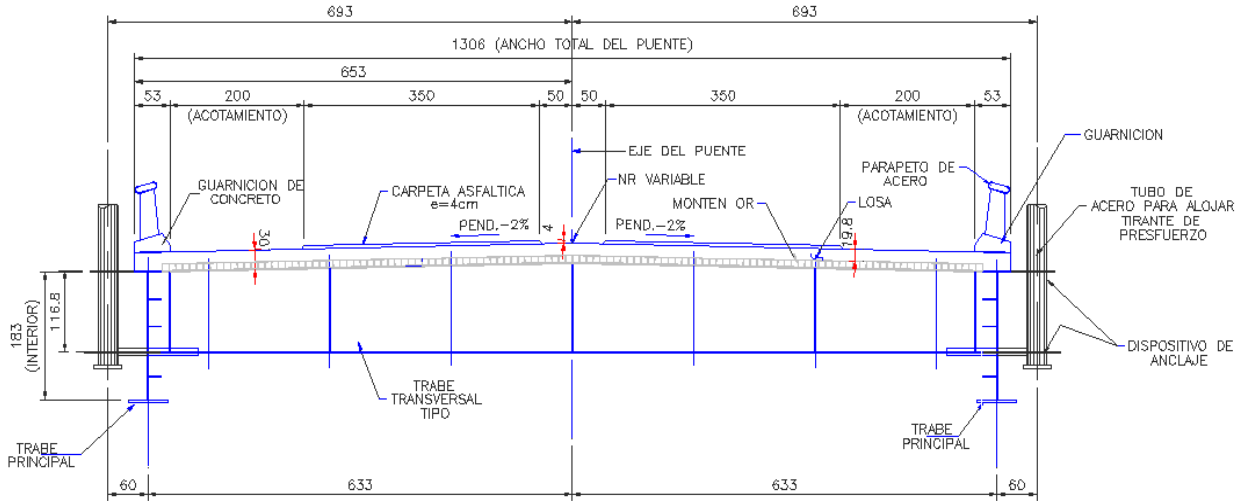
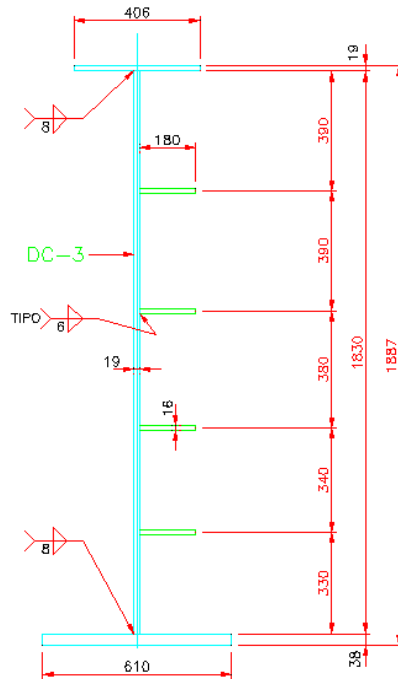


Figura N.- 36 Sistema de anclaje, planta pilas



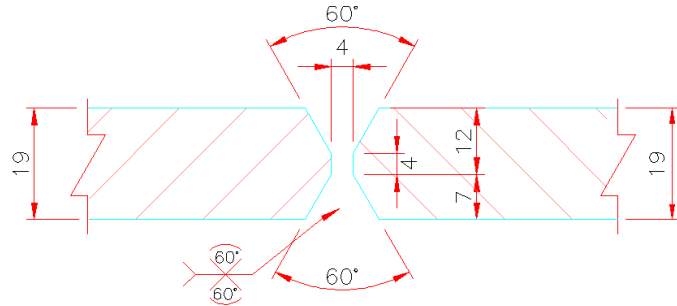
SECCION TRANSVERSAL TIPO  
 Figura N.- 37 Sección Transversal Dovela

La calzada estará soportada por una estructura mixta de concreto con traveses de acero de sección I variable de 1.83 de peralte mínimo con diafragmas a cada 4 metros con piezas puente transversales de sección variable 1.2 a 1.33 metros. La trabe principal en la dovela de cierre se indica en la figura 38. El puente estará formado por 51 dovelas sobre la estructura de acero se colocara una losa de 20 cm de peralte de concreto y sobre esta una capa de rodadura de 4 cm de asfalto.

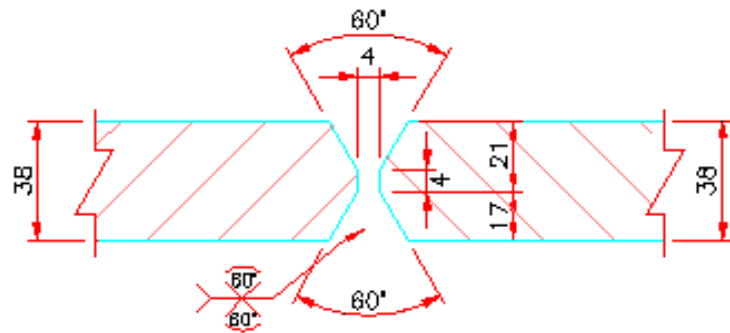


TRABE PRINCIPAL

Figura N.- 38 Sección Transversal Trabe



SOLDADURA EN ALMAS DEL MISMO ESPESOR



SOLDADURA EN PATINES DEL MISMO ESPESOR

Figura N.- 39 Detalle soldadura



Fotografía N.- 1 Dovela metálica



### 3.1.2 Subestructura:

En cuanto a la cimentación las pilas principales estarán estructuradas con 36 pilotes cada una y las dos pilas centrales con su respectivo pilón en sección variable, una zapata de 3 m de ancho y la altura de la pila a la zapata de la estructura será de 34.5 en el apoyo 3 y 47.5 metros en el apoyo 4

Las 4 pilas intermedias tendrán sección constante como se indica en la figura 16.

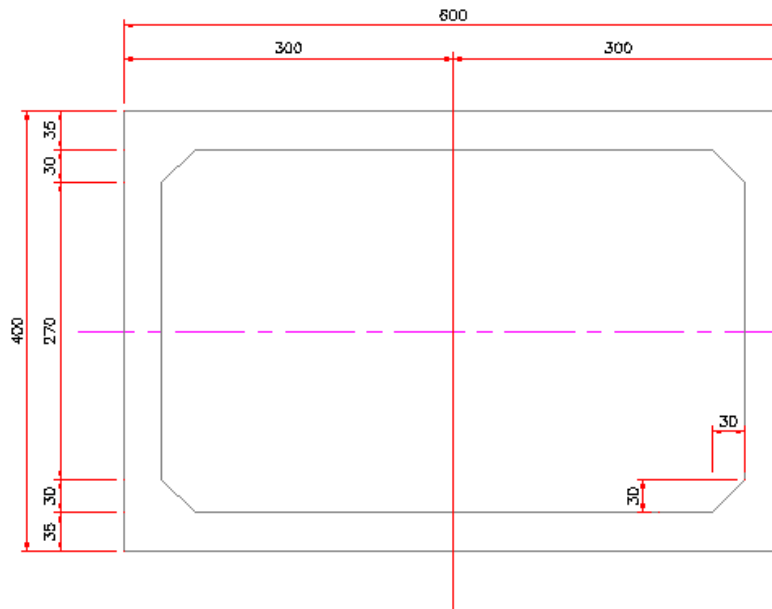
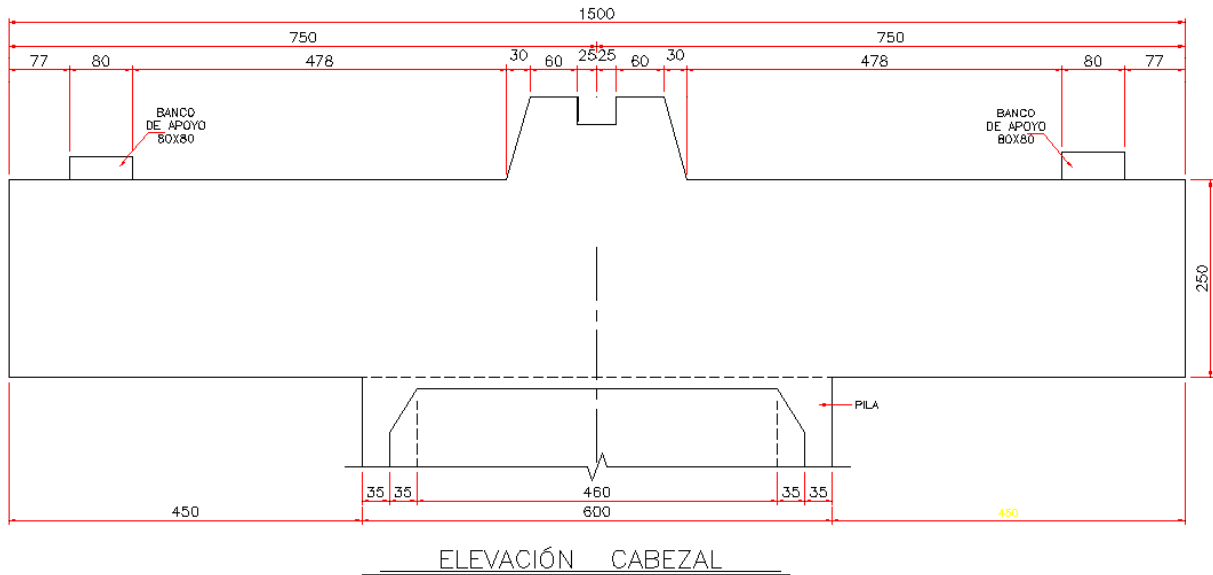


Figura N.- 40 Planta pila Vista Lateral Cabezal

Sobre cada pila se asienta un cabezal de (2.5 x 4.5 x 15) metros como el que se indica en la figura 40 en donde se asientan las traves principales del puente.

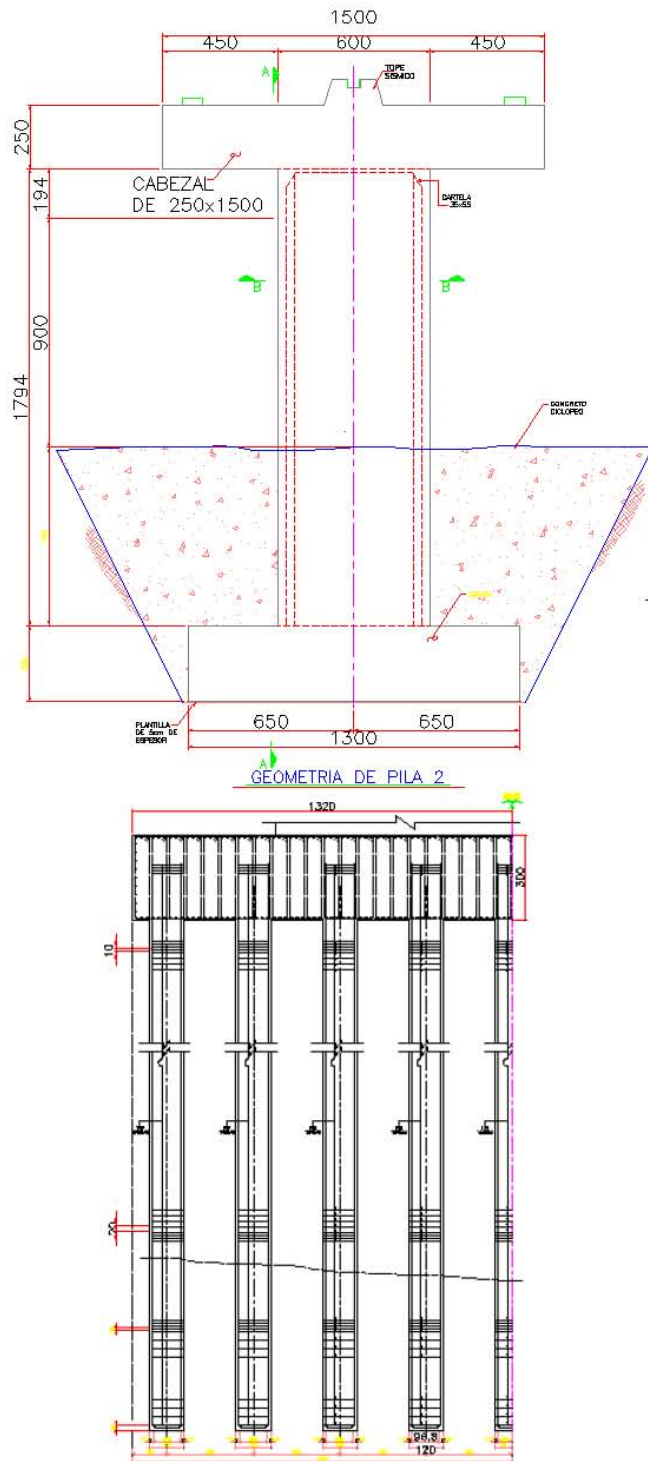


Figura N.- 41 cimentacion pilas pilotes

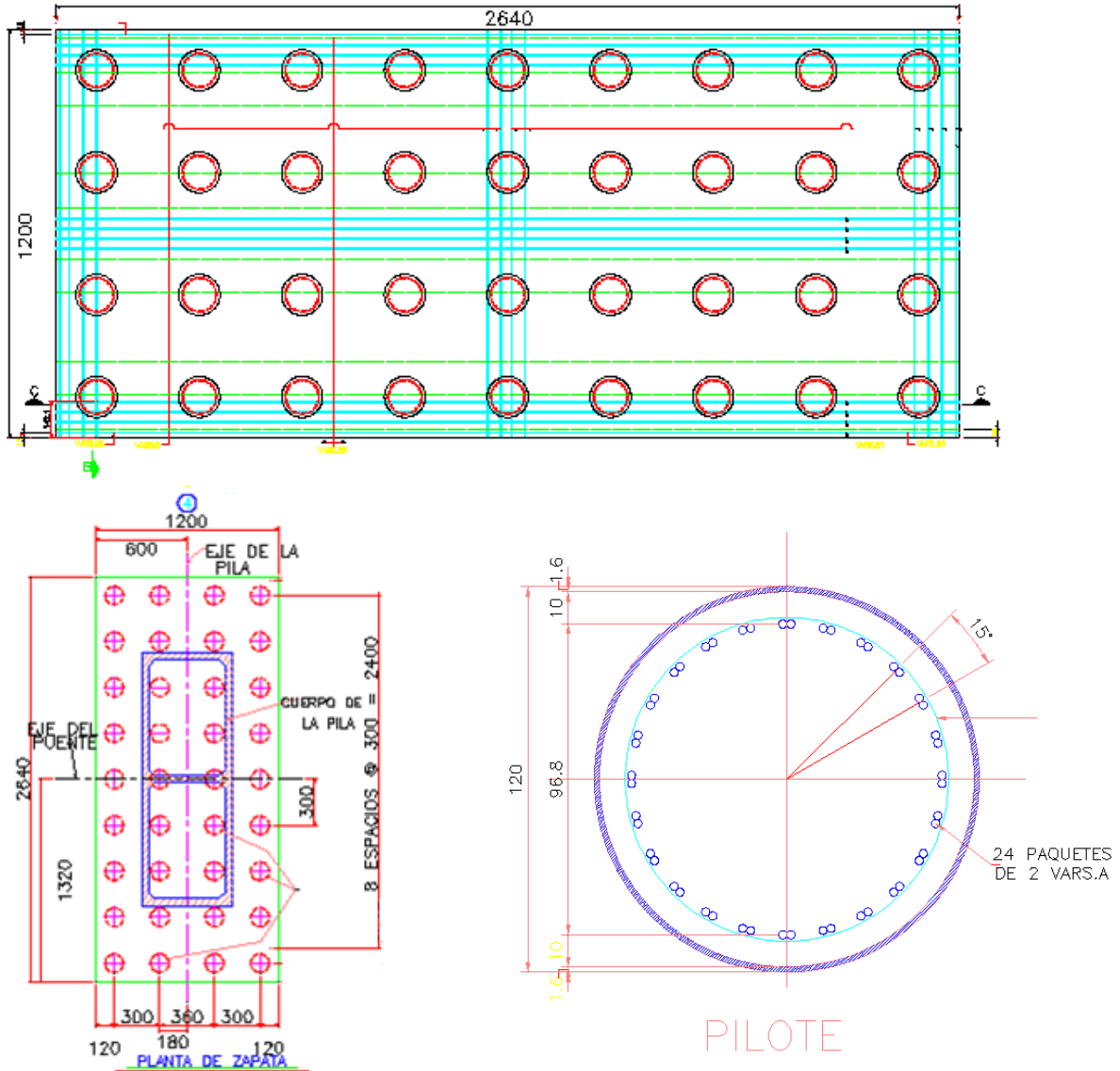


Figura N.- 42 cimentación Puentes la Concordia

La distribución de los pilotes es simétrica dejando tres metros entre eje y eje de cada pilote como se indica en la figura 42. Cada pilote tendrá 24 varillas del número 8.



Fotografía N.- 2 Armado de Pilas puente Concordia 2016

### 3.1.3 Ubicación del Puente:

Sus coordenadas geográficas:

	comienzo del puente	final del puente
latitud norte	92 °35'22''	92 °35' 30''
longitud oeste	16 °06' 45''	16 °07'07''

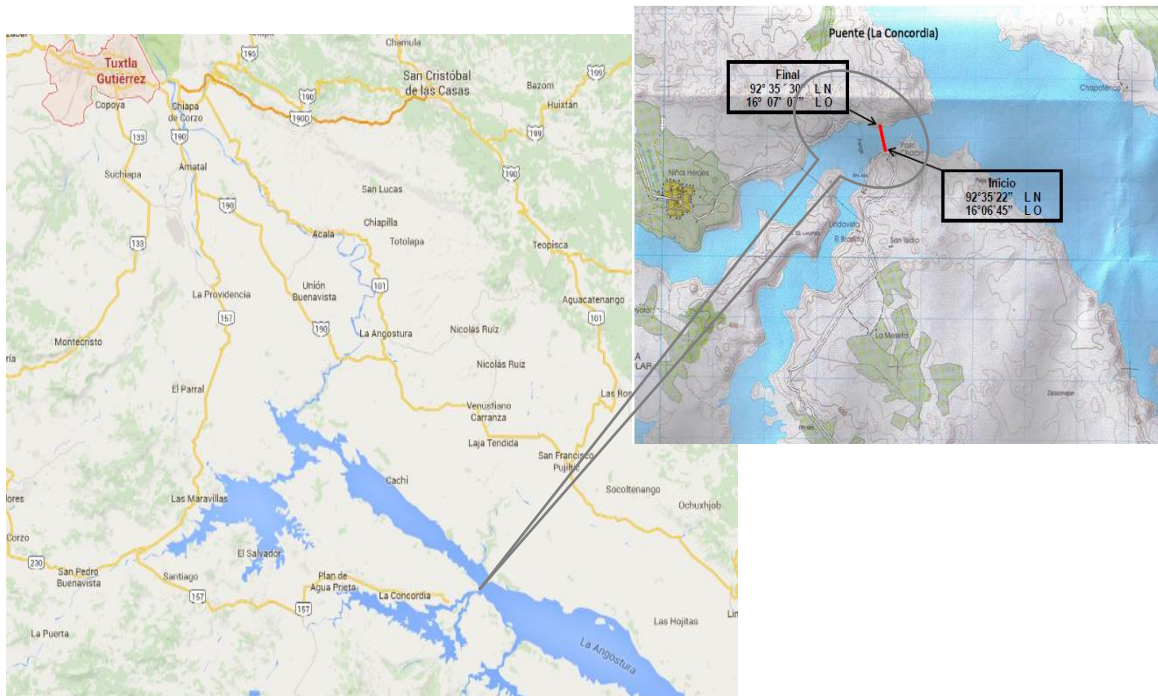


Figura N.- 43 UBICACIÓN

### 3.1.4 Materiales

Todos los materiales que formen parte integral de la obra, deberán cumplir con las siguientes especificaciones:

- Acero de refuerzo para concreto hidráulico N-CTM-2-03-001  
Tipo A,B, y C corrugado de grado duro con  $F_y = 4200 \text{ kg/cm}^2$  y  $F_u = 6000 \text{ kg/cm}^2$  con alargamiento medido e 20 cm o 8% como mínimo
- Acero estructural N-CTM-2-03-003
- Acero de presfuerzo N-CTM-2-03-002
- Soldadura al Arco Eléctrico N-CTM-2-04-001
- Estructuras de concreto reforzado N-CTR-CAR-1-02-006
- Estructuras de concreto presforzado N-CTR-CAR-1-02-007
- Concreto hidráulico N-CTR-CAR-1-02-003
- Calidad del cemento tipo portland - N-CTM-2-02-001/02  
(tipo I, II, III, IV)
- Calidad de agregados pétreos Para concreto hidráulico N-CTM-2-02-002/02
- Calidad de Agua para concreto hidráulico N-CTM-2-02-003/02
- Acero para concreto hidráulico N-CTR-CAR-1-02-004

#### 3.1.4.1 Concreto

Se empleara concreto cuya compactad no será menor de 0.80 con revenimiento de 5 a 10 cm y agregado grueso de tamaño máximo 19mm.

Ubicación	Resistencia	Módulo de Elasticidad
Pilas	$F'_c=250 \text{ kg/cm}^2$	$E=221359 \text{ kg/cm}^2$
Pilotes	$F'_c=300 \text{ kg/cm}^2$	$E=242487 \text{ kg/cm}^2$
Losa	$F'_c=250 \text{ kg/cm}^2$	$E=221359 \text{ kg/cm}^2$
Zapatas	$F'_c=250 \text{ kg/cm}^2$	$E=221359 \text{ kg/cm}^2$
Cabezal	$F'_c=250 \text{ kg/cm}^2$	$E=221359 \text{ kg/cm}^2$
Pilones	$F'_c=400 \text{ kg/cm}^2$	$E=280000 \text{ kg/cm}^2$

Tabla N.- 8 Especificaciones Concreto

### 3.1.4.2 Acero de refuerzo

Ubicación	Resistencia	Módulo de Elasticidad
Pilas	$F_y=4200\text{kg/cm}^2$	$E=2038900\text{ kg/cm}^2$
Pilotes	$F_y=4200\text{kg/cm}^2$	$E=2038900\text{ kg/cm}^2$
Losa	$F_y=4200\text{kg/cm}^2$	$E=2038900\text{ kg/cm}^2$
Zapatas	$F_y=4200\text{kg/cm}^2$	$E=2038900\text{ kg/cm}^2$
Cabezal	$F_y=4200\text{kg/cm}^2$	$E=2038900\text{ kg/cm}^2$
Pilones	$F_y=4200\text{kg/cm}^2$	$E=2038900\text{ kg/cm}^2$

*Tabla N.- 9 Especificaciones Acero de refuerzo*

### 3.1.4.3 Acero estructural

Ubicación/tipo	Resistencia	Módulo de Elasticidad
Superestructura/A50	$F_y=3518\text{kg/cm}^2$	$E=2038900\text{ kg/cm}^2$
Superestructura/A36	$F_y=2530\text{kg/cm}^2$	$E=2038900\text{ kg/cm}^2$

*Tabla N.- 10 Especificaciones Acero Estructural*

### 3.1.4.4 Acero de presfuerzo en cables de baja relajación

Los torones están diseñados para comportarse elásticamente mientras transmiten o soportan cargas axiales, formados al enrollar helicoidalmente 6 alambres alrededor de un núcleo, el cual es capaz de soportar esfuerzos de tensión que tienden a enderezar a los deformados de lo cual resultan esfuerzos de torsión y compresión entre ellos.

Los alambres cumplen con la norma ASTM A 1007 del American Society for Testing Materials sus propiedades dependen básicamente de su composición química, microestructura, nivel de inclusiones, tamaño de grano entre otras, son de sección circular con un diámetro de 4mm en acero de alto carbono y de alta resistencia debido al perfilado y

un tratamiento térmico posterior. Para el control de calidad de los alambres estos son sometidos a ensayos de tensión, torsión, adherencia del recubrimiento, uniformidad etc..

La composición química requerida se fija de acuerdo a la norma A 648-94, y se resume en la siguiente tabla

*Tabla N.- 11 Requerimientos químicos Acero Presfuerzo (ASTM, A 648-94)*

Elemento Químico	Contenido en %
Carbono	0.5-0.85
Magnesio	0.5-1.1
Fosforo	0.03
Azufre	0.035
Silicio	0.1-0.35

La resistencia a la rotura se especifica mediante una prueba de control de calidad, esta prueba de tensión en un dispositivo donde se mide la resistencia a la ruptura del alambre con recubrimiento y sin recubrimiento. La norma ASTM A 416 (ASTM, A 416,2010) nos indica la siguiente tabla

*Tabla N.- 12 Requisitos de resistencia a la rotura (ASTM, A416)*

Torón #	Diámetro del torón (mm)	Resistencia a la rotura mínima (KN)	Área de acero del Torón (mm <sup>2</sup> )	Peso del torón (kg/100m)
9	9.53	102.3	54.8	432
11	11.11	137.9	74.2	582
13	12.70	183.7	98.7	775
13 <sup>a</sup>	13.20	200.2	107.7	844
14	14.29	230.0	123.9	970
15	15.24	260.7	140.0	1102
18	17.78	353.2	189.7	1487

La Resistencia a la fatiga se define como la capacidad de un torón para soportar el daño acumulado por ciclos de carga en donde los esfuerzos inducidos son menores al esfuerzo de fluencia. Las normas especifican el rango de esfuerzos con relación al número de ciclos de carga que el torón debe resistir en un control de calidad. Los rangos de esfuerzos para fatiga recomendados por el PTI son:

*Tabla N.- 13 Resistencia a la fatiga de torones (PTI Guide Specification)*

Tipo de elemento	Número de ciclos	Rango de esfuerzos de fatiga (MPA)
torón	$2 \cdot 10^6$	213
	$2 \cdot 10^6$	288
	$1 \cdot 10^5$	302
	$1 \cdot 10^5$	443

*Tabla N.- 14 Resistencia a la fatiga de torones (PTI Guide Specification)*

tipo	Resistencia	Módulo de Elasticidad
Cables	$F_y = 19000 \text{ kg/cm}^2$	$E = 2038900 \text{ kg/cm}^2$

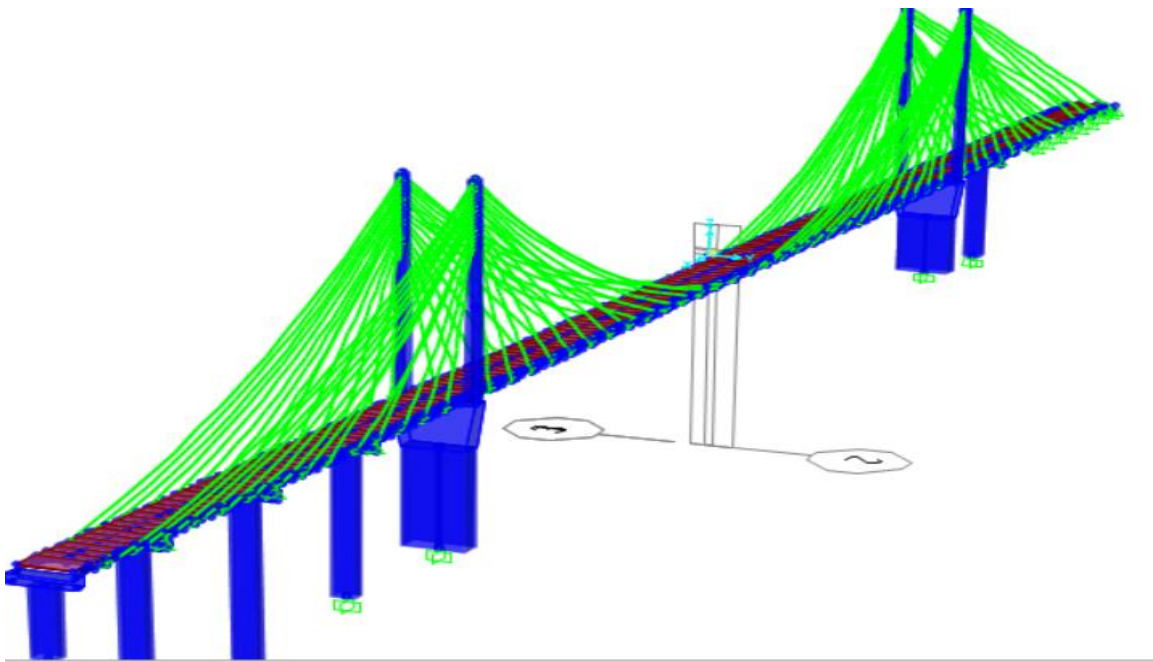


## 4. Descripción del modelo matemático

### 4.1 Introducción

El modelo matemático se elaboró con elementos finitos mediante el software Csi Bridge 2015. Para modelar las traveses principales, las piezas puente, contraventeos, y los elementos que forman la armadura en la dovela metálica se usaron elementos barra, y para los tirantes el elemento especial, tipo cable, las losas se modelaron con el elemento cascarón sobre los que se aplicarán carga muerta de parapetos, montenes y de carga viva máxima. Se consideró en el modelo la geometría y materiales especificados en los planos del proyecto.

La superestructura formada por 7 claros, uno de 31m, cuatro claros de 48m. uno de 35m, y un claro principal de 348m cuenta con una losa de concreto de 20cm de espesor sobre dos traveses principales de acero, con un ancho total de puente de 13.06m y un ancho de calzada de 12m, con carpeta asfáltica de 4cm de espesor, con carga móvil en dos carriles de circulación.



*Figura N.- 44 Vista 3D modelo Computacional del puente “La Concordia”*

El Software Csi Bridge 2015 es un programa creado por la compañía Computers and Structures este software para análisis estructural que permite realizar análisis tiempo-historia. El programa facilita la simulación de todos los elementos estructurales que forman el puente así como sus condiciones de frontera para los análisis, mediante su aplicación SECTION DESIGNER nos permite modelar cualquier sección irregular como pilas o pilones como se indica en la figura 45.

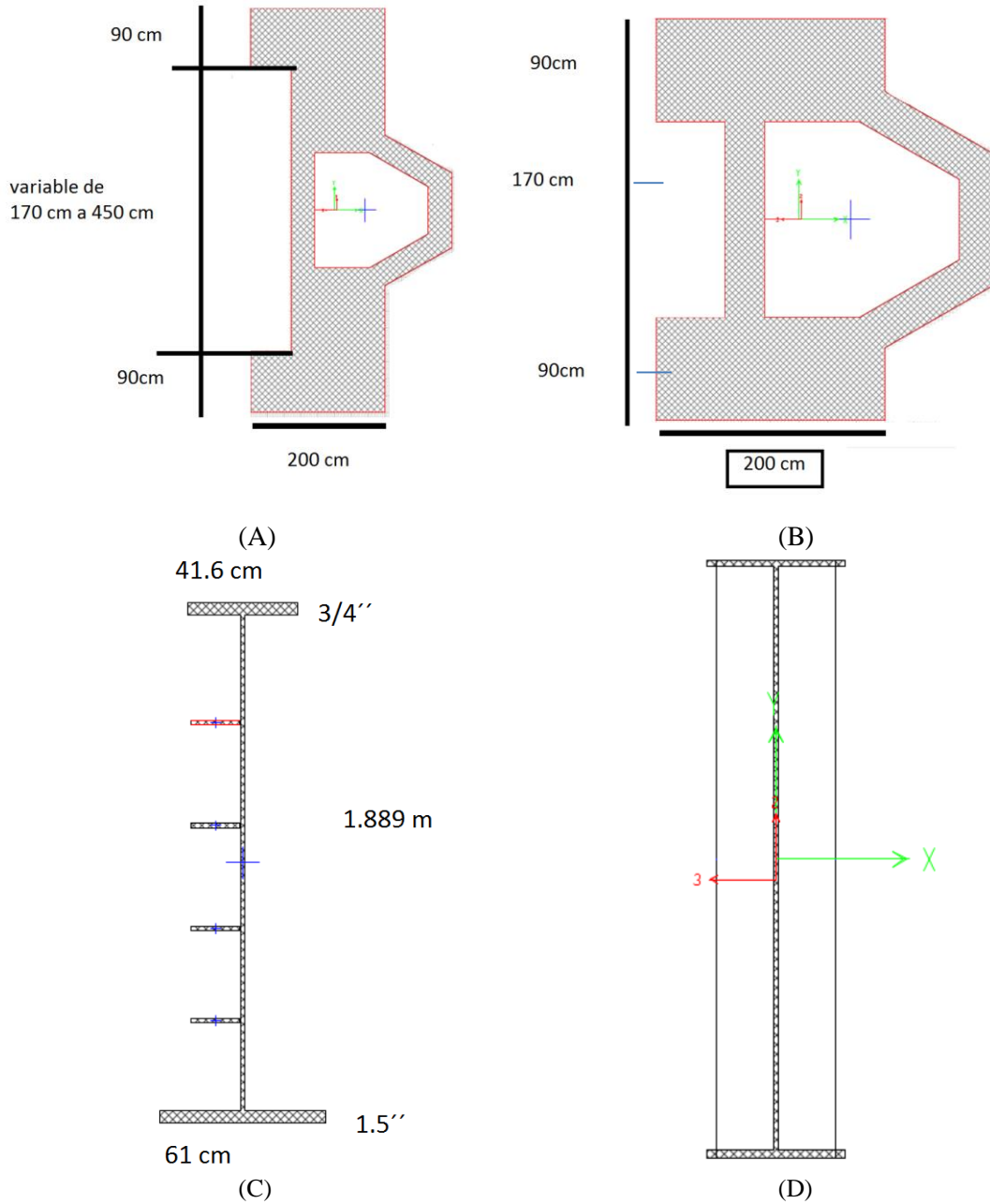
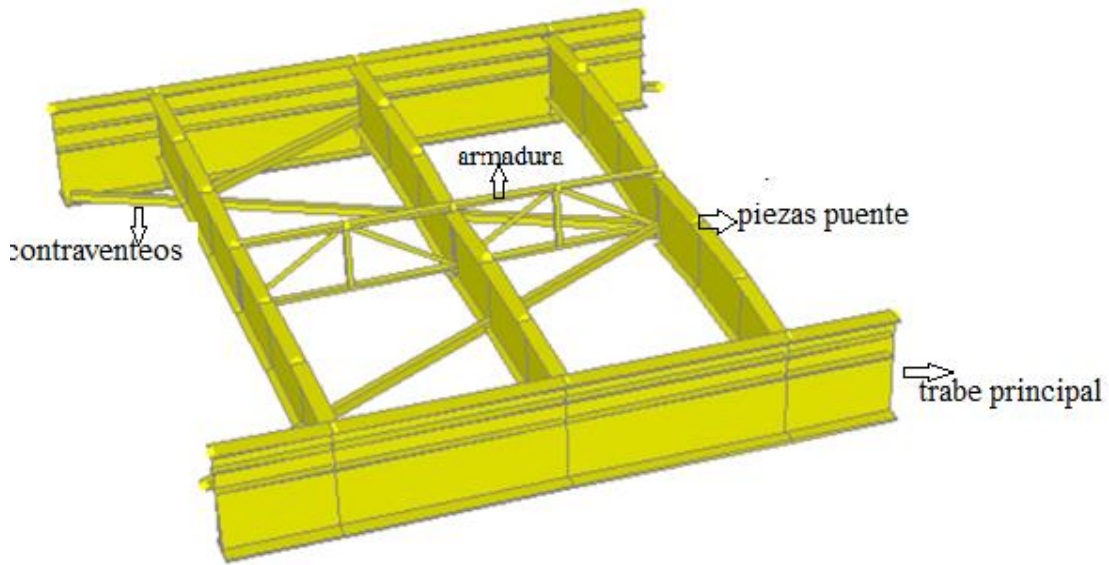


Figura N.- 45 Elementos estructurales Modelo Computacional



(C)

Figura N.- 46 dovela metálica modelo Computacional

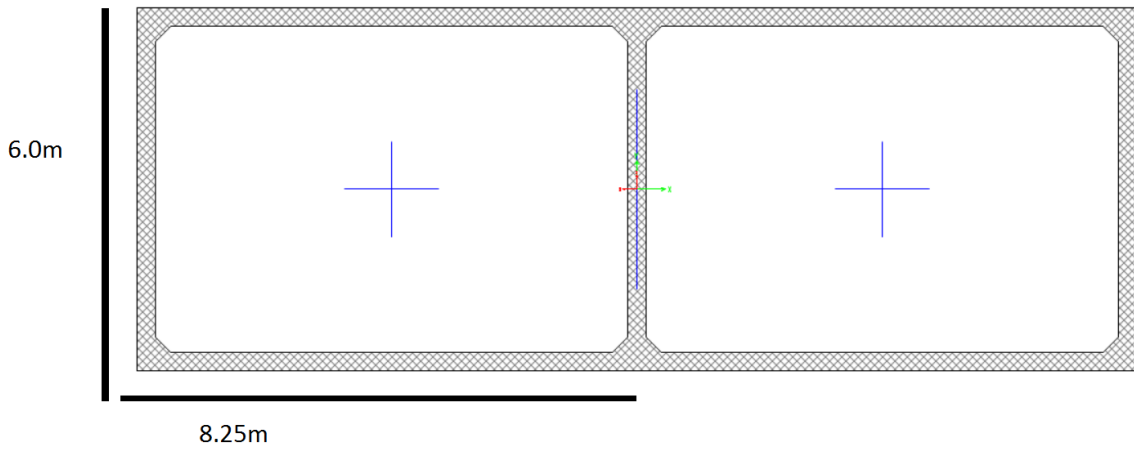
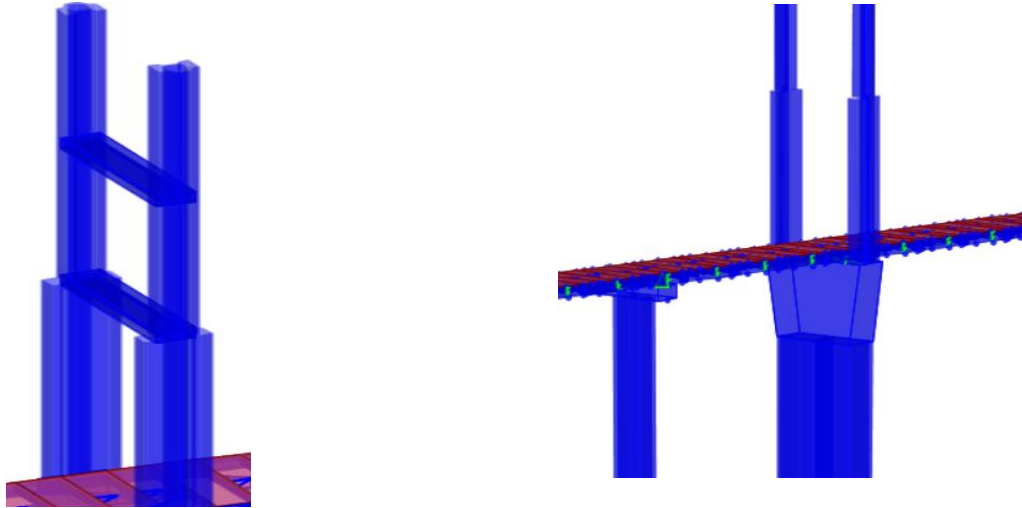
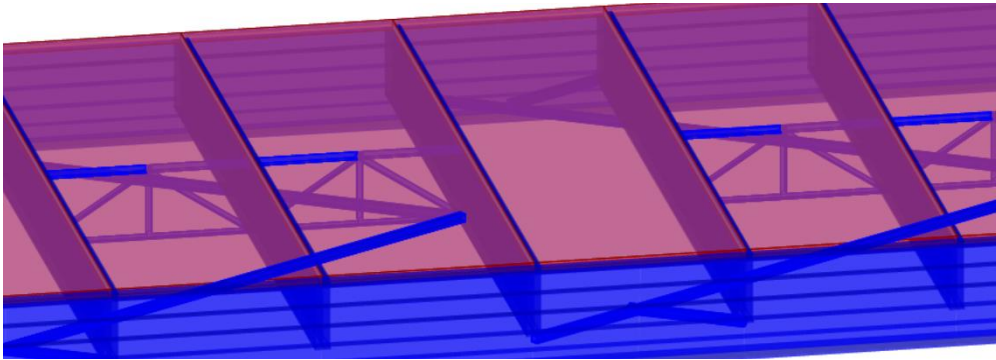


Figura N.- 47 A Secciones Pilas 2 y 3 modelo Computacional

El modelo matemático se utiliza para encontrar las zonas críticas en las conexiones y la obtención de los esfuerzos generados por cada camión por separado para generar el histograma de tensiones y así poder estimar la vida de la conexión ante fatiga.



*Figura N.- 48 Pilones modelo Computacional*



*Figura N.- 49 Vista Planta Tablero*

## 4.2 Descripción de los análisis

Luego de modelar todos los elementos se procede a realizar los siguientes análisis:

### 4.2.1 Análisis estático de Carga muerta

Se realizó un despiece de las 22 dovelas tipo del puente para estimar su peso como se indica en la tabla 15, si bien la carga muerta no fatiga la estructura es importante recuperar la matriz de rigidez de un modelo representativo del puente para comenzar con los análisis dinámicos. Para realizar los análisis (dinámicos y estáticos) ante carga vehicular se supone que el puente está en un estado de carga debido a peso propio y tensiones en los tirantes. Por lo tanto el análisis ante carga vehicular se precede de un análisis estático no lineal ante peso propio y tensiones objetivo de tal forma que el tablero del puente cumpla con la rasante del proyecto. Las tablas de despiece de cada dovela se encuentran en el anexo 1.

Tabla N.- 15 Comparativa Pesos Calculados y pesos

Dovela número	Peso calculado kg	Peso en plano kg	Diferencial kg	Error
dovela 6 izq pila 3	26652.94301	26538	114.9430108	0.00433126
dovela 5 izq pila 3	26716.56367	26538	178.5636719	0.0067286
dovela 4 izq pila 3	29027.37759	28873	154.3775918	0.00534678
dovela 2 y 3 izq pila 3	27870.12463	27755	115.1246329	0.00414789
dovela 1 izq pila 3	28993.82827	28842	151.8282719	0.00526414
dovela 1 eje 3 y 4	28993.82827	28842	151.8282719	0.00526414
dovela 2 a 4 eje 3 y 4	27092.94511	26979	113.9451129	0.00422347
dovela 5 a 7 eje 3 y 4	25856.67631	25762	94.67631289	0.00367504
dovela 8 a 13 eje 3 y 4	24412.61551	24302	110.6155129	0.0045517
dovela 14 eje 3 y 4	22810.7448	22615	195.7448009	0.00865553
dovela de pila eje 3 y 4	36357.11788	35643	714.1178783	0.02003529
dovela 1 der pila 4	28993.82827	28842	151.8282719	0.00526414
dovela 2 y 3 der pila 4	27870.12463	27755	115.1246329	0.00414789
dovela 4 der pila 4	29027.37759	28873	154.3775918	0.00534678
dovela 5 a 7 der pila 4	26652.94301	26538	114.9430108	0.00433126
dovela 8 der pila 4	26451.17011	26305	146.1701141	0.00555674
dovela 9 a 11 der pila 4	25276.46141	25211	65.46141077	0.00259654
dovela 12 derecha pila 4	26451.17011	26305	146.1701141	0.00555674
dovela 13 derecha pila 4	25276.46141	25211	65.46141077	0.00259654
dovela 14 derecha pila 4	25245.20895	25251	-5.79105135	0.00022934
dovela de cierre	12019.26892	12385	-365.73108	0.02953016
dovela de estribo	16060.00979	18307	-2246.99021	-0.1227394
sumatorias		573672	436.789283	0.04487842

#### 4.2.2 Análisis de líneas de influencia

Mediante líneas de influencia se ubica al camión tipo AASHTO a lo largo del puente y a lo ancho de su carril para, calcular zonas de esfuerzos máximos, en el centro del claro principal en su dovela de cierre que tiene la sección más desfavorable

#### 4.2.3 Análisis dinámico carga viva

Se realizó un primer análisis tiempo-historia de carga viva con un camión de diseño de la normativa AASHTO que tiene una carga de 145 KN en los ejes traseros y 35 KN en el eje delantero, pero con separación posterior constante de 9000 mm como se indica en la figura 50..

La frecuencia de la carga de fatiga se toma como el tráfico medio diario de camiones en un único carril (TPDA). Esta frecuencia se deberá aplicar a todos los componentes del puente

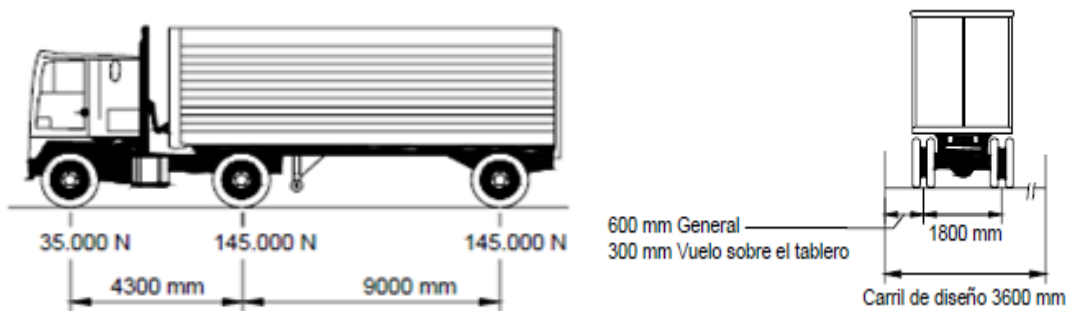


Figura N.- 50 Camión de fatiga AASHTO

Se simulará las conexiones entre las traves principales y las piezas puente para estimar la vida de estas ante fatiga.

Se realizó un segundo análisis con el Eurocódigo (Eurocódigo, 2010) con cada uno de los vehículos del aforo vehicular más cercano al sitio de construcción del puente según la Norma Mexicana SCT; cada camión induce un esfuerzo efectivo diferente sobre la estructura.

Se realizó un tercer análisis con los diferentes tipos de vehículos de acuerdo a la clasificación vehicular del aforo con sus pesos aumentados un 50 % en vehículos de carga ya que en el país se ha demostrado que los camiones exceden los reglamentos en un 40 – 60%.

(Garcia, 2010)

#### 4.2.4 Análisis del Aforo Vehicular

Como el puente “Concordia” se encuentra en construcción fue considerado un escenario de carga en base al aforo vehicular de la caseta más cercana de la SCT, considerando además variables como:

#### 4.2.5 Condiciones de Carga

Se identificaron 3 condiciones en los vehículos:

- Vehículos Vacíos
- Vehículos Regulares (peso regulado)
- Vehículos Sobrecargados (50% sobrecarga)

#### 4.2.6 Clasificación Vehicular

El total de vehículos registrados en la caseta de la SCT es de 15709 clasificándolos en los siguientes grupos: M, A, B2, B3 C2, C3, T3-S3 y T3-S2-R4 clasificándolos así:

Tabla N.- 16 TPDA ESTACION TUXTLA

Tpda	M	A	Ar	B	C2	C3	C5	C6	C9
15709	2.6	88.6	91.2	0.3	3.2	0.5	1.8	1.5	1.3
13265	1.8	88.6	90.4	0.2	3.8	0.2	1.5	2.8	1.1

36 CARR: Libramiento Sur de Tuxtla Gutiérrez

CLAVE: 07578

RUTA: CHIS

AÑO: 2015

L U G A R	E S T A C I O N			C L A S I F I C A C I O N V E H I C U L A R E N P O R C I E N T O													C O O R D E N A D A			
	KM	TE	SC TDPA	M	A	B	C2	C3	T3S2	T3S3	T3S2R4	OTROS	A	B	C	K	D	LATITUD	LONGITUD	
T. C. Tapanatepec - Tuxtla Gutiérrez	0.00	3	1	13265	1.8	88.6	0.2	3.8	0.2	1.5	2.8	0.4	0.7	90.4	0.2	9.4	0.053	0.530	16.751639	-93.141639
T. C. Tapanatepec - Tuxtla Gutiérrez	0.00	3	2	14963	2.1	87.4	0.2	4.1	0.2	1.7	3.1	0.4	0.8	89.5	0.2	10.3	0.061	0.530	16.751611	-93.141778
T. C. Tuxtla Gutiérrez - Cd. Cuauhtémoc	9.20	1	1	14152	2.5	89.6	0.3	2.9	0.5	1.7	1.4	0.3	0.8	92.1	0.3	7.6	0.079	0.526	16.741417	-93.078111
T. C. Tuxtla Gutiérrez - Cd. Cuauhtémoc	9.20	1	2	15709	2.6	88.8	0.3	3.2	0.5	1.8	1.5	0.3	1.0	91.4	0.3	8.3	0.085	0.526	16.741250	-93.078050

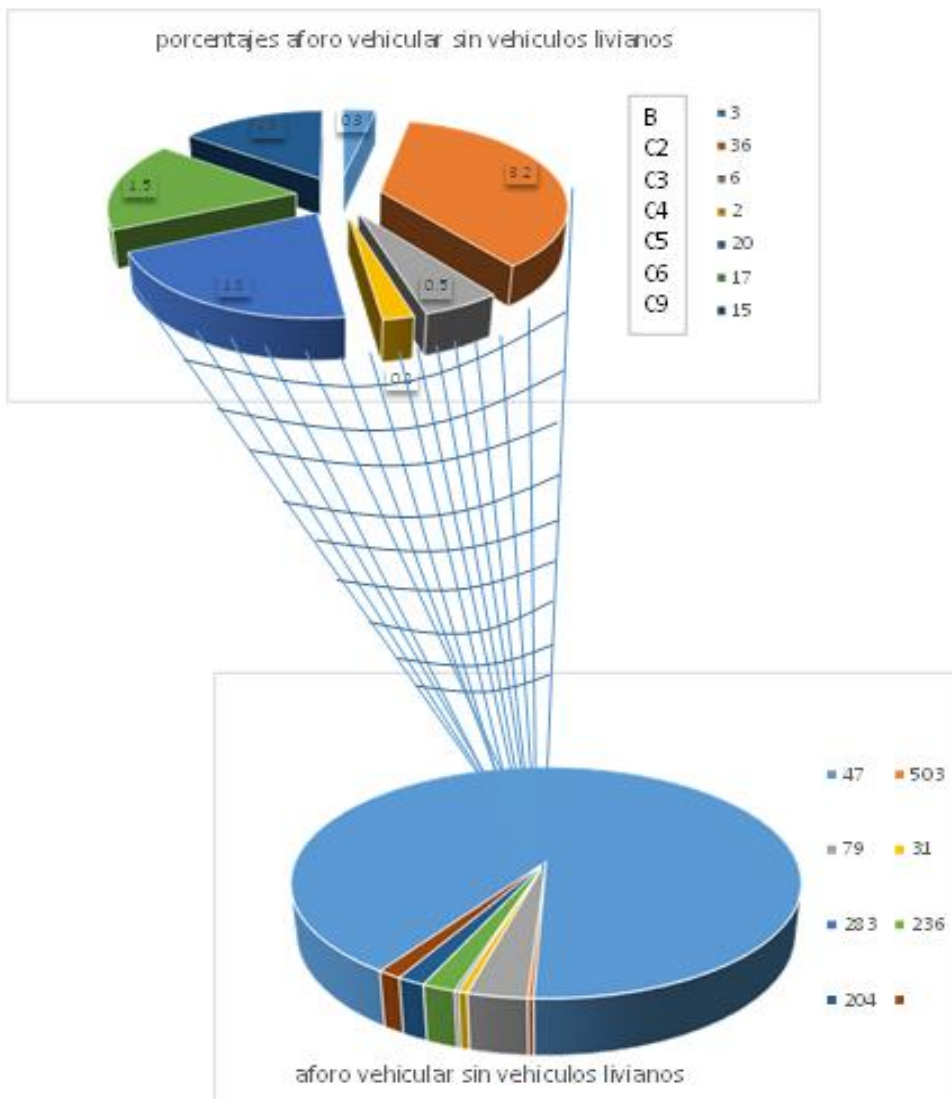


Figura N.- 51 Distribución TPDA










#### 4.2.7 Peso total Vehicular

De acuerdo a las condiciones de carga y al promedio presentado entre los automotores livianos en un conteo en una caseta de cobro, la condición para los vehículos vacíos se muestra en la siguiente tabla:

*Tabla N.- 17 Peso total Vehicular de vehículos vacíos*

Vehículos	Peso (ton)
Ligeros	3
B2	19
B3	27.5
C2	19
C3	27.5
T3-S2	46.5
T3-S3	54
T3-S2-R4	75.5*1.5=113.5

*Tabla N.- 18 Pesos individuales admisibles*

Nomenclatura	Configuración del vehículo	Numero de ejes	Peso bruto vehicular/ largo total				
			Et y A+	Et y A	B	C	D
B2		2	19.0 t	17.5t	16.5t	14.5t	13.0 t
			14.0m	14.0m	14.0m	14.0m	14.0m
B3		3	27.5 t	24.5t	23.0t	20.0t	18.5t
			14.0m	14.0m	14.0m	14.0m	14.0m
C2		2	19.0 t	17.5t	16.5t	14.5t	13.0t
			14.0m	14.0m	14.0m	14.0m	14.0m
C3		3	27.5 t	24.5t	23.0t	20.0t	18.5t
			14.0m	14.0m	14.0m	14.0m	14.0m
T3-S2		5	46.5t	41.5t	38.0t	33.5t	n/a
			23.0m	23.0m	20.8m	18.5m	n/a
T3-S3		6	54.0t	48.0t	45.5t	40.0t	n/a
			23.0m	23.0m	20.8m	18.5m	n/a
T3-S2-R4		9	75.5t	66.5t	66.0t	n/a	n/a
			31.0m	31.0m	28.5m	n/a	n/a

El número de ejes en los vehículos fue determinado con base en la Norma Oficial Mexicana NOM-012-SCT-2-2008, (SCT, 2008), del aforo se determinaron los pesos por cada eje de los diferentes vehículos y su porcentaje del peso total de cada uno de sus ejes.

Tabla N.- 19 Distribución Peso total Vehicular de vehículos

Porcentajes de peso Total vehicular (%)									
Tipo de vehículo	Eje 1	Eje 2	Eje 3	Eje 4	Eje 5	Eje 6	Eje 7	Eje 8	Eje 9
B2	50	50							
C2	40	60							
B3	25	37.5	37.5						
C3	25	37.5	37.5						
T3-S2	15	21.25	21.25	21.25	21.25				
T3-S3	12	20	20	16	16	16			
T3-S2-R4	8	11.5	11.5	11.5	11.5	11.5	11.5	11.5	11.5

#### 4.2.8 Crecimiento tráfico promedio vehicular

La tasa anual de crecimiento vehicular en México oscila en un 3% se realizaron 2 simulaciones extras con 4 % y un 5 % de incremento en el trafico promedio diario. En la tabla 20 se muestra que el puente puede llegar a saturarse a los 15 años de funcionamiento con 20000 vehiculos.

Tabla N.- 20 Proyecciones TPDA

TPDA	Año	Índice de Crecimiento	TPDA
13265	2017	3%	13265
	2019	3%	14072
	2022	3%	15377
	2027	3%	17827
	2032	3%	20000

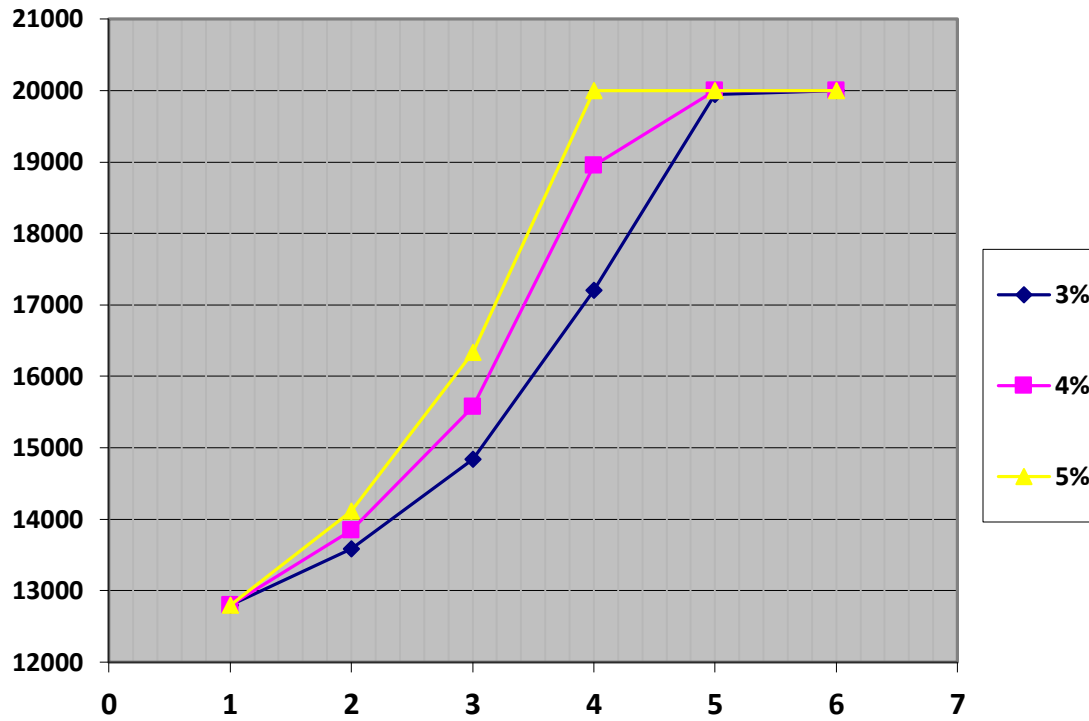


Figura N.- 52 Proyecciones TPDA

[51]

El AASHTO indica que el Tráfico Promedio Diario Anual máximo que puede circular por un carril en una vía excede a 20000 vehículos es por eso que la curva anterior es asintótica en ese valor.

#### 4.2.9 Carga viva distribuida

Cuantificar los vectores de carga que actúan en un puente bajo el efecto del tránsito aleatorio de vehículos es una tarea compleja debido al gran número de ejes y separación entre estos, con la ayuda de un modelo matemático un conjunto de cargas discretas puede ser reducido a una carga uniformemente distribuida equivalente facilitando la obtención de los elementos mecánicos máximo con un nivel bastante preciso. Csagoly (Garcia, 2013) propuso un método en el que  $N$  cargas discretas con un peso total de  $W$  en una viga pueden ser reemplazadas por una carga uniformemente distribuida que proporciona el peso total con una longitud “ $Be$ ” o base equivalente

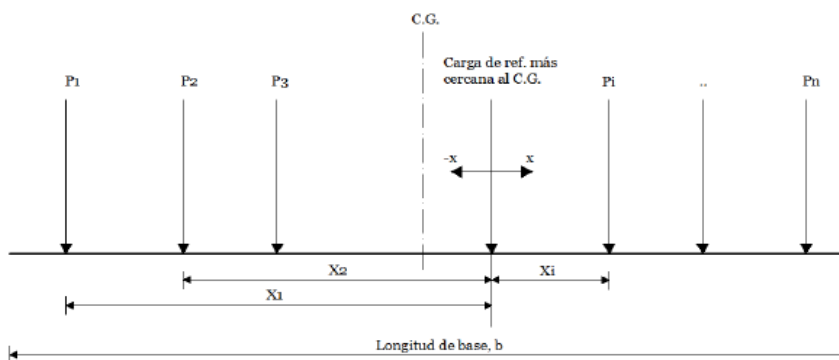


Figura N.- 53 Carga viva distribuida AASHTO

Donde N es el número de cargas

A pesar de utilizar el camión AASHTO para la generación de los escenarios de carga de manera aleatoria se analiza cada clase de vehículo según una estimación con la caseta de cobro más cercana, para determinar el momento flexionante y el rango de esfuerzos generado en las conexiones por separado para ubicar estas cargas sobre la superestructura, utilizando la línea de influencia que maximice el efecto. Para el paso de los vehículos se analizó únicamente un carril a la vez al ser un puente de 2 carriles como indica el AASHTO en su estudio de fatiga. Además de este análisis se obtuvo el número de ciclos que imprime el paso de cada uno de estos vehículos, con su respectivo esfuerzo en el centro del claro.

#### 4.2.10 Esfuerzos obtenidos

En el modelo computacional se observa por ejemplo que los vehículos livianos no imprimen un esfuerzo lo suficientemente alto para ser considerados, que los vehículos de carga pequeños y los camiones de dos ejes le imprimen 2 ciclos de carga a cada viga, sin embargo el vehículo T3-S2-R4 genera 4 ciclos a su paso, de esta manera y con las estimaciones de tráfico mencionadas en un periodo de 25 años, en intervalos de 5 años se proyecta un posible daño con los camiones sobrecargados en el escenario más desfavorable. A pesar de que el camión T3R2S4 induce 4 ciclos de carga se consideran solamente dos ya que los de los extremos son muy pequeños para entrar en el modelo la norma europea indica que todos los rangos de esfuerzos menores que  $(\Delta F)_{th}/2$  no deberían generar fatiga.

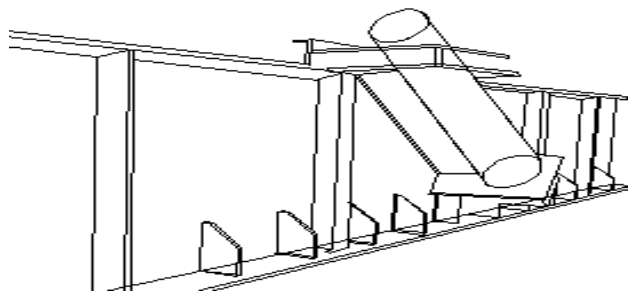


Figura N.- 54 Dovela metálica

#### 4.2.11 Comparación entre reglamentos

El Eurocódigo clasifica los detalles soldados en 14 tipos ante esfuerzos normales, el AASHTO solamente 8, un ejemplo claro es en los atiesadores el Eurocódigo los clasifica como una categoría que depende del sentido del esfuerzo aplicado pudiendo variar de (100a80 N/mm<sup>2</sup>), mientras que en el AASHTO son una categoría C donde  $\Delta F(th) = 10$  ksi a continuación se muestra una comparación de los 2 reglamentos en la siguiente figura

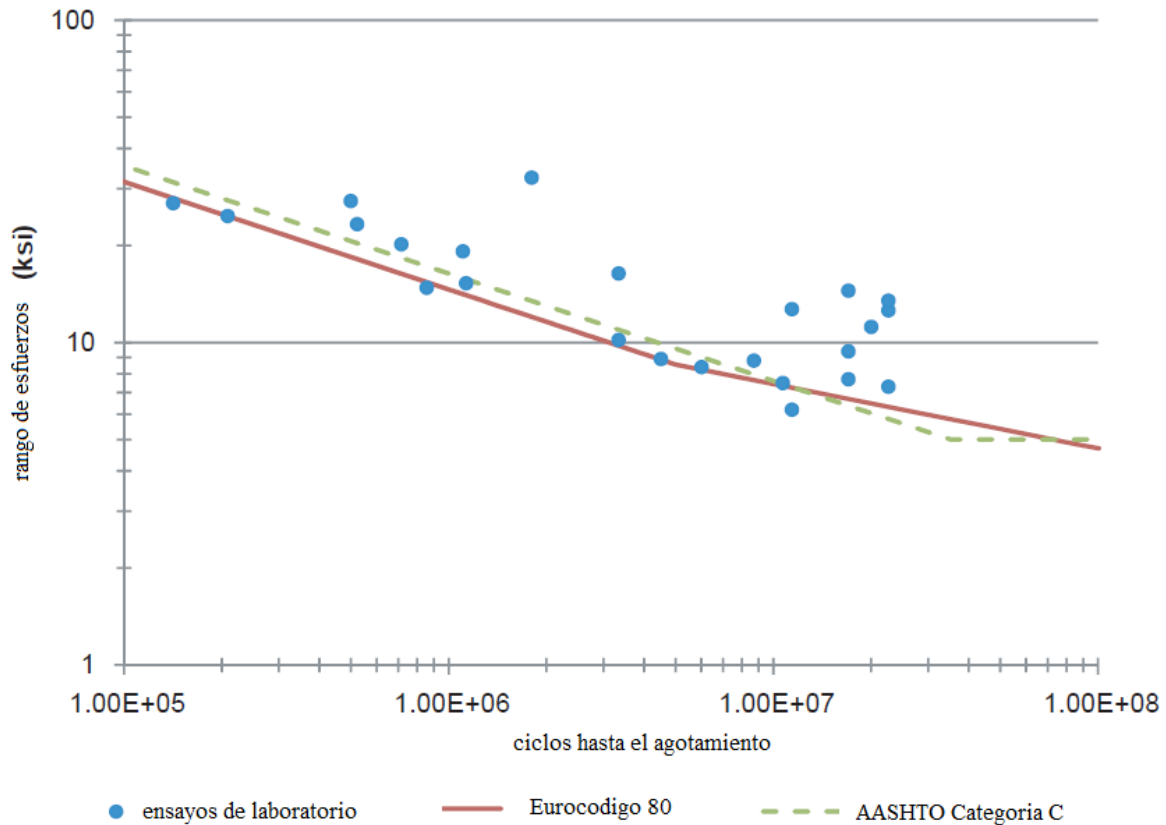


Figura N.- 55 Comparación Eurocódigo vs AASHTO

Las clasificaciones de los detalles como observamos en el anexo 3, se parece sin embargo el Eurocódigo es más detallado y más conservador en la amplitud del esfuerzo constante para los detalles tipo A y B, es común que estos detalles no sean los propensos a fatigarse en el puente concordia domina por ejemplo el diseño de las uniones soldadas, esto es común en estructuras nuevas, sin embargo es necesario calcular la resistencia del metal base a vida finita y realizar inspecciones en sitio periódicamente.

## 5. Resultados

Con el modelo matemático se obtiene los elementos mecánicos por el paso de los diferentes vehículos para calcular los esfuerzos en el patín inferior y en los atiesadores mediante la fórmula de la escuadría, a continuación se muestran las tablas resumen de los resultados de los análisis a fatiga de la dovela de cierre que tiene la sección más crítica de todo el proyecto y el mayor momento de diseño, por estar en el centro del claro. Las tablas completas se encuentran en el Anexo 5.

### 5.1 Revisión reglamento AASHTO 2012

TPDA 2016 = 1273 camiones  
 Trafico promedio diario de camiones

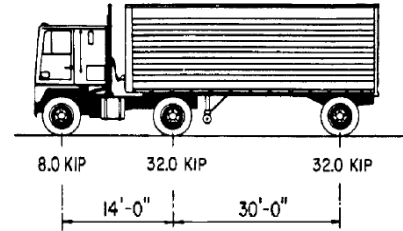


Figura N.- 48 Camión AASHTO de fatiga

Tabla N.- 21 Esfuerzo efectivo Camión AASHTO de Diseño

Porcentaje de vehículos registrados	11.2%
Distancia de separación entre ejes	5.25 metros
Número de ejes	2
Porcentaje de Peso por eje	50-50
Peso Regular vehículo	19 toneladas
Número de camiones en el modelo	1273
Esfuerzo Efectivo	313kg/cm <sup>2</sup>
Numero de ciclos	2
Espesor Soldadura	7mm
Resistencia Soldadura	238 kg/cm <sup>2</sup>

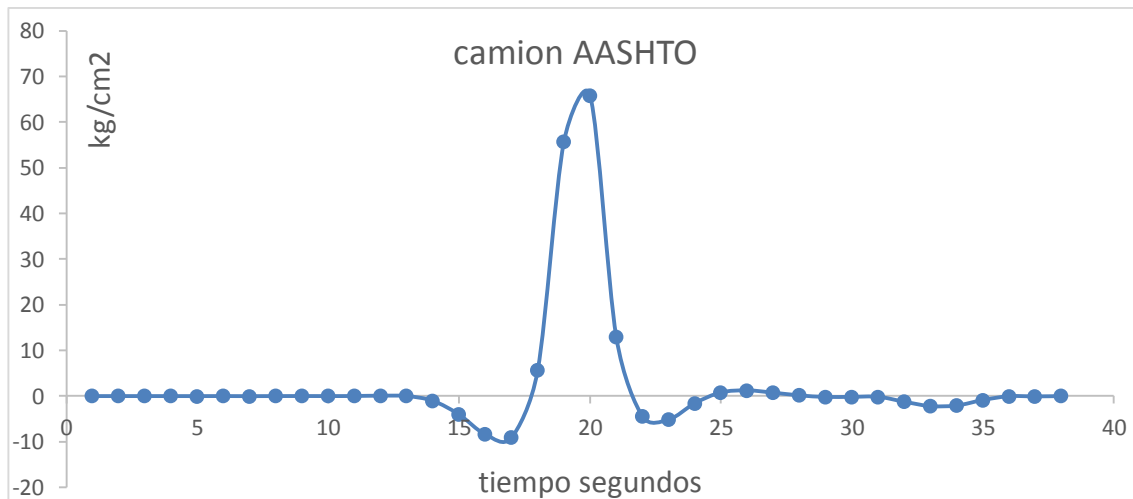


Figura N.- 56 Esfuerzo generado por el camión AASHTO de fatiga

### 5.1.1 Revisión de la conexión entre el alma y el patín inferior en la dovela de cierre

Momento de diseño	95	Ton/m
Tpda	13265	vehículos
Espesor de la soldadura	0.7	Cm

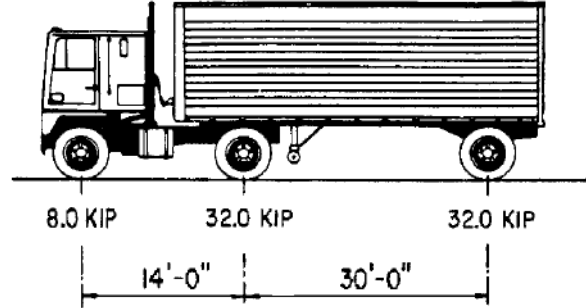


Figura N.- 48 Camión AASHTO de fatiga

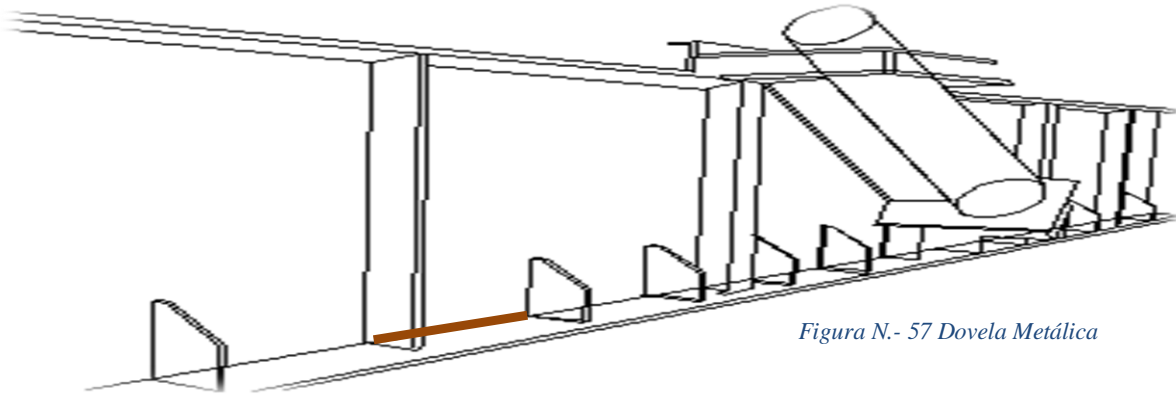
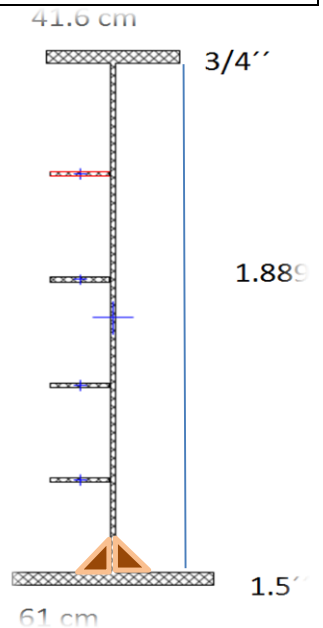


Figura N.- 57 Dovela Metálica

Tabla N.- 22 Propiedades de la sección I dovela de cierre

Propiedades de la sección		
	Sección simple	Sección compuesta
Inercia	3333383 cm <sup>4</sup>	11933338 cm <sup>4</sup>
y''inf	73.27 cm	177 cm
y''sup	115.43 cm	31 cm
Módulo de Sección Inferior	45495 cm <sup>3</sup>	67160 cm <sup>3</sup>
Módulo de Sección Superior	28877 cm <sup>3</sup>	
Esfuerzo Patín Inferior	217.61 kg/cm <sup>2</sup>	147 kg/cm <sup>2</sup>
Esfuerzo Patín Superior	342.82 kg/cm <sup>2</sup>	



## 5.1.2 Cálculo de la resistencia de la soldadura



Fotografía N.- 3 Tamaño del filete dovela metálica

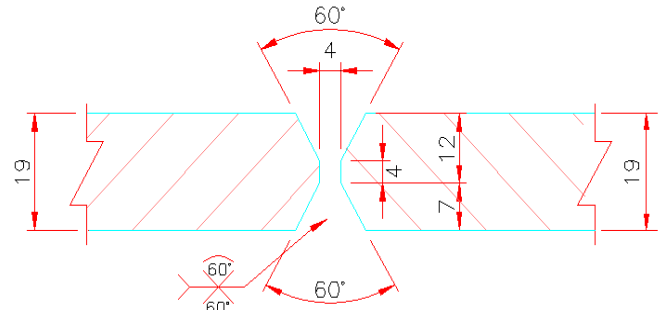


Figura N.- 58 detalle unión soldada alma patín

$$(\Delta F)_n = (\Delta F)_n^c \left( \frac{0.65 - 0.59 \left( \frac{2a}{t_p} \right) + 0.72 \left( \frac{w}{t_p} \right)}{t_p^{0.167}} \right) \leq (\Delta F)_n^c$$

[Ecuación 14]

Tabla N.- 23 Resistencia nominal soldadura

Resistencia nominal de la unión soldada		
$(\Delta F)_n^c$	10 ksi	Amplitud de fatiga detalle C
$2a/t_p$	1	
w	0.7 cm 1/4"	Tamaño del filete
$t_p$	1.9cm 3/4"	Espesor del alma
$\Delta F_{n=}$	3.41 ksi	
$\Delta F_{n=}$	238kg/cm <sup>2</sup>	

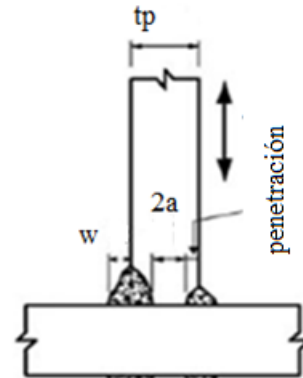


Figura N.- 21 Detalle soldadura

La resistencia de la soldadura es mayor que el esfuerzo generado por el camión de diseño AASHTO sobre el puente "La Concordia". Se considera adecuado el diseño en este caso sin embargo calculamos la vida de la conexión fatigada con las tablas del capítulo 5, para unas tasas de crecimiento de 3 4 y 5 %. El metal base al ser una estructura nueva tendrá vida infinita



### 5.1.3 Evaluación de la vida de la conexión fatigada

Tabla N.- 24 Clasificación de la unión soldada

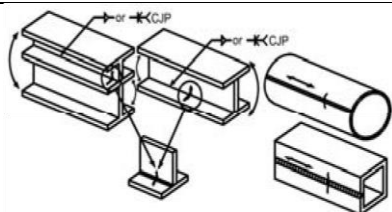
Detalle	Categoría	Constante A ksi	$\Delta F_{th}$ ksi	Punto inicial de la fisura	Ejemplo ilustrativo
Sección 2 material conectado					
3.1 Miembros añadidos a elementos estructurales o placas conectadas de manera continua con soldadura de penetración completa en la dirección del esfuerzo aplicado	B	$120 \times 10^8$	16	En la superficie o discontinuidades internas en la soldadura	

Tabla N.- 25 evaluación de la vida de la conexión fatigada

Detalle de la Categoría	evaluación de la vida de la conexión fatigada Y (años)		
	Evaluación de la vida	Vida mínima	Vida media
porcentaje de crecimiento anual g			
0.03	88	77	99
0.04	66	58	74
0.05	53	46	59

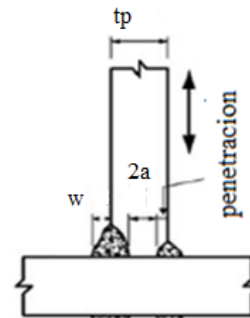


Figura N.- 21 Detalle soldadura

$$Y = \frac{\log \left[ \frac{R_f \cdot A}{365 \cdot n \cdot (TPDA) \cdot (\Delta f_{eff})^3} \cdot g \cdot (1 + g)^{a-1} + 1 \right]}{\log(1 + g)}$$

[Ecuación 14]

Observamos que la evaluación de la vida no solamente depende de la tasa de crecimiento y el TPDA sino que también del esfuerzo efectivo que genera el camión siendo de gran importancia el control de pesos en los puentes carreteros.

## 5.2 Revisión reglamento Eurocódigo

El Eurocódigo plantea una historia de tensión en el tiempo de acuerdo a datos más exactos como mediciones de campo de pesos y tráfico, o sensores colocados en el puente, en esta investigación se tomarán los datos de la caseta de cobro más cercana al lugar del proyecto.

Se estudia el paso de cada vehículo por separado.

- B2

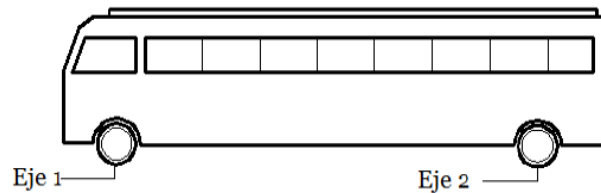


Figura N.- 59 Camión B2

Tabla N.- 26 Esfuerzo efectivo camión B2

Porcentaje de vehículos registrados	0.2%
Distancia de separación entre ejes	5.25 metros
Número de ejes	2
Porcentaje de Peso por eje	50-50
Peso Regular vehículo	19 toneladas
Número de camiones en el modelo	$=13265 \cdot .002 = 27$
Esfuerzo Efectivo	122 kg/cm <sup>2</sup>
Número de ciclos	2

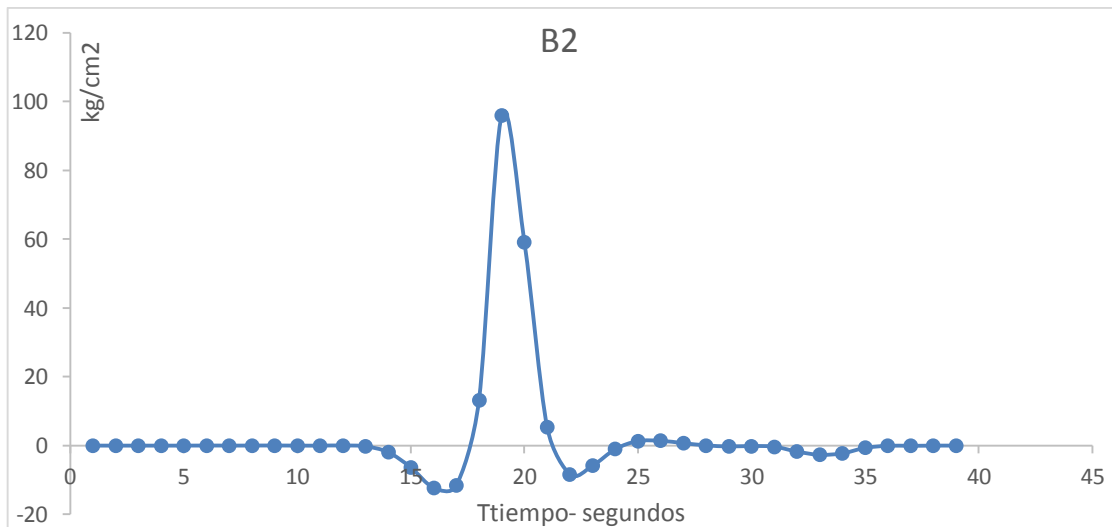


Figura N.- 60 Momento Generado por el camión B2

- C2

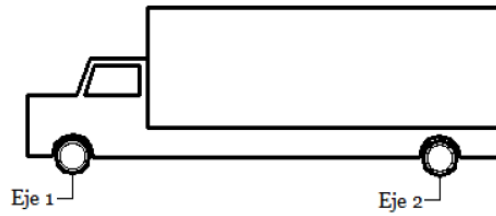


Figura N.- 61 Camión c3

Tabla N.- 27 Esfuerzo efectivo camión c2

Porcentaje de vehículos registrados	3.8 %
Distancia de separación entre ejes	5.25 metros
Número de ejes	2
Porcentaje de Peso por eje	40-60
Peso Regular vehículo	19 toneladas
Número de camiones en el modelo	$=13265 \cdot 0.038 = 504$
Esfuerzo Efectivo	253kg/cm <sup>2</sup>
Número de ciclos	2

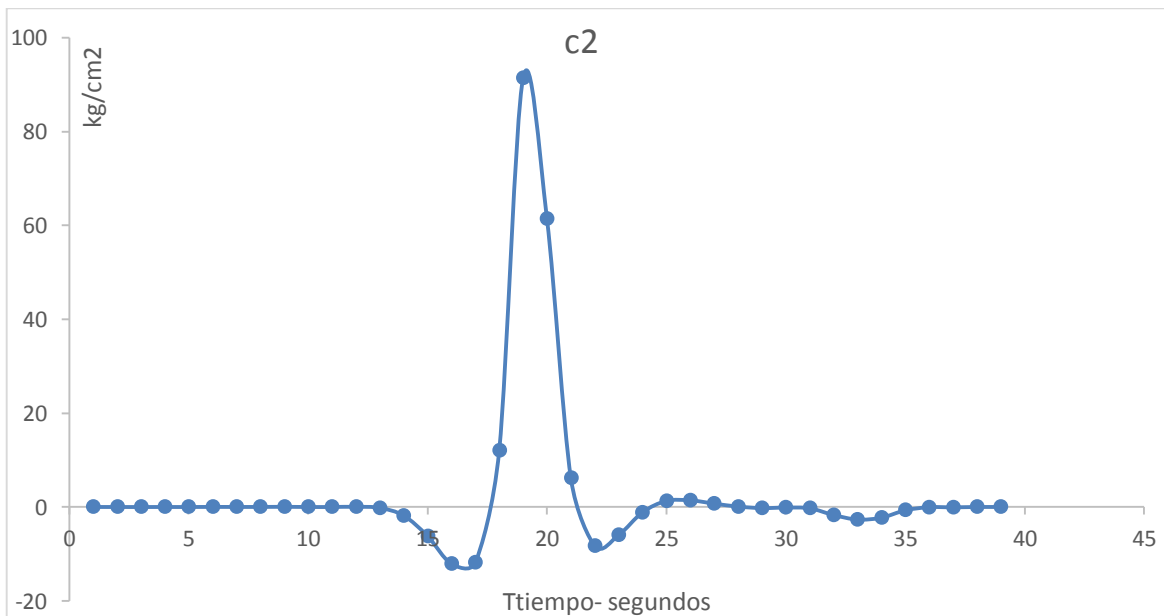


Figura N.- 62 Esfuerzo generado por el Camión c2

- C3

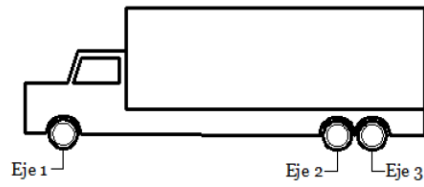


Figura N.- 63 Camión C3

Tabla N.- 28 Esfuerzo efectivo camión C3

Porcentaje de vehículos registrados	1.3%
Distancia de separación entre ejes	4m y 1.25m
Número de ejes	3
Porcentaje de Peso por eje	25-37.5-37.5
Peso Regular vehículo	27.5 toneladas
Número de camiones en el modelo	$=13265 \cdot 0.002 = 27$
Esfuerzo Efectivo	135kg/cm <sup>2</sup>
Número de ciclos	2

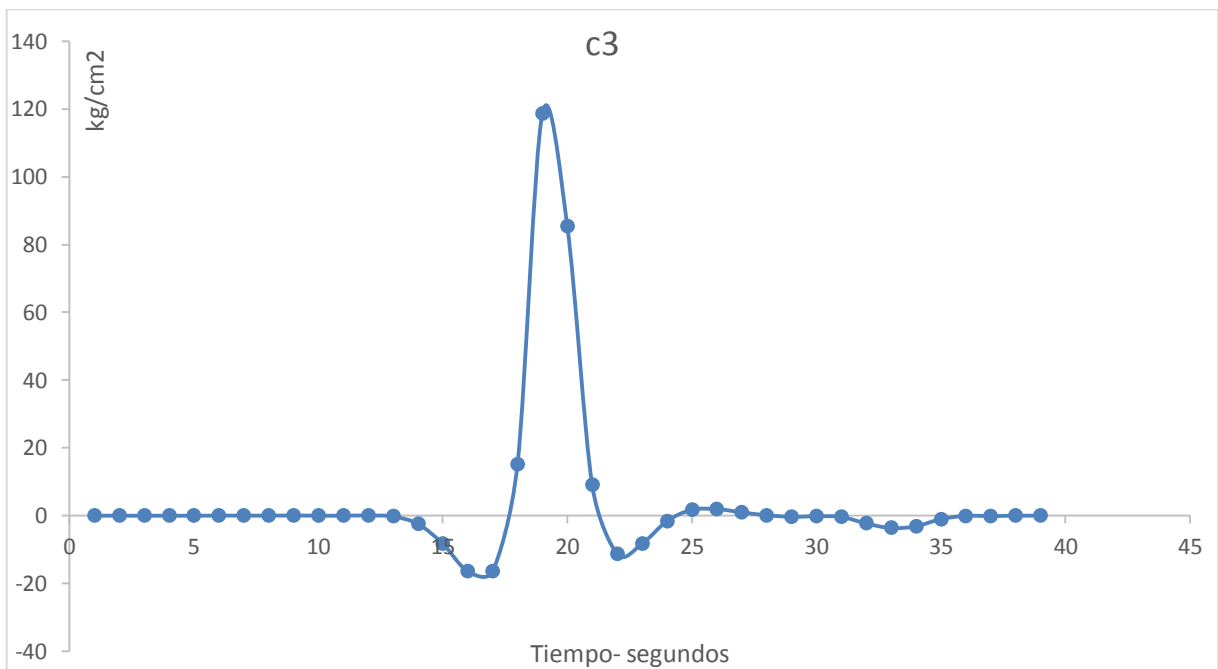


Figura N.- 64 Esfuerzo Generado por el camión C3

- T3S2

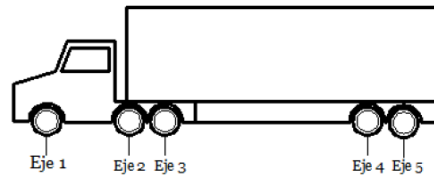


Figura N.- 65 Camion T3-S2

Tabla N.- 29 Esfuerzo efectivo camión T3-S2

Porcentaje de vehículos registrados	1.7%
Distancia de separación entre ejes	5.25 metros
Número de ejes	5
Porcentaje de Peso por eje	15- 21.25-21.25- 21.25-21.25
Peso Regular vehículo	46.5 toneladas
Número de camiones en el modelo	$=13265*0.015=199$
Esfuerzo Efectivo	223kg/cm <sup>2</sup>
Número de ciclos	2

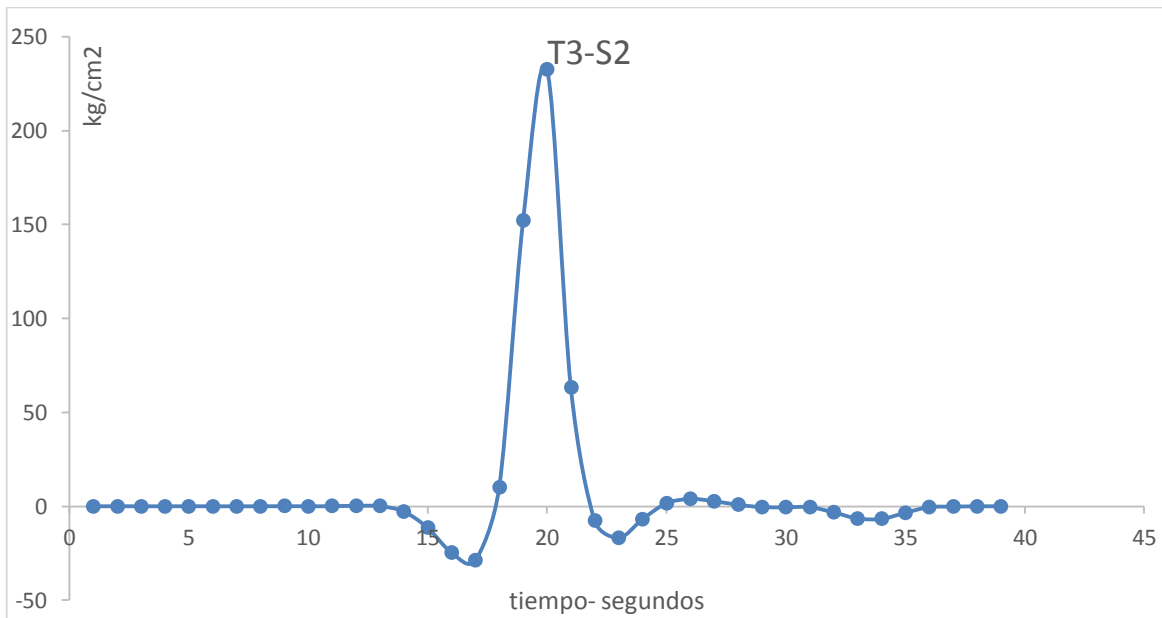


Figura N.- 66 Esfuerzo Generado por el camión T3-S2

- T3S3

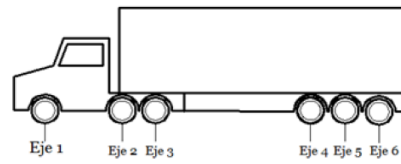


Figura N.- 67 Camion T3-S3

Tabla N.- 30 Esfuerzo efectivo camión T3-S3

Porcentaje de vehículos registrados	1.3%
Distancia de separación entre ejes	5.25 metros
Número de ejes	6
Porcentaje de Peso por eje	12- 20-20- 16-16-16
Peso Regular vehículo	54 toneladas
Número de camiones en el modelo	$=13265 \cdot 0.028 = 371$
Esfuerzo Efectivo	474kg/cm <sup>2</sup>
Número de ciclos	2

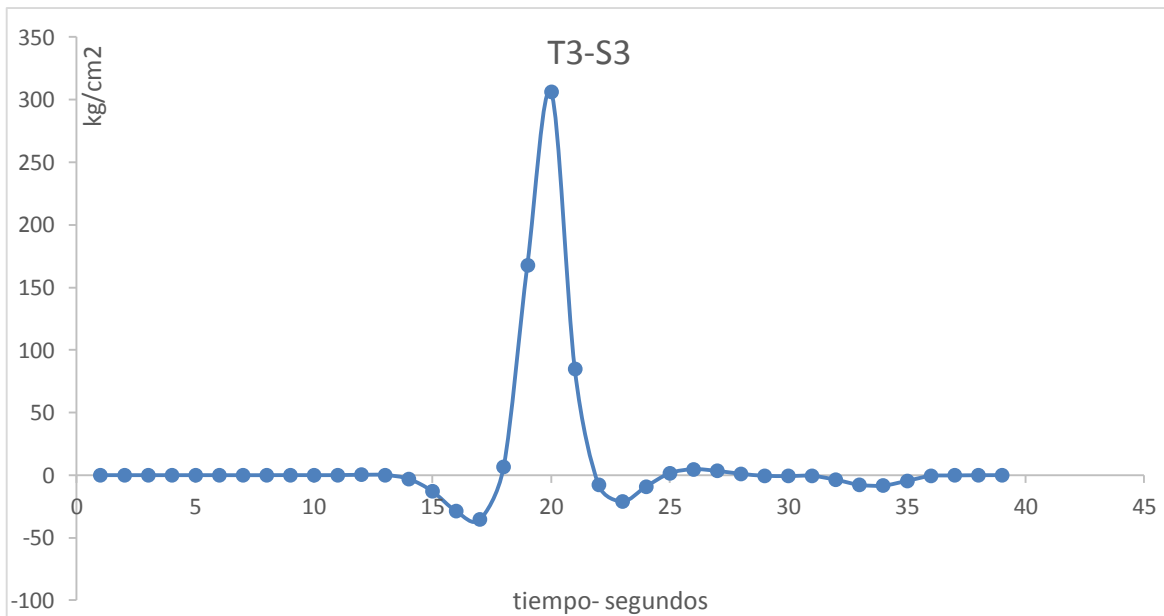


Figura N.- 68 Esfuerzo Generado por el camión T3-S3

- T3S2R4

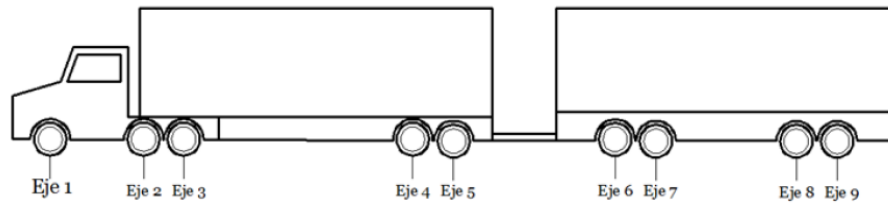


Figura N.- 69 Camión T3-S2-R4

Tabla N.- 31 Esfuerzo efectivo camión T3-S2-R4

Porcentaje de vehículos registrados	0.8%
Distancia de separación entre ejes	5.25 metros
Número de ejes	5
Porcentaje de Peso por eje	8- 11.5-11.5 11.5-11.5- 11.5-11.5 11.5.-11.5
Peso Regular vehículo	75.5 toneladas
Número de camiones en el modelo	=13265*0.011=146
Esfuerzo Efectivo	594kg/cm <sup>2</sup>
Número de ciclos	4

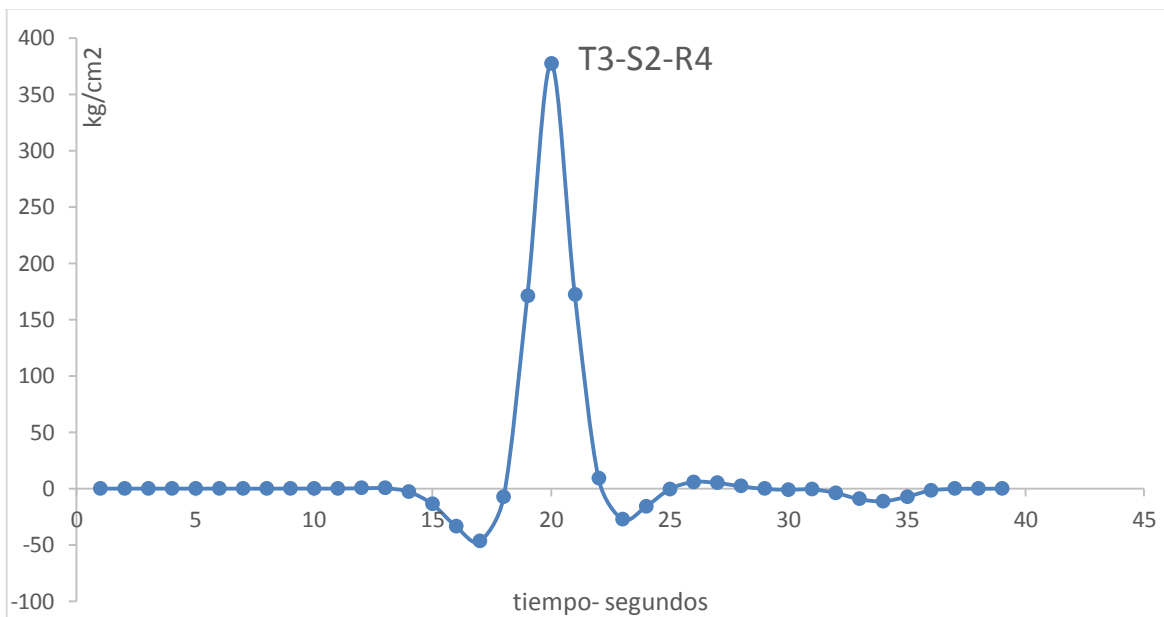


Figura N.- 70 Esfuerzo Generado Por el camión t3-S2-R4

A pesar de que el camión T3R2S4 induce 4 ciclos de carga se consideran solamente dos ya que los de los extremos son muy pequeños para entrar en el modelo la norma europea indica que todos los rangos de esfuerzos menores que  $(\Delta F)^{th}/2$  no deberían generar fatiga

Luego se traza el histograma de tensiones con el esfuerzo de efectivo individual, y con el número de ciclos de cada camión generando la siguiente figura

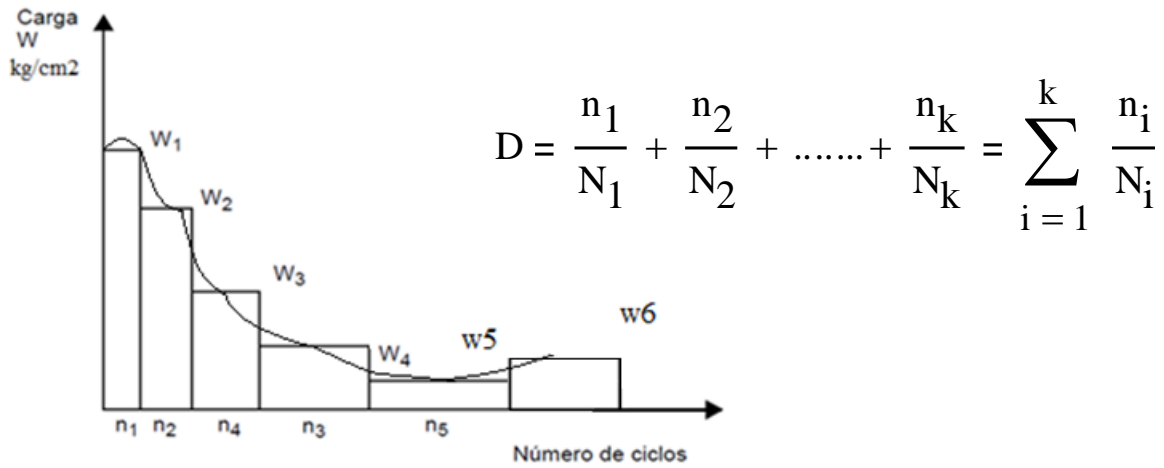


Figura N.- 71 Histograma de esfuerzos

Con la regla de Palmgren-Milne, obtenemos el esfuerzo equivalente resultante de todo el tráfico.

TPDA	13265
ciclos por día	2766
# de camiones	1273

tipo de vehículo	N/n		esfuerzo	n	N
B	53191.48	wb	135	52	5000000
C2	4970.17	wc2	135	1008	5000000
C3	31645.56	wc3	253	52	5000000
T3S2	6183.74	wc5	259	398	3500000
T3S3	5932.20	wc6	341	744	2800000
T3S2R4	5319.14	wc9	397	292	2500000

Tabla N.- 32 esfuerzo equivalente

esfuerzo equivalente	308 kg/cm <sup>2</sup>
esfuerzo equivalente kips	4.4 kips



## 5.2.1 Evaluación de la vida de la conexión fatigada Eurocódigo

Tabla N.- 33 Evaluación de la vida de la conexión fatigada

Detalle de la Categoría	evaluación de la vida de la conexión fatigada		
B			
% de crecimiento anual $g$	Evaluación de la vida	Vida mínima	Vida media
0.03	42.	34.	51.
0.04	37.	31	44.
0.05	33	28	39.

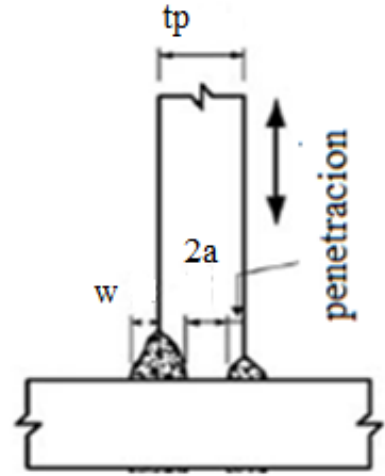


Figura N.- 72 detalle soldadura



Figura N.- 73 histograma de esfuerzos

Si bien el esfuerzo generado por el camión AASHTO no fatiga al puente dándole vida infinita incluso en la soldadura un análisis más detallado con el Eurocódigo utilizando el esfuerzo efectivo si lo hace y nos da una vida mínima menor como se indica en la tabla

### 5.3 Revisión con vehículos sobrecargados reglamento Eurocódigo

Se realiza un tercer análisis con los tres camiones más pesados sobrecargados en un 50% según estudios realizados en la universidad de Querétaro (Carrión, 2013)

- T3S2

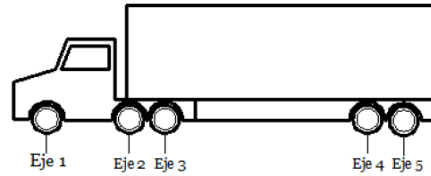


Tabla N.- 34 Esfuerzo efectivo camión T3-S2 sobrecargado

Porcentaje de vehículos registrados	1.7%
Distancia de separación entre ejes	5.25 metros
Número de ejes	5
Porcentaje de Peso por eje	15- 21.25-21.25- 21.25-21.25
Peso Regular vehículo	46.5 toneladas
Número de camiones en el modelo	=*1.7=217
Esfuerzo Efectivo sección simple	590kg/cm <sup>2</sup>
Esfuerzo Efectivo sección compuesta	400kg/cm <sup>2</sup>

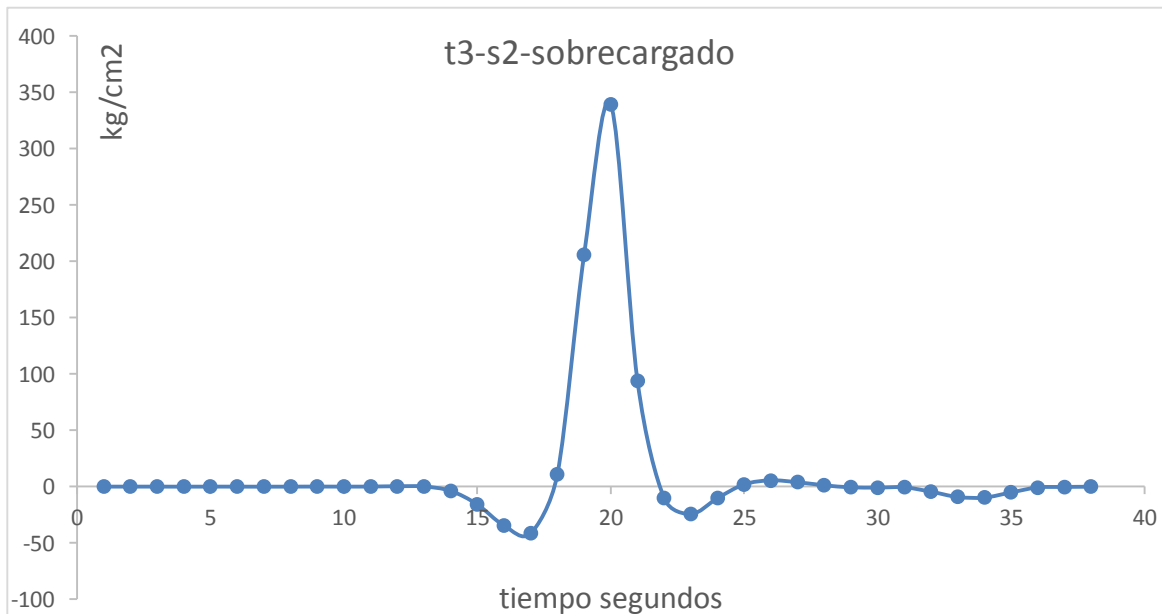


Figura N.- 74 Esfuerzo generado por el camión T3-S2 sobrecargado

- T3S3

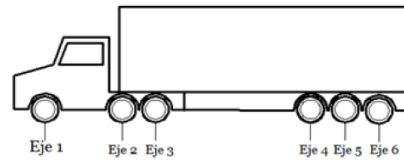


Tabla N.- 35 Esfuerzo efectivo camión T3-S3 sobrecargado

Porcentaje de vehículos registrados	1.3%
Distancia de separación entre ejes	5.25 metros
Número de ejes	6
Porcentaje de Peso por eje	12- 20-20- 16-16-16
Peso Regular vehículo	54 toneladas
número de camiones en el modelo	=12802*1.3=166
Esfuerzo Efectivo	738kg/cm <sup>2</sup>
Número de ciclos	500kg/cm <sup>2</sup>

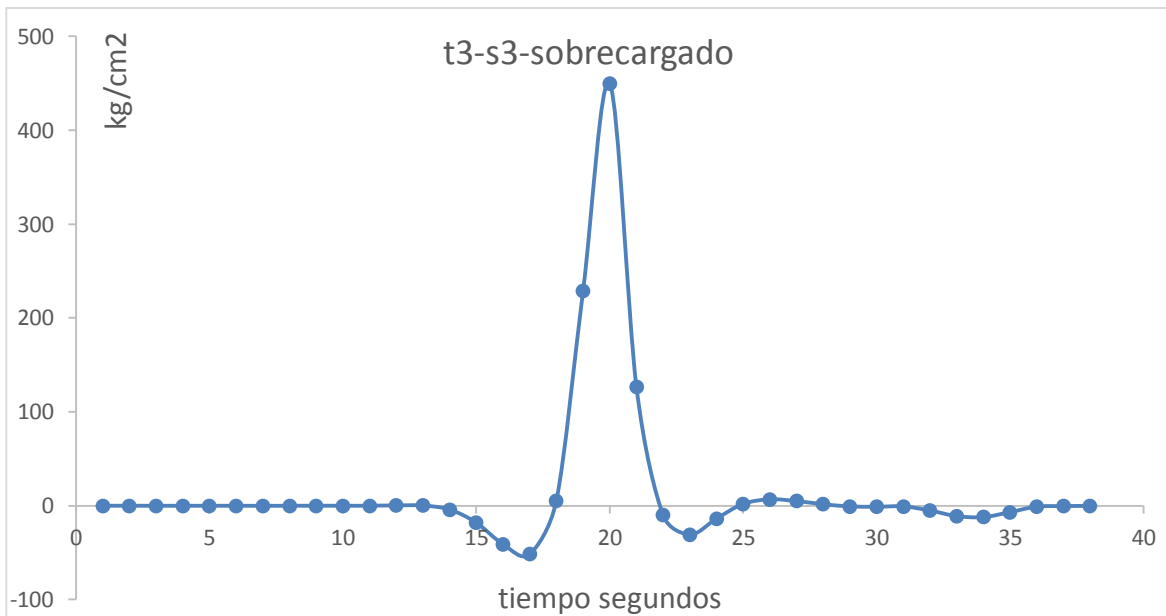


Figura N.- 75 Esfuerzo generado por el camión T3-S3 sobrecargado

- T3S2R4

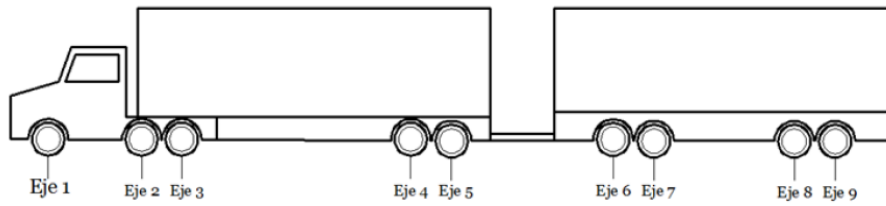


Tabla N.- 36 Esfuerzo efectivo camión T3-S2-R4 sobrecargado

Porcentaje de vehículos registrados	0.8%
Distancia de separación entre ejes	5.25 metros
Número de ejes	5
Porcentaje de Peso por eje	8- 11.5-11.5 11.5-11.5- 11.5-11.5 115.-11.5
Peso Regular vehículo	75.5 toneladas
Número de camiones en el modelo	=12802*.8=102
Esfuerzo Efectivo	926kg/cm2
Número de ciclos	627kg/cm2

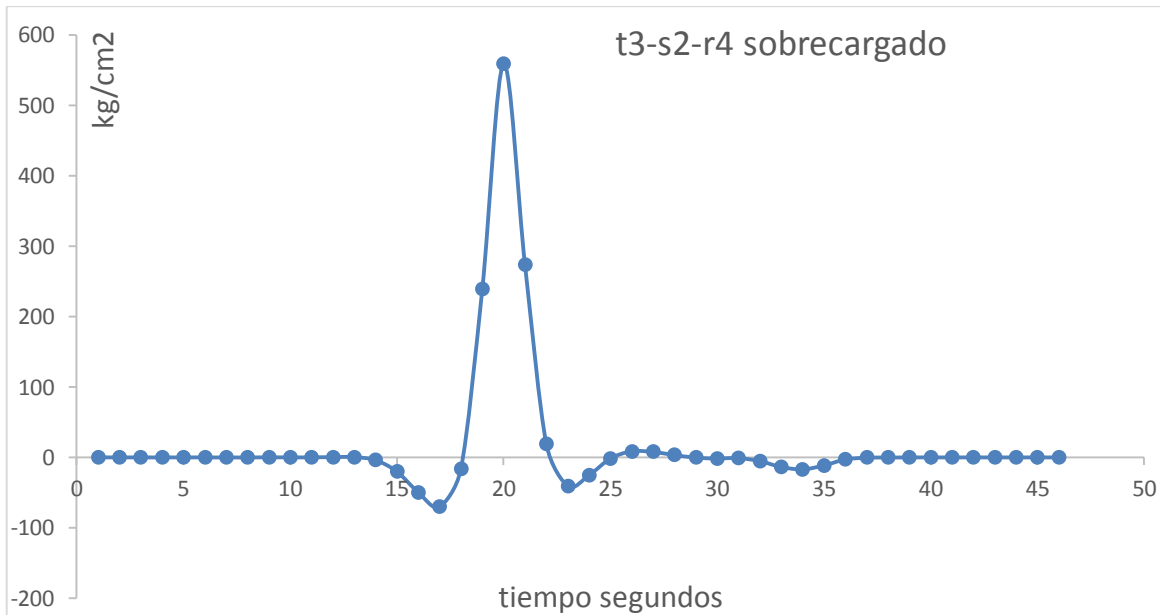
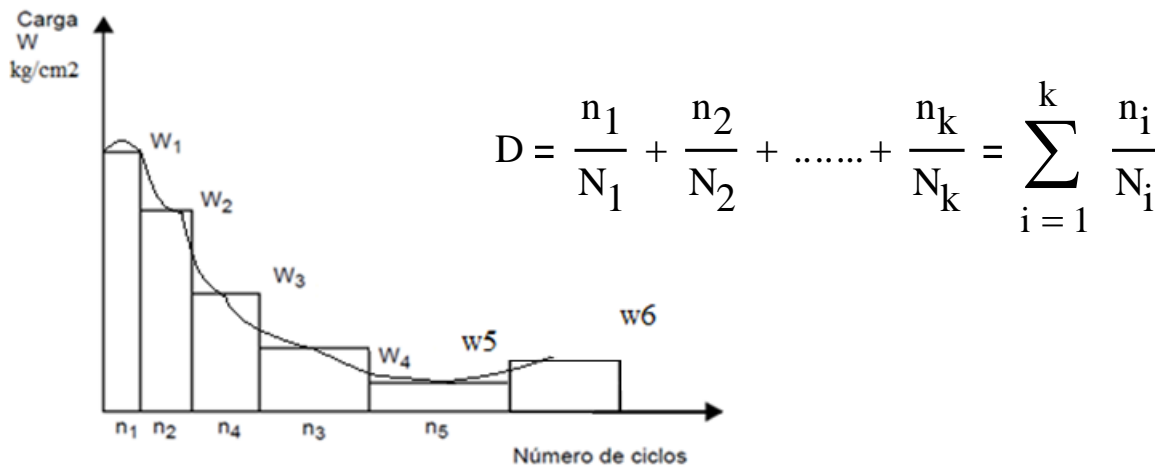


Figura N.- 76 Esfuerzo generado por el camión T3-S2-R4 sobrecargado

Se Realiza un tercer análisis con los tres camiones más pesados incrementados un 50 % de su peso para demostrar lo importante que es tener un control de pesos sobre las estructuras.



Con la regla de Palmgren-Milne, obtenemos el esfuerzo equivalente resultante de todo el tráfico.

TPDA	13265
ciclos por día	2546
# de camiones	1273

tipo de vehículo	N/n		esfuerzo	n	N
B	53191.48	wb	135	52	5000000
C2	4970.17	wc2	135	1008	5000000
C3	31645.56	wc3	253	52	5000000
T3S2	6183.74	wc5	400	398	3500000
T3S3	5932.20	wc6	500	744	2800000
T3S2R4	5319.14	wc9	627	292	2500000

Tabla N.- 37 Esfuerzo equivalente sobrecargado

esfuerzo equivalente	423 kg/cm <sup>2</sup>
esfuerzo equivalente kips	6.05 kips

Tabla N.- 38 Evaluación de la vida de la conexión fatigada sobrecargada

Detalle de la Categoría	evaluación de la vida de la conexión fatigada		
B			
% de crecimiento anual g	Evaluación de la vida	Vida mínima	Vida media
0.03	41	33	50
0.04	36	29	43
0.05	32	27	38

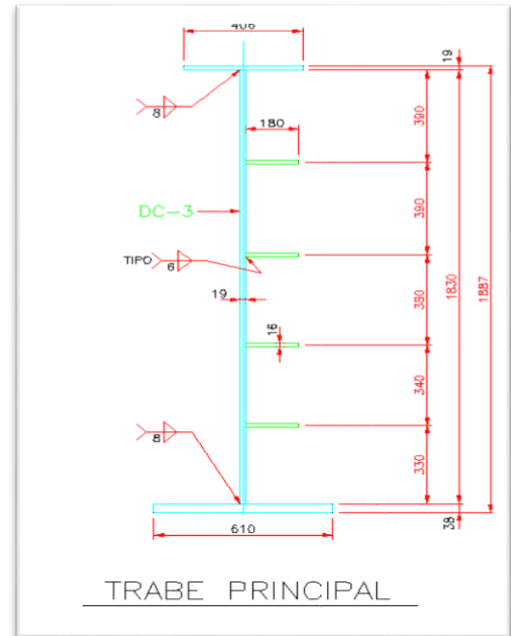


Figura N.- 77 trabe principal dovela de cierre

Tabla N.- 39 Clasificación Eurocódigo Alma Patín inferior

100		Cordones manuales en ángulo	Es esencial un ajuste perfecto entre las placas del ala y el alma debe prepararse el borde de modo que se consiga penetración regular en la raíz
-----	--	-----------------------------	--

Observamos que la evaluación de la vida de la conexión fatigada disminuye significativamente con este aumento en los pesos de los camiones

$$Y = \frac{\log \left[ \frac{R_f \cdot A}{365 \cdot n \cdot (TPDA) \cdot (\Delta f_{eff})^3} \cdot g \cdot (1 + g)^{a-1} + 1 \right]}{\log(1 + g)}$$

[Ecuación 14]

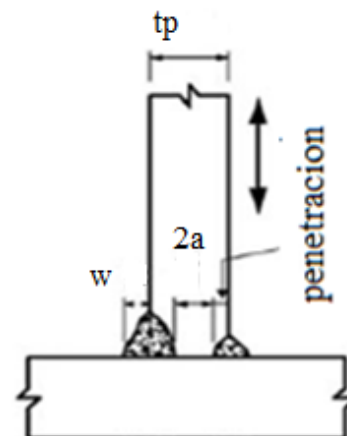


Figura 71 detalle soldadura

## 5.4 Revisión atiesadores

Los atiesadores a revisar serían los atiesadores transversales se sigue la misma metodología que en el caso anterior pero clasificando la unión como categoría C

### 5.4.1 Revisión Eurocódigo

Momento de diseño	95	Ton/m
Tpda	13265	vehículos
Espesor de la soldadura	0.7	Cm

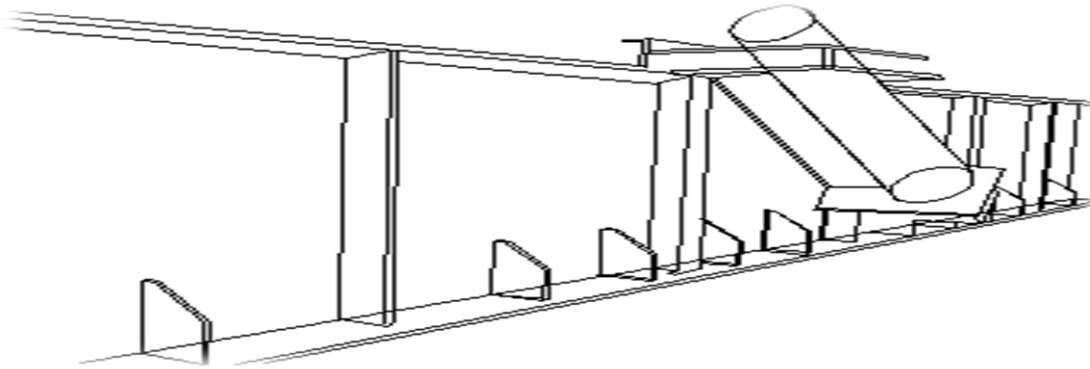
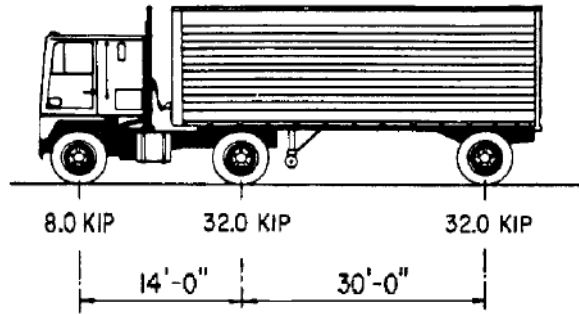
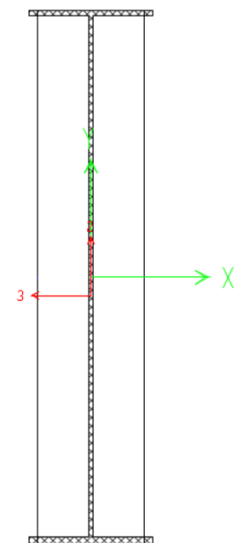


Tabla N.- 40 Propiedades sección atiesadores

Propiedades de la sección		
	Sección simple	Sección compuesta
Inercia	3333383 kg/cm <sup>2</sup>	11933338 kg/cm <sup>2</sup>
$y''_{inf}$	73.27 cm	177 cm
$Y''_{sup}$	115.43 cm	31 cm
Módulo de Sección Inferior	45495 cm <sup>3</sup>	67160 cm <sup>3</sup>
Módulo de Sección Superior	28877 cm <sup>3</sup>	
Esfuerzo Patín Inferior	217.61 kg/cm <sup>2</sup>	147 kg/cm <sup>2</sup>
Esfuerzo Patin Superior	342.82 kg/cm <sup>2</sup>	



## 5.4.2 Evaluación de la vida de atiesadores fatigados



Fotografía N.- 4 Tamaño del filete dovela metálica

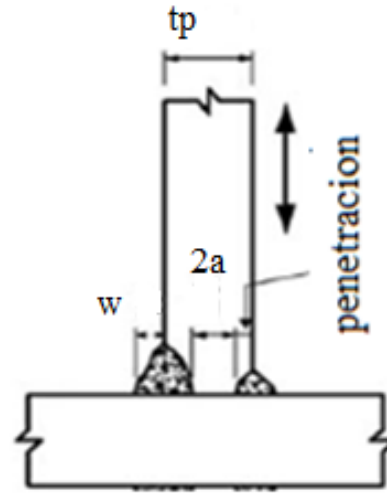


Figura 71 detalle soldadura

$$Y = \frac{\log \left[ \frac{R_Y \cdot A}{365 \cdot n \cdot (TPDA) \cdot (\Delta f_{eff})^3} \cdot g \cdot (1 + g)^{a-1} + 1 \right]}{\log(1 + g)}$$

[Ecuación 14]

Tabla N.- 41 Clasificación Atiesadores

Detalle	Categoría	Constante A ksi	$\Delta F_{th}$ ksi	Punto inicial de la fisura	Ejemplo ilustrativo
Sección 2 material conectado					
4.1 atiesadores transversales alma con alma filete o alma patin	C'	44 X 10 <sup>8</sup>	12	Cualquier discontinuidad en la soldadura	
4.2 Atiesadores longitudinales o en caja conectados con filete continuo paralelo a la dirección del esfuerzo aplicado	B	120 X 10 <sup>8</sup>	16	Cualquier discontinuidad en la soldadura	



Tabla N.- 42 evaluación de la vida de la conexión fatigada

Detalle de la Categoría	evaluación de la vida de la conexión fatigada Y		
B	Evaluación de la vida	Vida mínima	Vida media
% de crecimiento anual g			
0.03	36	32	38
0.04	32	29	33
0.05	29	26	30

Tabla N.- 43 evaluación de la vida de la conexión fatigada camión sobrecargado

Detalle de la Categoría	evaluación de la vida de la conexión fatigada Y		
B	Evaluación de la vida	Vida mínima	Vida media
% de crecimiento anual g			
0.03	21	16	20
0.04	19	15	18
0.05	18	14	17

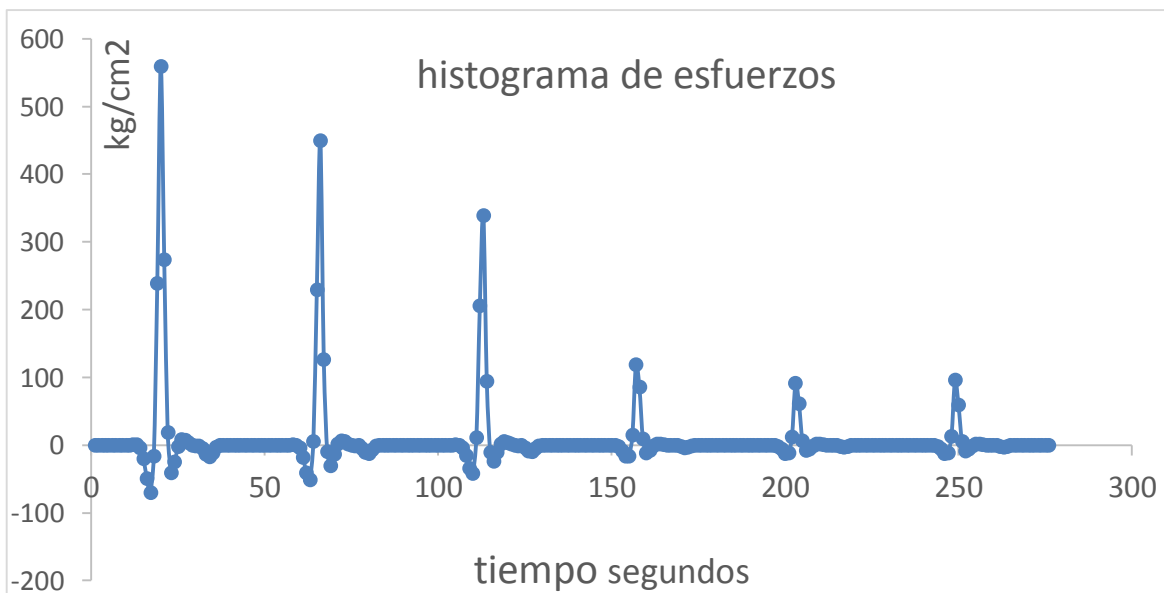


Figura N.- 78 histograma de esfuerzos sobrecargado

## 6 Conclusiones y Recomendaciones

- Un valor más alto del TPDA no necesariamente produce un mayor esfuerzo de fatiga, este depende primordialmente de la configuración del tráfico así como pesos, separación entre ejes distancias cargas etc...
- Se debe tener control máximo sobre los pesos que circulan sobre la estructura, pequeñas variaciones en el peso de los camiones si pueden producir agrietamientos en secciones calculadas al límite.
- Se debe reemplazar los datos de pesos y tráfico de la presente investigación con los registrados en el puente en funcionamiento en el futuro, el tráfico promedio diario seguramente será inferior, ya que en este trabajo se indicaron condiciones extremas de servicio, se espera que el TPDA del puente "Concordia" alcance un máximo de 8000 vehículos diarios.
- La fatiga es un fenómeno que depende de varios factores internos y externos del material, el método constructivo de la estructura, así como las condiciones de no-linealidad de degradación de las uniones etc., se vuelve entonces un problema difícil de estudiar debiendo utilizar coeficientes de seguridad que abarquen todas estas consideraciones.
- Los efectos combinados de estos factores se deben tener presentes identificando la clasificación correcta de conexión y todas las tensiones actuantes para poder formar curvas S-N (esfuerzos-#ciclos) y estimar la vida de la conexión
- Los avances tecnológicos facilitan un estudio previo de estructuras estos permiten detectar tempranamente problemas como la fatiga en elementos o conexiones soldadas esto no suprime la importancia de utilizar ensayos de campo en obra como escaneos radiográficos o ultrasónicos líquidos penetrantes o ensayos de laboratorio para estimar la resistencia a la fatiga.
- Si ya se han detectado visualmente grietas, se requiere un enfoque más complejo de mecánica de la fractura para la evaluación de la fatiga, y los daños ante una carga inducida en el lugar del procedimiento especificado.

## 7 Referencias

- [1] (AASHTO. 1990). *Guide Specifications for Fatigue Evaluation of Existing Steel Bridges*. American Association of State Highway and Transportation Officials. Washington, D.C.
- [2] (AASHTO. (2003). *Guide Manual for Condition Evaluation and Load and Resistance Factor Rating (LRFR) of Highway Bridges*. American Association of State Highway and Transportation Officials. Washington, D.C.
- [3] (AASHTO. 2010). *LRFD Bridge Design Specifications. Fifth Edition*, American Association of State Highway and Transportation Officials. Washington, D.C.
- [4] (AASHTO. 2011). *Manual for Bridge Evaluation. Second Edition*, American Association of State Highway and Transportation Officials. Washington, D.C.
- [5] (AASHTO. 2012). *LRFD Bridge Design Specifications. Sixth Edition*, American Association of State Highway and Transportation Officials. Washington, D.C.
- [6] (AISC. 2010). *Steel Construction Manual. 14th Edition*, American Institute of Steel Construction. Chicago.
- [7] (ASTM, 2010.) Standar Test Method For measurement of Fracture Toughness ASTM Designation E1820-01
- [8] (Aguilar. 2013) Evaluación Elastica simplificada por fatiga de un Puente de acero tipico ortotropico bajo cargas móviles en México Azcapotzalco, 2013
- [9] (Crespo. 2013) Instituto Mexicano del Transporte. (2013). *Análisis del deterioro estructural por fatiga y prognosis de un puente típico de concreto utilizando simulación MonteCarlo*. Sanfandila.
- [10] (ECCS. 2010) European Convention for Construction Steelwork Fatigue Recommendations
- [11] (Eurocódigo. 1993). *Design of Steel Structures*.
- [12] (Eurocódigo. 2010). *Design of Steel Structures*.

- [13] (Eurocodigo, 2010) Instituto Técnico de la Estructura en Acero. *Diseño para Fatiga* (Vol. 14).
- [14] (Garcia. 2013) Analisis del deterioro por fatiga en torones de presfuerzo utilizados en puentes. IMT 385 Sanfandila Querétaro 2013
- [15] (Perier. 2009 ) Fretting fatigue behavior of bridge engineering cables in a solution of sodium chloride
- [16] (Quintana. 2014). Damage detection on a cable stayed bridge using wave propagation analysis rio papaloapan bridge
- [17] (IMT, 2015) Manifestacion de impacto ambiental proyecto construccion del Puente “La Concordia” en el estado de Chiapa, Mexico.
- [18] National Cooperative Highway Research Program. (2012). *Fatigue Evaluation of Steel Bridges*. Washington, D.C.
- [19] Secretaría de Comunicaciones y Transportes. (2014). *NORMA Oficial Mexicana NOM-012SCT-2-2014*.

## Anexo I Análisis de peso propio

Se realizó una comparación de pesos en los planos del proyecto con los pesos de cada una de las piezas de cada una de las dovelas encontrándose errores despreciables del 5 x mil en todo el acero. Se presentan a continuación un resumen de los resultados obtenidos

- Dovela 6

BASE DE DATOS PIEZAS					acero a50	3518	7800					
					acero a36	2530	5650					
DOVELA #	6	agujeros										
Numero de Pieza	forma	L	h	e	#piezas	diametro	area	peso unitario	peso total	peso en planos proyecto	diferencial	
D6-1		12	0.406	0.038	7800	2	0	0	1444.0608	2888.1216	2912	23.8784
D6-2		12	0.61	0.038	7800	2	0	0	2169.648	4339.296	4374	34.704
D6-3		12	1.843	0.019	7800	2	0.104	0.0084949	3276.3323	6552.6645	6562	9.3354784
D6-4		2.295	0.18	0.016	7800	6		0	51.55488	309.32928	309	-0.32928
D6-5		3.99	0.18	0.016	7800	12		0	89.63136	1075.5763	1073	-2.57632
D6-6		1.695	0.18	0.016	7800	6		0	38.07648	228.45888	228	-0.45888
D6-7		2.148	0.18	0.016	7800	2		0	48.252672	96.505344	96	-0.505344
D6-8		3.695	0.18	0.016	7800	4		0	83.00448	332.01792	331	-1.01792
D6-9		1.548	0.18	0.016	7800	2		0	34.774272	69.548544	69	-0.548544
D6-10		6.128	0.305	0.013	7800	4		0	189.52066	758.08262	745	-13.082624
D6-11		12.64	0.305	0.019	7800	2		0	571.34064	1142.6813	1152	9.31872
D6-11a		12.64	0.305	0.019	7800	1	.399*.0104	0.0082992	570.1107	570.1107	576	5.8893014
D6-12		5.328	0.305	0.013	7800	2		0	164.77906	329.55811	324	-5.558112
D6-13		0.8	0.8	0.013	7800	2	.8*.247	0.1976	44.85936	89.71872	88	-1.71872
D6-14		12.05	1.281	0.01	7800	3	.025+0.104*0.0	0.731736	1146.9365	3440.8095	3279	-161.80948
D6-15		0.275	0.666	0.01	7800	6		0	14.2857	85.7142	81	-4.7142
D6-15a		0.275	1.158	0.01	7800	6		0	24.8391	149.0346	142	-7.0346
D6-16		0.305	1.158	0.019	7800	6	0.43	0.0726101	41.581947	249.49168	268	18.508318
D6-17		0.305	0.666	0.019	7800	6	0.052	0.0010619	29.946499	179.67899	180	0.3210084
D6-18		0.127	1.172	0.01	7800	12		0	11.609832	139.31798	133	-6.317984
D6-19		0.127	1.208	0.01	7800	12		0	11.966448	143.59738	137	-6.597376
D6-20		0.127	1.245	0.01	7800	12		0	12.33297	147.99564	141	-6.99564
D6-21		0.127	1.281	0.01	5650	2		0	9.1918155	18.383631	24	5.616369
D6-22		1.843			5650	6	0.203	0.0248	49.2081	295.2486	293	-2.2486
D6-23		7.99			5650	2		0	78.4618	156.9236	157	0.0764
D6-24		2.257			5650	4	0.102	0.0125	22.16374	88.65496	89	0.34504
D6-25		1.306			7800	2	0.102	0.0125	12.82492	25.64984	26	0.35016
D6-26		4.247			7800	2	0.126	0.06284	221.94822	443.89644	445	1.10356
D6-27		4.386	0.152	0.013	7800	2	0.126	0.06284	229.21236	458.42472	460	1.57528
D6-28		4.036	0.152	0.013	7800	2	0.126	0.06284	210.92136	421.84272	423	1.15728
D6-29	or 152*152*13	4.147	0.152	0.013	7800	2	0.126	0.06284	216.72222	433.44444	435	1.55556
D6-30		0.39	0.21	0.016	7800	6	.110*.210/2	0.01155	8.77968	52.67808	53	0.32192
D6-31		0.613	0.361	0.016	7800	2	.251*.613	0.0769315	18.016315	36.03263	36	-0.0326304
D6-32		0.88	0.49	0.016	7800	1	.222*.118	0.026196	50.544499	50.544499	52	1.4555008
D6-33		0.45	0.31	0.016	7800	4		0	17.4096	69.6384	69	-0.6384
D6-34		0.19	1.843	0.016	7800	6		0	43.701216	262.2073	258	-4.207296
D6-35		0.25	0.45	0.016	7800	24	0.2	0.02	11.544	277.056	276	-1.056
D6-36		0.25	0.337	0.016	7800	24	0.07	0.00245	10.20864	245.00736	242	-3.00736
									sumatorias	26652.943	26538	-114.94301 kg
												-0.0043126 % ERROR

- Dovela 5

DOVELA #	5	BASE DE DATOS PIEZAS			acero a50	3518	7800								
		acero a36	2530	5650	1428.308	2856.616	agujeros		peso unitario	peso total	peso en dovela	diferencial kg			
forma	L	h	e		#piezas	diámetro	area	kg	kg	kg					
D6-1		12	0.406	0.038	7800	2	0	0	1444.06	2888.12	2912	23.8784			
D6-2		12	0.61	0.038	7800	2	0	0	2169.65	4339.30	4374	34.704			
D6-3		12	1.843	0.019	7800	2	0.104	0.00849487	3276.33	6552.66	6562	9.33547844			
D6-4		2.295	0.18	0.016	7800	6		0	51.55	309.33	309	-0.32928			
D6-5		3.99	0.18	0.016	7800	12		0	89.63	1075.58	1073	-2.57632			
D6-6		1.695	0.18	0.016	7800	6		0	38.08	228.46	228	-0.45888			
D6-7		2.148	0.18	0.016	7800	2		0	48.25	96.51	96	-0.505344			
D6-8		3.695	0.18	0.016	7800	4		0	83.00	332.02	331	-1.01792			
D6-9		1.548	0.18	0.016	7800	2		0	34.77	69.55	69	-0.548544			
D6-10		6.128	0.305	0.013	7800	4		0	189.52	758.08	745	-13.082624			
D6-11		12.64	0.305	0.019	7800	2		0	571.34	1142.68	1152	9.31872			
D6-11a		12.64	0.305	0.019	7800	1	.399*.0104	0.0082992	570.11	570.11	576	5.88930144			
D6-12		5.328	0.305	0.013	7800	2		0	164.78	329.56	324	-5.558112			
D6-13		0.8	0.8	0.013	7800	2	.8*.247	0.1976	44.86	89.72	88	-1.71872			
D6-14		12.05	1.281	0.01	7800	3	12* Q25+0 10*0	0.731736	1146.94	3440.81	3279	-161.809476			
D6-15		0.275	0.666	0.01	7800	6		0	14.29	85.71	81	-4.7142			
D6-15a		0.275	1.158	0.01	7800	6		0	24.84	149.03	142	-7.0346			
D6-16		0.305	1.158	0.019	7800	6	0.052	0.00106186	52.19	313.11	268	-45.1123436			
D6-17		0.305	0.666	0.019	7800	6	0.052	0.00106186	29.95	179.68	180	0.32100842			
D6-18		0.127	1.172	0.01	7800	12		0	11.61	139.32	133	-6.317984			
D6-19		0.127	1.208	0.01	7800	12		0	11.97	143.60	137	-6.597376			
D6-20		0.127	1.245	0.01	7800	12		0	12.33	148.00	141	-6.99564			
D6-21		0.127	1.281	0.01	5650	2		0	9.19	18.38	24	5.616369			
D6-22		1.843			5650	6	0.203	0.0248	49.21	295.25	293	-2.2486			
D6-23		7.99			5650	2		0	78.46	156.92	157	0.0764			
D6-24		2.257			5650	4	0.102	0.0125	22.16	88.65	89	0.34504			
D6-25		1.306			7800	2	0.102	0.0125	12.82	25.65	26	0.35016			
D6-26		4.247			7800	2	0.126	0.06284	221.95	443.90	445	1.10356			
D6-27		4.386	0.152	0.013	7800	2	0.126	0.06284	229.21	458.42	460	1.57528			
D6-28		4.036	0.152	0.013	7800	2	0.126	0.06284	210.92	421.84	423	1.15728			
D6-29	or 152*152*13	4.147	0.152	0.013	7800	2	0.126	0.06284	216.72	433.44	435	1.55556			
D6-30		0.39	0.21	0.016	7800	6	.110*.210/2	0.01155	8.78	52.68	53	0.32192			
D6-31		0.613	0.361	0.016	7800	2	.251*.613	0.0769315	18.02	36.03	36	-0.0326304			
D6-32		0.88	0.49	0.016	7800	1	.222*.118	0.026196	50.54	50.54	52	1.4555008			
D6-33		0.45	0.31	0.016	7800	4		0	17.41	69.64	69	-0.6384			
D6-34		0.19	1.843	0.016	7800	6		0	43.70	262.21	258	-4.207296			
D6-35		0.25	0.45	0.016	7800	24		0.2	11.54	277.06	276	-1.056			
D6-36		0.25	0.337	0.016	7800	24		0.07	10.21	245.01	242	-3.00736			
									sumatorias	26716.56	26538	-178.563672			

- Dovela 4

DOVELA #	4	BASE DE DATOS PIEZAS			acero a50	3518	7800					peso en dovela kg	diferencial kg
		forma	L	h	e	acero a36	2530	5650	1428.308	2856.616	agujeros		
D8-1		12	0.406	0.0445	7800	2			0	1691.0712	3382.1424	3397	14.8576
D8-2		12	0.8	0.0445	7800	2	5.30*95*2+95*200	2.052		2619.9108	5239.8216	5262	22.1784
D8-3		12	1.862	0.019	7800	2		0.104	0.00849487	3310.12186	6620.24372	6562	-58.2437216
D8-4		2.295	0.18	0.016	7800	6			0	51.55488	309.32928	309	-0.32928
D8-5		3.99	0.18	0.016	7800	12			0	89.63136	1075.57632	1073	-2.57632
D8-6		1.695	0.18	0.016	7800	6			0	38.07648	228.45888	228	-0.45888
D8-7		2.148	0.18	0.016	7800	2			0	48.252672	96.505344	96	-0.505344
D8-8		3.695	0.18	0.016	7800	4			0	83.00448	332.01792	331	-1.01792
D8-9		1.548	0.18	0.016	7800	2			0	34.774272	69.548544	69	-0.548544
D8-10		6.128	0.305	0.013	7800	4			0	189.520656	758.082624	745	-13.082624
D8-11		12.64	0.305	0.019	7800	2			0	571.34064	1142.68128	1152	9.31872
D8-11a		12.64	0.4	0.019	7800	1	.399*.0104	0.0082992		748.069259	748.069259	755	6.93074144
D8-12		5.328	0.4	0.013	7800	2			0	216.10368	432.20736	425	-7.20736
D8-13		0.8	0.8	0.013	7800	2	8*.247	0.1976		44.85936	89.71872	96	6.28128
D8-14		12.05	1.274	0.01	7800	3	12* (25*0 10*0)	0.731736		1140.35719	3421.07158	3279	-142.071576
D8-15		0.275	0.659	0.01	7800	6			0	14.13555	84.8133	81	-3.8133
D8-15a		0.275	1.152	0.01	7800	6			0	24.7104	148.2624	142	-6.2624
D8-16		0.305	1.152	0.019	7800	6		0.43	0.07261006	41.3107411	247.864446	270	22.1355535
D8-17		0.305	0.659	0.019	7800	6		0.43	0.07261006	19.0266481	114.159888	180	65.8401115
D8-18		0.127	1.191	0.01	7800	12			0	11.798046	141.576552	133	-8.576552
D8-19		0.127	1.202	0.01	7800	12			0	11.907012	142.884144	137	-5.884144
D8-20		0.127	1.238	0.01	7800	12			0	12.263628	147.163536	141	-6.163536
D8-21		0.127	1.274	0.01	5650	2			0	9.141587	18.283174	24	5.716826
D8-22		1.83			5650	6		0.203	0.0248	48.861	293.166	293	-0.166
D8-23		7.99			5650	2			0	78.4618	156.9236	157	0.0764
D8-24		2.257			5650	4		0.102	0.0125	22.16374	88.65496	89	0.34504
D8-25		1.306			7800	2		0.102	0.0125	12.82492	25.64984	26	0.35016
D8-26		4.247			7800	2		0.126	0.06284	221.94822	443.89644	445	1.10356
D8-27		4.386	0.152	0.013	7800	2		0.126	0.06284	229.21236	458.42472	460	1.57528
D8-28		4.036	0.152	0.013	7800	2		0.126	0.06284	210.92136	421.84272	423	1.15728
D8-29	or 152*152*13	4.147	0.152	0.013	7800	2		0.126	0.06284	216.72222	433.44444	435	1.55556
D8-30		0.39	0.21	0.016	7800	6	.110*.210/2		0.01155	8.77968	52.67808	53	0.32192
D8-31		0.613	0.361	0.016	7800	2	.251*.613	0.0769315		18.0163152	36.0326304	36	-0.0326304
D8-32		0.88	0.49	0.016	7800	1	.222*.118	0.026196		50.5444992	50.5444992	52	1.4555008
D8-33		0.45	0.31	0.016	7800	4			0	17.4096	69.6384	69	-0.6384
D8-34		0.19	1.83	0.016	7800	6			0	43.39296	260.35776	258	-2.35776
D8-35		0.25	0.45	0.016	7800	28		0.2	0.02	11.544	323.232	322	-1.232
D8-36		0.25	0.33	0.016	7800	28		0.07	0.00245	9.99024	279.72672	282	2.27328
D8-37		0.19	1.27	0.016	7800	4		0.07	0.00245	29.80848	119.23392	120	0.76608
D8-38		0.127	1.973	0.016	7800	4		0.07	0.00245	30.9655008	123.862003	125	1.1379968
D8-39		0.448	0.5	0.019	7800	3		0.07	0.00245	32.83371	98.50113	101	2.49887
D8-40		0.4	0.5	0.025	7800	2		0.07	0.00245	38.52225	77.0445	80	2.9555
D8-41		0.8	0.8	0.022	7800	2			0	112.02048	224.04096	160	-64.04096
										sumatorias	29027.3776	28873	-154.377592

- Dovela 2 y 3

DOVELA #	Zy3	BASE DE DATOS PIEZAS			acero a50	3518	7800						
		L	h	e	acero a36	2530	5650	1428.308	2856.616	agujeros			
forma										peso unitario	peso total kg	peso en dovela	diferencial kg
					#piezas	diametro	area		kg	kg	kg		
D2-1		12	0.406	0.0445	7800	2	0	0	1691.0712	3382.1424	3397	14.8576	
D2-2		12	0.61	0.0445	7800	2			2540.772	5081.544	5104	22.456	
D2-3		12	1.83	0.019	7800	2	0.104	0.00849487	3253.21306	6506.42612	6562	55.5738784	
D2-4		2.295	0.18	0.016	7800	6		0	51.55488	309.32928	309	-0.32928	
D2-5		3.99	0.18	0.016	7800	12		0	89.63136	1075.57632	1073	-2.57632	
D2-6		1.695	0.18	0.016	7800	6		0	38.07648	228.45888	228	-0.45888	
D2-7		2.148	0.18	0.016	7800	2		0	48.252672	96.505344	96	-0.505344	
D2-8		3.695	0.18	0.016	7800	4		0	83.00448	332.01792	331	-1.01792	
D2-9		1.548	0.18	0.016	7800	2		0	34.774272	69.548544	69	-0.548544	
D2-10		6.128	0.305	0.013	7800	4		0	189.520656	758.082624	745	-13.082624	
D2-11		12.64	0.305	0.019	7800	2		0	571.34064	1142.68128	1152	9.31872	
D2-11a		12.64	0.305	0.019	7800	1	.399*.0104	0.0082992	570.110699	570.110699	576	5.88930144	
D2-12		5.328	0.305	0.013	7800	2		0	164.779056	329.558112	324	-5.558112	
D2-13		0.8	0.8	0.013	7800	2	.8*.247	0.1976	44.85936	89.71872	88	-1.71872	
D2-14		12.05	1.274	0.01	7800	3	12% 025-0 1040	0.731736	1140.35719	3421.07158	3279	-142.071576	
D2-15		0.275	0.659	0.01	7800	6		0	14.13555	84.8133	81	-3.8133	
D2-15a		0.275	1.152	0.01	7800	6		0	24.7104	148.2624	142	-6.2624	
D2-16		0.305	1.152	0.019	7800	6	0.052	0.00106186	51.9141846	311.485108	270	-41.4851076	
D2-17		0.305	0.659	0.019	7800	6	0.052	0.00106186	29.6300916	177.78055	180	2.21945042	
D2-18		0.127	1.166	0.01	7800	12		0	11.550396	138.604752	133	-5.604752	
D2-19		0.127	1.202	0.01	7800	12		0	11.907012	142.884144	137	-5.884144	
D2-20		0.127	1.238	0.01	7800	12		0	12.263628	147.163536	141	-6.163536	
D2-21		0.127	1.274	0.01	5650	2		0	9.141587	18.283174	24	5.716826	
D2-22		1.83			5650	6	0.203	0.0248	48.861	293.166	293	-0.166	
D2-23		7.99			5650	2		0	78.4618	156.9236	157	0.0764	
D2-24		2.257			5650	4	0.102	0.0125	22.16374	88.65496	89	0.34504	
D2-25		1.306			7800	2	0.102	0.0125	12.82492	25.64984	26	0.35016	
D2-26		4.247			7800	2	0.126	0.06284	221.94822	443.89644	445	1.10356	
D2-27		4.386	0.152	0.013	7800	2	0.126	0.06284	229.21236	458.42472	460	1.57528	
D2-28		4.036	0.152	0.013	7800	2	0.126	0.06284	210.92136	421.84272	423	1.15728	
D2-29	or 152*152*13	4.147	0.152	0.013	7800	2		0.126	0.06284	216.72222	433.44444	435	1.55556
D2-30		0.39	0.21	0.016	7800	6	.110*.210/2	0.01155	8.77968	52.67808	53	0.32192	
D2-31		0.613	0.361	0.016	7800	2	.251*.613	0.0769315	18.0163152	36.0326304	36	-0.0326304	
D2-32		0.88	0.49	0.016	7800	1	.222*.118	0.026196	50.5444992	50.5444992	52	1.4555008	
D2-33		0.45	0.31	0.016	7800	4		0	17.4096	69.6384	69	-0.6384	
D2-34		0.19	1.83	0.016	7800	6		0	43.39296	260.35776	258	-2.35776	
D2-35		0.25	0.45	0.016	7800	24		0.2	0.02	11.544	277.056	276	-1.056
D2-36		0.25	0.33	0.016	7800	24		0.07	0.00245	9.99024	239.76576	242	2.23424
									sumatorias	27870.1246	27755	-115.124633	



- Dovela 1 izquierda pila 3

BASE DE DATOS PIEZAS				acero a50	3518	7800									
				acero a36	2530	5650									
DOVELA	1 izquierda pila 3				1428.308	2856.616	agujeros								
	forma	L	h	e			#piezas	diametro	area	peso unitario kg	peso total kg	peso en plano kg	diferencial kg		
D1-1		12	0.406	0.051	7800		2	0	0	1938.0816	3876.1632	3882	5.8368		
D1-2		12	0.61	0.051	7800		2	0	0	2911.896	5823.792	5833	9.208		
D1-3		12	1.83	0.019	7800		2	0.104	0.00849487	3253.213061	6506.42612	6562	55.5738784		
D1-4		2.295	0.18	0.016	7800		6		0	51.55488	309.32928	309	-0.32928		
D1-5		3.99	0.18	0.016	7800		12		0	89.63136	1075.57632	1073	-2.57632		
D1-6		1.695	0.18	0.016	7800		6		0	38.07648	228.45888	228	-0.45888		
D1-7		2.148	0.18	0.016	7800		2		0	48.252672	96.505344	96	-0.505344		
D1-8		3.695	0.18	0.016	7800		4		0	83.00448	332.01792	331	-1.01792		
D1-9		1.548	0.18	0.016	7800		2		0	34.774272	69.548544	69	-0.548544		
D1-10		6.128	0.305	0.013	7800		4		0	189.520656	758.082624	745	-13.082624		
D1-11		12.64	0.305	0.019	7800		2		0	571.34064	1142.68128	1152	9.31872		
D1-11a		12.64	0.305	0.019	7800		1	399*.0104	0.0082992	570.1106986	570.110699	576	5.88930144		
D1-12		5.328	0.305	0.013	7800		2		0	164.779056	329.558112	324	-5.558112		
D1-13		0.8	0.8	0.013	7800		2	8*.247	0.1976	44.85936	89.71872	88	-1.71872		
D1-14		12.05	1.281	0.01	7800		3	126 Q25-0 10*0	0.731736	1146.936492	3440.80948	3280	-160.809476		
D1-15		0.275	0.666	0.01	7800		6		0	14.2857	85.7142	81	-4.7142		
D1-16		0.305	1.158	0.019	7800		6		0.052	0.00106186	52.1853906	313.112344	271	-42.1123436	
D1-17		0.305	0.666	0.019	7800		6		0.052	0.00106186	29.9464986	179.678992	180	0.32100842	
D1-18		0.127	1.172	0.01	7800		12		0	11.609832	139.317984	137	-2.317984		
D1-19		0.127	1.208	0.01	7800		12		0	11.966448	143.597376	141	-2.597376		
D1-20		0.127	1.245	0.01	7800		12		0	12.33297	147.99564	145	-2.99564		
D1-21		0.127	1.281	0.01	5650		2		0	9.1918155	18.383631	25	6.616369		
D1-22		1.843			5650		6		0.203	0.0248	49.2081	295.2486	293	-2.2486	
D1-23		7.99			5650		2		0	78.4618	156.9236	157	0.0764		
D1-24		2.257			5650		4		0.102	0.0125	22.16374	88.65496	89	0.34504	
D1-25		1.306			7800		2		0.102	0.0125	12.82492	25.64984	26	0.35016	
D1-26		4.247			7800		2		0.126	0.06284	221.94822	443.89644	445	1.10356	
D1-27		4.386	0.152	0.013	7800		2		0.126	0.06284	229.21236	458.42472	460	1.57528	
D1-28		4.036	0.152	0.013	7800		2		0.126	0.06284	210.92136	421.84272	423	1.15728	
D1-29		4.147	0.152	0.013	7800		2		0.126	0.06284	216.72222	433.44444	435	1.55556	
D1-30		0.39	0.21	0.016	7800		6	110*.210/2	0.01155	8.77968	52.67808	53	0.32192		
D1-31		0.613	0.361	0.016	7800		2	251*.613	0.0769315	18.0163152	36.0326304	36	-0.0326304		
D1-32		0.88	0.49	0.016	7800		1	222*.118	0.026196	50.5444992	50.5444992	52	1.4555008		
D1-33		0.45	0.31	0.016	7800		4		0	17.4096	69.6384	69	-0.6384		
D1-34		0.19	1.843	0.016	7800		6		0	43.701216	262.207296	258	-4.207296		
D1-35		0.25	0.45	0.016	7800		24		0.2	0.02	11.544	277.056	276	-1.056	
D1-36		0.25	0.337	0.016	7800		24		0.07	0.00245	10.20864	245.00736	242	-3.00736	
										sumatorias	28993.8283	28842	-151.828272		

• Dovela 1 eje 3 y 4

DOVELA #	1 eje 3 y 4	BASE DE DATOS PIEZAS			acero a50	3518	7800	agujeros		peso unitario kg	peso total kg	peso en dovela kg	diferencial kg
		forma	L	h	e	acero a36	2530	5650	#piezas				
D1-1		12	0.406	0.051	7800	2	0	0	1938.0816	3876.1632	3882	5.8368	
D1-2		12	0.61	0.051	7800	2	0	0	2911.896	5823.792	5833	9.208	
D1-3		12	1.83	0.019	7800	2	0.104	0.00849487	3253.21306	6506.42612	6562	55.5738784	
D1-4		2.295	0.18	0.016	7800	6		0	51.55488	309.32928	309	-0.32928	
D1-5		3.99	0.18	0.016	7800	12		0	89.63136	1075.57632	1073	-2.57632	
D1-6		1.695	0.18	0.016	7800	6		0	38.07648	228.45888	228	-0.45888	
D1-7		2.148	0.18	0.016	7800	2		0	48.252672	96.505344	96	-0.505344	
D1-8		3.695	0.18	0.016	7800	4		0	83.00448	332.01792	331	-1.01792	
D1-9		1.548	0.18	0.016	7800	2		0	34.774272	69.548544	69	-0.548544	
D1-10		6.128	0.305	0.013	7800	4		0	189.520656	758.082624	745	-13.082624	
D1-11		12.64	0.305	0.019	7800	2		0	571.34064	1142.68128	1152	9.31872	
D1-11a		12.64	0.305	0.019	7800	1	.399*.0104	0.0082992	570.110699	570.110699	576	5.88930144	
D1-12		5.328	0.305	0.013	7800	2		0	164.779056	329.558112	324	-5.558112	
D1-13		0.8	0.8	0.013	7800	2	.8*.247	0.1976	44.85936	89.71872	88	-1.71872	
D1-14		12.05	1.281	0.01	7800	3	12*6 (25=0) 10*0	0.731736	1146.93649	3440.80948	3280	-160.809476	
D1-15		0.275	0.666	0.01	7800	6		0	14.2857	85.7142	81	-4.7142	
D1-16		0.305	1.158	0.019	7800	6	0.052	0.00106186	52.1853906	313.112344	271	-42.1123436	
D1-17		0.305	0.666	0.019	7800	6	0.052	0.00106186	29.9464986	179.678992	180	0.32100842	
D1-18		0.127	1.172	0.01	7800	12		0	11.609832	139.317984	137	-2.317984	
D1-19		0.127	1.208	0.01	7800	12		0	11.966448	143.597376	141	-2.597376	
D1-20		0.127	1.245	0.01	7800	12		0	12.33297	147.99564	145	-2.99564	
D1-21		0.127	1.281	0.01	5650	2		0	9.1918155	18.383631	25	6.616369	
D1-22		1.843			5650	6	0.203	0.0248	49.2081	295.2486	293	-2.2486	
D1-23		7.99			5650	2		0	78.4618	156.9236	157	0.0764	
D1-24		2.257			5650	4	0.102	0.0125	22.16374	88.65496	89	0.34504	
D1-25		1.306			7800	2	0.102	0.0125	12.82492	25.64984	26	0.35016	
D1-26		4.247			7800	2	0.126	0.06284	221.94822	443.89644	445	1.10356	
D1-27		4.386	0.152	0.013	7800	2	0.126	0.06284	229.21236	458.42472	460	1.57528	
D1-28		4.036	0.152	0.013	7800	2	0.126	0.06284	210.92136	421.84272	423	1.15728	
D1-29		4.147	0.152	0.013	7800	2	0.126	0.06284	216.72222	433.44444	435	1.55556	
D1-30		0.39	0.21	0.016	7800	6	.110*.210/2	0.01155	8.77968	52.67808	53	0.32192	
D1-31		0.613	0.361	0.016	7800	2	.251*.613	0.0769315	18.0163152	36.0326304	36	-0.0326304	
D1-32		0.88	0.49	0.016	7800	1	.222*.118	0.026196	50.5444992	50.5444992	52	1.4555008	
D1-33		0.45	0.31	0.016	7800	4		0	17.4096	69.6384	69	-0.6384	
D1-34		0.19	1.843	0.016	7800	6		0	43.701216	262.207296	258	-4.207296	
D1-35		0.25	0.45	0.016	7800	24	0.2	0.02	11.544	277.056	276	-1.056	
D1-36		0.25	0.337	0.016	7800	24	0.07	0.00245	10.20864	245.00736	242	-3.00736	
									sumatorias	28993.8283	28842	-151.828272	

- Dovela 2 a 4 eje 2 y 3

DOVELA #	Za4 eje 3 y 4	BASE DE DATOS PIEZAS			acero a50	3518	7800	agujeros			peso unitario kg	peso total kg	peso en dovela kg	diferencial kg
		forma	L	h	e	acero a36	2530	5650	#piezas	diametro				
D2-1		12	0.406	0.0445	7800	2	0	0	1691.0712	3382.1424	3397	14.8576		
D2-2		12	0.61	0.0445	7800	2			2540.772	5081.544	5104	22.456		
D2-3		12	1.83	0.019	7800	2	0.104	0.00849487	3253.21306	6506.42612	6562	55.5738784		
D2-4		2.295	0.18	0.016	7800	6			51.55488	309.32928	309	-0.32928		
D2-5		3.99	0.18	0.016	7800	12			89.63136	1075.57632	1073	-2.57632		
D2-6		1.695	0.18	0.016	7800	6			38.07648	228.45888	228	-0.45888		
D2-7		2.148	0.18	0.016	7800	2			48.252672	96.505344	96	-0.505344		
D2-8		3.695	0.18	0.016	7800	4			83.00448	332.01792	331	-1.01792		
D2-9		1.548	0.18	0.016	7800	2			34.774272	69.548544	69	-0.548544		
D2-10		6.128	0.305	0.013	7800	4			189.520656	758.082624	745	-13.082624		
D2-11		12.64	0.305	0.019	7800	2			571.34064	1142.68128	1152	9.31872		
D2-11a		12.64	0.305	0.019	7800	1	399*.0104	0.0082992	570.110699	570.110699	576	5.88930144		
D2-12		5.328	0.305	0.013	7800	2			164.779056	329.558112	324	-5.558112		
D2-13		0.8	0.8	0.013	7800	2	8*.247	0.1976	44.85936	89.71872	88	-1.71872		
D2-14		12.05	1.274	0.01	7800	3	126 (25=0 1040)	0.731736	1140.35719	3421.07158	3279	-142.071576		
D2-15		0.275	0.659	0.01	7800	6			14.13555	84.8133	81	-3.8133		
D2-15a		0.275	1.152	0.01	7800	6			24.7104	148.2624	142	-6.2624		
D2-16		0.305	1.152	0.019	7800	6	0.052	0.00106186	51.9141846	311.485108	270	-41.4851076		
D2-17		0.305	0.659	0.019	7800	6	0.052	0.00106186	29.6300916	177.78055	180	2.21945042		
D2-18		0.127	1.166	0.01	7800	12			11.550396	138.604752	133	-5.604752		
D2-19		0.127	1.202	0.01	7800	12			11.907012	142.884144	137	-5.884144		
D2-20		0.127	1.238	0.01	7800	12			12.263628	147.163536	141	-6.163536		
D2-21		0.127	1.274	0.01	5650	2			9.141587	18.283174	24	5.716826		
D2-22		1.83			5650	6	0.203	0.0248	48.861	293.166	293	-0.166		
D2-23		7.99			5650	2			78.4618	156.9236	157	0.0764		
D2-24		2.257			5650	4	0.102	0.0125	22.16374	88.65496	89	0.34504		
D2-25		1.306			7800	2	0.102	0.0125	12.82492	25.64984	26	0.35016		
D2-26		4.247			7800	2	0.126	0.06284	221.94822	443.89644	445	1.10356		
D2-27		4.386	0.152	0.013	7800	2	0.126	0.06284	229.21236	458.42472	460	1.57528		
D2-28		4.036	0.152	0.013	7800	2	0.126	0.06284	210.92136	421.84272	423	1.15728		
D2-29	or 152*152*13	4.147	0.152	0.013	7800	2	0.126	0.06284	216.72222	433.44444	435	1.55556		
D2-30		0.39	0.21	0.016	7800	6	110*.210/2	0.01155	8.77968	52.67808	53	0.32192		
D2-31		0.613	0.361	0.016	7800	2	251*.613	0.0769315	18.0163152	36.0326304	36	-0.0326304		
D2-32		0.88	0.49	0.016	7800	1	222*.118	0.026196	50.5444992	50.5444992	52	1.4555008		
D2-33		0.45	0.31	0.016	7800	4			17.4096	69.6384	69	-0.6384		
									sumatorias	27092.9451	26979	-113.945113		

- Dovela 5 a 7 eje 2 y 3

DOVELA #	5a7	BASE DE DATOS PIEZAS			acero a50	3518	7800	agujeros		peso unitario kg	peso total kg	peso en dovela kg	diferencial kg
		L	h	e	acero a36	2530	5650	#piezas	diametro				
D5-1		12	0.406	0.038	7800	2	0	0	1444.0608	2888.1216	2912	23.8784	
D5-2		12	0.61	0.038	7800	2			2169.648	4339.296	4374	34.704	
D5-3		12	1.83	0.019	7800	2	0.104	0.00849487	3253.21306	6506.426122	6562	55.5738784	
D5-4		2.295	0.18	0.016	7800	6		0	51.55488	309.32928	309	-0.32928	
D5-5		3.99	0.18	0.016	7800	12		0	89.63136	1075.57632	1073	-2.57632	
D5-6		1.695	0.18	0.016	7800	6		0	38.07648	228.45888	228	-0.45888	
D5-7		2.148	0.18	0.016	7800	2		0	48.252672	96.505344	96	-0.505344	
D5-8		3.695	0.18	0.016	7800	4		0	83.00448	332.01792	331	-1.01792	
D5-9		1.548	0.18	0.016	7800	2		0	34.774272	69.548544	69	-0.548544	
D5-10		6.128	0.305	0.013	7800	4		0	189.520656	758.082624	745	-13.082624	
D5-11		12.64	0.305	0.019	7800	2		0	571.34064	1142.68128	1152	9.31872	
D5-11a		12.64	0.305	0.019	7800	1	399*.0104	0.0082992	570.110699	570.1106986	576	5.88930144	
D5-12		5.328	0.305	0.013	7800	2		0	164.779056	329.558112	324	-5.558112	
D5-13		0.8	0.8	0.013	7800	2	8*.247	0.1976	44.85936	89.71872	88	-1.71872	
D5-14		12.05	1.274	0.01	7800	3	126 025-0 1040	0.731736	1140.35719	3421.071576	3279	-142.071576	
D5-15		0.275	0.659	0.01	7800	6		0	14.13555	84.8133	81	-3.8133	
D5-15a		0.275	1.152	0.01	7800	6		0	24.7104	148.2624	142	-6.2624	
D5-16		0.305	1.152	0.019	7800	6		0.052	0.00106186	51.9141846	311.4851076	268	-43.4851076
D5-17		0.305	0.659	0.019	7800	6		0.052	0.00106186	29.6300916	177.7805496	180	2.21945042
D5-18		0.127	1.166	0.01	7800	12		0	11.550396	138.604752	133	-5.604752	
D5-19		0.127	1.202	0.01	7800	12		0	11.907012	142.884144	137	-5.884144	
D5-20		0.127	1.238	0.01	7800	12		0	12.263628	147.163536	141	-6.163536	
D5-21		0.127	1.274	0.01	5650	2		0	9.141587	18.283174	24	5.716826	
D5-22		1.83			5650	6	0.203	0.0248	48.861	293.166	293	-0.166	
D5-23		7.99			5650	2		0	78.4618	156.9236	157	0.0764	
D5-24		2.257			5650	4	0.102	0.0125	22.16374	88.65496	89	0.34504	
D5-25		1.306			7800	2	0.102	0.0125	12.82492	25.64984	26	0.35016	
D5-26		4.247			7800	2	0.126	0.06284	221.94822	443.89644	445	1.10356	
D5-27		4.386	0.152	0.013	7800	2	0.126	0.06284	229.21236	458.42472	460	1.57528	
D5-28		4.036	0.152	0.013	7800	2	0.126	0.06284	210.92136	421.84272	423	1.15728	
D5-29	or 152*152*13	4.147	0.152	0.013	7800	2	0.126	0.06284	216.72222	433.44444	435	1.55556	
D5-30		0.39	0.21	0.016	7800	6	110*.210/2	0.01155	8.77968	52.67808	53	0.32192	
D5-31		0.613	0.361	0.016	7800	2	251*.613	0.0769315	18.0163152	36.0326304	36	-0.0326304	
D5-32		0.88	0.49	0.016	7800	1	222*.118	0.026196	50.5444992	50.5444992	52	1.4555008	
D5-33		0.45	0.31	0.016	7800	4		0	17.4096	69.6384	69	-0.6384	
sumatorias										25856.67631	25762	-94.6763129	

- Dovela 8 a 13

		BASE DE DATOS PIEZAS			acero a50	3518	7800						
DOVELA #	8 a 13				acero a36	2530	5650	agujeros					
	forma	L	h	e		#piezas	diametro	area	peso unitario kg	peso total kg	peso en dovela kg	diferencial kg	
D8-1		12	0.406	0.019	7800	2	0	0	722.0304	1444.0608	1456	11.9392	
D8-2		12	0.61	0.038	7800	2			2169.648	4339.296	4374	34.704	
D8-3		12	1.83	0.019	7800	2	0.104	0.00849487	3253.21306	6506.42612	6562	55.5738784	
D8-4		2.295	0.18	0.016	7800	6		0	51.55488	309.32928	309	-0.32928	
D8-5		3.99	0.18	0.016	7800	12		0	89.63136	1075.57632	1073	-2.57632	
D8-6		1.695	0.18	0.016	7800	6		0	38.07648	228.45888	228	-0.45888	
D8-7		2.148	0.18	0.016	7800	2		0	48.252672	96.505344	96	-0.505344	
D8-8		3.695	0.18	0.016	7800	4		0	83.00448	332.01792	331	-1.01792	
D8-9		1.548	0.18	0.016	7800	2		0	34.774272	69.548544	69	-0.548544	
D8-10		6.128	0.305	0.013	7800	4		0	189.520656	758.082624	745	-13.082624	
D8-11		12.64	0.305	0.019	7800	2		0	571.34064	1142.68128	1152	9.31872	
D8-11a		12.64	0.305	0.019	7800	1	399*.0104	0.0082992	570.110699	570.110699	576	5.88930144	
D8-12		5.328	0.305	0.013	7800	2		0	164.779056	329.558112	324	-5.558112	
D8-13		0.8	0.8	0.013	7800	2	8*.247	0.1976	44.85936	89.71872	88	-1.71872	
D8-14		12.05	1.274	0.01	7800	3	12* 05-0 10*0	0.731736	1140.35719	3421.07158	3279	-142.071576	
D8-15		0.275	0.659	0.01	7800	6		0	14.13555	84.8133	81	-3.8133	
D8-15a		0.275	1.152	0.01	7800	6		0	24.7104	148.2624	142	-6.2624	
D8-16		0.305	1.152	0.019	7800	6	0.052	0.00106186	51.9141846	311.485108	264	-47.4851076	
D8-17		0.305	0.659	0.019	7800	6	0.052	0.00106186	29.6300916	177.78055	180	2.21945042	
D8-18		0.127	1.166	0.01	7800	12		0	11.550396	138.604752	133	-5.604752	
D8-19		0.127	1.202	0.01	7800	12		0	11.907012	142.884144	137	-5.884144	
D8-20		0.127	1.238	0.01	7800	12		0	12.263628	147.163536	141	-6.163536	
D8-21		0.127	1.274	0.01	5650	2		0	9.141587	18.283174	24	5.716826	
D8-22		1.83			5650	6	0.203	0.0248	48.861	293.166	293	-0.166	
D8-23		7.99			5650	2		0	78.4618	156.9236	157	0.0764	
D8-24		2.257			5650	4	0.102	0.0125	22.16374	88.65496	89	0.34504	
D8-25		1.306			7800	2	0.102	0.0125	12.82492	25.64984	26	0.35016	
D8-26		4.247			7800	2	0.126	0.06284	221.94822	443.89644	445	1.10356	
D8-27		4.386	0.152	0.013	7800	2	0.126	0.06284	229.21236	458.42472	460	1.57528	
D8-28		4.036	0.152	0.013	7800	2	0.126	0.06284	210.92136	421.84272	423	1.15728	
D8-29	or 152*152*13	4.147	0.152	0.013	7800	2	0.126	0.06284	216.72222	433.44444	435	1.55556	
D8-30		0.39	0.21	0.016	7800	6	110*.210/2	0.01155	8.77968	52.67808	53	0.32192	
D8-31		0.613	0.361	0.016	7800	2	251*.613	0.0769315	18.0163152	36.0326304	36	-0.0326304	
D8-32		0.88	0.49	0.016	7800	1	222*.118	0.026196	50.5444992	50.5444992	52	1.4555008	
D8-33		0.45	0.31	0.016	7800	4		0	17.4096	69.6384	69	-0.6384	
									sumatorias	24412.6155	24302	-110.615513	

• Dovela 14

DOVELA #	14	BASE DE DATOS PIEZAS			acero a50	3518	7800	agujeros		peso unitario kg	peso total kg	peso en dovela kg	diferencial kg	
		acero a36	2530	5650	983.574167	1967.14833	#piezas	diametro	area					
forma	L	h	e											
D14-1		11	0.406	0.019	7800	2	0	0	661.8612	1323.7224	1334	10.2776		
D14-2		11	0.61	0.038	7800	2			1988.844	3977.688	4010	32.312		
D14-3		11	1.83	0.019	7800	2	0.104	0.00849487	2982.00706	5964.01412	6015	50.9858784		
D14-4		2.295	0.18	0.016	7800	6			51.55488	309.32928	309	-0.32928		
D14-5		3.99	0.18	0.016	7800	12			89.63136	1075.57632	1073	-2.57632		
D14-6		0.695	0.18	0.016	7800	6			15.61248	93.67488	93	-0.67488		
D14-7		2.148	0.18	0.016	7800	2			48.252672	96.505344	96	-0.505344		
D14-8		3.695	0.18	0.016	7800	4			83.00448	332.01792	331	-1.01792		
D14-9		0.548	0.18	0.016	7800	2			12.310272	24.620544	25	0.379456		
D14-10		6.128	0.305	0.013	7800	4			189.520656	758.082624	745	-13.082624		
D14-11		12.64	0.305	0.019	7800	2			571.34064	1142.68128	1152	9.31872		
D14-11a		12.64	0.305	0.019	7800	1	.399*.0104	0.0082992	570.110699	570.110699	576	5.88930144		
D14-12		5.328	0.305	0.013	7800	2			164.779056	329.558112	324	-5.558112		
D14-13		0.8	0.8	0.013	7800	2	.8*.247	0.1976	44.85936	89.71872	88	-1.71872		
D14-14		12.05	1.274	0.01	7800	3	12* .025-0 10*0	0.731736	1140.35719	3421.07158	3279	-142.071576		
D14-15		0.275	0.659	0.01	7800	6			14.13555	84.8133	81	-3.8133		
D14-15a		0.275	1.152	0.01	7800	6			24.7104	148.2624	142	-6.2624		
D14-16		0.35	1.152	0.019	7800	6		0.052	0.00106186	59.5968726	268	-89.5812356		
D14-17		0.305	0.659	0.019	7800	6		0.052	0.00106186	29.6300916	177.78055	180	2.21945042	
D14-18		0.127	1.166	0.01	7800	12			11.550396	138.604752	133	-5.604752		
D14-19		0.127	1.202	0.01	7800	12			11.907012	142.884144	137	-5.884144		
D14-20		0.127	1.238	0.01	7800	12			12.263628	147.163536	141	-6.163536		
D14-21		0.127	1.274	0.01	5650	2			9.141587	18.283174	24	5.716826		
D14-22		1.83			5650	6		0.203	0.0248	48.861	293.166	293	-0.166	
D14-23		7.99			5650	2			78.4618	156.9236	157	0.0764		
D14-24		2.257			5650	4		0.102	0.0125	22.16374	88.65496	89	0.34504	
D14-25		1.306			7800	2		0.102	0.0125	12.82492	25.64984	26	0.35016	
D14-27		4.386	0.152	0.013	7800	2		0.126	0.06284	229.21236	458.42472	460	1.57528	
D14-28		4.036	0.152	0.013	7800	2		0.126	0.06284	210.92136	421.84272	423	1.15728	
D14-29		or 152*152*13	4.147	0.152	0.013	7800	2		0.126	0.06284	216.72222	433.44444	435	1.55556
D14-30		0.39	0.21	0.016	7800	6	.110*.210/2	0.01155	8.77968	52.67808	53	0.32192		
D14-31		0.613	0.361	0.016	7800	2	.251*.613	0.0769315	18.0163152	36.0326304	36	-0.0326304		
D14-32		0.88	0.49	0.016	7800	1	.222*.118	0.026196	50.5444992	50.5444992	52	1.4555008		
D14-33		0.45	0.31	0.016	7800	4			17.4096	69.6384	35	-34.6384		
sumatorias										22810.7448	22615	-195.744801		

- Dovelas de pila

		BASE DE DATOS PIEZAS			acero a50	3518	7800								
					acero a36	2530	5650								
DOVELA #	de pila	L	h	e		1428.308	2856.616	agujeros		peso unitario	peso total	peso en tovena	diferencial kg		
	forma						#piezas	diametro	area	kg	kg	kg			
DP-1		12	0.406	0.051		7800	2	0	0	1938.0816	3876.1632	3882	5.8368		
DP-2		12	0.8	0.051		7800	2	5.30*95*2+95*200	2.052	3002.5944	6005.1888	6015	9.8112		
DP-3		11.4	1.817	0.019		7800	2		0	3069.78516	6139.57032	6189	49.42968		
DP-4		1.695	0.18	0.016		7800	12		0	38.07648	456.91776	455	-1.91776		
DP-5		3.99	0.18	0.016		7800	12		0	89.63136	1075.57632	1037	-38.57632		
DP-6		1.548	0.18	0.016		7800	4		0	34.774272	139.097088	139	-0.097088		
DP-7		3.648	0.18	0.016		7800	4		0	81.948672	327.794688	327	-0.794688		
DP-8		6.128	0.305	0.013		7800	4		0	189.520656	758.082624	745	-13.082624		
DP-9		12.64	0.305	0.019		7800	2		0	571.34064	1142.68128	1152	9.31872		
DP-10		6.128	0.4	0.025		7800	2		0	477.984	955.968	976	20.032		
DP-11		4.625	0.4	0.038		7800	2		0	548.34	1096.68	1106	9.32		
DP-12		3.39	1.4	0.038		7800	1	.815*.500*2	0.815	1165.1484	1165.1484	1049	-116.1484		
DP-13		12.05	1.267	0.01		7800	2	12* .025*0 10*0	0.729025	1133.98935	2267.9787	2172	-95.9787		
DP-14		12.05	1.267	0.013		7800	1	12* .025*0 10*0	0.729025	1474.18616	1474.18616	1448	-26.186155		
DP-15		0.275	1.146	0.01		7800	4		0	24.5817	98.3268	94	-4.3268		
DP-15a		0.275	1.145	0.013		7800	2		0	31.928325	63.85665	63	-0.85665		
DP-16		0.275	0.653	0.01		7800	4	0.052	0.00106186	13.9240251	55.6961002	54	-1.69610021		
DP-17		0.275	0.633	0.013		7800	2	0.052	0.00106186	17.5435326	35.0870651	36	0.91293487		
DP-18		0.4	1.146	0.019		7800	6		0	67.93488	407.60928	411	3.39072		
DP-19		0.4	0.653	0.019		7800	4		0	38.70984	154.83936	156	1.16064		
DP-20		0.4	0.633	0.019		7800	2		0	37.52424	75.04848	76	0.95152		
DP-21		0.127	1.159	0.01		7800	8		0	11.481054	91.848432	88	-3.848432		
DP-22		0.127	1.196	0.01		7800	8		0	11.847576	94.780608	91	-3.780608		
DP-23		0.127	1.232	0.01		7800	8		0	12.204192	97.633536	94	-3.633536		
DP-24		0.192	1.257	0.019		7800	4		0	35.7671808	143.068723	144	0.9312768		
DP-25		0.692	1.255	0.019		7800	4	.4*1.255/2	0.251	91.507572	366.030288	331	-35.030288		
DP-26		0.192	1.253	0.019		7800	4		0	35.6533632	142.613453	144	1.3865472		
DP-27		0.192	1.244	0.019		7800	4		0	35.3972736	141.589094	143	1.4109056		
DP-28		0.192	1.235	0.019		7800	4		0	35.141184	140.564736	142	1.435264		
DP-29		0.192	1.225	0.013		7800	4		0	23.84928	95.39712	94	-1.39712		
DP-30		0.192	1.216	0.019		7800	4		0	34.6005504	138.402202	93	-45.4022016		
DP-31		0.192	1.207	0.013		7800	4		0	23.4988416	93.9953664	92	-1.9953664		
DP-32		0.192	1.198	0.013		7800	4		0	23.3236224	93.2944896	91	-2.2944896		
DP-33		0.192	1.189	0.013		7800	4		0	23.1484032	92.5936128	91	-1.5936128		
DP-34		0.192	1.179	0.019		7800	4		0	33.5477376	134.19095	90	-44.1909504		
DP-35		0.192	1.17	0.013		7800	4		0	22.778496	91.113984	89	-2.113984		
DP-36		0.192	1.161	0.013		7800	4		0	22.6032768	90.4131072	89	-1.4131072		
DP-37		0.192	1.15	0.013		7800	8		0	22.38912	179.11296	176	-3.11296		
DP-38		1.13	0.192	0.016		7800	4		0	27.076608	108.306432	108	-0.306432		
DP-39		0.8	0.192	0.019		7800	16		0	22.76352	364.21632	31	-333.21632		
DP-40		0.446	0.192	0.016		7800	72		0	10.6868736	769.454899	768	-1.4548992		
DP-40a		0.44	0.192	0.016		7800	16		0	10.543104	168.689664	168	-0.689664		
DP-41		0.084	0.192	0.016		7800	16		0	2.0127744	32.2043904	32	-0.2043904		
DP-42		1.4	0.85	0.025		7800	2		0	232.05	464.1	474	9.9		
DP-43		1.325	0.675	0.016		7800	8		0	111.618	892.944	891	-1.944		
DP-44		1.325	0.85	0.016		7800	3		0	140.556	421.668	421	-0.668		
DP-45	or 152*152*13	6.368		0.013		7800	4		62.46	332.79168	1331.16672	1336	4.83328		
DP-46		0.45	0.31	0.016		7800	4		0	17.4096	69.6384	69	-0.6384		
DP-47		0.51	0.3	0.016		7800	4	.1*.3/2	0.015	17.2224	68.8896	69	0.1104		
DP-48		0.127	1.268	0.01		7800	2		0	12.560808	25.121616	24	-1.121616		
DP-49	102*6 ANG	7.99				5650	2		0	9.82	156.9236	157	0.0764		
DP-50		2.257				5650	4		0	9.82	88.65496	89	0.34504		
DP-51		1.306				5650	2		0	9.82	25.64984	27	1.35016		
DP-52		1.817				5650	6		0	26.7	291.0834	293	1.9166		
DP-53		0.19	1.817	0.016		7800	6		0	43.084704	258.508224	258	-0.508224		
DP-54		0.25	0.45	0.016		7800	28	.2*.2/2	0.02	11.544	323.232	322	-1.232		
DP-55		0.25	0.324	0.016		7800	28	.07*.07/2	0.00245	9.80304	274.48512	282	7.51488		
DP-56		0.8	0.8	0.022		7800	2		0	112.02048	224.04096	160	-64.04096		
										sumatorias	36357.1179	35643	-669.807048		

- Dovela 1 derecha pila 4

DOVELA #	1	BASE DE DATOS PIEZAS			acero a50	3518	7800	agujeros		peso unitario kg	peso total kg	peso en dovela kg	diferencial kg
		forma	L	h	e	acero a36	2530	5650	#piezas				
D1-1		12	0.406	0.051	7800	2	0	0	1938.0816	3876.1632	3882	5.8368	
D1-2		12	0.61	0.051	7800	2	0	0	2911.896	5823.792	5833	9.208	
D1-3		12	1.83	0.019	7800	2	0.104	0.00849487	3253.21306	6506.42612	6562	55.5738784	
D1-4		2.295	0.18	0.016	7800	6		0	51.55488	309.32928	309	-0.32928	
D1-5		3.99	0.18	0.016	7800	12		0	89.63136	1075.57632	1073	-2.57632	
D1-6		1.695	0.18	0.016	7800	6		0	38.07648	228.45888	228	-0.45888	
D1-7		2.148	0.18	0.016	7800	2		0	48.252672	96.505344	96	-0.505344	
D1-8		3.695	0.18	0.016	7800	4		0	83.00448	332.01792	331	-1.01792	
D1-9		1.548	0.18	0.016	7800	2		0	34.774272	69.548544	69	-0.548544	
D1-10		6.128	0.305	0.013	7800	4		0	189.520656	758.082624	745	-13.082624	
D1-11		12.64	0.305	0.019	7800	2		0	571.34064	1142.68128	1152	9.31872	
D1-11a		12.64	0.305	0.019	7800	1	.399*.0104	0.0082992	570.110699	570.110699	576	5.88930144	
D1-12		5.328	0.305	0.013	7800	2		0	164.779056	329.558112	324	-5.558112	
D1-13		0.8	0.8	0.013	7800	2	.8*.247	0.1976	44.85936	89.71872	88	-1.71872	
D1-14		12.05	1.281	0.01	7800	3	12* .025*0 104*0	0.731736	1146.93649	3440.80948	3280	-160.809476	
D1-15		0.275	0.666	0.01	7800	6		0	14.2857	85.7142	81	-4.7142	
D1-16		0.305	1.158	0.019	7800	6		0.052	0.00106186	52.1853906	313.112344	271	-42.1123436
D1-17		0.305	0.666	0.019	7800	6		0.052	0.00106186	29.9464986	179.678992	180	0.32100842
D1-18		0.127	1.172	0.01	7800	12		0	11.609832	139.317984	137	-2.317984	
D1-19		0.127	1.208	0.01	7800	12		0	11.966448	143.597376	141	-2.597376	
D1-20		0.127	1.245	0.01	7800	12		0	12.33297	147.99564	145	-2.99564	
D1-21		0.127	1.281	0.01	5650	2		0	9.1918155	18.383631	25	6.616369	
D1-22		1.843			5650	6		0.203	0.0248	49.2081	295.2486	293	-2.2486
D1-23		7.99			5650	2		0	78.4618	156.9236	157	0.0764	
D1-24		2.257			5650	4		0.102	0.0125	22.16374	88.65496	89	0.34504
D1-25		1.306			7800	2		0.102	0.0125	12.82492	25.64984	26	0.35016
D1-26		4.247			7800	2		0.126	0.06284	221.94822	443.89644	445	1.10356
D1-27		4.386	0.152	0.013	7800	2		0.126	0.06284	229.21236	458.42472	460	1.57528
D1-28		4.036	0.152	0.013	7800	2		0.126	0.06284	210.92136	421.84272	423	1.15728
D1-29	or 152*152*13	4.147	0.152	0.013	7800	2		0.126	0.06284	216.72222	433.44444	435	1.55556
D1-30		0.39	0.21	0.016	7800	6	.110*.210/2	0.01155	8.77968	52.67808	53	0.32192	
D1-31		0.613	0.361	0.016	7800	2	.251*.613	0.0769315	18.0163152	36.0326304	36	-0.0326304	
D1-32		0.88	0.49	0.016	7800	1	.222*.118	0.026196	50.5444992	50.5444992	52	1.4555008	
D1-33		0.45	0.31	0.016	7800	4		0	17.4096	69.6384	69	-0.6384	
D1-34		0.19	1.843	0.016	7800	6		0	43.701216	262.207296	258	-4.207296	
D1-35		0.25	0.45	0.016	7800	24		0.2	0.02	11.544	277.056	276	-1.056
D1-36		0.25	0.337	0.016	7800	24		0.07	0.00245	10.20864	245.00736	242	-3.00736
									sumatorias	28993.8283	28842	-151.828272	



- Dovela 2 y 3 derecha pila 4

DOVELA #	2y3	BASE DE DATOS PIEZAS			acero a50	3518	7800						
		L	h	e	acero a36	2530	5650	agujeros					
	forma									peso unitario	peso total	peso en dovela	diferencial
						#piezas	diámetro	area	kg	kg	kg	kg	kg
D2-1		12	0.406	0.0445	7800	2	0	0	1691.0712	3382.1424	3397	14.8576	
D2-2		12	0.61	0.0445	7800	2			2540.772	5081.544	5104	22.456	
D2-3		12	1.83	0.019	7800	2	0.104	0.00849487	3253.21306	6506.42612	6562	55.5738784	
D2-4		2.295	0.18	0.016	7800	6			51.55488	309.32928	309	-0.32928	
D2-5		3.99	0.18	0.016	7800	12			89.63136	1075.57632	1073	-2.57632	
D2-6		1.695	0.18	0.016	7800	6			38.07648	228.45888	228	-0.45888	
D2-7		2.148	0.18	0.016	7800	2			48.252672	96.505344	96	-0.505344	
D2-8		3.695	0.18	0.016	7800	4			83.00448	332.01792	331	-1.01792	
D2-9		1.548	0.18	0.016	7800	2			34.774272	69.548544	69	-0.548544	
D2-10		6.128	0.305	0.013	7800	4			189.520656	758.082624	745	-13.082624	
D2-11		12.64	0.305	0.019	7800	2			571.34064	1142.68128	1152	9.31872	
D2-11a		12.64	0.305	0.019	7800	1	.399*.0104	0.0082992	570.110699	570.110699	576	5.88930144	
D2-12		5.328	0.305	0.013	7800	2			164.779056	329.558112	324	-5.558112	
D2-13		0.8	0.8	0.013	7800	2	.8*.247	0.1976	44.85936	89.71872	88	-1.71872	
D2-14		12.05	1.274	0.01	7800	3	12% 025-0 1040	0.731736	1140.35719	3421.07158	3279	-142.071576	
D2-15		0.275	0.659	0.01	7800	6			14.13555	84.8133	81	-3.8133	
D2-15a		0.275	1.152	0.01	7800	6			24.7104	148.2624	142	-6.2624	
D2-16		0.305	1.152	0.019	7800	6	0.052	0.00106186	51.9141846	311.485108	270	-41.4851076	
D2-17		0.305	0.659	0.019	7800	6	0.052	0.00106186	29.6300916	177.78055	180	2.21945042	
D2-18		0.127	1.166	0.01	7800	12			11.550396	138.604752	133	-5.604752	
D2-19		0.127	1.202	0.01	7800	12			11.907012	142.884144	137	-5.884144	
D2-20		0.127	1.238	0.01	7800	12			12.263628	147.163536	141	-6.163536	
D2-21		0.127	1.274	0.01	5650	2			9.141587	18.283174	24	5.716826	
D2-22		1.83			5650	6	0.203	0.0248	48.861	293.166	293	-0.166	
D2-23		7.99			5650	2			78.4618	156.9236	157	0.0764	
D2-24		2.257			5650	4	0.102	0.0125	22.16374	88.65496	89	0.34504	
D2-25		1.306			7800	2	0.102	0.0125	12.82492	25.64984	26	0.35016	
D2-26		4.247			7800	2	0.126	0.06284	221.94822	443.89644	445	1.10356	
D2-27		4.386	0.152	0.013	7800	2	0.126	0.06284	229.21236	458.42472	460	1.57528	
D2-28		4.036	0.152	0.013	7800	2	0.126	0.06284	210.92136	421.84272	423	1.15728	
D2-29	or 152*152*13	4.147	0.152	0.013	7800	2	0.126	0.06284	216.72222	433.44444	435	1.55556	
D2-30		0.39	0.21	0.016	7800	6	.110*.210/2	0.01155	8.77968	52.67808	53	0.32192	
D2-31		0.613	0.361	0.016	7800	2	.251*.613	0.0769315	18.0163152	36.0326304	36	-0.0326304	
D2-32		0.88	0.49	0.016	7800	1	.222*.118	0.026196	50.5444992	50.5444992	52	1.4555008	
D2-33		0.45	0.31	0.016	7800	4			17.4096	69.6384	69	-0.6384	
D2-34		0.19	1.83	0.016	7800	6			43.39296	260.35776	258	-2.35776	
D2-35		0.25	0.45	0.016	7800	24		0.2	0.02	11.544	277.056	276	-1.056
D2-36		0.25	0.33	0.016	7800	24		0.07	0.00245	9.99024	239.76576	242	2.23424
										sumatorias	27870.1246	27755	-115.124633

- Dovela 4 derecha pila 4

DOVELA #	4	BASE DE DATOS PIEZAS			acero a50	3518	7800							
		forma	L	h	e	acero a36	2530	5650	agujeros		peso unitario kg	peso total kg	peso en dovela kg	diferencial kg
D8-1		12	0.406	0.0445	7800	2	0	0	1691.0712	3382.1424	3397	14.8576		
D8-2		12	0.8	0.0445	7800	2	5.30*95*2+95*200	2.052	2619.9108	5239.8216	5262	22.1784		
D8-3		12	1.862	0.019	7800	2	0.104	0.00849487	3310.12186	6620.24372	6562	-58.2437216		
D8-4		2.295	0.18	0.016	7800	6		0	51.55488	309.32928	309	-0.32928		
D8-5		3.99	0.18	0.016	7800	12		0	89.63136	1075.57632	1073	-2.57632		
D8-6		1.695	0.18	0.016	7800	6		0	38.07648	228.45888	228	-0.45888		
D8-7		2.148	0.18	0.016	7800	2		0	48.252672	96.505344	96	-0.505344		
D8-8		3.695	0.18	0.016	7800	4		0	83.00448	332.01792	331	-1.01792		
D8-9		1.548	0.18	0.016	7800	2		0	34.774272	69.548544	69	-0.548544		
D8-10		6.128	0.305	0.013	7800	4		0	189.520656	758.082624	745	-13.082624		
D8-11		12.64	0.305	0.019	7800	2		0	571.34064	1142.68128	1152	9.31872		
D8-11a		12.64	0.4	0.019	7800	1	.399*.0104	0.0082992	748.069259	748.069259	755	6.93074144		
D8-12		5.328	0.4	0.013	7800	2		0	216.10368	432.20736	425	-7.20736		
D8-13		0.8	0.8	0.013	7800	2	.8*.247	0.1976	44.85936	89.71872	96	6.28128		
D8-14		12.05	1.274	0.01	7800	3	12* (25*0 10*0)	0.731736	1140.35719	3421.07158	3279	-142.071576		
D8-15		0.275	0.659	0.01	7800	6		0	14.13555	84.8133	81	-3.8133		
D8-15a		0.275	1.152	0.01	7800	6		0	24.7104	148.2624	142	-6.2624		
D8-16		0.305	1.152	0.019	7800	6		0.43	0.07261006	41.3107411	247.864446	270	22.1355535	
D8-17		0.305	0.659	0.019	7800	6		0.43	0.07261006	19.0266481	114.159888	180	65.8401115	
D8-18		0.127	1.191	0.01	7800	12		0	11.798046	141.576552	133	-8.576552		
D8-19		0.127	1.202	0.01	7800	12		0	11.907012	142.884144	137	-5.884144		
D8-20		0.127	1.238	0.01	7800	12		0	12.263628	147.163536	141	-6.163536		
D8-21		0.127	1.274	0.01	5650	2		0	9.141587	18.283174	24	5.716826		
D8-22		1.83			5650	6		0.203	0.0248	48.861	293.166	293	-0.166	
D8-23		7.99			5650	2		0	78.4618	156.9236	157	0.0764		
D8-24		2.257			5650	4		0.102	0.0125	22.16374	88.65496	89	0.34504	
D8-25		1.306			7800	2		0.102	0.0125	12.82492	25.64984	26	0.35016	
D8-26		4.247			7800	2		0.126	0.06284	221.94822	443.89644	445	1.10356	
D8-27		4.386	0.152	0.013	7800	2		0.126	0.06284	229.21236	458.42472	460	1.57528	
D8-28		4.036	0.152	0.013	7800	2		0.126	0.06284	210.92136	421.84272	423	1.15728	
D8-29		or 152*152*13	4.147	0.152	0.013	7800	2		0.126	0.06284	216.72222	433.44444	435	1.55556
D8-30		0.39	0.21	0.016	7800	6	.110*.210/2	0.01155	8.77968	52.67808	53	0.32192		
D8-31		0.613	0.361	0.016	7800	2	.251*.613	0.0769315	18.0163152	36.0326304	36	-0.0326304		
D8-32		0.88	0.49	0.016	7800	1	.222*.118	0.026196	50.5444992	50.5444992	52	1.4555008		
D8-33		0.45	0.31	0.016	7800	4		0	17.4096	69.6384	69	-0.6384		
D8-34		0.19	1.83	0.016	7800	6		0	43.39296	260.35776	258	-2.35776		
D8-35		0.25	0.45	0.016	7800	28		0.2	0.02	11.544	323.232	322	-1.232	
D8-36		0.25	0.33	0.016	7800	28		0.07	0.00245	9.99024	279.72672	282	2.27328	
D8-37		0.19	1.27	0.016	7800	4		0.07	0.00245	29.80848	119.23392	120	0.76608	
D8-38		0.127	1.973	0.016	7800	4		0.07	0.00245	30.9655008	123.862003	125	1.1379968	
D8-39		0.448	0.5	0.019	7800	3		0.07	0.00245	32.83371	98.50113	101	2.49887	
D8-40		0.4	0.5	0.025	7800	2		0.07	0.00245	38.52225	77.0445	80	2.9555	
D8-41		0.8	0.8	0.022	7800	2		0	112.02048	224.04096	160	-64.04096		
										sumatorias	29027.3776	28873	-154.377592	

- Dovela 5 a 7

DOVELA #	5 a 7	BASE DE DATOS PIEZAS			acero a50	3518	7800						
		L	h	e	acero a36	2530	5650	agujeros					
	forma					#piezas	diametro	area	peso unitario kg	peso total kg	peso en dovela kg	diferencial kg	
D6-1		12	0.406	0.038	7800	2	0	0	1444.0608	2888.1216	2912	23.8784	
D6-2		12	0.61	0.038	7800	2	0	0	2169.648	4339.296	4374	34.704	
D6-3		12	1.843	0.019	7800	2	0.104	0.00849487	3276.33226	6552.66452	6562	9.33547844	
D6-4		2.295	0.18	0.016	7800	6		0	51.55488	309.32928	309	-0.32928	
D6-5		3.99	0.18	0.016	7800	12		0	89.63136	1075.57632	1073	-2.57632	
D6-6		1.695	0.18	0.016	7800	6		0	38.07648	228.45888	228	-0.45888	
D6-7		2.148	0.18	0.016	7800	2		0	48.252672	96.505344	96	-0.505344	
D6-8		3.695	0.18	0.016	7800	4		0	83.00448	332.01792	331	-1.01792	
D6-9		1.548	0.18	0.016	7800	2		0	34.774272	69.548544	69	-0.548544	
D6-10		6.128	0.305	0.013	7800	4		0	189.520656	758.082624	745	-13.082624	
D6-11		12.64	0.305	0.019	7800	2		0	571.34064	1142.68128	1152	9.31872	
D6-11a		12.64	0.305	0.019	7800	1	.399*.0104	0.0082992	570.110699	570.110699	576	5.88930144	
D6-12		5.328	0.305	0.013	7800	2		0	164.779056	329.558112	324	-5.558112	
D6-13		0.8	0.8	0.013	7800	2	8*.247	0.1976	44.85936	89.71872	88	-1.71872	
D6-14		12.05	1.281	0.01	7800	3	12* 025*0 104*	0.731736	1146.93649	3440.80948	3279	-161.809476	
D6-15		0.275	0.666	0.01	7800	6		0	14.2857	85.7142	81	-4.7142	
D6-15a		0.275	1.158	0.01	7800	6		0	24.8391	149.0346	142	-7.0346	
D6-16		0.305	1.158	0.019	7800	6		0.43	0.07261006	41.5819471	249.491682	268	18.5083175
D6-17		0.305	0.666	0.019	7800	6		0.052	0.00106186	29.9464986	179.678992	180	0.32100842
D6-18		0.127	1.172	0.01	7800	12		0	11.609832	139.317984	133	-6.317984	
D6-19		0.127	1.208	0.01	7800	12		0	11.966448	143.597376	137	-6.597376	
D6-20		0.127	1.245	0.01	7800	12		0	12.33297	147.99564	141	-6.99564	
D6-21		0.127	1.281	0.01	5650	2		0	9.1918155	18.383631	24	5.616369	
D6-22		1.843			5650	6		0.203	0.0248	49.2081	295.2486	293	-2.2486
D6-23		7.99			5650	2		0	78.4618	156.9236	157	0.0764	
D6-24		2.257			5650	4		0.102	0.0125	22.16374	88.65496	89	0.34504
D6-25		1.306			7800	2		0.102	0.0125	12.82492	25.64984	26	0.35016
D6-26		4.247			7800	2		0.126	0.06284	221.94822	443.89644	445	1.10356
D6-27		4.386	0.152	0.013	7800	2		0.126	0.06284	229.21236	458.42472	460	1.57528
D6-28		4.036	0.152	0.013	7800	2		0.126	0.06284	210.92136	421.84272	423	1.15728
D6-29	or 152*152*13	4.147	0.152	0.013	7800	2		0.126	0.06284	216.72222	433.44444	435	1.55556
D6-30		0.39	0.21	0.016	7800	6	.110*.210/2	0.01155	8.77968	52.67808	53	0.32192	
D6-31		0.613	0.361	0.016	7800	2	.251*.613	0.0769315	18.0163152	36.0326304	36	-0.0326304	
D6-32		0.88	0.49	0.016	7800	1	.222*.118	0.026196	50.5444992	50.5444992	52	1.4555008	
D6-33		0.45	0.31	0.016	7800	4		0	17.4096	69.6384	69	-0.6384	
D6-34		0.19	1.843	0.016	7800	6		0	43.701216	262.207296	258	-4.207296	
D6-35		0.25	0.45	0.016	7800	24		0.2	0.02	11.544	277.056	276	-1.056
D6-36		0.25	0.337	0.016	7800	24		0.07	0.00245	10.20864	245.00736	242	-3.00736
									sumatorias	26652.943	26538	-114.943011	

• Dovela 8

BASE DE DATOS PIEZAS				acero a50	3518	7800							
DOVELA #	8			acero a36	2530	5650							
					1428.308	2856.616	agujeros						
	forma	L	h	e		#piezas	diametro	area	peso unitario kg	peso total kg	peso en dovela kg	diferencial kg	
D8-1		12	0.406	0.019	7800	2		0	722.0304	1444.0608	1456	11.9392	
D8-2		12	0.8	0.038	7800	2	5.30*95*2+95*200	2.052	2237.2272	4474.4544	4510	35.5456	
D8-3		12	1.862	0.019	7800	2		0.104	0.00849487	3310.12186	6620.24372	6676	55.7562784
D8-4		2.295	0.18	0.016	7800	6			0	51.55488	309.32928	309	-0.32928
D8-5		3.99	0.18	0.016	7800	12			0	89.63136	1075.57632	1073	-2.57632
D8-6		1.695	0.18	0.016	7800	6			0	38.07648	228.45888	228	-0.45888
D8-7		2.148	0.18	0.016	7800	2			0	48.252672	96.505344	96	-0.505344
D8-8		3.695	0.18	0.016	7800	4			0	83.00448	332.01792	331	-1.01792
D8-9		1.548	0.18	0.016	7800	2			0	34.774272	69.548544	69	-0.548544
D8-10		6.128	0.305	0.013	7800	4			0	189.520656	758.082624	745	-13.082624
D8-11		12.64	0.305	0.019	7800	2			0	571.34064	1142.68128	1152	9.31872
D8-11a		12.64	0.4	0.019	7800	1	.399*.0104	0.0082992	748.069259	748.069259	755	6.93074144	
D8-12		5.328	0.4	0.013	7800	2			0	216.10368	432.20736	425	-7.20736
D8-13		0.8	0.8	0.013	7800	2	8*.247		0.1976	44.85936	89.71872	96	6.28128
D8-14		12.05	1.274	0.01	7800	3	12* 025*0 10*0	0.731736	1140.35719	3421.07158	3281	-140.071576	
D8-15		0.275	0.659	0.01	7800	6			0	14.13555	84.8133	81	-3.8133
D8-15a		0.275	1.152	0.01	7800	6			0	24.7104	148.2624	142	-6.2624
D8-16		0.305	1.152	0.019	7800	6		0.052	0.00106186	51.9141846	311.485108	270	-41.4851076
D8-17		0.305	0.659	0.019	7800	6		0.052	0.00106186	29.6300916	177.78055	180	2.21945042
D8-18		0.127	1.191	0.01	7800	12			0	11.798046	141.576552	134	-7.576552
D8-19		0.127	1.202	0.01	7800	12			0	11.907012	142.884144	138	-4.884144
D8-20		0.127	1.238	0.01	7800	12			0	12.263628	147.163536	143	-4.163536
D8-21		0.127	1.274	0.01	5650	2			0	9.141587	18.283174	25	6.716826
D8-22		1.83			5650	6		0.203	0.0248	48.861	293.166	295	1.834
D8-23		7.99			5650	2			0	78.4618	156.9236	157	0.0764
D8-24		2.257			5650	4		0.102	0.0125	22.16374	88.65496	89	0.34504
D8-25		1.306			7800	2		0.102	0.0125	12.82492	25.64984	26	0.35016
D8-26		4.247			7800	2		0.126	0.06284	221.94822	443.89644	445	1.10356
D8-27		4.386	0.152	0.013	7800	2		0.126	0.06284	229.21236	458.42472	460	1.57528
D8-28		4.036	0.152	0.013	7800	2		0.126	0.06284	210.92136	421.84272	423	1.15728
D8-29		4.147	0.152	0.013	7800	2		0.126	0.06284	216.72222	433.44444	435	1.55556
D8-30		0.39	0.21	0.016	7800	6	.110*.210/2	0.01155	8.77968	52.67808	53	0.32192	
D8-31		0.613	0.361	0.016	7800	2	.251*.613	0.0769315	18.0163152	36.0326304	36	-0.0326304	
D8-32		0.88	0.49	0.016	7800	1	.222*.118	0.026196	50.5444992	50.5444992	52	1.4555008	
D8-33		0.45	0.31	0.016	7800	4			0	17.4096	69.6384	69	-0.6384
D8-34		0.19	1.83	0.016	7800	6			0	43.39296	260.35776	259	-1.35776
D8-35		0.25	0.45	0.016	7800	28		0.2	0.02	11.544	323.232	322	-1.232
D8-36		0.25	0.33	0.016	7800	28		0.07	0.00245	9.99024	279.72672	282	2.27328
D8-37		0.19	1.27	0.016	7800	4		0.07	0.00245	29.80848	119.23392	120	0.76608
D8-38		0.127	1.973	0.016	7800	4		0.07	0.00245	30.9655008	123.862003	126	2.1379968
D8-39		0.448	0.5	0.019	7800	3		0.07	0.00245	32.83371	98.50113	101	2.49887
D8-40		0.4	0.5	0.025	7800	2		0.07	0.00245	38.52225	77.0445	80	2.9555
D8-41		0.8	0.8	0.022	7800	2			0	112.02048	224.04096	160	-64.04096
									sumatorias	26451.1701	26305	-146.170114	

• Dovela 9

		BASE DE DATOS PIEZAS			acero a50	3518	7800							
					acero a36	2530	5650							
DOVELA #	9 a 11				1428.308	2856.616	agujeros							
	forma	L	h	e		#piezas	diametro	area	peso unitario kg	peso total kg	peso en dovela kg	diferencial kg		
D9-1		12	0.406	0.019	7800	2	0	0	722.0304	1444.0608	1456	11.9392		
D9-2		12	0.61	0.038	7800	2	0	0	2169.648	4339.296	4374	34.704		
D9-3		12	1.862	0.019	7800	2	0.104	0.00849487	3310.12186	6620.24372	6676	55.7562784		
D9-4		2.295	0.18	0.016	7800	6	0	0	51.55488	309.32928	309	-0.32928		
D9-5		3.99	0.18	0.016	7800	12	0	0	89.63136	1075.57632	1073	-2.57632		
D9-6		1.695	0.18	0.016	7800	6	0	0	38.07648	228.45888	228	-0.45888		
D9-7		2.148	0.18	0.016	7800	2	0	0	48.252672	96.505344	96	-0.505344		
D9-8		3.695	0.18	0.016	7800	4	0	0	83.00448	332.01792	331	-1.01792		
D9-9		1.548	0.18	0.016	7800	2	0	0	34.774272	69.548544	69	-0.548544		
D9-10		6.128	0.305	0.013	7800	4	0	0	189.520656	758.082624	745	-13.082624		
D9-11		12.64	0.305	0.019	7800	2	0	0	571.34064	1142.68128	1152	9.31872		
D9-11a		12.64	0.305	0.019	7800	1	.399*.0104	0.0082992	570.110699	570.110699	576	5.88930144		
D9-12		5.328	0.305	0.013	7800	2	0	0	164.779056	329.558112	324	-5.558112		
D9-13		0.8	0.8	0.013	7800	2	.8*.247	0.1976	44.85936	89.71872	88	-1.71872		
D9-14		12.05	1.281	0.01	7800	3	126 025-0 1040	0.731736	1146.93649	3440.80948	3281	-159.809476		
D9-15		0.275	0.666	0.01	7800	6	0	0	14.2857	85.7142	81	-4.7142		
D9-15a		0.275	1.158	0.01	7800	6	0	0	24.8391	149.0346	142	-7.0346		
D9-16		0.305	1.158	0.019	7800	6	0.43	0.07261006	41.5819471	249.491682	268	18.5083175		
D9-17		0.305	0.666	0.019	7800	6	0.052	0.00106186	29.9464986	179.678992	180	0.32100842		
D9-18		0.127	1.172	0.01	7800	12	0	0	11.609832	139.317984	135	-4.317984		
D9-19		0.127	1.208	0.01	7800	12	0	0	11.966448	143.597376	139	-4.597376		
D9-20		0.127	1.245	0.01	7800	12	0	0	12.33297	147.99564	143	-4.99564		
D9-21		0.127	1.281	0.01	5650	2	0	0	9.1918155	18.383631	25	6.616369		
D9-22		1.843			5650	6	0.203	0.0248	49.2081	295.2486	298	2.7514		
D9-23		7.99			5650	2	0	0	78.4618	156.9236	157	0.0764		
D9-24		2.257			5650	4	0.102	0.0125	22.16374	88.65496	89	0.34504		
D9-25		1.306			7800	2	0.102	0.0125	12.82492	25.64984	26	0.35016		
D9-26		4.247			7800	2	0.126	0.06284	221.94822	443.89644	445	1.10356		
D9-27		4.386	0.152	0.013	7800	2	0.126	0.06284	229.21236	458.42472	460	1.57528		
D9-28		4.036	0.152	0.013	7800	2	0.126	0.06284	210.92136	421.84272	423	1.15728		
D9-29	or 152*152*13	4.147	0.152	0.013	7800	2	0.126	0.06284	216.72222	433.44444	435	1.55556		
D9-30		0.39	0.21	0.016	7800	6	.110*.210/2	0.01155	8.77968	52.67808	53	0.32192		
D9-31		0.613	0.361	0.016	7800	2	.251*.613	0.0769315	18.0163152	36.0326304	36	-0.0326304		
D9-32		0.88	0.49	0.016	7800	1	.222*.118	0.026196	50.5444992	50.5444992	52	1.4555008		
D9-33		0.45	0.31	0.016	7800	4	0	0	17.4096	69.6384	69	-0.6384		
D9-34		0.19	1.843	0.016	7800	6	0	0	43.701216	262.207296	259	-3.207296		
D9-35		0.25	0.45	0.016	7800	24	0.2	0.02	11.544	277.056	276	-1.056		
D9-36		0.25	0.337	0.016	7800	24	0.07	0.00245	10.20864	245.00736	242	-3.00736		
									sumatorias	25276.4614	25211	-65.4614108		

• Dovela 12

BASE DE DATOS PIEZAS				acero a50	3518	7800							
DOVELA #	12			acero a36	2530	5650							
					1428.308	2856.616	agujeros						
	forma	L	h	e		#piezas	diametro	area	peso unitario kg	peso total kg	peso en dovela kg	diferencial kg	
D12-1		12	0.406	0.019	7800	2	0	0	722.0304	1444.0608	1456	11.9392	
D12-2		12	0.8	0.038	7800	2	5.30*95*2+95*200	2.052	2237.2272	4474.4544	4510	35.5456	
D12-3		12	1.862	0.019	7800	2	0.104	0.00849487	3310.12186	6620.24372	6676	55.7562784	
D12-4		2.295	0.18	0.016	7800	6		0	51.55488	309.32928	309	-0.32928	
D12-5		3.99	0.18	0.016	7800	12		0	89.63136	1075.57632	1073	-2.57632	
D12-6		1.695	0.18	0.016	7800	6		0	38.07648	228.45888	228	-0.45888	
D12-7		2.148	0.18	0.016	7800	2		0	48.252672	96.505344	96	-0.505344	
D12-8		3.695	0.18	0.016	7800	4		0	83.00448	332.01792	331	-1.01792	
D12-9		1.548	0.18	0.016	7800	2		0	34.774272	69.548544	69	-0.548544	
D12-10		6.128	0.305	0.013	7800	4		0	189.520656	758.082624	745	-13.082624	
D12-11		12.64	0.305	0.019	7800	2		0	571.34064	1142.68128	1152	9.31872	
D12-11a		12.64	0.4	0.019	7800	1	.399*.0104	0.0082992	748.069259	748.069259	755	6.93074144	
D12-12		5.328	0.4	0.013	7800	2		0	216.10368	432.20736	425	-7.20736	
D12-13		0.8	0.8	0.013	7800	2	.8*.247	0.1976	44.85936	89.71872	96	6.28128	
D12-14		12.05	1.274	0.01	7800	3	12* (25-0) 10*0	0.731736	1140.35719	3421.07158	3281	-140.071576	
D12-15		0.275	0.659	0.01	7800	6		0	14.13555	84.8133	81	-3.8133	
D12-15a		0.275	1.152	0.01	7800	6		0	24.7104	148.2624	142	-6.2624	
D12-16		0.305	1.152	0.019	7800	6		0.052	0.00106186	51.9141846	311.485108	270	-41.4851076
D12-17		0.305	0.659	0.019	7800	6		0.052	0.00106186	29.6300916	177.78055	180	2.21945042
D12-18		0.127	1.191	0.01	7800	12		0	11.798046	141.576552	134	-7.576552	
D12-19		0.127	1.202	0.01	7800	12		0	11.907012	142.884144	138	-4.884144	
D12-20		0.127	1.238	0.01	7800	12		0	12.263628	147.163536	143	-4.163536	
D12-21		0.127	1.274	0.01	5650	2		0	9.141587	18.283174	25	6.716826	
D12-22		1.83			5650	6		0.203	0.0248	48.861	293.166	295	1.834
D12-23		7.99			5650	2		0	78.4618	156.9236	157	0.0764	
D12-24		2.257			5650	4		0.102	0.0125	22.16374	88.65496	89	0.34504
D12-25		1.306			7800	2		0.102	0.0125	12.82492	25.64984	26	0.35016
D12-26		4.247			7800	2		0.126	0.06284	221.94822	443.89644	445	1.10356
D12-27		4.386	0.152	0.013	7800	2		0.126	0.06284	229.21236	458.42472	460	1.57528
D12-28		4.036	0.152	0.013	7800	2		0.126	0.06284	210.92136	421.84272	423	1.15728
D12-29	or 152*152*13	4.147	0.152	0.013	7800	2		0.126	0.06284	216.72222	433.44444	435	1.55556
D12-30		0.39	0.21	0.016	7800	6	.110*.210/2	0.01155	8.77968	52.67808	53	0.32192	
D12-31		0.613	0.361	0.016	7800	2	.251*.613	0.0769315	18.0163152	36.0326304	36	-0.0326304	
D12-32		0.88	0.49	0.016	7800	1	.222*.118	0.026196	50.5444992	50.5444992	52	1.4555008	
D12-33		0.45	0.31	0.016	7800	4		0	17.4096	69.6384	69	-0.6384	
D12-34		0.19	1.83	0.016	7800	6		0	43.39296	260.35776	259	-1.35776	
D12-35		0.25	0.45	0.016	7800	28		0.2	0.02	11.544	323.232	322	-1.232
D12-36		0.25	0.33	0.016	7800	28		0.07	0.00245	9.99024	279.72672	282	2.27328
D12-37		0.19	1.27	0.016	7800	4		0.07	0.00245	29.80848	119.23392	120	0.76608
D12-38		0.127	1.973	0.016	7800	4		0.07	0.00245	30.9655008	123.862003	126	2.1379968
D12-39		0.448	0.5	0.019	7800	3		0.07	0.00245	32.83371	98.50113	101	2.49887
D12-40		0.4	0.5	0.025	7800	2		0.07	0.00245	38.52225	77.0445	80	2.9555
D12-41		0.8	0.8	0.022	7800	2		0	112.02048	224.04096	160	-64.04096	
									sumatorias	26451.1701	26305	-146.170114	

• Dovela 13

		BASE DE DATOS PIEZAS			acero a50	3518	7800							
					acero a36	2530	5650							
DOVELA #	13				1428.308	2856.616	agujeros							
	forma	L	h	e		#piezas	diametro	area	peso unitario kg	peso total kg	peso en dovela kg	diferencial kg		
D9-1		12	0.406	0.019	7800	2	0	0	722.0304	1444.0608	1456	11.9392		
D9-2		12	0.61	0.038	7800	2	0	0	2169.648	4339.296	4374	34.704		
D9-3		12	1.862	0.019	7800	2	0.104	0.00849487	3310.12186	6620.24372	6676	55.7562784		
D9-4		2.295	0.18	0.016	7800	6		0	51.55488	309.32928	309	-0.32928		
D9-5		3.99	0.18	0.016	7800	12		0	89.63136	1075.57632	1073	-2.57632		
D9-6		1.695	0.18	0.016	7800	6		0	38.07648	228.45888	228	-0.45888		
D9-7		2.148	0.18	0.016	7800	2		0	48.252672	96.505344	96	-0.505344		
D9-8		3.695	0.18	0.016	7800	4		0	83.00448	332.01792	331	-1.01792		
D9-9		1.548	0.18	0.016	7800	2		0	34.774272	69.548544	69	-0.548544		
D9-10		6.128	0.305	0.013	7800	4		0	189.520656	758.082624	745	-13.082624		
D9-11		12.64	0.305	0.019	7800	2		0	571.34064	1142.68128	1152	9.31872		
D9-11a		12.64	0.305	0.019	7800	1	.399*.0104	0.0082992	570.110699	570.110699	576	5.88930144		
D9-12		5.328	0.305	0.013	7800	2		0	164.779056	329.558112	324	-5.558112		
D9-13		0.8	0.8	0.013	7800	2	.8*.247	0.1976	44.85936	89.71872	88	-1.71872		
D9-14		12.05	1.281	0.01	7800	3	126 (25-0) 1040	0.731736	1146.93649	3440.80948	3281	-159.809476		
D9-15		0.275	0.666	0.01	7800	6		0	14.2857	85.7142	81	-4.7142		
D9-15a		0.275	1.158	0.01	7800	6		0	24.8391	149.0346	142	-7.0346		
D9-16		0.305	1.158	0.019	7800	6	0.43	0.07261006	41.5819471	249.491682	268	18.5083175		
D9-17		0.305	0.666	0.019	7800	6	0.052	0.00106186	29.9464986	179.678992	180	0.32100842		
D9-18		0.127	1.172	0.01	7800	12		0	11.609832	139.317984	135	-4.317984		
D9-19		0.127	1.208	0.01	7800	12		0	11.966448	143.597376	139	-4.597376		
D9-20		0.127	1.245	0.01	7800	12		0	12.33297	147.99564	143	-4.99564		
D9-21		0.127	1.281	0.01	5650	2		0	9.1918155	18.383631	25	6.616369		
D9-22		1.843			5650	6	0.203	0.0248	49.2081	295.2486	298	2.7514		
D9-23		7.99			5650	2		0	78.4618	156.9236	157	0.0764		
D9-24		2.257			5650	4	0.102	0.0125	22.16374	88.65496	89	0.34504		
D9-25		1.306			7800	2	0.102	0.0125	12.82492	25.64984	26	0.35016		
D9-26		4.247			7800	2	0.126	0.06284	221.94822	443.89644	445	1.10356		
D9-27		4.386	0.152	0.013	7800	2	0.126	0.06284	229.21236	458.42472	460	1.57528		
D9-28		4.036	0.152	0.013	7800	2	0.126	0.06284	210.92136	421.84272	423	1.15728		
D9-29	or 152*152*13	4.147	0.152	0.013	7800	2	0.126	0.06284	216.72222	433.44444	435	1.55556		
D9-30		0.39	0.21	0.016	7800	6	.110*.210/2	0.01155	8.77968	52.67808	53	0.32192		
D9-31		0.613	0.361	0.016	7800	2	.251*.613	0.0769315	18.0163152	36.0326304	36	-0.0326304		
D9-32		0.88	0.49	0.016	7800	1	.222*.118	0.026196	50.5444992	50.5444992	52	1.4555008		
D9-33		0.45	0.31	0.016	7800	4		0	17.4096	69.6384	69	-0.6384		
D9-34		0.19	1.843	0.016	7800	6		0	43.701216	262.207296	259	-3.207296		
D9-35		0.25	0.45	0.016	7800	24	0.2	0.02	11.544	277.056	276	-1.056		
D9-36		0.25	0.337	0.016	7800	24	0.07	0.00245	10.20864	245.00736	242	-3.00736		
									sumatorias	25276.4614	25211	-65.4614108		

• Dovela 14

		BASE DE DATOS PIEZAS			acero a50	3518	7800						
					acero a36	2530	5650						
DOVELA #	14				1428.308	2856.616	agujeros						
	forma	L	h	e		#piezas	diametro	area	peso unitario kg	peso total kg	peso en dovela kg	diferencial kg	
D14-1		12	0.406	0.019	7800	2	0	0	722.0304	1444.0608	1456	11.9392	
D14-2		12	0.61	0.038	7800	2			2169.648	4339.296	4374	34.704	
D14-3		12	1.862	0.019	7800	1	0.104	0.00849487	3310.12186	3310.12186	3338	27.8781392	
D14-3a		12	1.862	0.019	7800	1	0.104	0.48864487	3238.96363	3238.96363	3272	33.0363692	
D14-4		2.295	0.18	0.016	7800	6		0	51.55488	309.32928	309	-0.32928	
D14-5		3.99	0.18	0.016	7800	12		0	89.63136	1075.57632	1073	-2.57632	
D14-6		1.695	0.18	0.016	7800	6		0	38.07648	228.45888	228	-0.45888	
D14-7		2.148	0.18	0.016	7800	2		0	48.252672	96.505344	96	-0.505344	
D14-8		3.695	0.18	0.016	7800	4		0	83.00448	332.01792	331	-1.01792	
D14-9		1.548	0.18	0.016	7800	2		0	34.774272	69.548544	69	-0.548544	
D14-10		6.128	0.305	0.013	7800	4		0	189.520656	758.082624	745	-13.082624	
D14-11		12.64	0.305	0.019	7800	2		0	571.34064	1142.68128	1152	9.31872	
D14-11a		12.64	0.305	0.019	7800	1	399*.0104	0.0082992	570.110699	570.110699	576	5.88930144	
D14-12		5.328	0.4	0.013	7800	2		0	216.10368	432.20736	324	-108.20736	
D14-13		0.8	0.8	0.013	7800	2	8*.247	0.1976	44.85936	89.71872	88	-1.71872	
D14-14		12.05	1.3	0.01	7800	1	12*6 025*0 10*	0.737761	1164.32464	1164.32464	1116	-48.324642	
D14-14a		12.05	1.3	0.01	7800	1	12*6 025*0 10*0	0.849525	1155.60705	1155.60705	1108	-47.60705	
D14-14b		12.05	1.3	0.01	7800	1	12*6 025*0 10*0	0.9670125	1146.44303	1146.44303	1099	-47.443025	
D14-15		0.275	0.666	0.01	7800	6		0	14.2857	85.7142	81	-4.7142	
D14-15a		0.275	1.179	0.01	7800	4		0	25.28955	101.1582	47	-54.1582	
D14-15b		0.275	1.138	0.01	7800	1		0	24.4101	24.4101	23	-1.4101	
D14-15c		0.275	1.099	0.01	7800	1		0	23.57355	23.57355	23	-0.57355	
D14-16		0.305	1.179	0.019	7800	4		0.43	0.07261006	42.5311681	170.124672	215	44.8753277
D14-16a		0.305	1.138	0.019	7800	1		0.43	0.07261006	40.6779271	40.6779271	52	11.3220729
D14-16b		0.305	1.099	0.019	7800	1		0.43	0.07261006	38.9150881	38.9150881	50	11.0849119
D14-17		0.305	0.666	0.019	7800	6		0.43	0.07261006	19.3430551	116.05833	180	63.9416695
D14-18		0.127	1.191	0.01	7800	6		0	11.798046	70.788276	68	-2.788276	
D14-18a		0.127	1.156	0.01	7800	2		0	11.451336	22.902672	22	-0.902672	
D14-18b		0.127	1.121	0.01	7800	2		0	11.104626	22.209252	21	-1.209252	
D14-19		0.127	1.227	0.01	7800	8		0	12.154662	97.237296	93	-4.237296	
D14-19a		0.127	1.204	0.01	7800	2		0	11.926824	23.853648	23	-0.853648	
D14-19b		0.127	1.181	0.01	7800	2		0	11.698986	23.397972	22	-1.397972	
D14-20		0.127	1.264	0.01	7800	8		0	12.521184	100.169472	96	-4.169472	
D14-20a		0.127	1.252	0.01	7800	2		0	12.402312	24.804624	24	-0.804624	
D14-20b		0.127	1.24	0.01	7800	2		0	12.28344	24.56688	24	-0.56688	
D14-21		0.127	1.3	0.01	5650	2		0	9.32815	18.6563	25	6.3437	
D14-22		1.862			5650	4		0.203	0.0248	49.7154	198.8616	199	0.1384
D14-22a		1.841			5650	1		0.203	0.0248	49.1547	49.1547	49	-0.1547
D14-22b		1.802			5650	1		0.203	0.0248	48.1134	48.1134	48	-0.1134
D14-23		7.99			5650	2		0	78.4618	156.9236	157	0.0764	
D14-24		2.257			5650	4		0.102	0.0125	22.16374	88.65496	89	0.34504
D14-25		1.306			7800	2		0.102	0.0125	12.82492	25.64984	26	0.35016
D14-26		4.247			7800	2		0.126	0.06284	221.94822	443.89644	445	1.10356
D14-27		4.386	0.152	0.013	7800	2		0.126	0.06284	229.21236	458.42472	460	1.57528
D14-28		4.036	0.152	0.013	7800	2		0.126	0.06284	210.92136	421.84272	423	1.15728
D14-29		4.147	0.152	0.013	7800	2		0.126	0.06284	216.72222	433.44444	435	1.55556
D14-30		0.39	0.21	0.016	7800	6	.110*.210/2	0.01155	8.77968	52.67808	53	0.32192	
D14-31		0.613	0.361	0.016	7800	2	251*.613	0.0769315	18.0163152	36.0326304	36	-0.0326304	
D14-32		0.88	0.49	0.016	7800	1	222*.118	0.026196	50.5444992	50.5444992	52	1.4555008	
D14-33		0.45	0.31	0.016	7800	4		0	17.4096	69.6384	69	-0.6384	
D14-34		0.19	1.862	0.016	7800	4		0	44.151744	176.606976	264	87.393024	
D14-34a		0.19	1.825	0.016	7800	1		0	43.2744	43.2744	43	-0.2744	
D14-34b		0.19	1.787	0.016	7800	1		0	42.373344	42.373344	42	-0.373344	
D14-35		0.25	0.45	0.016	7800	24		0.2	0.02	11.544	277.056	276	-1.056
D14-36		0.25	0.33	0.016	7800	24		0.07	0.00245	9.99024	239.76576	242	2.23424
									sumatorias	25245.2089	25251	5.79105135	



• Dovela de estribo

		BASE DE DATOS PIEZAS			acero a50	3518	7800					
					acero a36	2530	5650					
DOVELA #	De estribo				714.154	1428.308	agujeros					
	forma	L	h	e		#piezas	diametro	area	peso unitario kg	peso total kg	peso en dovela kg	diferencial kg
DE-1		6	0.406	0.019	7800	2		0	361.0152	722.0304	728	5.9696
DE-2		6	0.8	0.038	7800	2	5.30*95*2+95*200	0.836	1174.9296	2349.8592	2380	30.1408
DE-3		6	1.862	0.019	7800	1		0	1655.6904	1655.6904	1669	13.3096
DP-3a		6	1.823	0.019	7800	1	6*.12	0.36	1567.6596	1567.6596	1580	12.3404
DE-4		0.195	0.18	0.016	7800	6		0	4.38048	26.28288	26	-0.28288
DE-5		0.79	0.18	0.016	7800	6		0	17.74656	106.47936	127	20.52064
DE-6		2.99	0.18	0.016	7800	6		0	67.16736	403.00416	402	-1.00416
DE-7		2.2295	0.18	0.016	7800	6		0	50.083488	300.500928	309	8.499072
DE-8		0.4	0.18	0.016	7800	2		0	8.9856	17.9712	18	0.0288
DE-9		2.648	0.18	0.016	7800	2		0	59.484672	118.969344	119	0.030656
DE-10		2.147	0.18	0.016	7800	2		0	48.230208	96.460416	96	-0.460416
D1-11		6.321	0.4	0.013	7800	2		0	256.37976	512.75952	504	-8.75952
D1-11a		6.128	0.4	0.013	7800	2		0	248.55168	497.10336	488	-9.10336
DE-12		6.128	0.305	0.013	7800	2		0	189.520656	379.041312	372	-7.041312
DE-13		12.64	0.4	0.019	7800	5		0	749.2992	3746.496	3777	30.504
DE-14		12.64	0.305	0.019	7800	1		0	571.34064	571.34064	574	2.65936
DE-15		12.05	1.24	0.01	7800	1	6.025*.121/2+0.275*6.025/2	2.0213875	1007.80778	1007.80778	1027	19.192225
DE-16		12.05	1.3	0.01	7800	1	6.025*.121/2+6.025*0.267/2	1.16885	1130.6997	1130.6997	1083	-47.6997
DE-16a		12.05	1.3	0.01	7800	1	6.025*.121/2+6.025*0.237/2	1.078475	1137.74895	1137.74895	1089	-48.74895
DE-17		0.275	0.666	0.01	7800	6		0	14.2857	85.7142	81	-4.7142
DE-18		0.275	1.113	0.01	7800	1		0	23.87385	23.87385	23	-0.87385
DE-18a		0.275	0.952	0.01	7800	1		0	20.4204	20.4204	20	-0.4204
DE-19		0.275	1.177	0.01	7800	2		0	25.24665	50.4933	48	-2.4933
DE-19a		0.275	1.029	0.01	7800	1		0	22.07205	22.07205	21	-1.07205
DE-19b		0.275	1.058	0.01	7800	1		0	22.6941	22.6941	22	-0.6941
DE-20		0.4	0.666	0.019	7800	4		0	39.48048	157.92192	158	0.07808
DE-20a		0.305	0.666	0.019	7800	2		0	30.103866	60.207732	60	-0.207732
DE-21		0.4	1.119	0.019	7800	1		0	66.33432	66.33432	67	0.66568
DE-21a		0.4	0.964	0.019	7800	1		0	57.14592	57.14592	58	0.85408
DE-22		0.4	1.177	0.013	7800	1		0	47.73912	47.73912	70	22.26088
DE-22a		0.4	1.029	0.019	7800	1		0	60.99912	60.99912	61	0.00088
DE-23		0.305	1.177	0.019	7800	1		0	53.201577	53.201577	54	0.798423
DE-23a		0.305	1.058	0.019	7800	1		0	47.822658	47.822658	48	0.177342
DE-24		0.175	1.131	0.01	7800	2		0	15.43815	30.8763	30	-0.8763
DE-24a		0.175	0.992	0.01	7800	2		0	13.5408	27.0816	26	-1.0816
DE-25		0.175	1.167	0.01	7800	2		0	15.92955	31.8591	31	-0.8591
DE-25a		0.175	1.075	0.01	7800	2		0	14.67375	29.3475	28	-1.3475
DE-26		0.175	1.203	0.01	7800	2		0	16.42095	32.8419	31	-1.8419
DE-26a		0.175	1.157	0.01	7800	2		0	15.79305	31.5861	30	-1.5861
DE-27		0.175	1.191	0.01	7800	2		0	16.25715	32.5143	31	-1.5143
DE-27a		0.175	1.059	0.01	7800	2		0	14.45535	28.9107	28	-0.9107
DE-28		0.175	1.227	0.01	7800	2		0	16.74855	33.4971	32	-1.4971
DE-28a		0.175	1.139	0.01	7800	2		0	15.54735	31.0947	30	-1.0947
DE-29		0.175	1.264	0.01	7800	2		0	17.2536	34.5072	33	-1.5072
DE-29a		0.175	1.22	0.01	7800	2		0	16.653	33.306	32	-1.306
DE-30		0.175	1.289	0.01	7800	4		0	17.59485	70.3794	67	-3.3794
DE-31		0.175	1.986	0.01	7800	4		0	27.1089	108.4356	104	-4.4356
DE-32		0.127	1.191	0.01	7800	2		0	11.798046	23.596092	23	-0.596092
DE-32a		0.127	1.086	0.01	7800	2	.1*.3/2	0	10.757916	21.515832	21	-0.515832
DE-33		0.127	1.227	0.01	7800	2		0	12.154662	24.309324	23	-1.309324
DE-33a		0.127	1.157	0.01	7800	2		0	11.461242	22.922484	22	-0.922484
DE-34		0.127	1.264	0.01	7800	2		0	12.521184	25.042368	24	-1.042368
DE-34a		0.127	1.228	0.01	7800	2		0	12.164568	24.329136	23	-1.329136
DE-35		0.19	1.862	0.01	7800	3		0	27.59484	82.78452	79	-3.78452
DE-35a		0.19	1.743	0.01	7800	1		0	25.83126	25.83126	25	-0.83126
DE-35b		0.19	1.713	0.01	7800	1	2*.2/2	0.02	23.82666	23.82666	24	0.17334
DE-35c		0.19	1.705	0.01	7800	1	.07*.07/2	0.00245	25.077	25.077	24	-1.077
DE-36		0.175	1.3	0.01	7800	2		0	17.745	35.49	34	-1.49
DE-37		1.862			7800	2		0	26.7	99.4308	99	-0.4308
DE-37a	tr 8*26.7	1.762			7800	1		0	26.7	47.0454	47	-0.0454
DE-37b	tr 8*26.7	1.727			7800	1		0	26.7	46.1109	46	-0.1109
DE-38		0.449	0.5	0.019	7800	3		0	33.2709	99.8127	101	1.1873
									sumatorias	18307.9074	18307	-0.907388

- Dovela de cierre

		BASE DE DATOS PIEZAS			acero a50	3518	7800							
					acero a36	2530	5650							
DOVELA #	de cierre				89.26925	178.5385	agujeros			peso unitario	peso total	peso en dovela	diferencial	
	forma	L	h	e		#piezas	diametro	area	kg	kg	kg			
DC1-1		0.75	0.406	0.038	7800	2			90.2538	180.5076	182	1.4924		
DC1-2		0.587	0.406	0.038	7800	4			70.6386408	282.554563	284	1.4454368		
DC1-3		0.772	0.61	0.038	7800	2			139.580688	279.161376	281	1.838624		
DC1-4		0.587	0.61	0.038	7800	4			106.131948	424.527792	427	2.472208		
DC1-5		1.072	1.843	0.019	7800	2		0.040546	286.78923	573.57846	584	10.42154		
DC1-6		0.587	1.843	0.019	7800	4		0	160.328836	641.315345	647	5.6846552		
DC1-7		0.9	0.18	0.016	7800	4		0.018	17.9712	71.8848	71	-0.8848		
DC1-8		1.064	0.18	0.016	7800	4		0	23.901696	95.606784	95	-0.606784		
DC1-9		1.00	1.919	0.025	7800	6	0.016	0.00080425	374.048172	2244.28903	2294	49.7109698		
DC1-10		0.49	0.587	0.025	7800	20		0	56.08785	1121.757	1146	24.243		
DC1-11		0.587	0.285	0.025	7800	16		0	32.622525	521.9604	533	11.0396		
DC1-12		0.587	0.247	0.025	7800	16		0	28.272855	452.36568	462	9.63432		
DC1-13		0.587	0.2	0.025	7800	32			22.893	732.576	748	15.424		
DC1-14		0.587	0.411	0.025	7800	32		0	47.045115	1505.44368	1538	32.55632		
DC1-15		5.956	0.4	0.013	7800	2			241.57536	483.15072	475	-8.15072		
DC1-16		11.91	0.4	0.019	7800	1			706.0248	706.0248	950	243.9752		
DC1-17		11.91	1.281	0.01	7800	1		1.065645	1106.90307	1106.90307	1087	-19.90307		
DC1-18		0.195	1.172	0.01	7800	4			17.82612	71.30448	68	-3.30448		
DC1-19		0.195	1.208	0.01	7800	4		0	18.37368	73.49472	70	-3.49472		
DC1-20		0.195	1.245	0.01	7800	4		0	18.93645	75.7458	73	-2.7458		
DC1-21		0.195	1.27	0.01	7800	4		0	19.3167	77.2668	74	-3.2668		
DC1-22		0.195	1.973	0.01	7800	4		0	30.00933	120.03732	115	-5.03732		
DC1-23		0.449	0.5	0.019	7800	3		0	33.2709	99.8127	101	1.1873		
DC1-24		0.4	0.5	0.025	7800	2		0	39	78	80	2		
										sumatorias	12019.2689	12385	365.73108	

## Anexo 2 Mecánica de la Fractura de un cable

Se define a la fractura como la formación de dos superficies en un sólido sometido a una carga externa, un material se fractura cuando existe suficiente energía para romper los enlaces atómicos, es decir, una fuerza de tensión requerida para incrementar la distancia de separación de los átomos con respecto al equilibrio esta fuerza debe ser superior a la fuerza cohesiva para romper estos enlaces (García, 2013).

Para fragmentar un sólido se requiere incrementar la carga progresivamente hasta que se logre formar la fisura, dependiendo de las condiciones de carga a la que es sometida una estructura, su tamaño de grieta y su geometría, provocando la falla en uno o varios de sus componentes.

Se estudia entonces las variables más representativas como son:

El rango de crecimiento de grietas, la resistencia del material para soportar el daño conocida como la tenacidad, la velocidad de propagación de las grietas, el modo de falla etc...

(García, 2013)

Un material elástico puede estar sometido a 3 tipos de esfuerzos, respecto a su plano de fractura, esfuerzos de tensión cortantes y cortante fuera del plano, o una combinación de ellos, como los cables del puente concordia solo trabajan a tensión el modo predominante será el modo "a"

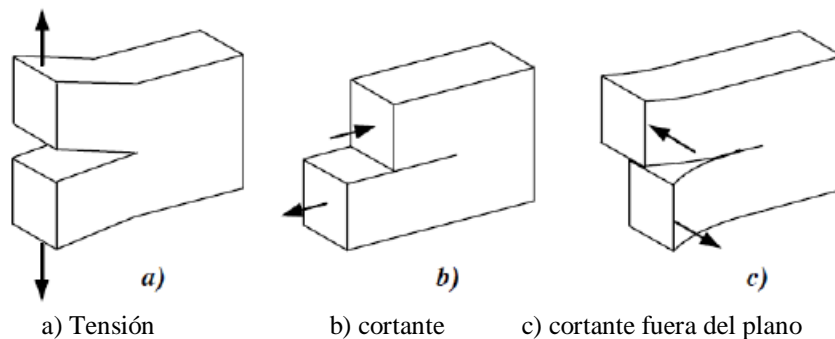
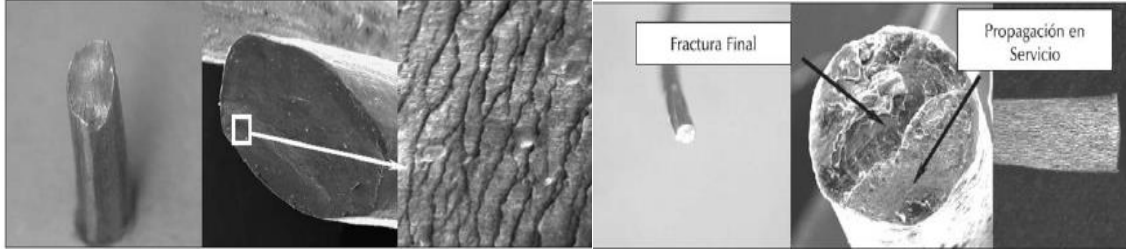


Figura N.- 79 Modos de falla

### Modo de falla en torones

Considerar el desgaste progresivo de un torón es una tarea complicada, normalmente se encuentran sometidos a tres tipos de esfuerzos los de tensión, los que tratan de enderezar las helicoidales, y los de fricción o rozamiento entre alambres y entre torones por lo que perderán gradualmente su capacidad de carga a lo largo de su vida útil. Además existe la zona de anclaje que provoca acumulación de esfuerzos cerca a la cuña de anclaje, su geometría permite al torón tolerar la ruptura de alguno de sus alambres antes de la falla final, debido a las fuerzas de rozamiento entre sus elementos lo que permite una transferencia de cargas entre sus elementos.

Los alambres se van fracturando progresivamente en el ciclo de carga y descarga del cable en su vida útil, sus microfisuras aparecen y se unen hasta que los alambres fallan paulatinamente, puede provocarse formando 45 grados con respecto al eje del alambre o perpendicular a este sin cuello.



Fotografía N.- 5 Modos de Falla en torones

### Falla Dúctil

Perteneciente a la falla en la mayoría de los materiales, cristalinos, Se presenta después de una gran deformación plástica, se observa en las pruebas de tensión con una fractura tipo copa y cono, con una formación de un cuello, empieza con la formación de microfisuras en el centro de la sección, bajo esfuerzos constantes las microfisuras crecen e interactúan entre si hasta formar una grieta, la grieta avanza hacia la superficie perpendicular a la dirección del esfuerzo .

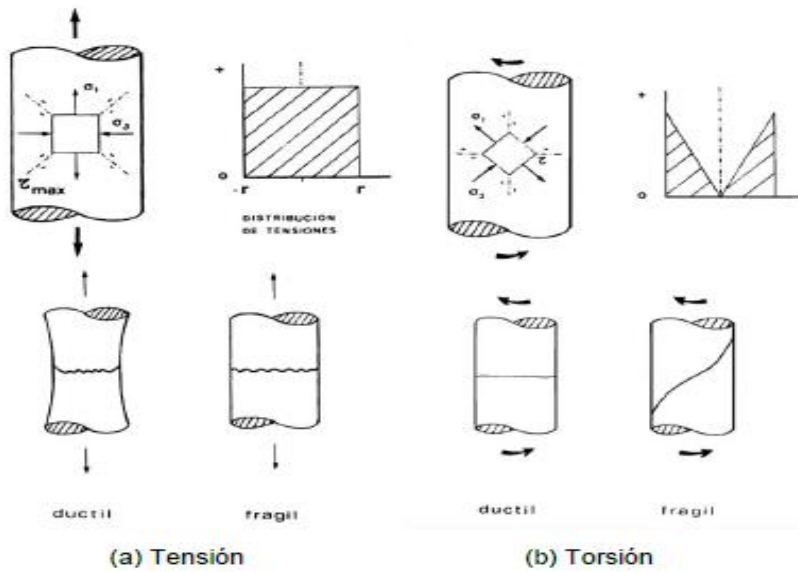


Figura N.- 80 Falla dúctil

## Falla Frágil

Esta falla se singulariza por una rápida propagación de grietas con mínima absorción de energía y muy poca deformación plástica, en metales cristalinos la mayoría de estas fracturas son transangulares, es decir las grietas se propagan a través de la matriz de los granos.

Esta se produce cuando los granos han sido afectados por segregación de algún tipo, existen entonces tres fases bien definidas.

- Deformación plástica que concentra las dislocaciones o defectos en los planos de deslizamiento.
- Incremento de esfuerzos de cizallamiento o de corte en zonas donde los defectos están restringidos se generan las microgrietas.
- Se Producen nuevos esfuerzos y se propagan las grietas hasta un tamaño crítico que ocasiona la falla (Anderson, 1991)

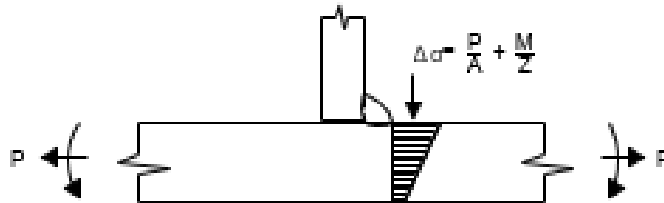
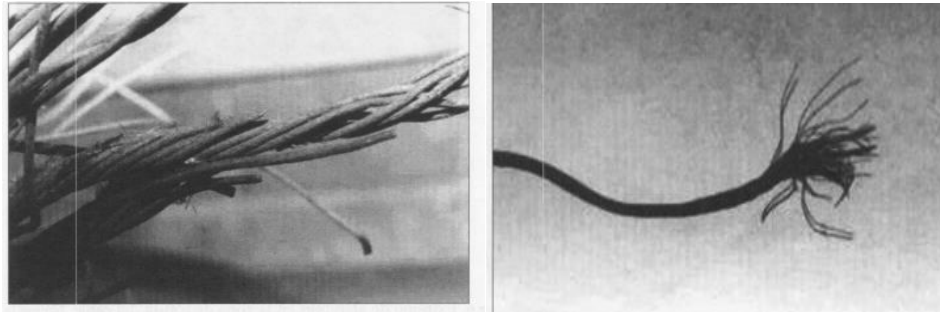


Figura N.- 81 Esfuerzos en una conexión soldada (Eurocódigo, 2010)



Fotografía N.- 6 Falla en un alambre (García, 2010)

## Mecanismos de Falla

### Coalescencia de las micro fisuras

A medida que avanza el proceso de deformación las fisuras interactúan entre si formando pequeñas microcavidades, para al final separarse por completo, caracterizada por depresiones semiesféricas que se denominan cavidades, que dependen del tamaño y

distribución de las partículas, su composición química, las características de la carga (normal, tensión, cortante, desgarramiento) y de la tenacidad de la fractura

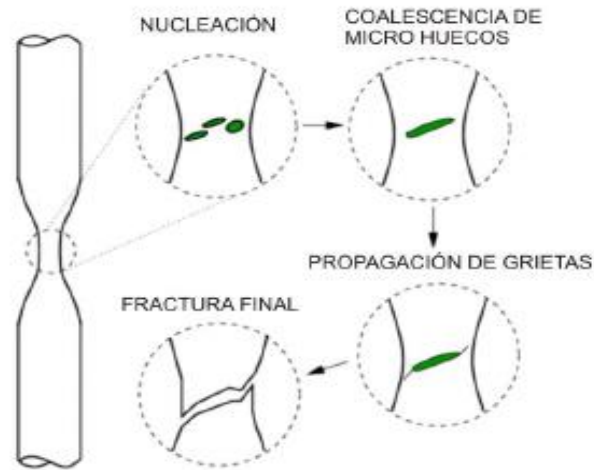


Figura N.- 82 Ruptura Dúctil (García, 2010)

## Clivaje

Es un modo de falla de baja energía pero de fractura rápida producido por la separación de planos cristalográficos, este mecanismo no indica necesariamente fragilidad en el material y se puede producir bajo las siguientes condiciones de carga:

- Tensiones triaxiales altas
- Altas velocidades de transformación
- Bajas temperaturas

Este modo de falla interactúa con el mecanismo de coalescencia formando un tercer método conocido como cuasiclivaje

## Fatiga en los cables

### Esfuerzos en un torón

El comportamiento no lineal de los torones es un complejo mecanismo de interacción entre los alambres que lo conforman ha sido modelado por algunos autores entre los principales tenemos a Costello (García, 2013) quien propone las siguientes ecuaciones para el cálculo de sus esfuerzos internos.

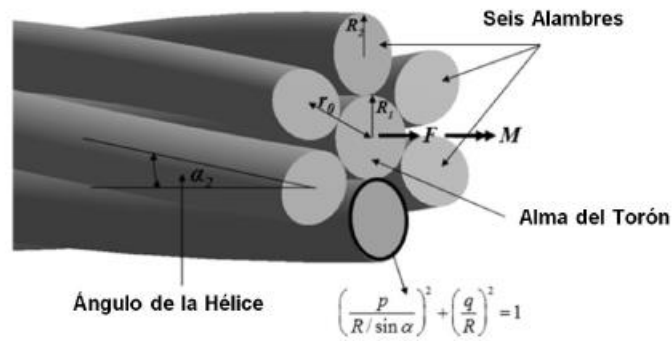


Figura N.- 83 Configuración de un torón

[18]García

$$\left( \frac{\frac{P}{R}}{\sin(\alpha)} \right)^2 + \left( \frac{q}{R} \right)^2 = 1$$

[Ecuación 21]

Donde:

- R1 es el radio del alma
- R2 el radio de un alambre helicoidal
- r es la distancia del centro de un alambre al centro del alma
- $\alpha$  es el ángulo de los alambres helicoidales

Una de las hipótesis validadas por Costello indica que para que sus ecuaciones sean aplicables los torones que envuelven al alma no se toquen unos con otros, el torón deberá cumplir entonces la siguiente condición geométrica, donde ( $m_2$ ) es el número de alambres de la segunda capa:

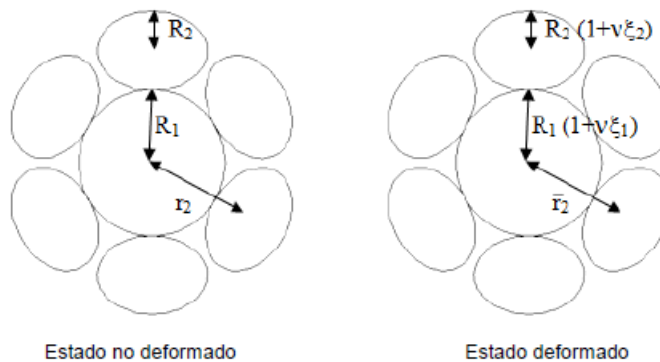


Figura N.- 84 Esfuerzos en un torón (García, 2010)

$$R_2 \cdot \sqrt{1 + \frac{\tan\left(\frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{m_2}\right)^2}{\sin(\alpha)^2}} < R_2 + R_2 \quad \text{[ecuación 22]}$$

Los radios de las hélices no deformados y deformados vienen en las siguientes formulas.

$$r_2 = R_1 + R_2 \quad \text{[ecuación 23]}$$

$$r'_2 = R_1 \cdot (1 + \nu \cdot \zeta_1) + R_2 \cdot (1 + \nu \cdot \zeta_2) \quad \text{[ecuación 24]}$$

Donde:

$\nu$  es el módulo de Poisson del material  
 $\zeta_1$  y  $\zeta_2$  son las deformaciones unitarias de la primera y segunda capa de alambres

Los alambres que envuelven al alma pueden representarse analíticamente como un triángulo rectángulo, cuya hipotenusa será la longitud del alambre en una determinada altura (h). Como el torón es estirado por medio una Fuerza ( $F_T$ ) las helicoidales se estiran de una posición (h) a una posición ( $\bar{h}$ ) y de un ángulo ( $\alpha$ ) a uno ( $\bar{\alpha}_2$ ) producto de esta fuerza se presentara un momento ( $M_T$ ) que es ocasionado por el estiramiento de las helicoidales.

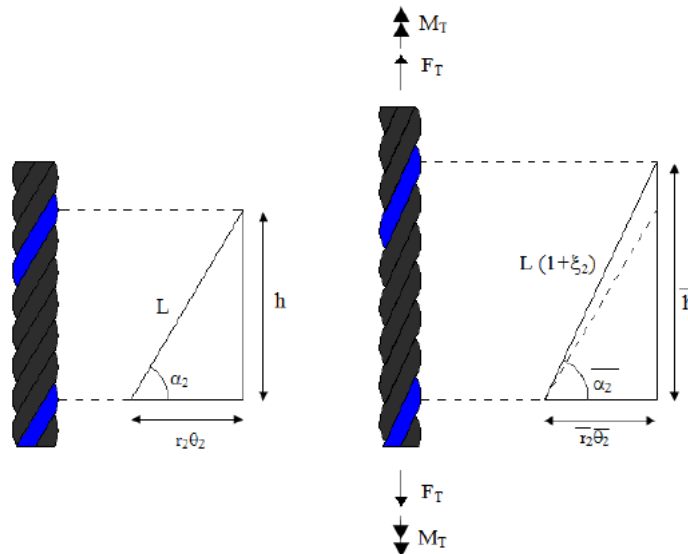


Figura N.- 85 Deformaciones en un cable (García, 2010)

El ángulo de hélice para los alambres se calcula mediante la siguiente ecuación



$$\tan(\alpha) \cdot 2 = \frac{p_2}{2 \cdot \pi \cdot r_2} \quad | \quad \text{[ecuación 25]}$$

Donde:

$p_2$  es el paso del cable  
 $r_2$  el radio del cable

El paso de un cable se determina por la forma en que los torones o trenzas están enrollados en el cable y por la manera en como los alambres están enrollados en los torones. La longitud de paso de un cable de acero es la distancia lineal medida a lo largo del mismo, desde un punto de un torón hasta otro punto del mismo torón después de dar una vuelta alrededor del núcleo o alma del cable (360°).

La deformación unitaria tiene la siguiente forma

$$\varepsilon = \frac{h'' - h}{h} \quad \text{[ecuación 26]}$$

La deformación rotacional tiene la siguiente forma:

$$\beta_2 = r_2 \cdot \tau_s = r_2 \cdot \frac{(\theta'' - \theta)}{h} \quad \text{[ecuación 27]}$$

Donde

$T_s$  es igual al torcimiento por unidad de longitud.

Si consideramos al torón como un elemento en conjunto se puede deducir que la deformación unitaria del torón será igual a la deformación unitaria del alma.

$$\zeta_2 = \zeta_1 - \frac{\Delta\alpha_2}{\tan(\alpha_2)} \quad \text{[ecuación 28]}$$

Donde

$\Delta\alpha$  Es el cambio en el ángulo de inclinación y es igual a:

$$\Delta\alpha = |\alpha''_2 - \alpha_2| \quad \text{[ecuación 29]}$$

La deformación rotacional será igual a:

$$\beta_2 = \frac{\zeta_2}{\tan(\alpha_2)} - \Delta \cdot \alpha_2 + v \cdot \frac{((R_1 \cdot \zeta_1 + R_2 \cdot \zeta_2))}{r_2 \cdot \tan(\alpha_2)} \quad \text{[ecuación 30]}$$

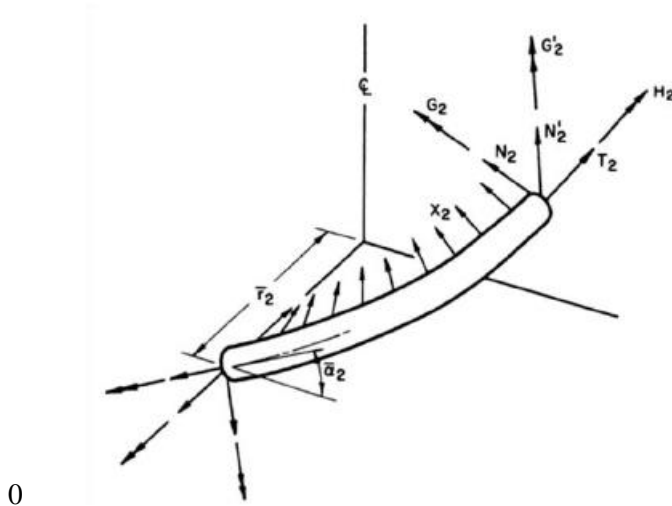


Figura N.- 86 Esfuerzos en un alambre (García, 2010)

Donde:

- T.2 es la fuerza de tensión en dirección del eje
- H.2 es el momento torsional
- N.2 y N.2' son las fuerzas cortantes que se presentan en el alambre
- G.2 y G.2' son las componentes del momento torsionante
- X2 es una carga por unidad de longitud producto del contacto con el alma

Cada alambre tiene 3 curvaturas que se encuentran al descomponer una velocidad angular dirigida a lo largo del eje del cable en cada dirección. Cuando se le aplican tensiones al cable los alambres sufren deformaciones y las componentes cambian en estado deformado, existe entonces un cambio en el torcimiento por unidad de longitud que se representa así:

$$R_2 \cdot \Delta \cdot k'_2 = \frac{-2 \cdot \sin(\alpha) \cdot \cos(\alpha)}{\frac{r_2}{R_2}} \cdot \Delta \cdot \alpha + v \cdot \frac{(R_1 \cdot \zeta_1 + R_2 \cdot \zeta_2) \cdot \cos^2(\alpha)}{r_2 \cdot \frac{r_2}{R_2}} \quad \text{[ecuación 31]}$$

$$R_2 \cdot \Delta \cdot \tau = \frac{(1 - 2) \cdot \sin^2(\alpha)}{\frac{r_2}{R_2}} \cdot \Delta \cdot \alpha + \nu \cdot \frac{(R_1 \cdot \zeta_1 + R_2 \cdot \zeta_2) \cdot \sin(\alpha) \cdot (\cos)(\alpha)}{r_2 \cdot \frac{r_2}{R_2}} \quad [\text{ecuación 32}]$$

Para Calcular las fuerzas y los momentos actuantes en los alambres helicoidales de la segunda capa del torón se utiliza las siguientes formulas:

$$\frac{G'}{E \cdot R_2^3} = \frac{\pi}{4} \cdot R_2 \cdot \Delta \cdot k'_2 \quad [\text{ecuación 33}]$$

$$\frac{H_2}{E \cdot R_2^3} = \frac{\pi}{4(1 + \nu)} \cdot R_2 \cdot \Delta \cdot \tau \quad [\text{ecuación 34}]$$

$$\frac{N'}{E \cdot R^2} = \frac{H}{E \cdot R^3} \cdot \frac{[\cos^{(2)}(\alpha)]}{\frac{r}{R}} - \frac{G'}{E \cdot R^3} \cdot \frac{\sin(\alpha) \cdot \cos(\alpha)}{\frac{r}{R}} \quad [\text{ecuación 35}]$$

$$\frac{T}{E \cdot R^2} = \pi \cdot \zeta_2 \quad [\text{ecuación 36}]$$

$$\frac{X_2}{E \cdot R} = \frac{N'}{E \cdot R^2} \cdot \frac{\sin(\alpha) \cdot \cos(\alpha)}{\frac{r}{R}} - \frac{T_2}{E \cdot R^2} \cdot \left[ \frac{\cos^{(2)}(\alpha)}{\frac{r}{R}} \right]$$

La proyección de estas fuerzas y momentos actuando en los alambres en dirección axial al eje se obtiene con las siguientes ecuaciones:

$$F = m \cdot (E \cdot R^2) \cdot \left[ \frac{T}{(E \cdot R)^2} \cdot \sin(\alpha) + \frac{N'}{E \cdot R^2} \cdot \cos(\alpha) \right] \quad [\text{ecuación 37}]$$

$$M = m \cdot E \cdot R^3 \cdot \left( \frac{H}{E \cdot R^3} \cdot \sin(\alpha) + \frac{G'}{E \cdot R^3} \cdot \cos(\alpha) + \frac{T}{E \cdot R^2} \cdot \frac{r}{R} \cdot \cos(\alpha) - \frac{N'}{E \cdot R^2} \cdot \frac{r}{R} \cdot \sin(\alpha) \right) \quad [\text{ecuación 38}]$$

Las fuerzas y momentos en el alma del torón son:

$$F_1 = \pi \cdot \zeta_1 \cdot E \cdot R_1^3 \quad \text{[ecuación 39]}$$

$$M_1 = \frac{\pi \cdot R_1 \cdot \tau_s \cdot E \cdot R_1^3}{4 \cdot (1 + \nu)} \quad \text{[ecuación 40]}$$

Entonces las fuerzas y momentos totales serán:

$$F.t = F_1 + F_2 \quad \text{[ecuación 41]}$$

$$M_t = M_1 + M_2 \quad \text{[ecuación 42]}$$

Se calculan individualmente las fuerzas que actúan en cada uno de los alambres que conforman el torón y con su magnitud se calculan los esfuerzos producidos por estas fuerzas.

Para el caso del alma los esfuerzos se calculan con las siguientes ecuaciones (Alonso García, 2013)

$$\sigma_{1F} = \frac{F_1}{\pi \cdot R_1^2} \quad \text{[ecuación 43]}$$

$$\sigma_{1M} = \frac{2 \cdot M_1}{\pi \cdot R_1^3} \quad \text{[ecuación 44]}$$

Y para los alambres helicoidales sus ecuaciones son:

$$\sigma_T = \frac{T}{\pi \cdot R^2} \quad \text{[ecuación 45]}$$

$$\sigma_{G'} = \frac{4 \cdot G'}{\pi \cdot R^3} \quad \text{[ecuación 46]}$$

$$\sigma_H = 2 \cdot \frac{H}{\pi \cdot R^2} \quad \text{[ecuación 47]}$$

$$\sigma_{N'} = \frac{N'}{\pi \cdot R^2} \quad \text{[ecuación 48]}$$

El esfuerzo normal  $N'$  en general es muy pequeño lo que permite despreciarlo.

### Crecimiento de grieta

Cuando un elemento soporta cargas cíclicas de amplitud constante se forma una zona plástica en la punta de la grieta y la propagación de la misma forma una franja plástica, las condiciones de la punta de grieta están definidas únicamente por el valor del factor de intensidad de esfuerzos  $K$  y la velocidad de propagación de la grieta, es decir el incremento de tamaño de grieta por ciclo de carga.

Este incremento depende de la amplitud del factor de intensidad de esfuerzos aplicados ( $\Delta K$ ). Paris represento los datos de  $da/dN$  contra ( $\Delta K$ ) en una gráfica logarítmica y encontró que la rapidez de propagación de grietas por fatiga, muestra tres zonas de crecimiento bien definidas, las cuales varían considerablemente en función del tipo de material, carga, irregularidades, temperatura, geometría, etc... (Carrión, 2013)

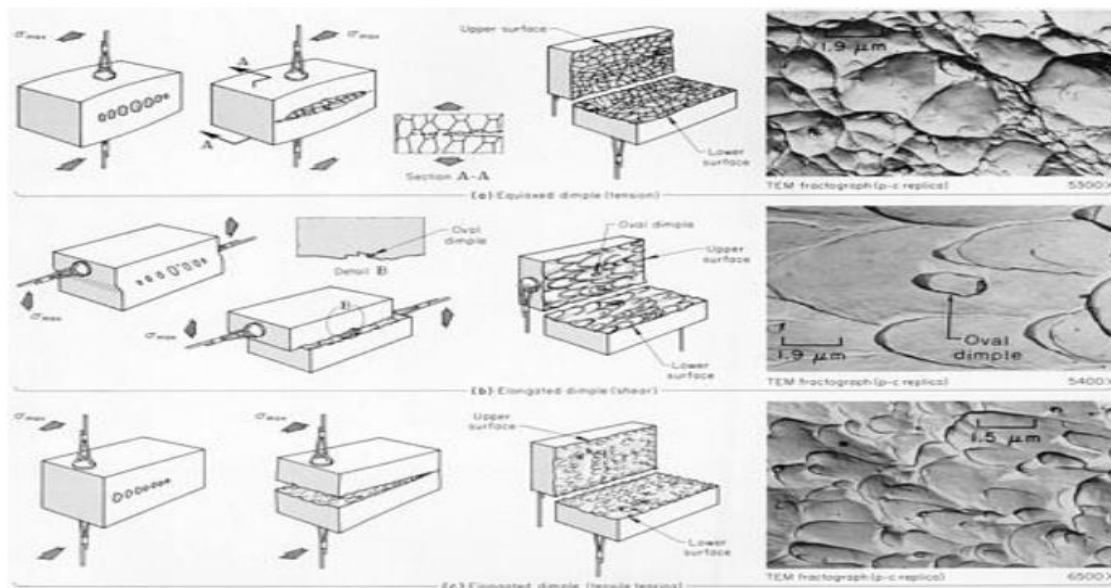


Figura N.- 87 Cavidades respecto a los modos de carga (Eurocódigo)

## Etapa I

Caracterizada por la formación de las grietas, los primeros cambios microestructurales terminan en formar microfisuras en zonas de fluencia plástica, produciendo distorsiones en el material que introducen la formación de bandas de deslizamiento a su alrededor, ayudando al aumento de la densidad de dislocación que produce daños irreversibles. En esta etapa se encuentra el límite de la amplitud del factor de intensidad de esfuerzos aplicados o umbral de agrietamiento ( $\Delta K$ -lim) debajo de este punto no se registran agrietamientos, se lo conoce también como vida a la fatiga infinita.

## Etapa II

Un elemento pasa en esta etapa más del 90 % de su vida útil, presentando un crecimiento estable, las grietas crecen de manera lineal, lo suficiente que pueden ser observadas a simple vista, para interactuar entre sí, incluso pueden haber bifurcaciones en el patrón de grietas. Paris demostró que esta etapa se puede describir con una relación empírica en donde está relacionada la velocidad de crecimiento de grieta con la amplitud del factor de intensidad de esfuerzos, el factor de forma que se considera constante y la pendiente de la recta (m).

## Etapa III

Conocida como la zona de fractura, la grieta crece rápidamente y alcanza la tenacidad a la fractura o falla final, la grieta alcanza su tamaño crítico superando la resistencia del material. En análisis fractograficos se puede apreciar el cambio del crecimiento de la zona estable con la zona de fractura final, se aprecia un cambio en la superficie de fractura.

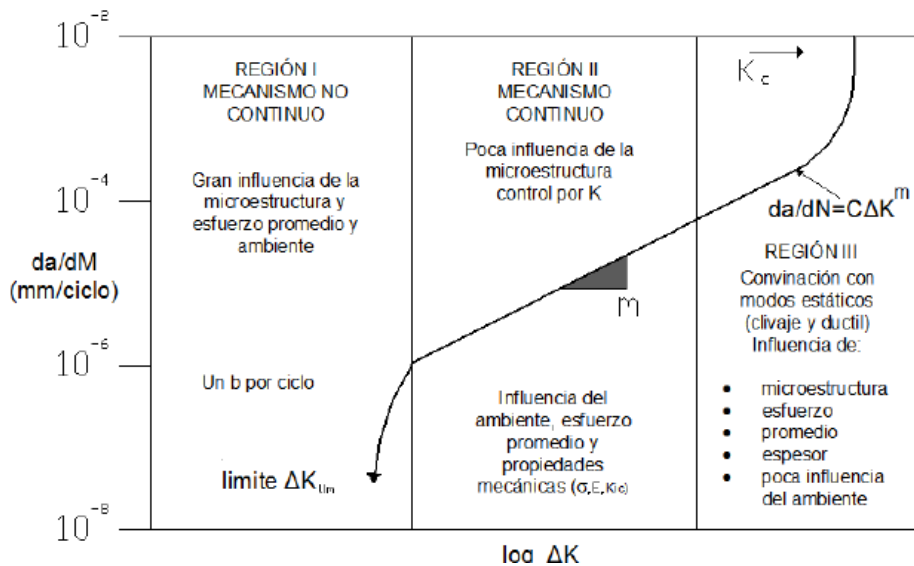


Figura N.- 88 Propagación de las grietas (Eurocódigo, 2010)

Se presenta en cualquier momento a lo largo de la vida útil de la estructura dependiendo de las propiedades y el nivel de servicio Paris (Paris, 1960) estudio el crecimiento de grieta en

los años 60's demostró que la mecánica de la fractura es una herramienta útil para caracterizar el crecimiento de grietas por fatiga.

El crecimiento progresivo de la grieta influye en el comportamiento del elemento provocando cambios significativos en las propiedades mecánicas (Rigidez, dureza, resistencia) representado también por la reducción de la pendiente en la curva esfuerzo deformación conforme se incrementa el número de ciclos de carga, Paris caracterizo el crecimiento de grieta descrito por el factor de intensidad de esfuerzos (K) considerando al crecimiento de grieta como una función del rango y la amplitud de esfuerzos cíclicos aplicados, el tamaño de la grieta y el factor de forma aplicado (da/dN) (Carrión, 2013)  
 En cualquier etapa la rapidez de la extensión de la grieta está en función del número de ciclos y depende de la magnitud de la variación de los esfuerzos aplicados en la punta de la grieta, que en condiciones elásticas son descritos por el factor de intensidad de esfuerzos (K)

$$K = \sigma \cdot \beta \cdot \sqrt{\pi \cdot \alpha} \quad \text{[ecuación 49]}$$

Donde:

- $\alpha$  Es el tamaño de grieta
- $\beta$  Constante del factor de forma
- $\sigma$  Es el esfuerzo aplicado cuya expresión es:

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad \text{[ecuación 50]}$$

Donde:

- P es la carga aplicada y
- A es el área transversal a la dirección normal de aplicación de la carga del elemento.
- En un ciclo completo de carga, K varia sobre un intervalo de amplitud del factor de intensidad de esfuerzos ( $\Delta K$ ).

$$\Delta K = K_{\max} - K_{\min} \quad \text{[ecuación 51]}$$

Si ( $\Delta K$ ) es constante el ciclo de carga queda definido con la relación de cargas (R):

$$R = \frac{P_{\min}}{P_{\max}} \quad \text{[ecuación 52]}$$

$$R = \frac{K_{\min}}{K_{\max}} \quad \text{[ecuación 53]}$$

Cuando la conexión ya está agrietada a medida que se propaga el factor de intensidad se incrementa y la rapidez de propagación aumenta. Esto ocurre hasta igualar la tenacidad del material ( $K_c$ ) ya cuando la placa se ha fracturado. Finalmente la velocidad de crecimiento de la grieta viene determinada por la relación de Paris

$$\frac{d\alpha}{dN} = C \cdot \Delta \cdot K^m \quad \text{[ecuación 54]}$$

Donde:

C es el factor de forma del elemento y  
m es la pendiente de la recta

El estudio de los mecanismos y procesos de propagación de grietas en sólidos así como la redistribución de esfuerzos y deformaciones que ocurren en un material agrietado o con discontinuidades es tratado por la mecánica de Fractura Elástica Lineal, propuesta por Griffith en 1920 con su criterio energético de propagación de grietas (Hernández, 2002)

$$\sigma_c = \sqrt{\frac{2TE}{\pi c}} \quad \text{[ecuación 55]}$$

Donde:

T es la energía específica de superficie y c es la longitud de la grieta, E el módulo elástico del material (Kaplan, 1961). Sin embargo Irwin desarrolló un aporte importante a esta teoría al formular la distribución de esfuerzos alrededor de la punta de la grieta dado por:

$$\sigma_{i,j} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} f_{i,j}(\theta) \quad \text{[ecuación 56]}$$

Donde:

$f_{ij}(\theta)$  es una función conocida de  $\theta$  y

$K_I$  es el factor de intensidad de esfuerzos para el modo i de agrietamiento y se expresa como:

$$K_I = \beta \sigma \sqrt{\alpha} \quad \text{[ecuación 57]}$$



Donde  $\alpha$  es la longitud de la grieta inicial y  $\beta$  es un factor adimensional que depende de la longitud de la grieta y de la geometría del elemento sometido a un esfuerzo dado, se expresa como la longitud  $L'$  proporcional a una de sus dimensiones  $L$ .

De aquí se describe la ecuación de Paris para la propagación de grietas (Paris, 1960)

$$\frac{\partial \alpha}{\partial N} = C(\Delta K)^n \quad \text{[ecuación 58]}$$

Donde  $C$  y  $n$  son constantes que dependen del material y  $\Delta K$  es la variación del factor de intensidad de esfuerzo de un ciclo de carga.

A partir de la ley de Paris surgieron las siguientes leyes:

Ley de Walker (Walker, 1970)

$$\frac{\partial \alpha}{\partial N} = CK (i)max^m(\Delta K)i^n \quad \text{[ecuación 59]}$$

Donde  $KI_{max}$  es el factor de intensidad de esfuerzos correspondientes al límite de carga por fatiga más alto y  $C$ ,  $m$  y  $n$  son parámetros correspondientes al material.

Ley de Forman

$$\frac{\partial \alpha}{\partial N} = \frac{CK (i)max^m(\Delta K)i^m}{K(ic)-K(max)} \quad \text{[ecuación 60]}$$

En los años 90's Bazant (García 2013) modifico la ley de Paris implementando nuevas variables para materiales como el acero o el concreto estructural

$$\frac{\partial \alpha}{\partial N} = C \left[ \frac{\Delta K(i)}{K(ic)} \right]^m \quad \text{[ecuación 61]}$$

$$K(ic) = K(if) \left[ \frac{\beta}{1+\beta} \right]^{1/2}, \quad \text{[ecuación 62]}$$

$$\beta = \frac{d}{d_0} \quad \text{[ecuación 63]}$$

Donde:

$K_{if}$  es la tenacidad a la fractura de un elemento estructural  
 $d$  es una dimensión característica de la estructura y

do es una constante empírica.

Esta propuesta es aceptada para cargas de amplitud constante y un rango de carga particular Bazant (García, 2013)

Ley de Slowik (García, 2013)

Desarrollo un modelo elástico lineal simplificado basado también en la ley de Paris (Paris, 1960), el cual describe el incremento de la longitud de la grieta equivalente  $\alpha$  en la región en la que

$$K_I < K_{IC}$$

$$\frac{\partial \alpha}{\partial N} = C \frac{K(i)max^m(\Delta K)i^n}{[K(ic)-K(isup)]^p} + F(\alpha, \Delta\sigma) \quad \text{[ecuación 64]}$$

Donde:

C es un parámetro que proporciona una medida del crecimiento de grieta por ciclo de carga,

K(isup) es el máximo factor de intensidad de esfuerzo jamás alcanzado en su historial de carga,

K(ic) es la tenacidad a la fractura,

K(imax)<sup>m</sup> es el máximo factor de intensidad de esfuerzo en un ciclo,

N es el número de ciclos de carga,  $\alpha$  es la longitud de la grieta,

$\Delta K$  es el rango de factores de intensidad de esfuerzo y

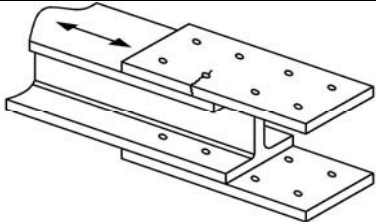
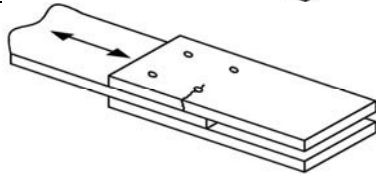
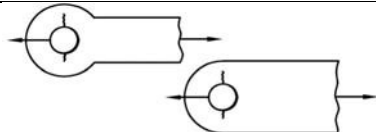
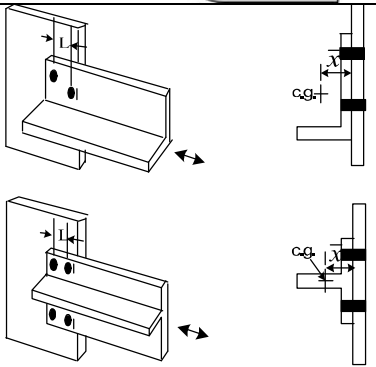
m, n y p son constantes determinadas experimentalmente en 2, 1.1 y 0.7 por Slowik (Slowik, 1996) para acero A 572 Gr 50

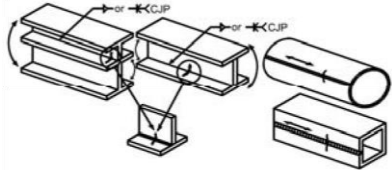
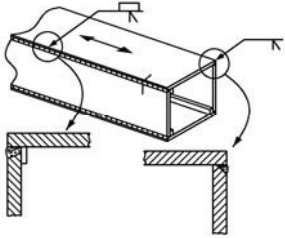
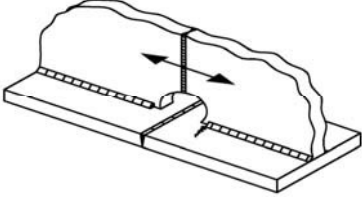
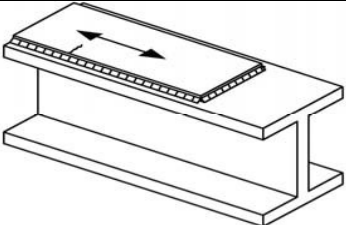
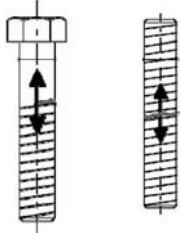
Ensayos realizados en la Universidad Nacional Autónoma de México (Alonso García 2013) estiman que los esfuerzos últimos a tensión fatiga en torones se ven reducidos hasta en 13% que en el mismo elemento solamente a tensión y los desplazamientos se incrementan hasta un 40%. Esto podría afectar inclusive a la secuencia de ruptura de los alambres y torones que forman el cable.

### Anexo 3 Clasificación de las uniones

- AASHTO

Detalle	Categoría	Constante A ksi	$\Delta F_t$ h ksi	Punto inicial de la fisura	Ejemplo ilustrativo
Sección 1 material en el plano sin dobladuras					
1.1 Metal base en elementos estructurales forjados excepto acero sin recubrimiento. Bordes cortados con fuego con rugosidad de 1000 u-in o menos no estudia las esquinas	A	$250 \times 10^8$	24	Lejos de cualquier conexión soldada	
1.2 Acero sin recubrimiento o planchas enrolladas con diseños acordes a la FHWA (1989) cortados a máquina	B	$120 \times 10^8$	16	Lejos de cualquier conexión soldada	
1.3 Miembros con esquinas en los bordes o con discontinuidades geométricas de acuerdo al AASHTO/AWS D1-5 sin orificios	C	$44 \times 10^8$	10	En el borde externo	
1.4 Secciones huecas de acuerdo al artículo 3.2.4 AASHTO entre placas	C	$44 \times 10^8$	10	En el metal base o en el hoyo	
1.5 Secciones huecas	D	$22 \times 10^8$	7	En la sección neta del hoyo	
SECCION 2 secciones de concreto con acero de alta resistencia					
2.1 Acero de alta resistencia con pernos pretensados o remachados o atiesadores entre placa y placa atornillados	B	$120 \times 10^8$	16	Cerca al hoyo	

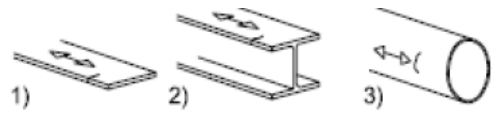


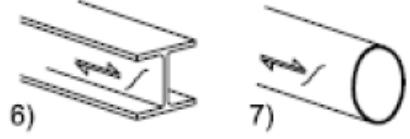


Detalle	Categoría	Constante A ksi	$\Delta F_t$ h ksi	Punto inicial de la fisura	Ejemplo ilustrativo
Sección 2 material conectados uniones atornilladas					
2.2 Metal en zonas de concentracion de esfuerzos fabricado o instalado conexiones pretensadas de alta resistencia	B	$120 \times 10^8$	16	en una dirección cerca al hoyo	
2.3 Conexiones en miembros galvanizados con tornillos pretensados de alta resistencia usando la norma ASTM A307 o ángulos o secciones patines en secciones I o tee	D	$22 \times 10^8$	7	En la seccion neta cercana al hoyo	
2.4 Metal base en barras o pines en conexiones ebtre placas	E	$11 \times 10^8$	4.5	En la sección neta del pin	
2.5 Conexiones en tee o en ángulo en zonas críticas a fatiga cuya área neta se mide la distancia del centroide de la placa a la conexión  La fatiga se calculara de acuerdo a la condición 2.1 para todos los demás casos se debe calcular el área neta	E	$11 \times 10^8$	4.5	en la seccion neta o cercana al hoyo	

Detalle	Categoría	Constante A ksi	$\Delta F_{th}$ ksi	Punto inicial de la fisura	Ejemplo ilustrativo
Sección 2 material conectados uniones atornilladas					
3.1 Miembros añadidos a elementos estructurales o placas conectadas de manera continua con soldadura de penetración completa en la dirección del esfuerzo aplicado	B	$120 \times 10^8$	16	En la superficie o discontinuidades internas en la soldadura	
3.2 Miembros estructurales armados de placas unidas con soldadura de penetración completa paralela a la dirección del esfuerzo aplicado	B'	$61 \times 10^8$	12	En la superficie o discontinuidades internas en la soldadura	
3.3 Uniones de placas con orificios de acuerdo a los requerimientos del AASHTO/AWS D1-5 artículo 3.2.4 en miembros estructurales	D	$20 \times 10^8$	7	En el alma o en el orificio	
3.4 Cubreplacas parciales conectadas con filete continuo paralela a la dirección del esfuerzo aplicado	B	$120 \times 10^8$	16	En la superficie o discontinuidades internas en la soldadura	
9.2 pernos de alta resistencia enrollados o cortados en el rango de la tensión pueden soportar cargas o acciones aplicables a vida finita o infinita	E' D	$3.9 \times 10^8$ N/A	n/a 7	En la raíz de la conexión se extiende por donde pasa el área de tensión	

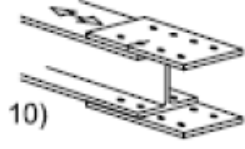

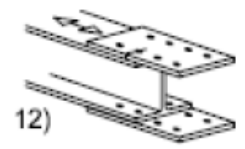
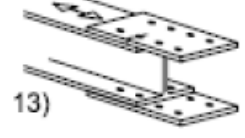
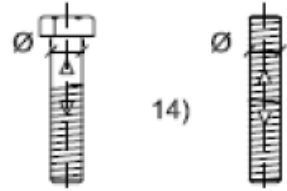
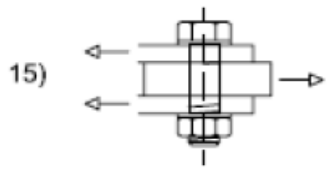
Detalle	Categoría	Constante A ksi	$\Delta F_t$ h ksi	Punto inicial de la fisura	Ejemplo ilustrativo
Sección 2 material conectados uniones atornilladas					
3.5 terminaciones parciales en placas unidas a elementos estructurales con o sin soldadura de refuerzo alrededor del borde	E E'	11 X 10 <sup>8</sup> 3.9 X 10 <sup>8</sup>	4.5 2.6	En el alma o en el patin o en la terminacion de la soldadura	
3.6 cubreplacas con conexiones criticas con orificios que satisfacen el articulo 6.10.12.2.3	B	120 X 10 <sup>8</sup>	16	En el alma o en el patin o en la terminacion de la soldadura	
3.7 Cubreplacas anchas soldadas al patin inferior sin soldadura de refuerzo	E'	3.9 X 10 <sup>8</sup>	2.6	En el borde del alma o en el patin o en la terminacion de la soldadura	
Sección 4 atiesadores soldados					
4.1 atiesadores transversales alma con alma filete o alma patin	C'	44 X 10 <sup>8</sup>	12	Cualquier discontinuidad en la soldadura	
4.2 Atiesadores longitudinales o en caja conectados con filete continuo paralelo a la dirección del esfuerzo aplicado	B	120 X 10 <sup>8</sup>	16	Cualquier discontinuidad en la soldadura	

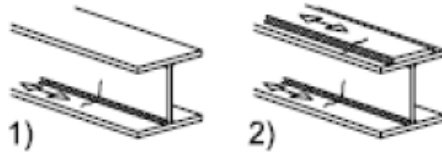
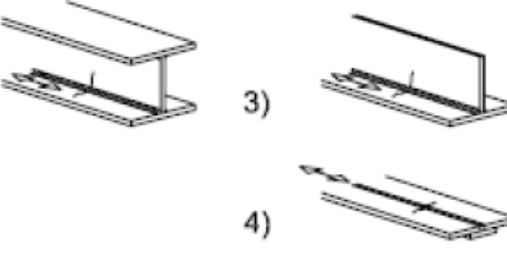
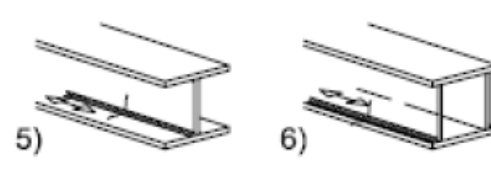

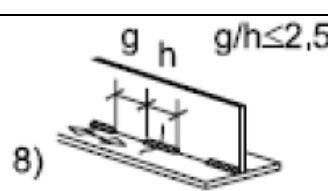

Detalle	Categoría	Constante A ksi	$\Delta F_t$ h ksi	Punto inicial de la fisura	Ejemplo ilustrativo
Sección I material en el plano sin dobladuras					
5.3 Conexiones en T o en uniones de esquinas con cuerdas cuyo espesor no supere la relación 1:2:5	C	$250 \times 10^8$	24	En el cordón de la soldadura o en discontinuidades en la raíz	
5.4 detalles donde las discontinuidades son parte del filete o penetración parcial en la dirección del esfuerzo principal	C ajustada	$120 \times 10^8$	16	En el cordón de la soldadura o en discontinuidades en la raíz	
SECCION 6 secciones cargadas transversalmente					
6.1 Placas adyacentes a elementos estructurales cargados de manera paralela al filete incorporándose el radio de transición para variaciones en espesores $R \geq 24$ in.  $24$ in. $> R \geq 6$ in.  $6$ in. $> R \geq 2$ in.  $2$ in. $> R$	B C D E E	$120 \times 10^8$ $440 \times 10^8$ $220 \times 10^8$ $110 \times 10^8$ $110 \times 10^8$	16 10 7 4.5 4.5		


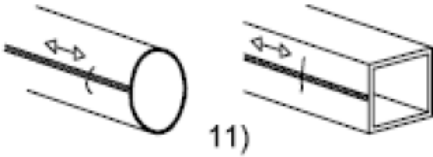

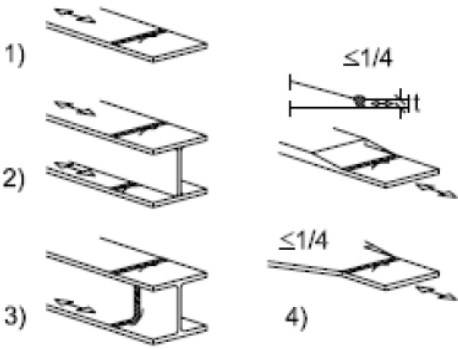
- Clasificación uniones EUROCODIGO

	Detalles constructivos	Descripción	Requisitos
160	<p>Nota: la curva de resistencia a la fatiga correspondiente a la categoría 160 es la más alta. Ningún detalle puede alcanzar una resistencia a la fatiga mayor para ningún número de ciclos</p> 	<p>Productos laminados y extruidos</p> <p>1) Placas y planos</p> <p>2) Perfiles laminados</p> <p>3) Secciones huecas circulares o rectangulares sin soldadura</p>	<p>Detalles</p> <p>Los cortes vivos, las fisuras superficiales de laminación deben tratarse mediante amolado hasta eliminarlas y dejar acuerdos suaves.</p>
140		<p>Placas cizallas</p> <p>4) Material cortado con gas o con cizalla con repaso posterior</p> <p>5) Material con bordes cortados con gas presentando líneas de arrastre someras rectangulares o material cortado con maquina de gas con eliminación de las marcas de borde</p>	<p>4) Deben eliminarse todos los signos visibles de discontinuidades de borde. Las áreas oxicrotadas deben ser esmeriladas o rectificadas hasta eliminar todas las marcas</p>
125		<p>líneas de arrastre someras rectangulares o material cortado con maquina de gas con eliminación de las marcas de borde</p> <p>calidad EN 1090</p>	
100 m=5		<p>6)7) Productos laminados y extruidos como en los detalles 1 2 y 3</p>	<p>Calculando mediante</p> $T = \frac{VS(t)}{It}$
112		<p>Junta simétrica con tornillos de alta resistencia o con tornillos de inyección</p>	
90		<p>Junta simétrica con tornillos calibrados de alta resistencia pretensados de inyección</p>	<p><math>\Delta\tau</math> calculado sobre la sección neta</p>



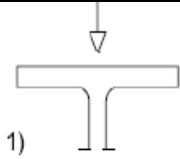
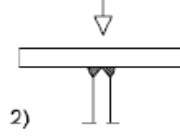
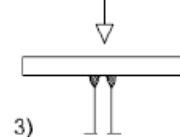
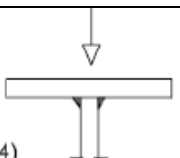
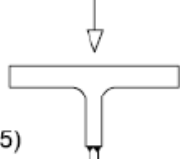
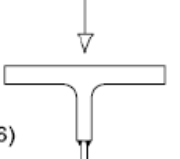
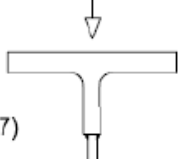
	Detalles constructivos	Descripción	Requisitos
	 <p>10)</p>	Unión mediante tornillos pretensados de inyección	$\Delta\tau$ calculado sobre la sección bruta
	 <p>11)</p>	Pieza con agujeros sometida a flexión axial	$\Delta\tau$ calculado sobre la sección neta
80	 <p>12)</p>	Unión mediante tornillos calibrados sin pretensar	$\Delta\tau$ calculado sobre la sección neta
50	 <p>13)</p>		$\Delta\tau$ calculado sobre la sección neta
50	<p>Efecto de escala  <math>\Theta &gt; 30\text{mm}</math>  <math display="block">k_s = \left(\frac{30}{\phi}\right)^{1/4}</math></p>  <p>14)</p>	Tornillos y barras en tracción con rosca laminada	Se calcula usando el área a tracción del tornillo En tornillos pretensados debe considerarse la reducción de la carrera de tensión
100 m=5	 <p>15)</p>	Tornillos a corte simple con la rosca fuera del plano calibrados normales sin inversiones de carga	$\Delta\tau$ calculado para el área resistente. Se tendrán en cuenta las cargas y flexiones adicionales debidas al efecto palanca así como el efecto del pretensado

	Detalles constructivos	Descripción	Requisitos
125	 <p>1) 2)</p>	Cordones longitudinales continuos cordones a tope por ambos lados cordones en ángulo en los extremos	No se permite interrupción alguna del cordón
112	 <p>3) 4)</p>	Cordones automáticos a tope en ambos lados con chispa dorsal sin interrupciones	Sin interrupciones soldadura clase 100
100	 <p>5) 6)</p>	Cordones manuales en ángulo	Es esencial un ajuste perfecto entre las placas del ala y el alma debe prepararse el borde de modo que se consiga penetración regular en la raíz
100	 <p>7)</p>	Cordones a tope o en ángulo reparados	La categoría original se puede recuperar si un especialista procede a eliminar los efectos visibles y se lleva un control adecuado
80	 <p>8) <math>g</math> <math>h</math> <math>g/h \leq 2,5</math></p>	Cordones en angulo longitudinales intermitentes	$\Delta\tau$ calculado a partir de las tensiones normales en el ala
71	 <p>9)</p>	Cordones longitudinales continuos o intermitentes con groeras de diámetro no superior a 60 mm	$\Delta\tau$ calculado a partir de las tensiones normales en el ala

	Detalles constructivos	Descripción	Requisitos
125		Cordones a tope longitudinales con ambos lados rectificadas en paralelo a la dirección de la carga	
112		Sin amolado ni interrupciones	
90		Con interrupciones	
140		Costura longitudinal con soldadura automática sin interrupciones en secciones huecas	Libre de defectos fuera de las tolerancias de espesor de pared $t < 12.5\text{mm}$
125		Costura longitudinal con soldadura automática sin interrupciones en secciones huecas	Espesor $> 12.5\text{mm}$
90		intermitente	
112	Efecto de escala para $t > 25\text{mm}$ $K_s = (25/t)^{0.2}$ 	Sin chapa dorsal empalmes de y vigas armadas antes de su ensamble cordones a tope de sección completa en perfiles laminados con pendientes $< 1/4$	Todos los cordones en bordes de placas rectificadas sin diferencias de tolerancia
90		Empalmes a tope de penetración total en perfiles laminados de canto variable	$\Delta\sigma$ en la placa se calcula con el área de la figura el cordón debe terminar 10 mm más allá del extremo de la placa

	Detalles constructivos		Descripción	Requisitos
			<p>Cordones de penetración total</p> <p>Unión soldada en ángulo con cubre junta</p> <p>Pendientes <math>&lt; 1/4</math></p>	<p>La altura de cordón no superara el 10 % de su anchura con transición suave</p> <p>bordes rectificadoss</p> <p>Soldadura a ambos lados</p>
80	$L < 50$	<p>Todo t</p>	<p>Junta en T</p> <p>Soldaduras de penetración total y uniones de penetración parcial</p>	
71	$50 < L < 80$			
63	$80 < L < 100$			
56	$100 < L < 120$			
56	$L > 120$			$T < 20$
50	$120 < L < 200$ $L > 200$	$t > 20$ $20 < t < 30$		
45	$200 < L < 300$ $L > 300$	$T > 30$ $30 < t < 50$		
40	$L > 300$ $t > 50$	$t > 50$		
Detalle 1				
36*				
			<p>Zonas extremas sencillas o multiples con o sin soldadura frontal</p>	<p>La longitud máxima es de 300 mm</p>

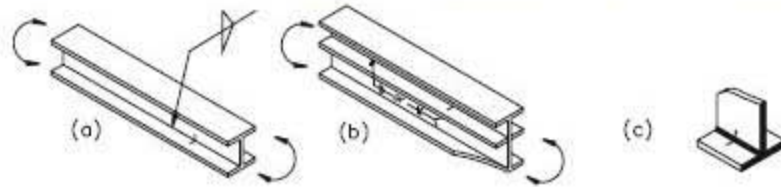
	Detalles constructivos			Descripción	Requisitos
Detalle 1	<p>4) área de tensiones del panel principal: pendiente 1/2</p>			Unión soldada con cubre-placa	$\Delta\sigma$ se calcula basándose en el área mostrada en el croquis más 10 mm del extremo de la placa. Debe comprobarse el diseño de cortante.
45*	<p>5)</p>			Unión soldada en ángulo	
56	$T < 20$		<p>6)</p>		
50	$20 < t < 30$				
45	$30 < t < 50$				
40	$t > 50$				
56	<p>7) cordón frontal reforzado</p>			Cubreplacas en vigas y vigas armadas	Cordon frontal depositado y rebajado además si $\tau_s > 20$ mm el frente de la placa en el extremo de contacto con pendiente $< 1/4$
80 m=5	<p>8) 9)</p>			Cordones en angulos continuos transmitiendo un flujo de cortante en una ala soldada a vigas armadas	$\Delta\tau$ se calcula en el área de la garganta del cordon considerando la longitud total de la soldadura además de 10 mm del borde de la placa
90 m=8	<p>10)</p>			Conectores de cortante para uso en estructuras mixtas	$\Delta\tau$ se calcula en la sección nominal del conector
71	<p>11) 12)</p>			Junta articulada tubular con 80 % de soldadura a tope con penetración total	

	Detalles constructivos	Descripción	Requisitos
40		Junta articulada tubular con soldadura a de ángulo	Raíz depositada de la soldadura el esfuerzo se calcula en el tubo
160	 <p>1)</p>	Perfiles laminados I o H	Rango de tensiones de compresión $\Delta\sigma$ en el alma debido a la carga de ruedas
71	 <p>2)</p>	Soldadura a tope con penetración total	
36*	 <p>3)</p>	Cordones a tope con penetración parcial	Rango de tensiones de compresión en la garganta de la soldadura debido a la carga de ruedas
36*	 <p>4)</p>	Soldaduras en ángulo	
71	 <p>5)</p>	Ala de sección T con soldadura de penetración completa	El rango de tensiones verticales de compresión $\Delta\sigma$ en el alma debida a carga de ruedas
36*	 <p>6)</p>	Ala de sección T con soldadura de penetración parcial	
36*	 <p>7)</p>	Ala de sección T con soldaduras en ángulo	

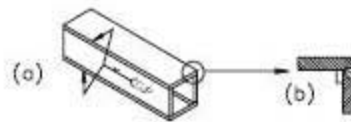
Ejemplos Típicos Ilustrativos

**SECCIÓN 3 - UNIONES SOLDADAS QUE UNEN COMPONENTES DE PERFILES SOLDADOS**

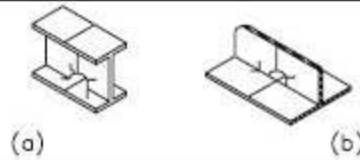
3.1



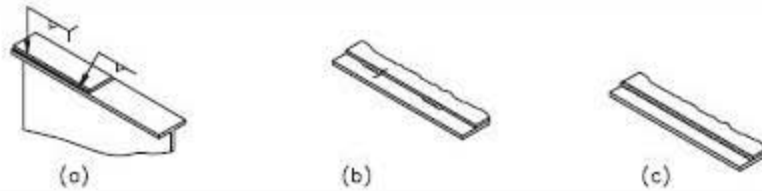
3.2



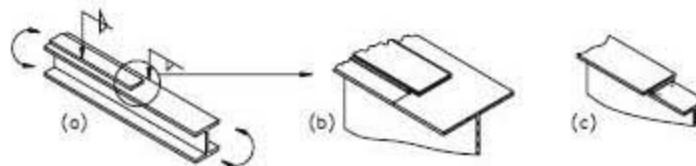
3.3



3.4



3.5



3.6



**SECCIÓN 4 - CONEXIONES DE EXTREMO CON SOLDADURA LONGITUDINAL DE FILETE**

4.1

