



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA  
INGENIERÍA MECÁNICA – INGENIERÍA AUTOMOTRIZ

MODELO PARA PREDICCIÓN DE FALLA POR FATIGA EN UNIONES  
SOLDADAS CON ACEROS AVANZADOS DE ALTA RESISTENCIA UTILIZADOS  
EN LA INDUSTRIA AUTOMOTRIZ

TESIS  
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:  
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:  
GREGORIO REYES HERNÁNDEZ

TUTOR PRINCIPAL:  
DR. SAÚL DANIEL SANTILLÁN GUTIÉRREZ

**JURADO ASIGNADO:**

Presidente: Dr. Juan Genescá Llongueras  
Secretario: Dr. Arturo Barba Pingarrón  
Vocal: Dr. Saúl Daniel Santillán Gutiérrez  
1 er. Suplente: Dr. Fernando Velázquez Villegas  
2 do. Suplente: Dr. Miguel Ángel Hernández Gallegos

Lugar o lugares donde se realizó la tesis:

Facultad de Ingeniería, Ciudad Universitaria, UNAM, Coyoacán, Distrito Federal, México.

Polo Universitario de Tecnología Avanzada (PUNTA), UNAM, Apodaca, Nuevo León, México.

**TUTOR DE TESIS:**

DR. SAÚL DANIEL SANTILLÁN GUTIÉRREZ

-----  
**FIRMA**



## Índice

Lista de tablas.....	8
Lista de figuras.....	10
Introducción.....	14
1. Planteamiento de problema.....	17
1.1. Objetivo general.....	17
1.2. Objetivos específicos.....	17
1.3. Justificación.....	18
2. Aceros estructurales y falla en uniones soldadas.....	19
2.1. Aceros Avanzados de Alta Resistencia (AHSS) .....	19
2.1.1. Aceros de Fase Compleja (CP).....	21
2.2. Comportamiento de los AHSS en proceso de soldadura con Atmosfera controlada.....	22
2.2.1. Falla en uniones soldadas.....	23
3. Fatiga en materiales metálicos.....	27
3.1. Concepto de fatiga.....	27
3.1.1. Fatiga en elementos estructurales sin grieta.....	27
3.1.2. Fatiga en elementos estructurales con grieta.....	28
3.2. Principales términos de fatiga a altos ciclos.....	28
3.2.1. Factores que influyen en la evaluación a fatiga.....	31
3.2.2. Efectos de concentrador de esfuerzos en la vida a fatiga ( $K_f$ ).....	32
3.2.3. Efectos del esfuerzo medio en la vida fatiga.....	33
3.2.4. Teoría de daño acumulado.....	35
3.2.4.1. Regla de Palmgren Miner.....	36
3.2.5. Análisis estadístico en fatiga.....	36
3.2.5.1. Análisis estadístico de curva S-N (curva de vida finita).....	37
3.2.5.1.1. Correlación.....	38
3.2.5.1.2. Probabilidad de supervivencia.....	38

3.2.5.1.3. Intervalo de confianza.....	41
3.2.5.2. Análisis estadístico para límite de fatiga (Método de escalera).....	42
3.3. Análisis de vida a la fatiga en uniones soldadas.....	43
3.3.1. Curva $S - N$ para uniones soldadas.....	45
3.4. Métodos de aproximación globales y locales para evaluación de fatiga en uniones soldadas.....	47
3.4.1. Método de aproximación de esfuerzo nominal.....	48
3.4.2. Método de aproximación de esfuerzo estructural.....	49
3.4.2.1. Método de esfuerzo equivalente Battelle “Curva Maestra $S - N$ ” .....	50
3.4.3. Método de aproximación de esfuerzo de muesca.....	51
3.4.4. Mecánica de la fractura elástico lineal (LEMF).....	52
4. Planteamiento de metodología con método de aproximación de esfuerzo de muesca.....	54
4.1. Criterio de selección de método para evaluación de fatiga.....	54
4.2. Definición del método de aproximación de esfuerzo de muesca.....	55
4.2.1. Radio de referencia $r_{ref} = 0.05 \text{ mm}$ .....	58
4.2.2. Radio de referencia $r_{ref} = 0.3 \text{ mm}$ .....	58
4.2.3. Radio de referencia $r_{ref} = 1 \text{ mm}$ .....	59
4.2.4. Influencia de geometría, esfuerzo residual e imperfecciones provenientes del proceso de soldadura.....	59
4.2.5. Valores FAT recomendados por normativa para aproximación de esfuerzo de muesca.....	61
4.2.6. Requisitos de aplicación de método.....	62
4.3. Metodología de aproximación de esfuerzo de muesca por análisis FEM.....	63
4.3.1. Pre-procesamiento.....	64
4.3.1.1. Modelado de geometría.....	64
4.3.1.2. Mallado.....	65

4.3.1.2.1. Parámetros de discretización de muesca.....	66
4.3.2. Procesamiento.....	67
4.3.2.1. Análisis estático lineal .....	67
4.3.3. Post-procesamiento (análisis de fatiga).....	68
4.3.3.1. Criterios de falla.....	68
4.3.3.2. Factores que modifican la vida a fatiga en uniones soldadas.....	69
4.3.3.2.1. Factor de concentrador de esfuerzos de fatiga $K_f$ .....	70
4.3.3.2.2. Factor de esfuerzo residual.....	70
4.3.3.2.3. Factor de esfuerzo medio.....	71
5. Fase experimental.....	73
5.1. Caracterización del material.....	73
5.2. Descripción de unión soldada a traslape.....	74
5.2.1. Diseño de muestra soldada para fase experimental.....	74
5.3. Pruebas de macroscopía.....	77
5.3.1. Resultados de pruebas macroscópicas.....	78
5.4. Pruebas de tensión.....	79
5.4.1. Resultados de pruebas de tensión.....	80
5.5. Pruebas de fatiga.....	81
5.5.1. Procedimiento de ensayo.....	82
5.5.2. Etapa 1 Evaluación de resistencia a la fatiga para obtención de curva S-N.....	83
5.5.2.1. Resultados de primera etapa experimental de fatiga.....	86
5.5.2.2. Análisis estadístico de primera etapa experimental.....	87
5.5.3. Etapa 2 Evaluación de límite de fatiga con método de escalera....	98
5.5.3.1. Resultados de segunda fase experimental de fatiga.....	98
5.5.3.2. Análisis estadístico de segunda etapa experimental.....	99
5.6. Análisis de resultados experimentales con recomendaciones de normativa.....	100



## Lista de tablas

- Tabla 5.1. Composición química de acero TATA CP780
- Tabla 5.2. Propiedades mecánicas del acero CP 780
- Tabla 5.3. Principales parámetros de proceso de soldadura
- Tabla 5.4. Resultados de mediciones de macrografía de uniones soldadas
- Tabla 5.5. Valores de YS, UTS y porcentaje de elongación
- Tabla 5.6. Niveles y número de muestras para primera etapa experimental
- Tabla 5.7. Niveles de carga determinados
- Tabla 5.8. Resultados de pruebas para determinación de curva de vida finita
- Tabla 5.9. Resultados para análisis de regresión lineal de la prueba
- Tabla 5.10. Resistencia a fatiga a 5 millones de ciclos
- Tabla 5.11. Valores de probabilidad para comprobación de distribución log-normal
- Tabla 5.12. Resultados de análisis de dispersión
- Tabla 5.13. Valores para cálculo de intervalo de confianza
- Tabla 5.14. Valores límites de intervalos de confianza a 5 millones de ciclos
- Tabla 5.15. Resultados de pruebas de fatiga con método de escalera
- Tabla 5.16. Interpretación de resultados utilizando método de escalera
- Tabla 5.17. Límite de fatiga y desviación estándar a 5 millones de ciclos
- Tabla 5.18. Comparativo de curvas S-N de material CP780 base con unión soldada
- Tabla 5.19. Comparativo de curvas S-N soldada de material CP780 con normativa IIW
- Tabla 6.1. Medidas de muestra 25 utilizada para modelado de muescas
- Tabla 6.2. Distancias entre anillos de diseño de raíz
- Tabla 6.3. Distancias entre anillos de diseño de pie
- Tabla 6.4. Factor de concentrador de esfuerzos de fatiga de pie y raíz de la unión soldada
- Tabla 6.5. Parámetros y nomenclatura de curva utilizados para el análisis
- Tabla 6.6. Valores teóricos de resistencia a la fatiga de metal base



- Tabla 6.7. Valores de esfuerzo con método de esfuerzo de muesca a 2 y 5 millones de ciclos
- Tabla 6.8. Valores de límite de fatiga de curvas S-N de simulación con curva experimental
- Tabla 6.9. Valores de límite de fatiga de curvas S-N de simulación con curva experimental, comparadas con curva de diseño FAT 560 de esfuerzo de muesca

## Lista de figuras

- Figura 2.1. Comparativa de implementación de los AHSS de los principales fabricantes en industria automotriz
- Figura 2.2. Incremento y expectativa de consumo de AHSS en la industria automotriz en los últimos años
- Figura 2.3. Aceros de Fase Compleja
- Figura 2.4. Ilustración del proceso de soldadura de atmosfera controlada GMAW
- Figura 2.5. Ejemplo de ZAC de soldadura múltiple en un acero al carbón con Manganeso
- Figura 2.6. Distribución de esfuerzos residuales en unión soldada
- Figura 2.7. Comparativo de influencia de características geométricas con la resistencia y vida a la fatiga
- Figura 3.1. Curva S-N, visualización de altos y bajos ciclos
- Figura 3.2. Esfuerzos amplitud constante y expresiones de esfuerzos correspondientes
- Figura 3.3. Curva S-N, representación de límite de fatiga
- Figura 3.4. Clasificación de razones de esfuerzo  $R$
- Figura 3.5. Diagrama de métodos de corrección de resistencia la fatiga
- Figura 3.6. Diagrama  $S - N$  de daño acumulado a distintos niveles de esfuerzo
- Figura 3.7. Curvas S-N de Pf y bandas de dispersión para unión soldada entre aceros St 37 y St 52
- Figura 3.8. Curva de distribución normal o de Gauss
- Figura 3.9. Representación de distribución en datos de fatiga
- Figura 3.10. Intervalo de confianza de distribución  $t - student$
- Figura 3.11. Esquema grafico de método de escalera
- Figura 3.12. Comparación de resistencia y límite respecto proceso de fabricación
- Figura 3.13. Resistencia a la fatiga a un  $R=-1$  correspondiente a materiales lisos, con orificio y soldados en función de la resistencia de acero
- Figura 3.14. Ejemplo de curvas FAT S-N de esfuerzo nominal recomendadas por el IIW para uniones soldadas con aceros

- Figura 3.15. Área gráfica de pendiente (m) en función de espesor de placa (t) en uniones soldadas
- Figura 3.16. Variantes de aproximaciones globales y locales desarrolladas para la evaluación de resistencia a la fatiga de uniones soldadas
- Figura 3.17. Representación de aproximación de esfuerzo nominal
- Figura 3.18. Representación de aproximación esfuerzo estructural
- Figura 3.19. Master Curve y esfuerzo equivalente Battelle
- Figura 3.20. Representación aproximación de esfuerzo de muesca
- Figura 3.21. Crecimiento de grieta
- Figura 4.1. Diagrama de selección de método
- Figura 4.2. Comparación de aproximaciones exactitud contra complejidad
- Figura 4.3. Relación de esfuerzos tomados en cuenta en método de aproximación de esfuerzo de muesca en una unión soldada
- Figura 4.4. a) Pie de soldadura, b) Raíz de soldaduras a tope y c) Raíz de soldaduras de filete
- Figura 4.5. Inicio de grieta en unión a traslape
- Figura 4.6. Radios de referencia recomendados de acuerdo al espesor de placa y zonas potenciales de inicio de grieta como son pie y raíz de soldadura
- Figura 4.7. Distribución de esfuerzos residuales en unión soldada (a) transversales (b) longitudinales
- Figura 4.8. Rangos de esfuerzo FAT para aproximación de esfuerzo de muesca, recomendados para ( $N= 2 \times 10^6$ ,  $R=0.5$ ,  $P_s= 97.7\%$ )
- Figura 4.9. Diagrama de modelado FEM aplicando método de aproximación de esfuerzo de muesca para obtener resistencia y límite de fatiga aplicado en uniones soldadas
- Figura 4.10. Ejemplo de modelado de unión soldada aplicando método de aproximación de esfuerzo de muesca
- Figura 4.11. Parámetros de discretización
- Figura 5.1. Representación de unión a traslape en componente estructural
- Figura 5.2. Geometría de probeta utilizada en pruebas experimentales
- Figura 5.3. Soldeo de placas con proceso GMAW

- Figura 5.4. Placa soldada con capacidad de 5 muestras
- Figura 5.5. Vistas frontal y lateral de muestras maquinadas resultantes
- Figura 5.6. Macrografía y visualización de zonas generadas por soldadura
- Figura 5.7. Zonas geométricas de interés de unión soldada
- Figura 5.8. Pruebas de tensión con equipo hidráulico Zwich Roell Z250
- Figura 5.9. Curvas esfuerzo deformación ( $\sigma$ - $\epsilon$ ) representativas de pruebas de tensión
- Figura 5.10. Muestras rotas que fueron sometidas a pruebas de tensión
- Figura 5.11. Etapas de desarrollo experimental para determinar resistencia y vida a fatiga de unión soldada
- Figura 5.12. Montaje de muestra en equipo de pruebas de fatiga
- Figura 5.13. Diagrama de planeación de pruebas experimentales para determinar curva  $S - N$
- Figura 5.14. Clasificación de unión a solape según IIW
- Figura 5.15. Valores recomendados por el IIW de curva S-N de unión a solape
- Figura 5.16. Curva de fatiga de uniones soldadas obtenida por datos de proveedor
- Figura 5.17. Desplazamiento en probeta 12 que presentó falla en prueba de fatiga
- Figura 5.18. Vista superior de muestra de grieta originada por fatiga de muestra 22 y vista lateral de grietas resultantes de pruebas de fatiga en muestras 22 y 54
- Figura 5.19. Curva de regresión lineal de los valores experimentales
- Figura 5.20. Curva S-N de regresión logarítmica de unión a traslape con acero CP780
- Figura 5.21. Gráfica de probabilidad de niveles de esfuerzo experimentales
- Figura 5.22. Distribución de probabilidad log-normal aplicada en análisis de probabilidad de supervivencia
- Figura 5.23. Gráficas de varios porcentajes probabilidad de supervivencia
- Figura 5.24. Gráfica de intervalo de confianza de 95 % de pruebas experimentales
- Figura 5.25. Gráfica de resultados de límite de fatiga aplicando método de escalera
- Figura 5.26. Gráfica de comparativa de curva S-N de unión soldada y material base

- Figura 5.27. Gráfica de comparativa de curva S-N de unión soldada y curva de diseño FAT 63
- Figura 6.1. Geometría CAD de probeta con radios de referencia
- Figura 6.2. Modelo CAD 3D de probeta para la aproximación de esfuerzo de muesca
- Figura 6.3. Discretización de la raíz de unión soldada
- Figura 6.4. Discretización del pie de unión soldada
- Figura 6.5. Visualización de calidad de malla 2D
- Figura 6.6. Visualización de mallado 3D de probeta
- Figura 6.7. Cargas y restricciones de la pieza simulada
- Figura 6.8. Concentración de esfuerzos en la raíz y pie de la unión
- Figura 6.9. Análisis de fatiga en DesingLife de nCode
- Figura 6.10. Configuración de análisis de fatiga estándar  $S - N$
- Figura 6.11. Parámetros de curva característica S-N de software nCode utilizados en fase de simulación
- Figura 6.12. Curva teórica S-N obtenida con propiedades mecánicas y elásticas de acero CP780
- Figura 6.13. Visualización en tablas de resultados de puntos Hot Spot
- Figura 6.14. Visualización de punto Hot Spot en pie de análisis fatiga en software nCode
- Figura 6.15. Visualización de zona afectada por fatiga en software nCode
- Figura 6.16. Magnitud de daño a lo largo de pie de la soldadura
- Figura 6.17. Curvas S-N de simulaciones ajustadas con factores de corrección de resistencia a fatiga
- Figura 6.18. Comparativo de curvas S-N de simulación con curva de unión soldada
- Figura 6.19. Comparativo de curvas S-N de simulación, de diseño y experimental

## Introducción

Las actuales regulaciones han puesto en marcha una serie de requerimientos que tienen como propósito elevar el nivel de eficiencia de combustibles, con el fin de disminuir el consumo de energía y la contaminación ambiental, teniendo como objetivo para el año 2025 que todas las camionetas pick up o Vehículos de Carga Ligera (VCL) deban de satisfacer 23.17 Km/l según la Auto-Steel PartnerShip (A-SP) [1].

Se está enfocando a los fabricantes de automóviles para hacer frente a estos requerimientos a través del desarrollo de avances tecnológicos en la implementación de soluciones de reducción de peso de acero con la introducción de mejores materiales en su estructura (chasis, carrocería, etc.) como son los Aceros Avanzados de Alta Resistencia (*Advanced High Strength Steels-AHSS*) siempre y cuando se mantengan los estándares de rendimiento y al mismo tiempo garantizar la seguridad del usuario [1].

Uno de los componentes estructurales más importantes en VCL es el chasis o bastidor, el cual soporta a componentes del tren motriz, la caja de carga y la cabina del vehículo, proporcionando rigidez y resistencia. Debido a que los VCL viajan a lo largo de diversos tipos de caminos, el chasis del vehículo recibe cargas dinámicas inducidas por la rugosidad de la carretera, el motor, la transmisión, cargas por lo que el chasis de los VCL tiende a vibrar.

Si alguna de las frecuencias cargas alcanza a las frecuencias naturales de los componentes estructurales del vehículo, se produce fenómeno de resonancia. Estas oscilaciones pueden conducir a la deflexión y la deformación plástica del mismo y por tanto la falla total del vehículo y su salida del parque motor.

En presencia de irregularidades o discontinuidades geométricas de orden macroscópico, como orificios, ranuras o muescas, se incrementan de manera significativa los esfuerzos teóricos en la vecindad inmediata de la discontinuidad. Las zonas con concentradores de esfuerzos son encontradas principalmente en uniones soldadas, remachadas y atornilladas. Estas zonas son potenciales para el

inicio y propagación de grietas, desarrollando el proceso conocido como falla por fatiga.

Si se presenta una falla por fatiga en las uniones del vehículo, ésta puede ser catastrófica y poner en riesgo la integridad de los usuarios. Es inaceptable para los fabricantes que se den escenarios de falla, ya sea producida por fatiga o por exceder el límite de resistencia del material. Por esta razón se debe tener especial cuidado durante la fase de diseño para evitar estos fenómenos y dada su naturaleza de falla súbita, requieren que se analicen por métodos complementarios entre sí, ya sean analíticos y experimentales a fin de proporcionar la confiabilidad necesaria. Por ejemplo, con diseño de prototipos que validen modelos teóricos o estadísticos.

Es de especial interés el estudiar las uniones de elementos estructurales, ya que éstas implican cambiar los niveles de resistencia por la aparición de concentradores de esfuerzo, haciendo más difícil la predicción de vida de componentes estructurales en diferentes escenarios de uso del vehículo. El estudio de características dinámicas de los componentes estructurales de VCL es por lo tanto esencial, poniéndose una gran atención en la resistencia y vida a la fatiga en diferentes escenarios de uso.

Esta tesis realizada en conjunto con una empresa dedicada a la fabricación de componentes estructurales automotrices, se presentará un estudio de la aplicación de los AHSS en la industria automotriz, en específico utilizando aceros de Fase Compleja (*Complex Phase-CP*) que están integrados en un proyecto industrial e incorporados en el diseño de componentes estructurales de un vehículo comercial en la categoría de los VCL. En particular en esta tesis se estudiará y determinará la optimización de uniones soldadas utilizando aceros CP780 frente al fenómeno de fatiga.

En el presente trabajo se desarrollará un modelo que involucra tanto al análisis experimental y de simulación para relacionar la influencia del proceso de soldadura en la vida a la fatiga aplicable a distintas configuraciones de uniones soldadas, la evaluación a fatiga es realizada a una unión soldada a traslape sometida a pruebas

de carga cíclicas uniaxiales de amplitud constante a altos ciclos, para la obtención de valores de resistencia y límite a la fatiga.

Los resultados del modelo de simulación son comparados con resultados experimentales, así como con valores recomendados por normas de diseño establecidas internacionalmente. De ésta manera se obtienen las conclusiones del estudio realizado, destacando los aspectos más relevantes que permiten establecer recomendaciones para trabajos futuros.



## **1. Planteamiento del problema**

### **1.1. Breve descripción**

En este trabajo se hará una propuesta de modelo de predicción de falla por fatiga para aplicarse a uniones soldadas de componentes estructurales automotrices, la cual es basada en análisis experimental y simulación utilizando método de elemento finito (FEM).

### **1.2. Objetivo general**

Evaluar y comparar valores de resistencia y límite a la fatiga de una configuración de unión soldada, utilizada en chasis de vehículo de carga ligera, para determinar viabilidad de la metodología experimental y de simulación para AHSS.

### **Objetivos específicos**

- Aplicar método experimental de fatiga a altos ciclos a la unión soldada a traslape con acero CP780.
- Obtener una expresión matemática de resistencia y valor de límite a la fatiga a 5 millones de ciclos, aplicando métodos estadísticos establecidos por el ASTM.
- Aplicar método de aproximación de esfuerzo de muesca en modelado y análisis por FEM para obtención de factor de concentrador de esfuerzo de fatiga ( $K_f$ )
- Predecir resistencia y límite de fatiga  $K_f$  y factores que afectan la resistencia a la fatiga, propios de una unión soldada.
- Recomendar con base a comparación de resultados la aplicación del modelo de predicción de falla.

### 1.3. Justificación

La incorporación de nuevos aceros en la industria automotriz para su aplicación en elementos estructurales involucra inevitablemente el uso de soldadura en sus uniones. Actualmente éstas son soldadas utilizando procesos conocidos como soldaduras a gas y arco metálico (*Gas Metal Arc Welding-GMAW*) donde generalmente este proceso tiene el inconveniente de producir zonas más frágiles comparadas con el material base, que por lo tanto podrían ser propensas a fallas bajo condiciones de carga cíclica.

Es por eso que el proceso de unión por soldadura en aceros AHSS debe ser estudiado cuidadosamente en sus propiedades mecánicas resultantes, debido a requerimientos de seguridad e integridad de la industria automotriz. Debido a que los conocimientos sobre las propiedades de las uniones soldadas con este tipo de aceros de alta resistencia es limitado, se consideró conveniente desarrollar el estudio de resistencia a la fatiga bajo cargas cíclicas uniaxiales de amplitud constante en una unión muy utilizada en elementos estructurales, como lo es la unión a traslape.

Por lo tanto, el presente trabajo es realizado para evaluar la resistencia y vida a fatiga (límite de fatiga) de una unión soldada utilizando al acero CP780 por medio de caracterización mecánica experimental, así como la propuesta de incorporación del método de aproximación de esfuerzo de muesca para determinar la resistencia y límite de fatiga apoyado de la herramienta FEM.

## 2. Aceros estructurales y falla en uniones soldadas

### 2.1. Aceros Avanzados de Alta Resistencia (AHSS)

Los AHSS presentan muchas ventajas en relación a los aceros estructurales al carbono y de baja aleación, son buenos candidatos para ser incorporados en elementos estructurales en la industria automotriz, con respecto al costo y a la mejora en propiedades mecánicas que se obtienen mediante un tratamiento termo-mecánico controlado [2].

La introducción de los AHSS en la industria automotriz ha ido en aumento en años recientes [3] (Figura 2.1). En 1995 por ejemplo, existían pocas aplicaciones automotrices de los AHSS, sin embargo, para el año 2005 se incrementó su aplicación en la industria automotriz un 24%, esperándose que en 2015 la aplicación de los AHSS se haya incrementado hasta un 45% [3] (Figura 2.2).

Se puede proyectar que con la integración en partes estratégicas de los componentes automotrices estructurales con los AHSS se puede alcanzar una reducción de peso de hasta un 25%-35%, sin poner en riesgo condiciones y requerimientos de seguridad de los pasajeros [5].

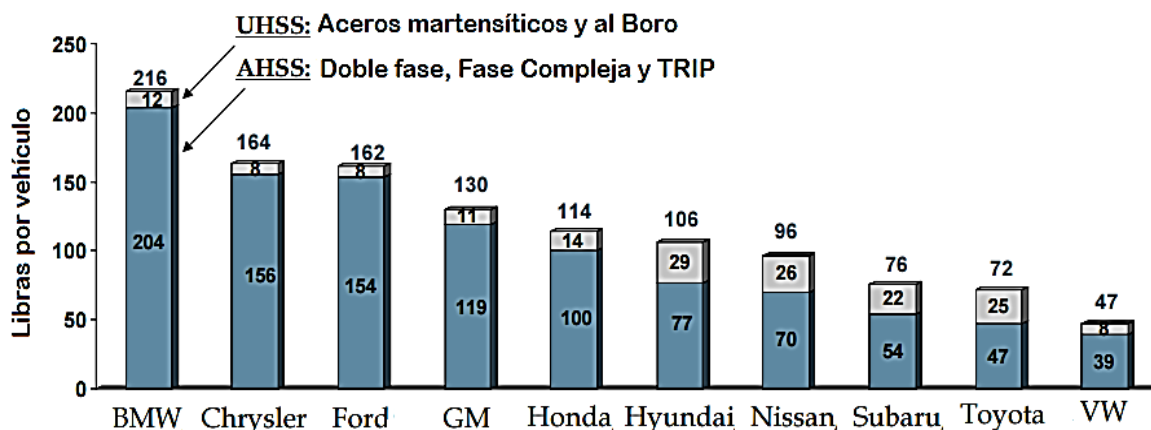
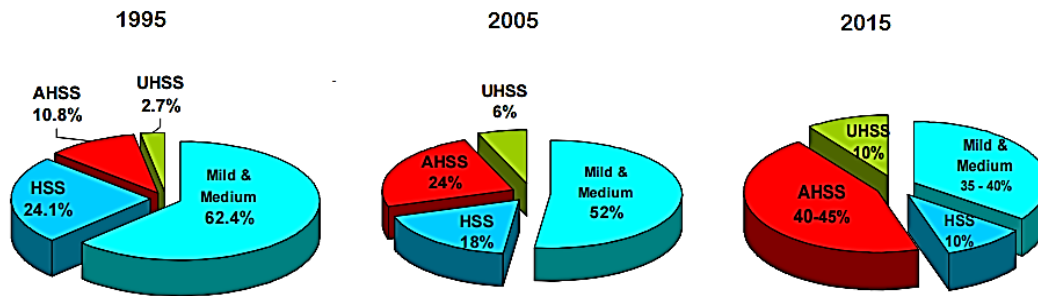


Figura 2.1. Comparativa de implementación de los AHSS de los principales fabricantes en industria automotriz [3]



**Figura 2.2. Incremento y expectativa de consumo de AHSS en la industria automotriz en los últimos años [3]**

Los aceros AHSS tienen una resistencia máxima mayor a 300 MPa de límite de cedencia (*Yield Strength-YS*) y mayor a 600 MPa de última resistencia a la tensión (*Ultimate Tensile Strength-UTS*), son aleaciones multifásicas que pueden contener ferrita, perlita, martensita, bainita y/o austenita residual, retenida en cantidades suficientes para producir propiedades mecánicas adecuadas para el uso estructural en vehículos, siempre que estén ayudados por un tratamiento térmico [2].

Los Aceros AHSS de primera generación base ferrita son:

- Fase Dual (*Dual Phase-DP*)
- Fase Compleja (*Complex Phase-CP*)
- De Transformación Inducida por Deformación Plástica (*Transformation Induced Plasticity-TRIP*)
- Martensíticos (*Martensitic Steels-MS*)

Actualmente son utilizados en la manufactura de componentes automotrices, uniéndolos por diferentes procesos de soldadura [6], mostrando una excelente combinación de resistencia mecánica y facilidad de conformado. Se pueden soldar y producir uniones con buena durabilidad.

Para la aplicación en VCL se requiere que estos aceros resistentes al choque y resilientes, proporcionen la rigidez necesaria para que el vehículo tenga un comportamiento aceptable en su manejo ya sea con o sin carga.

### 2.1.1. Aceros de Fase Compleja (CP)

Estos aceros muestran un límite de cedencia igual o mayor a 680 MPa (Figura 2.3), son caracterizados por la alta energía de absorción y alta capacidad de deformación residual, la microestructura de aceros CP contiene pequeñas cantidades de martensita, austenita y perlita en una matriz de ferrita/bainita. Un grano extremadamente refinado es creado por recocido lento que permite la precipitación de elementos microaleantes como Titanio (Ti) y Niobio (Nb) [7].

La presencia de elementos de aleación, como el Titanio (Ti) y el Niobio (Nb), produce microestructuras muy duras que ayudan al aumento de la resistencia. Estos aceros se utilizan en elementos estructurales y en mecanismos de absorción de impactos, algunos ejemplos dentro la estructura son los siguientes [7]:

- CP680/1000 Largueros del bastidor, vigas transversales, refuerzo de pilar B, soportes de la suspensión trasera, etc.
- CP1000/1500 Refuerzo del bastidor trasero, paneles laterales, etc.

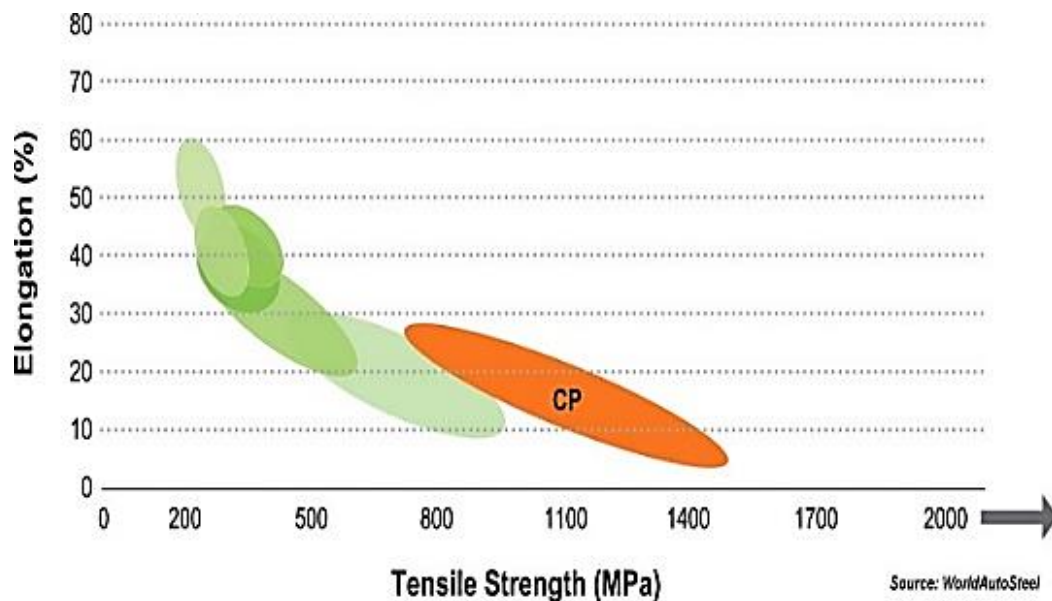


Figura 2.3. Aceros de Fase Compleja [7]

## 2.2. Comportamiento de los AHSS en proceso de soldadura con atmosfera controlada.

La importancia de la soldadura en uniones automotrices radica en el costo menor que en el caso de uniones atornilladas o remachadas. Teniendo en cuenta que se debe tener cuidado para que las uniones no se deformen y éstas cuenten con una mejor apariencia.

Actualmente uno de los métodos más utilizados en la unión de elementos estructurales en la industria automotriz son los procesos de soldadura GMAW (Figura 2.4), estos son procesos de soldadura donde el calor necesario es generado por un arco eléctrico que se establece entre un electrodo consumible y el metal base. El metal de aporte (electrodo) es un alambre sólido, desnudo que se alimenta de forma continua automáticamente y se convierte en el metal de aporte según se consume.

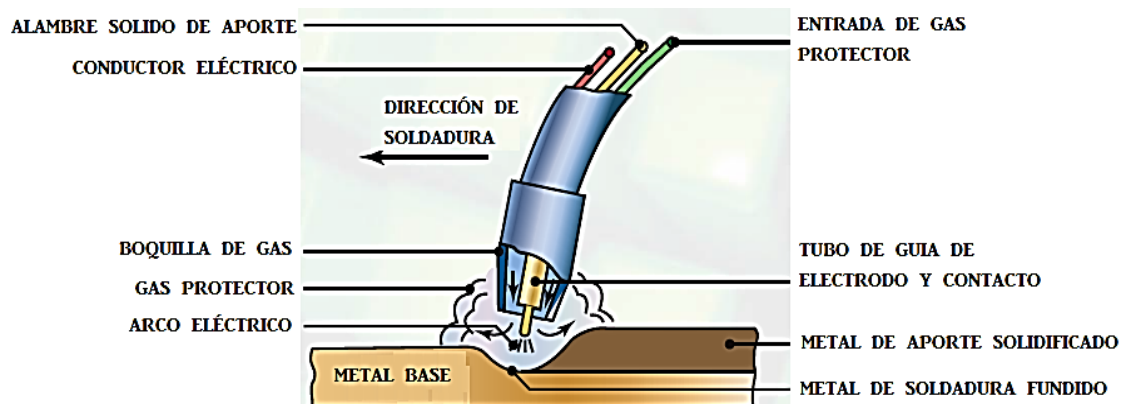


Figura 2.4. Ilustración del proceso de soldadura de atmosfera controlada GMAW [4]

El electrodo, arco, metal fundido y zonas adyacentes del metal base, quedan protegidos de la contaminación de los gases atmosféricos mediante una corriente de gas que se inyecta por la tobera de la pistola concéntricamente al alambre o electrodo. Este proceso de soldadura puede ser automático o manual [11]. Obteniéndose ventajas como:

- Trabajos en producción muy rápidos, ya que la velocidad de deposición es alta.

- Proceso consumible que sirve para la gran mayoría de aceros y aleaciones.
- Alta continuidad de deposición.
- Limpieza, ya que no se produce escoria.

Es importante mencionar que cuando un acero es sometido al proceso de soldadura, existe cambio de propiedades mecánicas y de microestructura en la unión soldada, por ejemplo, las zonas identificadas en una soldadura multipasos en un acero al carbono con alto manganeso, como se ejemplifica en la Figura 2.4. La zona afectada por el calor (ZAC) depende de la cantidad de calor aportado, inicia en el borde de fusión y se extiende hasta donde los efectos de la temperatura alcanzada ya no son suficientes para producir cambios micro-estructurales importantes [12].

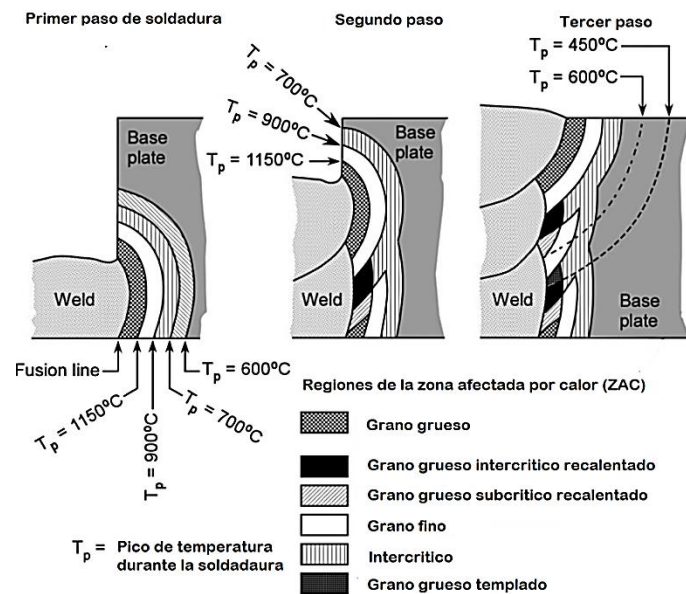


Figura 2.5. Ejemplo de ZAC de soldadura múltiple en un acero al carbono con manganeso [12]

### 2.2.1. Falla en uniones soldadas

Debido a la naturaleza del proceso de soldadura, las juntas soldadas generalmente tienen una resistencia a la fatiga inferior al metal base. Al mismo tiempo las uniones soldadas tienden a ser diseñadas para características

geométricas o cambio en la sección en la estructura. Estos factores hacen que incluso en estructuras bien diseñadas las uniones soldadas sean propensas a la falla por fatiga. En consecuencia, cualquier evaluación de durabilidad de la estructura soldada debe tener una alta prioridad para poder establecer la resistencia a la fatiga de elementos estructurales que tienen uniones soldadas.

La resistencia a la fatiga de uniones soldadas es en general significativamente menor que del metal base, existen varias razones para esto [13]:

- La geometría de una soldadura normalmente da lugar a una concentración de esfuerzos. El esfuerzo es típicamente más grande en el pie y raíz de la unión soldada ya que la forma en esta área puede no ser controlada.
- El proceso de soldadura produce defectos, como muescas, las cuales pueden actuar como iniciadores de grieta, también, sitios para inclusión de escoria, fusión incompleta, porosidad son ejemplos típicos.
- Alrededor de la zona de fusión, en el ZAC donde el material original ha sido sometido a altas temperaturas y se ha dejado enfriar, puede causar cambios mayores en la microestructura y propiedades de esta región, eliminando cualquier tratamiento anterior, tal y como se ilustra en la Figura 2.4.
- En el proceso de soldadura se introduce esfuerzo residual de tensión, el cual puede ser del orden del límite elástico del material, como se ilustra en la Figura 2.6.

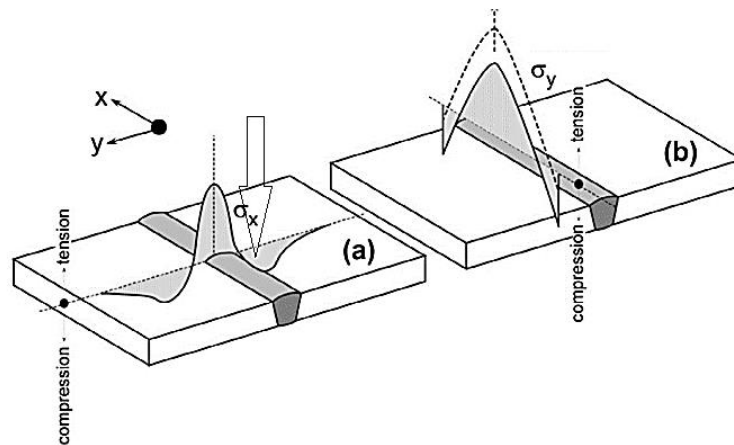


Figura 2.6. Distribución de esfuerzos residuales en unión soldada [12]



Por lo tanto, el uso de AHSS para aligeramiento de peso debe ser realizado mediante el uso de métodos que mejoren el comportamiento a la fatiga de la unión soldada. Respecto a cambios en la microestructura en AHSS provocados por la soldadura, aún se tienen actualmente conocimientos limitados cuando es sometido a proceso de fatiga [14].

Heimbuch Roger [15] realizó la caracterización de AHSS (DP, TRIP) para una evaluación de fatiga para diferentes rangos de esfuerzo mediante la evaluación de diferentes aceros AHSS, utilizando el proceso de soldadura GMAW con un alto control en la geometría de la soldadura. Los tipos de muestras fueron soldados a traslape con uno o dos filetes con espesores de 16 y 34 mm, obteniendo las siguientes conclusiones:

- Dada una consistente geometría de la soldadura; el espesor de la placa es factor más dominante factor en la resistencia a la fatiga de unión soldada por el proceso GMAW, que cualquier otro factor considerado.
- La vida a la fatiga es influenciada por el espesor; las uniones colapsan en una zona bastante estrecha que es el pie o raíz de la soldadura, independientemente de la resistencia del metal base.

Zhili Feng [16] analizó aceros AHSS (DP780, TRIP780, DP980) por medio de uniones soldadas a traslape con proceso GMAW, aunque reportó reblandecimiento en el ZAC, posteriormente por medio de una optimización de la geometría de la soldadura, se demostró su influencia en la resistencia a la fatiga, encontrándose menor vida a la fatiga en geometrías incorrectas, comprobando así que no influye tanto el reblandecimiento del área afectada por el calor si no que es más la influencia de la geometría del cordón (Figura 2.5).

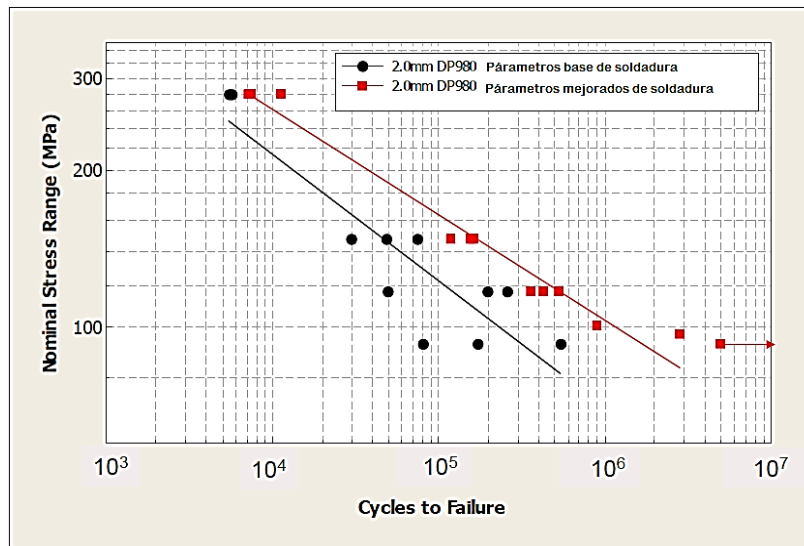
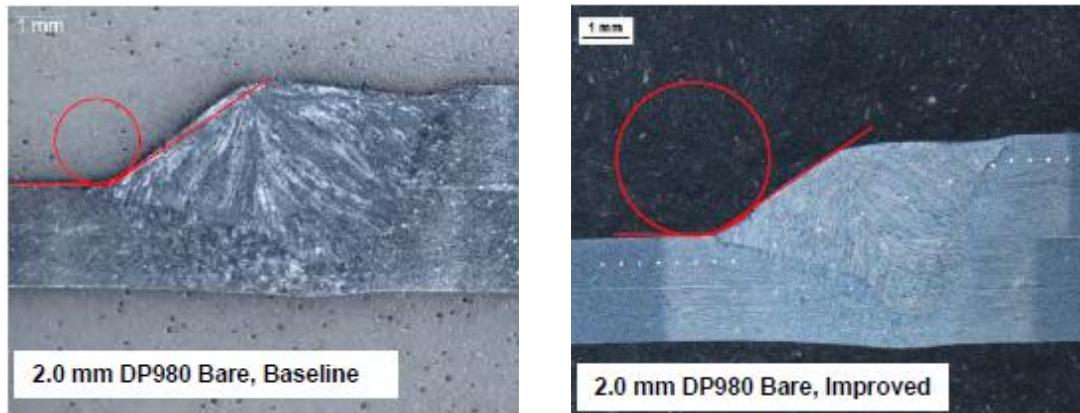


Figura 2.7. Comparativo de influencia de características geométricas con la resistencia y vida a la fatiga [16]

### 3. Fatiga en materiales metálicos

#### 3.1. Concepto de fatiga

En elementos estructurales metálicos las cargas cíclicas pueden causar el inicio o propagación de una grieta, ésta eventualmente puede alcanzar un tamaño crítico causando la falla de ésta. Este proceso es conocido como fatiga y ocurre por lo general a valores de esfuerzo por debajo de la resistencia última a la tensión del material (UTS) y en ocasiones mayores al límite del esfuerzo de cedencia del material (YS).

Dos aproximaciones para análisis de fatiga son utilizadas, éstas son, dependiendo si hay o no una grieta preexistente en un componente estructural, y son descritas a continuación.

##### 3.1.1. Fatiga elementos estructurales sin grieta

No hay una grieta preexistente y el proceso de fatiga que conduce a la fractura, es controlado por la etapa inicial de la grieta. El objetivo de este análisis de fatiga es determinar la acumulación de daño a fatiga en un lugar crítico o unión, el enfoque básico es para determinar el rango esfuerzo fluctuante en el lugar crítico en cuestión y la determinación de una curva de vida a fatiga apropiada [6]. Dependiendo del nivel de esfuerzo aplicado y/o del número de ciclos de resistencia a la fatiga, se pueden distinguir dos situaciones (Figura 3.1) como se describe a continuación.

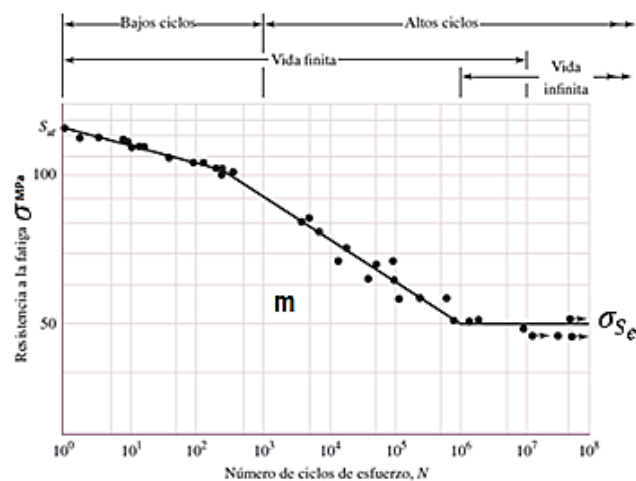


Figura 3.1. Curva S-N, visualización de altos y bajos ciclos [30]

- **Fatiga a altos ciclos:** Este concepto corresponde a la situación donde el nivel de esfuerzo a fatiga es menor al esfuerzo de cedencia ( $YS$ ). Es usualmente considerado a un límite de resistencia a la fatiga o límite de fatiga ( $\sigma_{Se}$ ) de mínimo  $1 \times 10^3$  a más de  $1 \times 10^6$  ciclos de vida. Las curvas utilizadas para el análisis de este tipo de fatiga son conocidas como curvas  $S - N$  que proporcionan el número de ciclos a falla ( $N$ ) como una función del esfuerzo aplicado ( $\sigma$ ). Debido a que es el tipo de análisis al que nos enfocaremos en la tesis, será desarrollado a fondo posteriormente.
- **Fatiga a bajos ciclos:** El esfuerzo aplicado es normalmente por encima del esfuerzo de cedencia del material ( $YS$ ) y es usualmente menor a  $1 \times 10^3$  ciclos de vida. En este fenómeno la apropiada curva a fatiga representa el número de ciclos a falla como una función del rango de deformación ( $\epsilon$ ).

### 3.1.2. Fatiga en elementos estructurales con grieta.

Este concepto se analiza en componentes que cuentan con una grieta preexistente y la fractura final depende sobre el proceso de propagación de la misma. En este fenómeno el objetivo del análisis de fatiga es determinar la vida a fatiga del componente, la cual es obtenida a través de la ley de Paris y la mecánica de la fractura elástico lineal (*Lineal Elastic Mechanic Fracture-LEMF*).

### 3.2. Principales términos de fatiga a altos ciclos

Debido a que muchas aplicaciones prácticas involucran cargas cíclicas en los componentes de entre un nivel mínimo de esfuerzo y un nivel máximo de esfuerzo se utilizan enfoques basados en esfuerzos, las amplitudes constantes de esfuerzo pueden ser descritas usando algunas definiciones que se usan en la literatura de manera común (Figura 3.2). El *rango de esfuerzo* ( $\Delta\sigma$ ) es definido como la diferencia entre el *máximo esfuerzo* ( $\sigma_{max}$ ) y el *esfuerzo mínimo* ( $\sigma_{min}$ ). El *esfuerzo medio* ( $\sigma_m$ ), es definido como el promedio del esfuerzo máximo y mínimo. La *amplitud de esfuerzo* ( $\sigma_a$ ) es tomada como la mitad del rango de esfuerzo.

Matemáticamente estas expresiones son:

$$\Delta\sigma = \sigma_{max} - \sigma_{min} \quad \sigma_m = \frac{(\sigma_{max} + \sigma_{min})}{2} \quad \sigma_a = \frac{\Delta\sigma}{2} \quad [3.1]$$

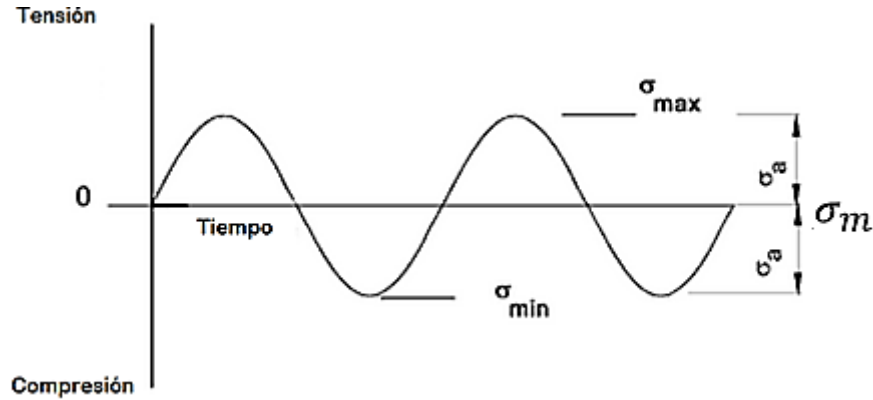


Figura 3.2. Esfuerzos amplitud constante y expresiones de esfuerzos correspondientes

[30]

La curva de vida-esfuerzo o curva  $S - N$  relaciona al rango de esfuerzo  $\Delta\sigma$  o esfuerzo máximo  $\sigma_{max}$  en el eje de las ordenadas y al número de ciclos ( $N$ ) o los ciclos hasta la falla de la muestra ( $N_f$ ) desarrollo de grieta o la ruptura total en el eje de las abscisas. Normalmente son expresadas en función del esfuerzo nominal ( $\sigma_n$ ). Estas curvas son trazadas con un esfuerzo ( $S$  o  $\sigma$ ) lineal y  $N$  logarítmico ( $log - lineal$ ) o con nomenclatura doblemente logarítmica ( $log - log$ ).

También conocidas como curvas de Wöhler, estas curvas son interpretadas como “un deterioro estructural progresivo y con una ruptura gradual de enlaces interatómicos bajo esfuerzos repetidos y puede ser interpretada como un proceso estadístico” [8]. La curva puede ser modelada usando la expresión 3.2 sobre la región  $log - lineal$ . Para la región lineal sobre una gráfica  $log - log$ , la ecuación 3.3 de Basquin es utilizada normalmente [31].

$$\log N = a + b * \log \sigma \quad [3.2]$$

“0”

$$\sigma = a * N^{\frac{1}{b}} \quad [3.3]$$

Donde:

$$b = -m \qquad \alpha = (10^a)^{\frac{1}{m}}$$

$m$  = Pendiente de recta

$\alpha$  = Parámetros de ajuste de intersección con eje de esfuerzo

En algunos materiales existe un valor de esfuerzo de tal manera que la falla por fatiga no se produce por debajo de este nivel, este esfuerzo es conocido como *Límite de fatiga* o *límite de resistencia a fatiga* ( $\sigma_{Se}$ ) y la *resistencia a la fatiga* es el valor máximo del esfuerzo alternante (fluctuante) que resistirá sin fallo un material, para un número dado de ciclos (Figura 3.3).

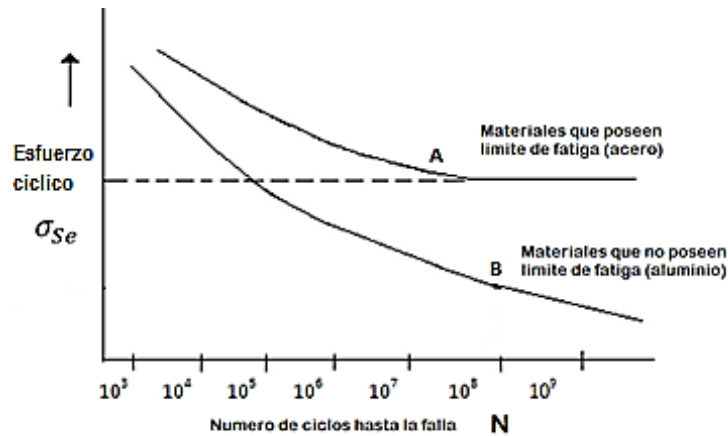


Figura 3.3. Curva S-N, representación de límite de fatiga [30]

La relación entre el esfuerzo mínimo y el esfuerzo máximo es muy importante y es un valor usado cuando se describen resultados de pruebas a fatiga, conocida como "*razón de esfuerzo* ( $R$ )". Los valores de esfuerzo pueden ser positivos (esfuerzos de tensión) o negativos (esfuerzo de compresión).

$$R = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_{min}} \qquad [3.4]$$

Diferentes tipos de razón  $R$  pueden ser clasificados de acuerdo a la Figura 3.4.

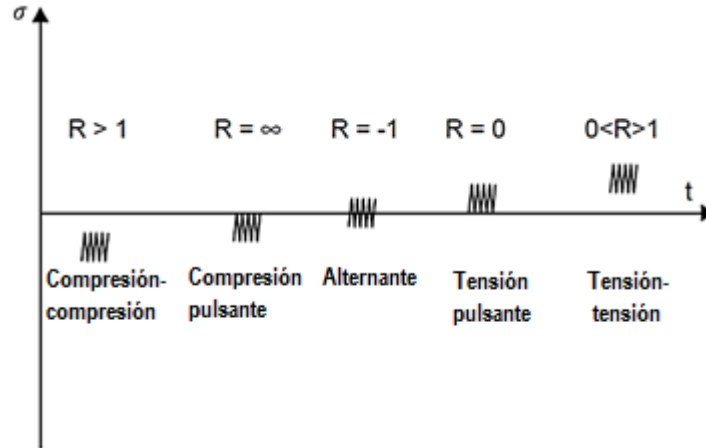


Figura 3.4. Clasificación de razones de esfuerzo  $R$  [32]

### 3.2.1. Factores que influyen en la evaluación a fatiga

Las características de los componentes estructurales y su entorno difieren a las condiciones de un laboratorio cuando son utilizadas muestras en pruebas de fatiga, algunos de los factores más relevantes que intervienen en el límite de resistencia a fatiga son los siguientes, conocidos como factores de Marin [30]:

$$\sigma_{se} = K_a K_b K_c K_d K_e K_f \sigma_{S'e} \quad [3.5]$$

- $\sigma_{se}$ =Límite de resistencia de componente a la fatiga tomando en cuenta los factores.
- $\sigma_{S'e}$ =Límite de resistencia a la fatiga de material base.
- $K_a$ =Factor de condición superficial
- $K_b$ =Factor de tamaño
- $K_c$ =Factor de carga
- $K_d$ =Factor de temperatura
- $K_e$ =Factor de confiabilidad
- $K_t$ =Factor de concentración de esfuerzo
- $K_f$ = Factor de fatiga o de efectos vario (corrosión, esfuerzos residuales, etc...)

Lo ideal sería poder cuantificar la mayor cantidad de estos factores para tener la mejor aproximación en la evaluación de fatiga de componentes, entre los más

importantes y que afectan al límite de fatiga son el factor de concentrador de esfuerzos y el factor de esfuerzo medio, descritos a continuación.

### 3.2.2. Efecto de concentrador de esfuerzos en la vida a fatiga ( $K_f$ )

En los componentes la presencia irregularidades o discontinuidades (orificios, ranuras o muescas), incrementan significativamente los esfuerzos teóricos en la zona vecina inmediata a la discontinuidad y es determinado por el factor de concentrador de esfuerzos  $K_t$ , calculado de la siguiente manera.

$$K_t = \frac{\sigma_{Max}}{\sigma_n} \quad [3.6]$$

Donde:

$\sigma_{Max}$  = Esfuerzo elastico maximo localizado en muestra con muesca

$\sigma_n$  = Esfuerzo elastico nominal en muestra sin muesca

$K_t$  = Factor de concentración de esfuerzos

Diferencia en propiedades de materiales dan origen a la factor de fatiga ( $K_f$ ) con la relación 3.7, es dependiente de un factor  $q$  que se refiere a la sensibilidad del material a tal irregularidad.

$$K_f = \frac{\text{Resistencia a la fatiga de muestra con muesca}}{\text{Resistencia a la fatiga de muestra sin muesca}} \quad [3.7]$$

La relación entre el  $K_f$  con  $K_t$ , tomando en cuenta la sensibilidad del material a la presencia muescas es:

$$K_f = 1 + q(K_t - 1) \quad [3.8]$$

$q = 0 \Rightarrow K_f = 1$  El material no tiene sensibilidad a la muesca

sí  $q = 1 \Rightarrow K_t = K_f$  Existe una completa sensibilidad del material a la muesca

Debido a la complejidad para determinar al valor  $q$  en el material y por la variedad de factores que pueden intervenir, siempre es seguro usar  $K_t = K_f$ , cuando no se tiene un valor certero de  $q$  [30].



### 3.2.3. Efecto de esfuerzo medio en la vida a fatiga

Una de las principales características de cada ciclo de carga que afectan a la resistencia y límite de fatiga por fatiga es el rango de esfuerzo medio  $\sigma_m$  y su componente de amplitud  $\sigma_a$ . Existen métodos establecidos de corrección de resistencia a la fatiga que permiten al esfuerzo medio y amplitud ser modelada y tomada en cuenta en la predicción de vida a fatiga, los métodos que comúnmente son usados como criterios de diseño son, el diagrama de Goodman y Gerber. La gráfica que relaciona a estos métodos de corrección puede visualizarse a continuación en la Figura 3.5.

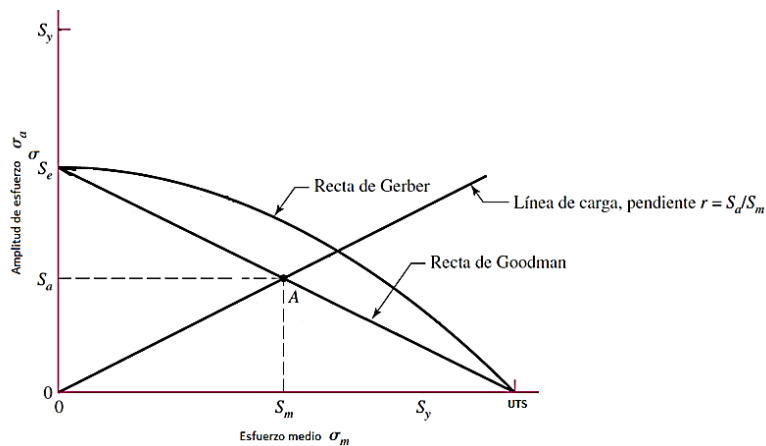


Figura 3.5. Diagrama de métodos de corrección de resistencia la fatiga [33]

En el diagrama se representa al esfuerzo medio  $\sigma_m$  a lo largo del eje de las abscisas junto con el YS y UTS, la amplitud  $\sigma_a$  en el eje de las ordenadas junto con el límite de fatiga ( $\sigma_{S_e}$ ) obtenido con una razón de carga de  $R = -1$ , un vez que éste ha sido corregido por los factores de Marin con la ecuación 3.5. El punto A representa el punto límite con una resistencia alterante  $S_a$  y una resistencia media  $S_m$ . Los esfuerzos  $n\sigma_a$  y  $n\sigma_m$  pueden reemplazar a  $S_a$  y  $S_m$ , tomado en cuenta a un factor de diseño  $n$ , la pendiente de línea de carga se define como:

$$r = \frac{S_a}{S_m} = \frac{\sigma_a}{\sigma_m} \quad [3.9]$$

El límite de fatiga es modificado con los métodos de Gerber y Goodman utilizando como referencia a él UTS para trazar las diferentes rectas y curvas respectivamente. Con el diagrama se permite cuantificar la probabilidad de falla con el lugar geométrico, es decir, el área bajo la respectiva curva es una zona segura, mientras que cada línea representa el límite y en consecuencia la zona exterior a curva como zona de falla. A continuación se describen los dos métodos más utilizados.

- **Goodman**

Esta corrección de esfuerzo medio calcula una amplitud de esfuerzo efectivo, basada en el esfuerzo medio y el UTS de cada ciclo y es recomendado para materiales frágiles. Está delimitado por la línea recta entre UTS y  $\sigma_{Se}$ , con la función siguiente se puede determinar cuándo solo son cargas de tensión con la siguiente expresión [30].

$$\frac{S_a}{\sigma_{Se}} + \frac{S_m}{UTS} = 1 \quad [3.10]$$

- **Gerber**

Esta corrección de esfuerzo medio calcula una amplitud de esfuerzo efectivo, basada en el esfuerzo medio y la resistencia última a la tensión UTS de cada ciclo. Esta corrección de esfuerzo es parecida a Goodman y a diferencia éste es utilizado en materiales dúctiles. Está delimitado por la línea recta entre UTS y  $\sigma_{Se}$ , con la función siguiente cuándo solo son cargas de tensión [30].

$$\frac{S_a}{\sigma_{Se}} + \left(\frac{S_m}{UTS}\right)^2 = 1 \quad [3.11]$$

### 3.2.4. Teoría de daño acumulado

La teoría de daño acumulado establece que cada serie de ciclos de esfuerzo se calcula como una cierta fracción del daño total, cuando estas fracciones sumadas llegan a la unidad ocurre la fractura. La fracción del daño total ocasionado por una

serie de ciclos a un determinado nivel de esfuerzo está dado por la relación entre el número de ciclos aplicados (a ese nivel de esfuerzo), y la vida en fatiga a ese esfuerzo (relación de ciclos  $C = \frac{n_i}{N_i}$  donde  $N$  se obtiene de las curvas  $S - N$  para un dado “ $P_s$ ” porcentaje de supervivencia), matemáticamente es expresado como:

$$\frac{\sum n_i}{N_i} = 1 \quad [3.12]$$

La teoría del daño acumulado puede graficarse en la curva  $S - N$  (Figura 3.6), si comenzamos los ciclos de cargas en  $\sigma_1$  y aplicamos una cantidad de ciclos igual a  $n_1$ , los ciclos remanentes a ese nivel de esfuerzo serán  $N_1 - n_1$ , en escala logarítmica.

$$\log N_1 - \log n_1 = \log \left( \frac{N_1}{n_1} \right) \quad [3.13]$$

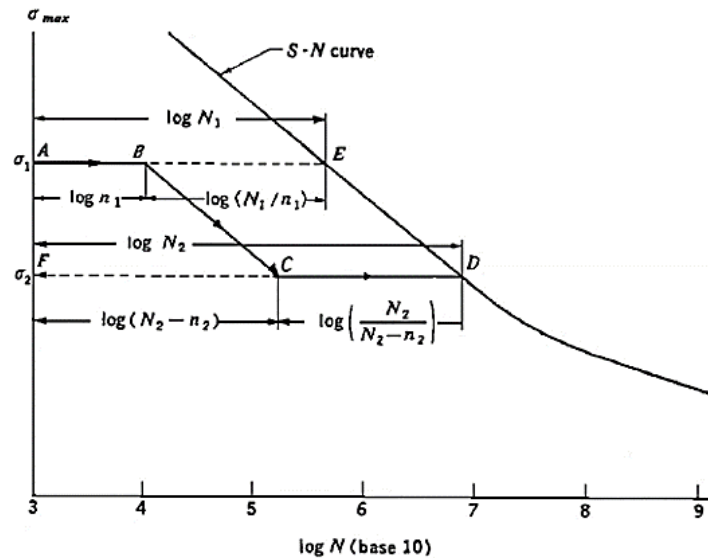


Figura 3.6. Diagrama  $S - N$  de daño acumulado a distintos niveles de esfuerzo [32]

Sabiendo que:  $\frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} = 1$  “o”  $\frac{n_i}{N_i} = 1 - \frac{n_2}{N_2} = \frac{N_2 - n_2}{N_2}$  [3.14]

Por lo tanto los ciclos remanentes, en el caso de que se aplique un nuevo nivel de esfuerzos  $\sigma_2$ , serán iguales a:

$$\log \left( \frac{N_2}{N_2 - n_2} \right) \quad [3.15]$$

### 3.2.4.1. Regla de Palmgrem Miner.

La regla de Palmgrem Miner o de daño acumulado, es una teoría que sirve para estimar la vida a la fatiga a partir del historial de esfuerzos a la que el elemento mecánico se sometido. El análisis de fatiga bajo el enfoque de Palmgrem-Miner básicamente se divide en tres pasos:

1. Una reducción de picos o valles.
2. Se realiza un conteo de ciclos basándose en la gráfica simplificada.
3. En base al número de ciclos contados se puede hacer una estimación de la vida a la fatiga.

Se establece que la falla ocurre cuando:

$$\sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_i} = 1 \quad [3.16]$$

$k$  =numero de bloques de carga.

Donde  $n_i$  es el número de niveles de cargas aplicadas es  $i$ , y  $N_i$  es su correspondiente vida a la fatiga, el daño inducido debido al ciclo de carga  $i$  será:

$$D_i = \sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_i} \quad [3.17]$$

La regla de Palmgrem-Miner establece que la falla ocurre cuando:

$$\sum_{i=1}^k D_i = 1 \quad [3.18]$$

### 3.2.5. Análisis estadístico en fatiga

El objetivo de la estadística es hacer una inferencia sobre una población, basándose en la información contenida en una muestra representativa poblacional y proveer una medida de bondad asociada a la inferencia [8]. Este análisis estadístico sirve para disminuir la incertidumbre en el proceso de diseño, sin embargo, debe tener fundamentos en condiciones de experimentación que puedan ayudar a establecer diferentes escenarios de diseño y operación.

En este proyecto de investigación la aplicación de la estadística tiene como objetivo el desarrollo de un medio para estimar la resistencia a la fatiga y el límite a la fatiga (inferencia), basada en cantidades limitadas de ensayos de fatiga (muestra representativa poblacional) con una razonable confiabilidad (medida de bondad).

### 3.2.5.1. Análisis estadístico de curva S-N (curva de vida finita)

En fatiga este análisis estadístico es realizado por medio de la regresión lineal y es utilizada para obtener una relación estimada entre variable de ciclos ( $N$ ) y esfuerzo ( $\sigma$ ), tal y como recomienda la norma internacional ASTM 739 [38], se determina la función matemática de la curva S-N o curva de Whöler que es utilizada para describir la resistencia a la fatiga.

Los resultados de regresión son utilizados para determinar al intervalo de confiabilidad y correlación de resultados experimentales. Adicionalmente con el análisis de distribución log-normal se pueden determinar porcentajes de probabilidad de supervivencia ( $P_s$ ), conocida de manera inversa en la literatura como probabilidad de falla ( $P_f$ ) [9], como es ejemplificada en la Figura 3.7 con una unión soldada entre aceros estructurales al carbono St 37 y St 52 [9].

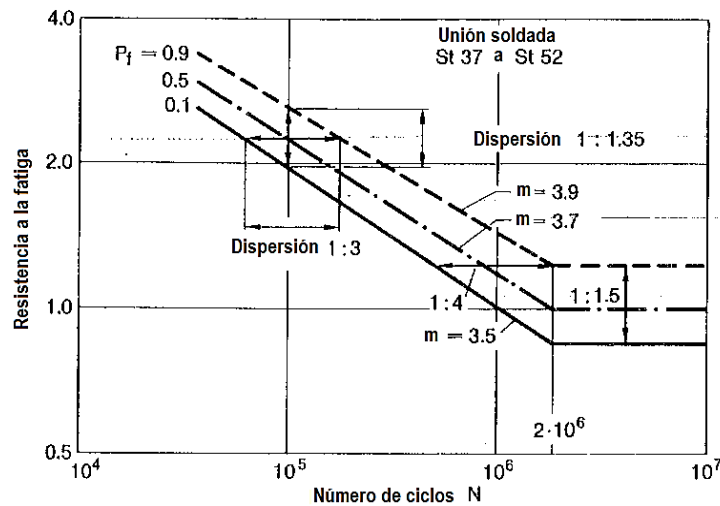


Figura 3.7 Curvas S-N de  $P_f$  y para unión soldada entre aceros St 37 y St 52 [9]

### 3.2.5.1.1. Correlación

Con la correlación se demuestra la relación existente entre dos clases de datos y se cuantifica la intensidad de dicha relación. En el análisis de resultados de fatiga es utilizada para conocer si efectivamente existe una relación entre el esfuerzo aplicado ( $\sigma$ ) y los ciclos de falla ( $N$ ) de la unión soldada. Los valores de correlación pueden estar comprendidos entre -1 y 1. Cuanto más próximo es a 0 menor será la relación entre los datos y cuanto más próximo sea a 1 mayor será su relación, esta correlación es denotada por  $R^2$ .

### 3.2.5.1.2. Probabilidad de supervivencia

Considerada como una estimación estadística puntual, consiste en obtener valores únicos de probabilidad de supervivencia calculados, a partir de observaciones muestrales (ensayos experimentales) y son utilizadas como estimación del valor del parámetro poblacional. En este proyecto es utilizada considerando al número de uniones soldadas (probetas) como muestras representativas de uniones soldadas en componentes estructurales automotrices (población).

Existen dos clases de variables aleatorias: discretas y continuas. Las variables discretas están dentro de un rango finito y toman valores definidos, mientras que las variables continuas toman un número infinito de valores dentro de un intervalo. Por ejemplo, en análisis de ensayos de fatiga el nivel de esfuerzo ( $\sigma$ ) podría ser una variable aleatoria discreta ya que tomaría valor entero, inversamente el número de ciclos de falla ( $N$ ) también podría de ser una variable continua ya que podría tomar cualquier valor real positivo, siendo  $N$  el tipo de variables en la que nos enfocamos para el análisis de probabilidad.

En probabilidad y estadística, la distribución de probabilidad de una variable aleatoria  $X$  es una función que se asigna a cada suceso definido  $[a - b]$  sobre la variable aleatoria  $X$  la probabilidad que dicho suceso ocurra. Esta probabilidad está definida sobre el conjunto de todos los sucesos, cada uno de los sucesos en el

rango de los valores de  $X$ . Se define a una función de densidad de probabilidad como:

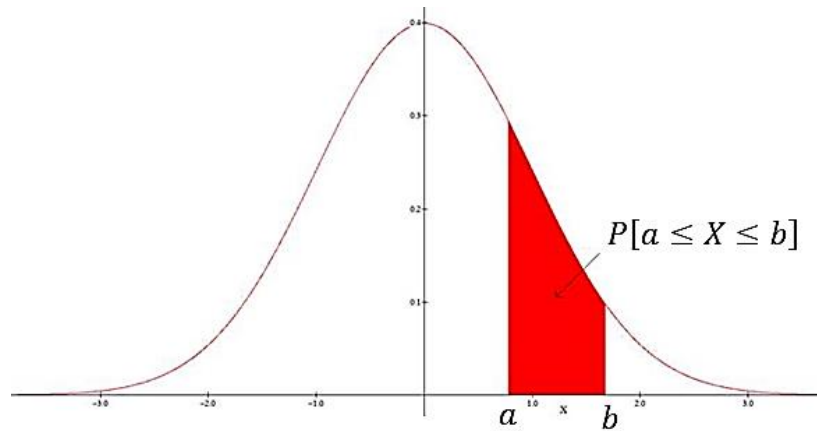
$$P[a \leq X \leq b] = \int_a^b f(x)dx \quad a, b \in \mathbb{R} \quad [3.21]$$

$$P[X = a] = 0 \quad [3.22]$$

Con las propiedades:

$$1. f(x) \geq 0 \quad \forall x \quad [3.23]$$

$$2. \int_{-\infty}^{+\infty} f(x)dx = 1 \quad [3.24]$$



**Figura 3.8. Curva de distribución normal o de Gauss [34]**

La probabilidad está completamente especificada por una función de distribución de probabilidad, cuyo valor en cada  $X$  real es la probabilidad de que cada variable aleatoria sea menor o igual a  $x_i$  (ecuación 3.25). Asociando su cálculo de probabilidad al área por debajo de la curva de distribución respectiva, por ejemplo en Figura 3.8 se denota la probabilidad de una distribución normal (Gauss).

$$F(X) = P[X \leq x_i] = \int_{-\infty}^{x_i} f(x)dx \quad [3.25]$$

Cuando se tiene conocimiento superficial de la función de la masa o densidad de probabilidad de la población, la probabilidad se puede aproximar mediante una de muchas familias comunes de curvas de funciones, algunas de las distribuciones más comunes para variables aleatorias continuas son:

- Distribución normal (Gauss)
- Distribución Log-normal
- Distribución Exponencial
- Distribución Gamma

En estudios de fatiga esta probabilidad de suceso está definida como la probabilidad de supervivencia ( $P_s$ ) y es la vida para la cual el porcentaje (%) de la población tiene una vida más larga. La probabilidad de supervivencia se estima por lo general a partir de la distribución log-normal ya que el rango de observaciones es de orden atípico [8], es decir en ciclos de falla abarca varios órdenes de magnitud logarítmica. Ejemplo de probabilidad utilizada en análisis de resultados experimentales de fatiga, se visualiza en la Figura 3.9.

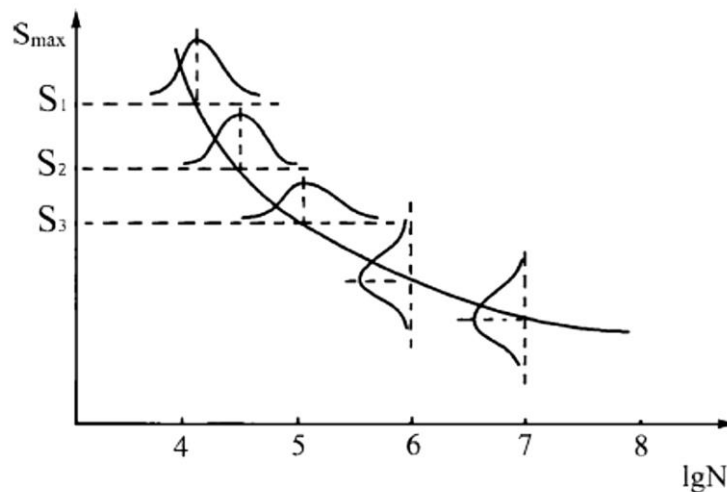


Figura 3.9. Representación de distribución en datos de fatiga [8]

### 3.2.5.1.3. intervalo de confianza

La estimación estadística utilizada en este análisis es por intervalos, que consiste en utilizar datos de la muestra poblacional con un determinado número  $n$  datos experimentales, con una distribución de media muestral  $\bar{x}$  y varianza muestral  $s^2$ , siendo  $s$  la desviación estándar muestral, teniendo como objetivo estimar a los datos poblacionales como la media  $\mu$  varianza  $\sigma^2$  y desviación estándar  $\sigma$ .



Cuando el tamaño de la muestra es pequeño, es decir con menos de 30 datos experimentales se puede utilizar una distribución de probabilidad *t – student* para calcular la media poblacional. Como la desviación estándar de la muestra  $s$  no es necesariamente cercana a la media poblacional  $\sigma$ . La distribución de la media muestral es expresada como en 3.19.

$$\bar{x} \sim N\left(\mu, \frac{s}{\sqrt{n}}\right) \quad [3.19]$$

Asociando al porcentaje % del intervalo de confiabilidad a un área por debajo de la curva de distribución respectiva, definido como:

$$T = \frac{\bar{x} - \mu}{\frac{s}{\sqrt{n}}} \quad [3.20]$$

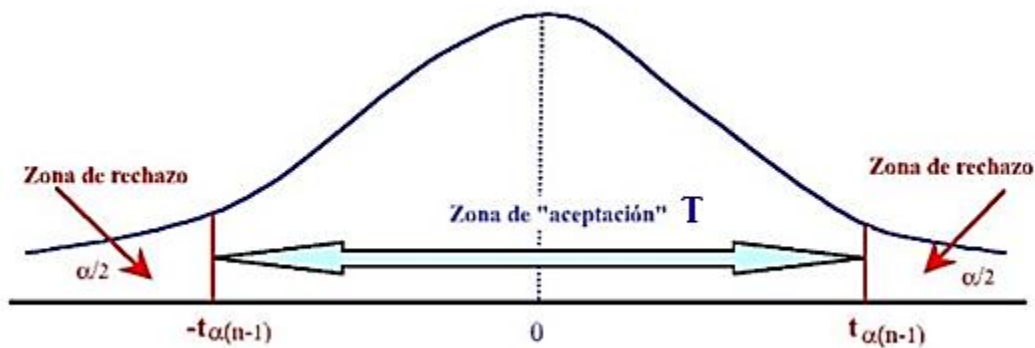


Figura 3.10. Distribución de intervalo de confianza de distribución *t – student* [34]

Se obtiene un intervalo de valores  $T$  como se muestra en la Figura 3.10, dentro del cual se espera que se encuentre el parámetro poblacional con cierto nivel de confianza  $1 - \alpha$ . La curva distribución *t – student* de la Figura 3.10 tiene  $n - 1$  grados de libertad, denotado por  $t_{n-1}$ , cuando  $n$  es grande la distribución es muy cercana a la curva normal y puede sustituirse.

En fatiga, la regresión muestra una relación estimada entre el esfuerzo aplicado ( $\sigma$ ) y los ciclos de vida de la pieza ( $N$ ), y su ecuación depende exclusivamente de los datos experimentales. Por lo tanto, es lógico suponer que los resultados son poco confiables si estos fueron obtenidos, analizados o inferidos de forma

incorrecta, sea por error humano o técnico. Por tal razón es necesario realizar un análisis de confianza de modo que se pueda saber que tan confiables son nuestros datos experimentales.

### 3.2.5.2. Análisis estadístico para límite de fatiga (Método de escalera)

Un análisis estadístico utilizado en el desarrollo de este proyecto es el método de escalera, y es para determinar de manera más exacta al límite de vida a la fatiga a determinado número de ciclos (5 millones) de la unión soldada sometida a estudio, el cual está fundamentado por el método “Up and Down” [36] y brinda cierta validez y confiabilidad a los análisis mencionados.

Este método estadístico es desarrollado por medio de pruebas realizadas sucesivamente de la siguiente manera: La primera muestra se ensaya al valor de esfuerzo límite  $\sigma$  de fatiga estimado, si esta muestra falla al número de establecido de ciclos  $N$  (5 millones), el esfuerzo aplicado a la siguiente se disminuye en una cantidad determinada. Este proceso continúa para cada muestra sucesiva hasta que no se obtiene rotura. Entonces, el esfuerzo aplicado a la muestra siguiente se aumenta en la cantidad establecida. Se continúa el procedimiento aumentando el esfuerzo cuando la muestra falla y disminuyendo cuando falla. Este procedimiento se visualiza en la Figura 3.11.

El objetivo es obtener una media muestral  $\bar{X}$  y dispersión estándar muestral  $s$ , que se relacionen al valor de límite de fatiga.

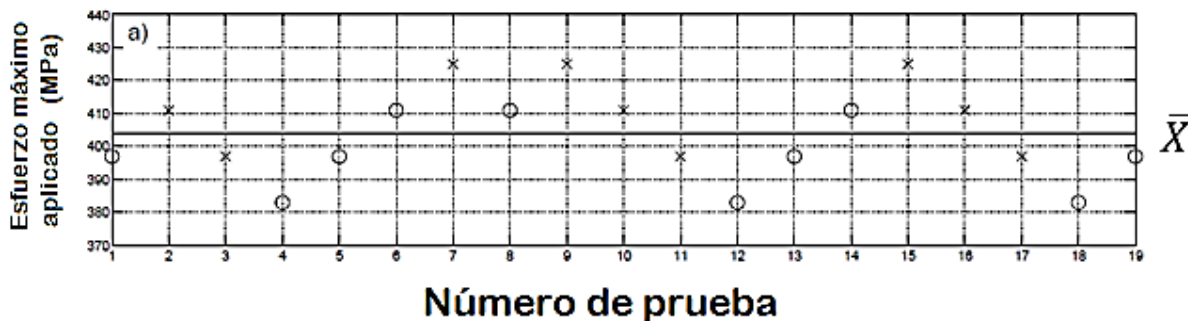


Figura 3.11. Esquema grafico de método de escalera [37]

### 3.3. Análisis de fatiga en uniones soldadas

Independientemente de la situación específica de análisis de fatiga (preexistente falla o no, alto o bajo ciclo), la evaluación de componentes y estructuras soldadas presentan cuestiones específicas las cuales deben abordarse. La importancia de este tipo de estudio en uniones soldadas es debido a que propiedades mecánicas propias de las diferentes zonas de la unión (material base, ZAC y cordón de soldadura), influyen de manera considerable. Las siguientes condiciones y parámetros más relevantes para determinar el daño, son:

- Concentrador de esfuerzos generadas por el proceso de soldadura.
- Esfuerzo medio a la que está sometido el componente o unión.
- Esfuerzos residuales de la soldadura.
- Geometría del componente.
- Material no homogéneo.
- Defectos e imperfecciones resultado de la soldadura.

A continuación se ilustra la comparación entre la variación de resistencia a la fatiga y límite de fatiga de un material liso, una muesca con geometría definida y en una unión soldada sometida a pruebas de fatiga (Figura 3.12).

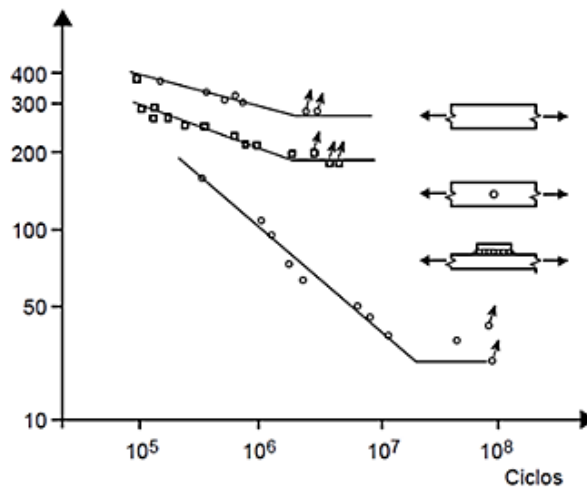
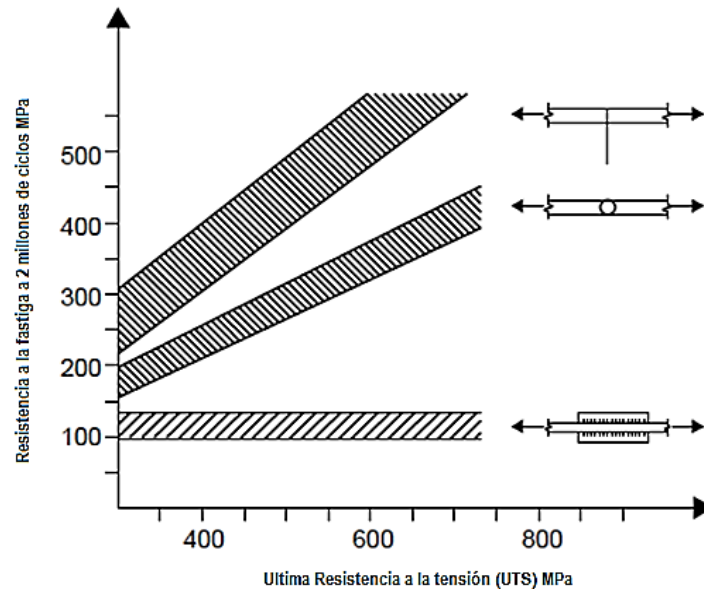


Figura 3.12. Comparación de resistencia y límite respecto proceso de fabricación [35]

La baja resistencia a la fatiga de uniones soldadas es un factor limitador para el diseño de estructuras más eficaces, debido especialmente al hecho de que normalmente la resistencia a la fatiga no aumenta considerablemente con el aumento de la resistencia del material (Figura 3.13).



**Figura 3.13. Resistencia a la fatiga a un R=-1 correspondiente a materiales lisos, con orificio y soldados en función de la resistencia de acero [35]**

### 3.3.1. Curva $S - N$ para uniones soldadas

Organismos como el Instituto Internacional de Soldadura (*International Institute of Welding* o IIW) [17] y el Eurocódigo 3 [27] dan recomendaciones de diseño para las curvas  $S - N$ , para la evaluación de fatiga de uniones soldadas. Estas curvas  $S - N$  son descritas por líneas rectas en una escala  $\log - lineal$  o  $\log - \log$  dadas por la ecuación [17].

$$N = 2 \times 10^6 * \left( \frac{\Delta\sigma}{FAT} \right)^{-m} \quad N \leq N_f \quad [3.26]$$

En donde  $N$  representa el número de ciclos hasta el fallo, el esfuerzo ( $\sigma$ ) (nominal, estructural o de muesca). El esfuerzo permisible de fatiga es de acuerdo a la clasificación de la unión soldada o  $FAT$  se obtiene dependiendo del tipo método de aproximación de falla a fatiga utilizado, material utilizado (acero o aluminio), de

igual manera por los esfuerzos evaluados, ya sea, esfuerzo máximo principal (*EMP*) o de Von Mises (*EVM*). Los rangos de esfuerzo *FAT* son dados en MPa a  $N = 2 \times 10^6$  ciclos como valor de referencia para cada método de aproximación.

El valor de límite de fatiga se considera  $N_f = 1 \times 10^7$  de acuerdo al IIW o  $N_f = 5 \times 10^6$  según el Eurocódigo 3, ejemplos de curvas *FAT* se ven en la Figura 3.14.

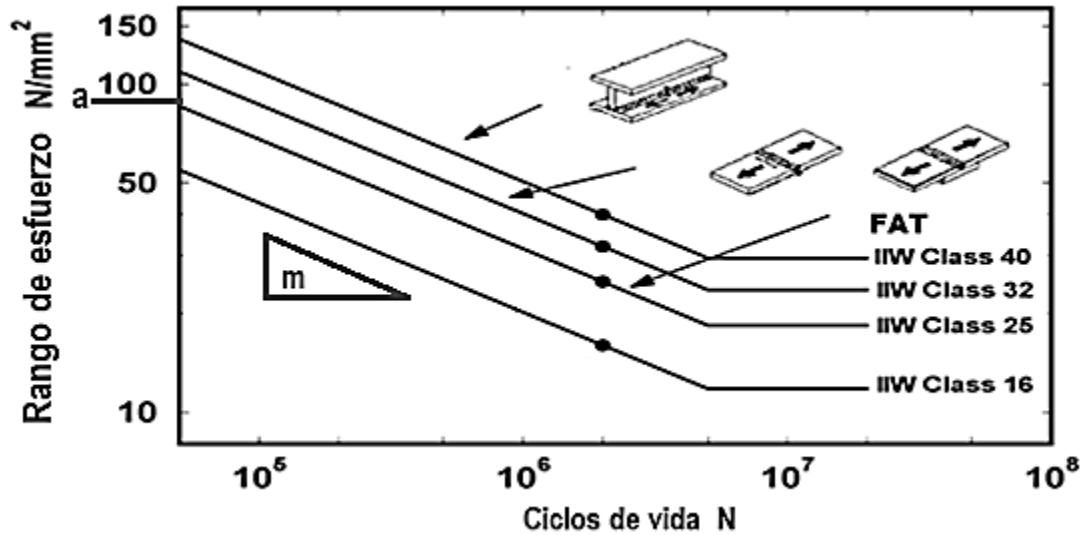
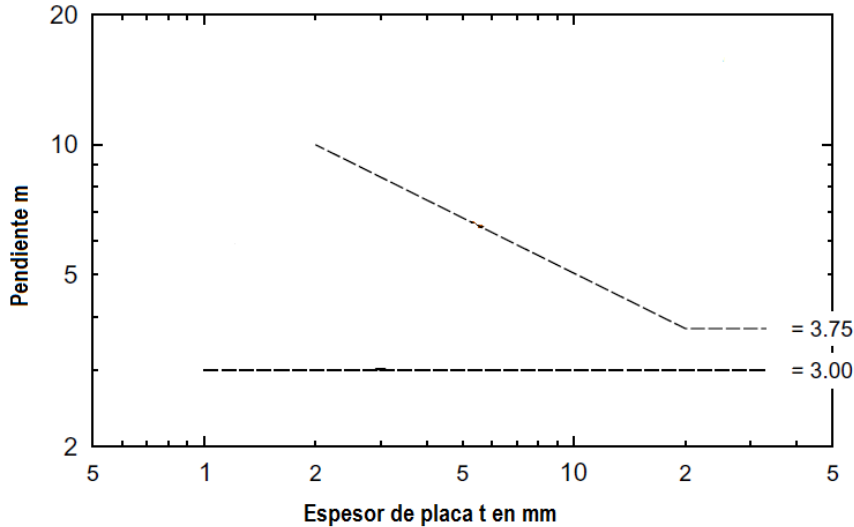


Figura 3.14. Ejemplo de curvas FAT S-N de esfuerzo nominal recomendadas por el IIW para uniones soldadas con aceros [17]

La pendiente  $m$  es una estimación recomendada de la resistencia a la fatiga del elemento estructural estudiado y son: para placas gruesas con  $t > 5 \text{ mm}$  para cargas normales  $m = 3$  y para cargas cortantes  $m = 5$ , en placas delgadas con  $t \leq 5 \text{ mm}$  en cargas normales de  $m = 5$  y para cargas cortantes  $m = 7$ . Sin embargo, éstas en pruebas experimentales, varían dependiendo de las propiedades del material, geometría, rigidez estructural y modo de carga y pueden encontrarse dentro de la gráfica de la Figura 3.15, donde a pendiente  $m$  es dada en función del espesor de la placa  $t$ .



**Figura 3.15** Área Gráficas de pendiente (m) en función de espesor de placa (t) en uniones soldadas [18]

El valor de  $FAT$  obtenido utilizando el método de aproximación elegido en la evaluación de resistencia a fatiga de la unión soldada se puede corregir en función de la relación de carga máxima y mínima ( $R$ ) o de esfuerzo medio, esfuerzo residual, desalineamientos, dependiendo de que tanto se conozcan estos [9].

### 3.4. Métodos de aproximación globales y locales para evaluación de fatiga en uniones soldadas.

Las evaluaciones existentes de resistencia a la fatiga de uniones soldadas comprenden de manera implícita o explícita la comparación de cargas, esfuerzos y deformaciones, sobre una existente o no existente grieta. Las cargas comprenden fuerzas y momentos, los esfuerzos son del tipo nominal, estructural o de muesca, de tal manera que los valores críticos son designados como valores de resistencia. Estos esfuerzos y deformaciones son principalmente acorde a teorías de elasticidad y plasticidad [9].

**Aproximaciones globales:** Es denominada “aproximación global” si procede directamente de fuerzas externas y momentos o de esfuerzos nominales en la sección transversal de una unión específica, bajo la suposición de una constante o linealizada distribución de esfuerzos [9, 10]. Estas aproximaciones originalmente usan valores críticos de carga o esfuerzos nominales, los cuales son relacionados

a un fenómeno global, tal como la fractura total de la muestra. Se considera aquí a la “aproximación de esfuerzo nominal”.

**Aproximaciones locales:** Las evaluaciones de resistencia a fatiga son denominadas “aproximaciones locales”, si éstas proceden de esfuerzos locales o parámetros de deformación, los considerados procesos locales de daño por la fatiga del material, son:

- Inicio cíclico de grieta
- Propagación cíclica de grieta
- Fractura final

El inicio de grieta es cubierto por la “Aproximación de esfuerzo de muesca” y “Aproximación de deformación de muesca”, las cuales son basadas en el esfuerzo de muesca de la raíz o pie de la soldadura (o una comparable región de concentración de esfuerzo), la propagación de grieta o fractura final, por otra parte son descrita en “Aproximación de propagación de grieta”, la cuales proceden de una existente grieta en el componente [9, 10].

Una aproximación que actúa como conexión entre aproximaciones globales y locales, es la “Aproximación de esfuerzo estructura” la cual refleja la concentración de esfuerzos originados provenientes de la macro-geometría de la estructura, mientras el efecto de la muesca de la soldadura es implícita, tomándose en cuenta mediante la reducción de la curva  $S - N$ .

Diferentes variantes de aproximaciones se han desarrollado acorde al esfuerzo, parámetros locales o de deformación elegida y el tipo de criterio de falla (Figura 3.16). En donde existe un incremento de parámetros resultantes de las gráficas de izquierda a derecha, debido a que se toman cada vez más condiciones locales en cuenta, por lo tanto, la complejidad de aplicación incrementa [9].

La resistencia a la fatiga es expresada por amplitudes nominales de esfuerzos nominales cíclicos ( $\sigma_n$ ) como en componentes no soldados, esfuerzos estructurales ( $\sigma_e$ ) o esfuerzos de muesca ( $\sigma_m$ ). Pueden ser introducidos otros parámetros los cuales son correspondientes a sus respectivas curvas de diseño [9].

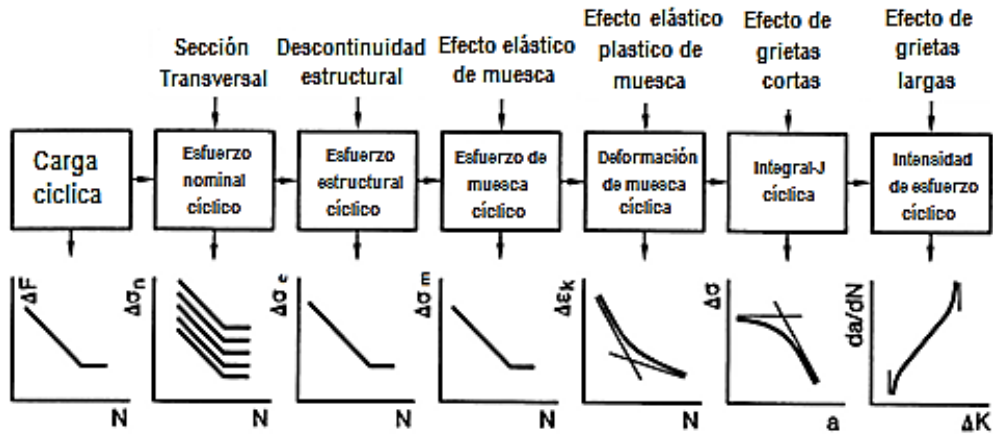


Figura 3.16. Variantes de aproximaciones globales y locales desarrolladas para la evaluación de resistencia a la fatiga de uniones soldadas [9]

### 3.4.1. Método de aproximación de esfuerzo nominal

El esfuerzo nominal es el esfuerzo calculado en una unión soldada sin tener en cuenta a efectos locales de concentración de esfuerzos, como puede ser la existencia de una unión soldada, pero sí incluye variaciones de esfuerzos producidas por grandes cambios geométricos, por ejemplo, cambios bruscos de sección, desalineaciones y características relevantes adquiridas en el proceso de soldadura [17].

Se utilizan las curvas FAT de diseño  $S - N$  que caracterizan el límite de fatiga de un detalle estructural concreto en función del esfuerzo nominal a la que se somete (Figura 3.17). Por tanto, para el uso de estas curvas, se debe utilizar el esfuerzo nominal excluyendo el esfuerzo o concentración de esfuerzos producidos por las discontinuidades del componente estructural, que han sido tomadas en cuenta en la elaboración de las curvas  $S - N$ , éstas están basadas en una evaluación de pruebas de fatiga a alguna configuración de uniones dadas por el IIW [17].

Para uniones simples, el esfuerzo nominal ( $\sigma_n$ ) puede ser determinado utilizando teorías elementales de la mecánica estructural [9, 10].



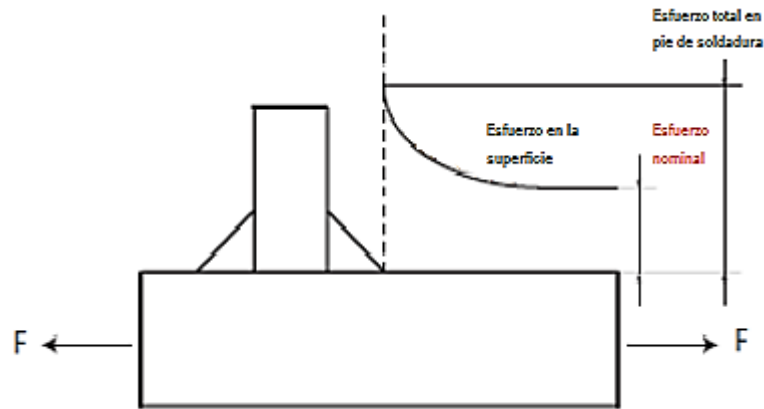


Figura 3.17. Representación de aproximación de esfuerzo nominal [17]

### 3.4.2. Método de aproximación de esfuerzo estructural

El esfuerzo estructural ( $\sigma_e$ ) también conocido como “Esfuerzo Hot Spot” [9, 10, 17], incluye el efecto de esfuerzos nominales y de esfuerzos provocados por discontinuidades geométricas. Sin embargo, no incluye la influencia del cordón de soldadura, por lo que, el pico de esfuerzos no lineal que se experimenta en el pie de la soldadura no se excluye del esfuerzo estructural [17]. Este método se utiliza generalmente cuando el esfuerzo nominal no está definido de forma clara debido a diseños geométricos [19].

La aproximación de esfuerzo estructural corresponde a la determinación de esfuerzos en ciertos puntos de referencia cerca del pie de la soldadura (Figura 3.18), puede ser calculada ya sea por una extrapolación o linealización de esfuerzos, se obtiene el factor de concentrador de esfuerzos (*FCE*) para una posterior evaluación del daño a fatiga. Existe una relación entre el esfuerzo estructural  $\sigma_e$  y el esfuerzo nominal  $\sigma_n$ , por medio del *FCE* o también denominado concentrador de esfuerzos de fatiga  $K_f$  calculado con la ecuación 3.27.

$$FCE = k_f = \frac{\sigma_e}{\sigma_n} \quad [3.27]$$

Sin embargo, la geometría de ciertos componentes que se evalúan mediante esta técnica hace que sea difícil y costoso determinar su comportamiento a fatiga

experimentalmente, por lo que el método más utilizado es el análisis por Método de Elemento Finito (FEM).

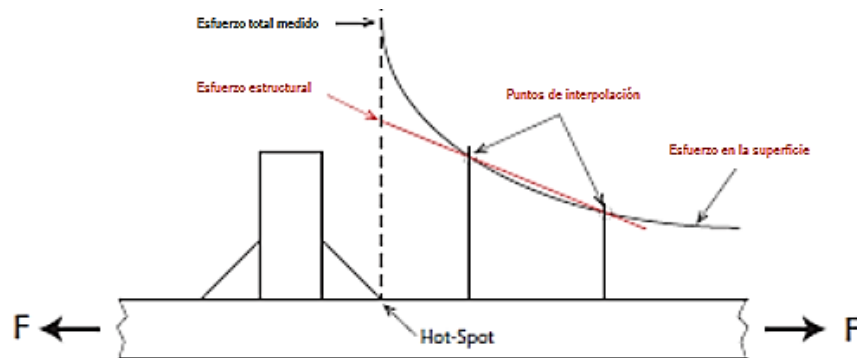


Figura 3.18. Representación de aproximación de esfuerzo estructural [17]

#### 3.4.2.1. Método de esfuerzo equivalente Battelle “Curva Maestra S-N”

Propuesto por P. Dong [23], es basado en el cálculo del esfuerzo estructural de la insensibilidad de malla, es decir, el método de esfuerzo equivalente de Battelle resultante del análisis de elemento finito no es susceptible al tamaño de malla, por lo cual se obtiene un cálculo uniforme de esfuerzo para diversos tipos de malla.

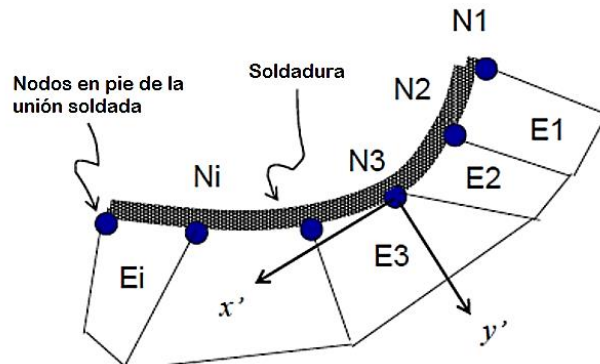


Figura 3.19. Master Curve y esfuerzo equivalente Battelle [23]

Este método está basado en la teoría elemental de la mecánica de medio continuo en aplicaciones estructurales, obteniendo el esfuerzo estructural normal en cada nodo [23] (Figura 3.19). La curva maestra S-N es obtenida para caracterizar la vida a fatiga de varios tipos de unión soldada. Este método de aproximación extensamente aplicado en varios campos y ya ha sido adoptada por la *American*

*Society of Mechanical Engineers* (ASME) como un estándar para el análisis de fatiga en uniones soldada [23].

### 3.4.3. Método de aproximación de esfuerzo de muesca

Se basa en el cálculo del esfuerzo local ( $\sigma_m$ ) en el pie o en la raíz de la soldadura, por medio del modelado de muescas con un radio de referencia  $r_{ref}$ , siendo estas dos zonas potenciales para el inicio de grieta. Con el  $r_{ref}$  se tiene en cuenta a la geometría variable del contorno de la soldadura, así como el comportamiento no lineal del material en la base de la soldadura (figura 3.20). El análisis de esfuerzo de muesca se realiza asumiendo un comportamiento elástico-lineal del material [20].

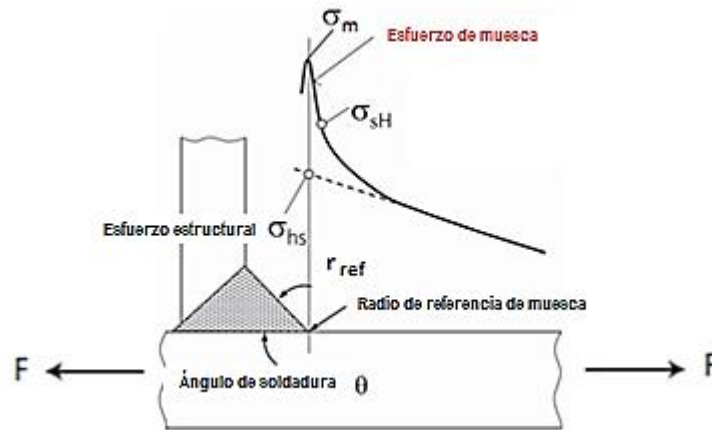


Figura 3.20. Representación aproximación de esfuerzo de muesca [17]

La curva S-N depende del radio de referencia y del material [17]. Al igual que en la aproximación de esfuerzo estructural existe una relación entre el esfuerzo de muesca y el esfuerzo nominal por medio del factor de concentración de esfuerzos (*FCE*), denominado factor de concentrador de esfuerzos de fatiga  $K_f$ , determinado con la ecuación 3.28. Debido a que es el método que se desarrolla en la tesis, se dará la explicación más detallada posteriormente.

$$k_f = \frac{\sigma_m}{\sigma_n} \quad [3.28]$$

### 3.4.4. Mecánica de la fractura elástico lineal (LEMF)

Alternativamente a las curvas S-N, por medio de la mecánica de la fractura y ley de Paris [30] se puede utilizar para evaluar la resistencia a fatiga en uniones soldadas donde se ha determinado una grieta preexistente. Este método se basa en establecer una relación entre la velocidad de crecimiento de una grieta, su longitud para un mismo ciclo de carga y estado de concentración de esfuerzos (Figura 3.21).

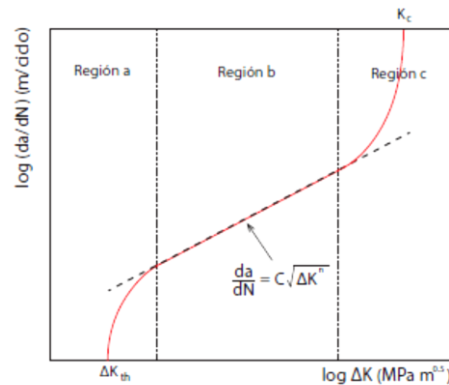


Figura 3.21. Crecimiento de grieta [17]

En este método de aproximación de evaluación a fatiga se debe fijar un límite de crecimiento de grieta para determinar la resistencia a fatiga. Es útil para optimizar operaciones de inspección y mantenimiento durante el servicio de una estructura, permitiendo predecir el comportamiento de una grieta durante su funcionamiento, implicando que el modelo generado deba asemejarse a las historias de crecimiento de grietas antes de que la unión falle.

Es utilizado el concepto de factor de intensidad de esfuerzo (*FIE*), para determinarlo se ha dado lugar a una gran diversidad de métodos disponibles como, FEM, método extendido FEM (X-FEM), método de elementos de frontera (*Boundary Element Method* o BEM) [33]. La resolución de este tipo de problemas de propagación de grieta mediante la formulación convencional de FEM exige una modelización laboriosa de malla.

## 4. Planteamiento de metodología con método de aproximación de esfuerzo de muesca

### 4.1. Criterio de selección de método para evaluación de fatiga

Para la evaluación de fatiga en uniones soldadas diferentes aproximaciones se aplican: aproximación de esfuerzo nominal, aproximación de esfuerzo estructural, aproximaciones de esfuerzo y deformación de muesca y conceptos de mecánica de la fractura. De acuerdo a recomendaciones internacionales BS 7608 y el IIW [17, 28] como se describe en la Figura 4.1, se pueden utilizar criterios de selección de métodos de evaluación según los objetivos de estudio.

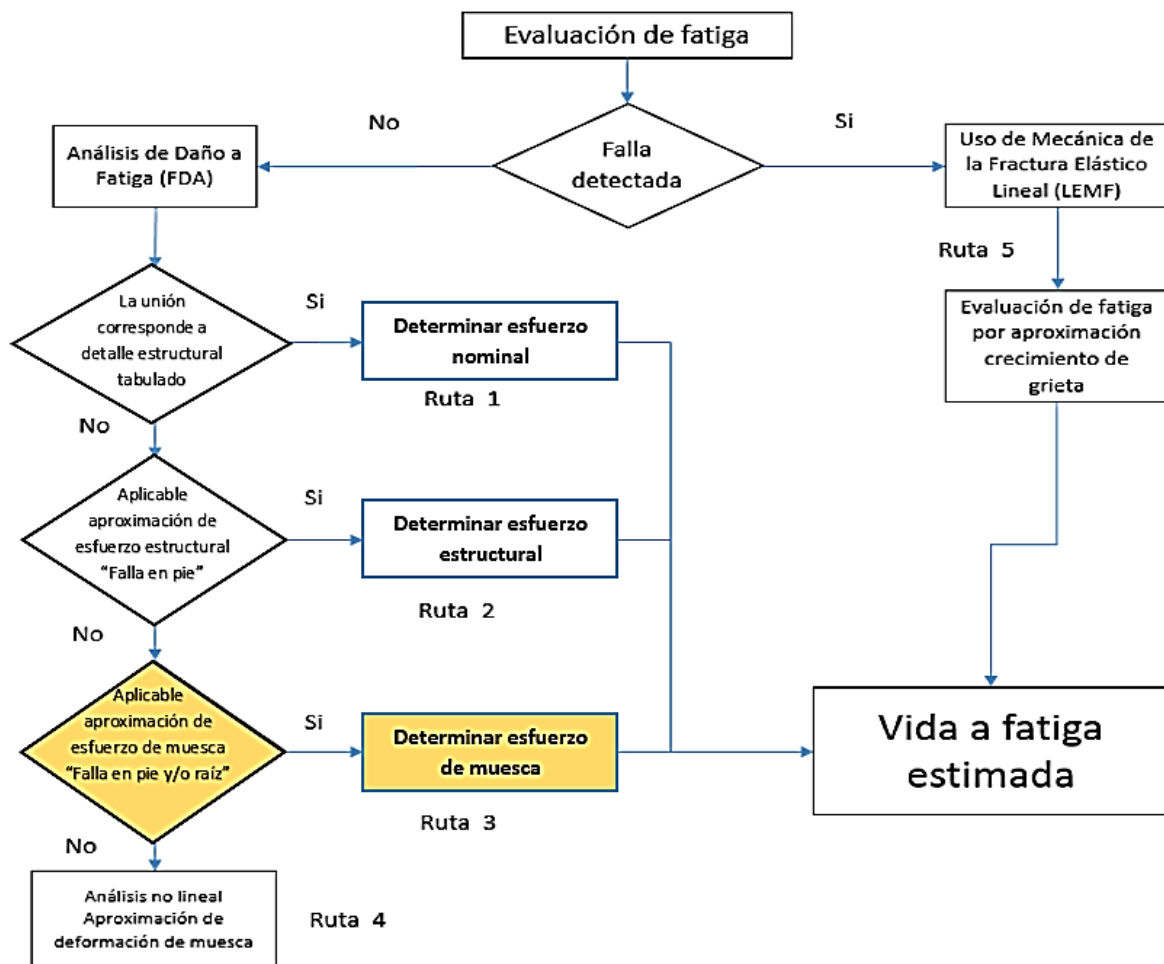


Figura 4.1. Diagrama de selección de método

El primer criterio de selección es sí componente que se va a analizar presenta alguna grieta establecida. Si la ruta es negativa se realiza los procedimientos 1 a 4

(análisis de daño acumulado a fatiga o FDA) o si es positiva se sigue la ruta 5 (mecánica de la fractura elástico lineal LEMF). Las rutas 1, 2 y 3 corresponden al análisis de fatiga a altos ciclos de componentes sin grieta, la ruta 4 corresponde a análisis de fatiga a bajos ciclos en componentes sin grieta, la ruta 5 se refiere al análisis de falla por fatiga de componentes con grieta.

Un segundo criterio selección se visualiza en la Figura 4.2, se ejemplifica la exactitud dependiente de la complejidad de las diferentes aproximaciones. Las aproximaciones locales, en especial la aproximación de esfuerzo de muesca (Notch Stress), está ganando cada vez más importancia en aplicaciones industriales y debido a su mejor aproximación en comparación con la aproximación de esfuerzo normal y estructural [38].

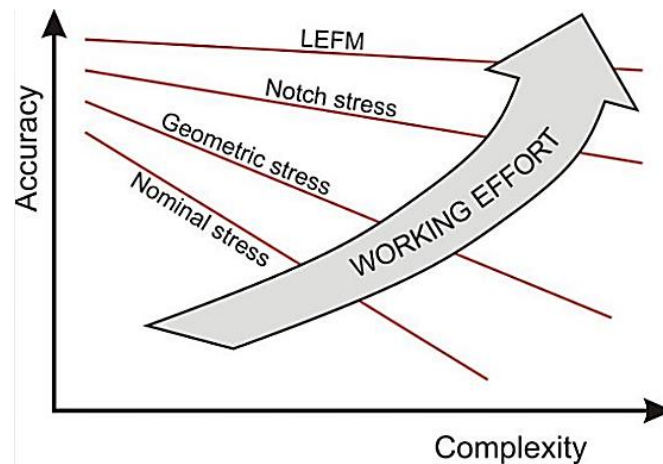
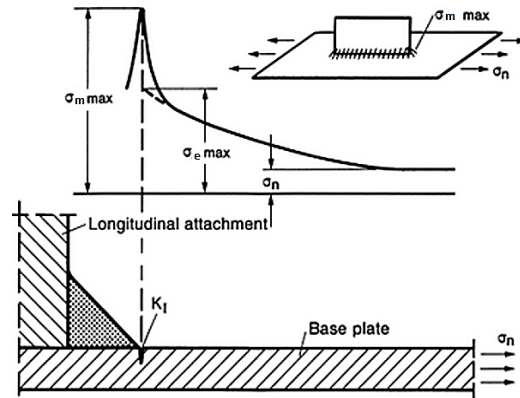


Figura 4.2. Comparación de aproximaciones exactitud contra complejidad [38]

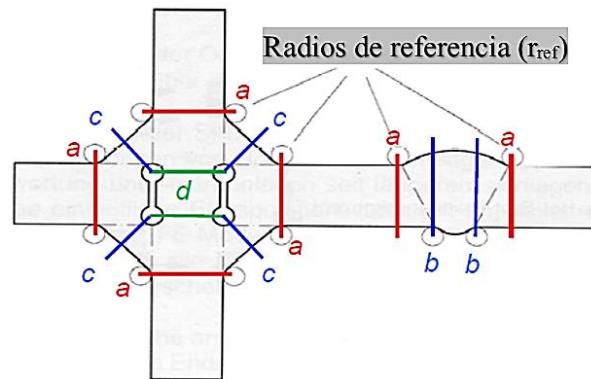
#### 4.2. Definición del método de aproximación de esfuerzo de muesca

La aplicación del método de aproximación de esfuerzo de muesca es decisivo o al menos inicialmente para la predecir la propagación de la grieta de una unión soldada, cuando ésta es sometida a carga variables. Para predecir la resistencia a fatiga de los componentes se asume un comportamiento elástico lineal de material, basándose en teoría de la elasticidad, tomando en cuenta a los esfuerzos teóricos de discontinuidades, originados por cambios geométricos producto del por proceso de soldadura (Figura 4.3) [9, 10, 25].



**Figura 4.3. Relación de esfuerzos tomados en cuenta en método de aproximación de esfuerzo de muesca en una unión soldada [9]**

Debido a que los esfuerzos en la muesca de raíz y pie son puntos dominantes para la resistencia a la fatiga de estructura soldadas, la idea básica de esta aproximación es el modelado del pie y raíz de la soldadura (Figura 4.4), con un radio de referencia ( $r_{ref}$ ), para calcular el Esfuerzo Principal Máximo local o Esfuerzo local Von Mises mediante cálculos estático lineales utilizando FEM.



**Figura 4.4. a) Pie de soldadura, b) Raíz de soldaduras a tope y c) Raíz de soldaduras de filete [39]**

Los esfuerzos calculados son comparados con valores característicos de esfuerzo nominal del material derivada de una prueba con una muestra equivalente sin muesca, para así obtener el factor de concentrador de fatiga con la relación 4.1

$$K_f = \frac{\text{Esfuerzo maximo obtenida con aproximación de muesca}}{\text{Esfuerzo nominal sin concentrador de esfuerzo}} \quad [4.1]$$

Las muescas en la unión soldada pueden ser divididas en muescas de pie (MP) y muescas de raíz (MR) (Figura 4.5), muescas con un ángulo de abertura  $\theta \leq 90^\circ$  descritas como MR y MP a muescas con  $\theta > 90^\circ$  [18].

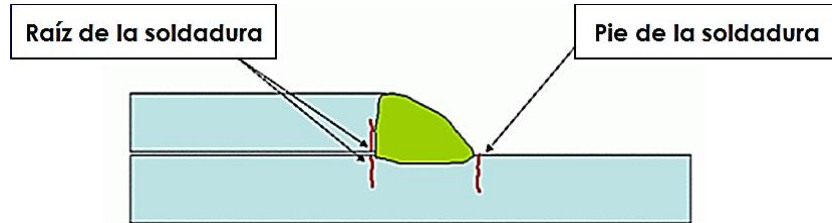


Figura 4.5. Inicio de grieta en unión a traslape [39]

Las uniones soldadas pueden ser tratadas tomando en consideración del espesor de la placa del material utilizado en la unión soldada [18, 20], se han realizado investigaciones de las que han resultado los radios de referencia  $r_{ref} = 1\text{ mm}$ ,  $r_{ref} = 0.3\text{ mm}$  y  $r_{ref} = 0.05\text{ mm}$  (Figura 4.6).

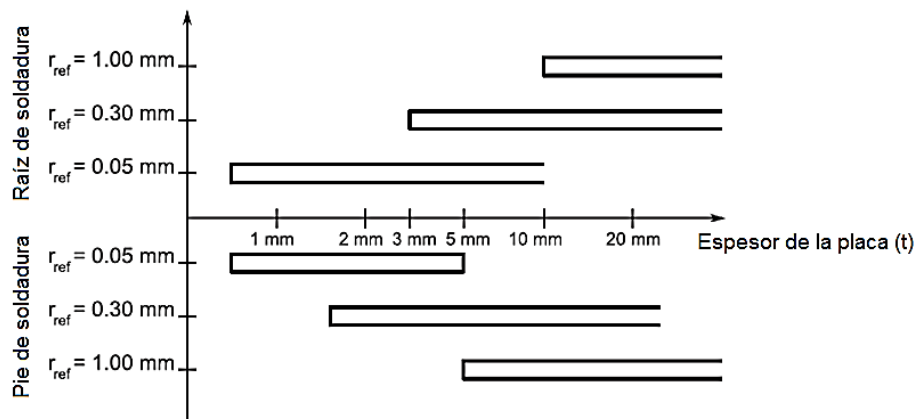


Figura 4.6. Radios de referencia recomendados de acuerdo al espesor de placa y zonas potenciales de inicio de grieta como son pie y raíz de soldadura [18]

El modelado geométrico debe proporcionar una imagen realista de la geometría básica soldada para que los cálculos sean aproximados a la realidad. El esfuerzo calculado  $\sigma_m$  y factor de concentración de esfuerzo de fatiga  $k_f$  son basados de alguna manera en una sola curva de diseño FAT recomendada, la cual varía de acuerdo al tipo de radio de referencia utilizado. A continuación se describen conceptos teóricos que justifican la propuesta de radios de referencia mencionados.



#### 4.2.1. Radio de referencia $r_{ref} = 0.05 \text{ mm}$

La justificación de la propuesta de uso de radio de referencia  $r_{ref} = 0.05 \text{ mm}$  es la relación entre factor de intensidad de esfuerzo y esfuerzo de muesca acorde con teoría de Creager y Paris con el concepto de “*Crack Tip blunting*” [20, 21, 24]. También, es un acuerdo con respecto al modelado FEM y el cálculo razonable de esfuerzos locales del esfuerzo generado en la unión, adicionalmente, es basado sobre observaciones empíricas que han sido observadas en placas delgadas [18].

El radio es recomendado generalmente para uniones con placas con espesores menores a 5 mm ( $t \leq 5 \text{ mm}$ ), pudiéndose utilizar las recomendaciones de la Figura 4.6. La introducción de este radio tiene también su justificación en evitar el debilitamiento de la sección transversal de la placa si el radio de 1.00 mm es aplicado. Debido a que en este proyecto la placa del acero CP780 utilizada tiene un espesor de 3.2 mm se consideró adecuado tomarlo como uno de los radios de referencia en el modelado.

#### 4.2.2. Radio de referencia $r_{ref} = 0.3 \text{ mm}$

La propuesta de este radio de referencia es una aproximación localizada entre el radio de referencia de 0.05 mm y 1 mm. Su introducción es acorde a la propuesta por Sonsino [9]. Se han encontrado aproximaciones para los valores de referencia *FAT* (Figura 4.6), los cuales son derivados a partir de valores de otros radios de referencia. De acuerdo a las necesidades de diseño, este radio  $r_{ref}$  se consideró conveniente a ser utilizado en desarrollo del modelo de simulación.

#### 4.2.3. Radio de referencia $r_{ref} = 1 \text{ mm}$

El radio referencia  $r_{ref} = 1 \text{ mm}$  es propuesto por Radaj [20], está basado en estudios empíricos y en teoría de Neuber [21, 24, 25], usado generalmente para placas con espesores mayores a 5 mm ( $t > 5 \text{ mm}$ ), ofreciendo una opción tanto para el modelado de pie y raíz para placas gruesas, utilizándose también las recomendaciones de la Figura 4.6.

#### **4.2.4. Influencia de características geométricas, esfuerzos residuales e imperfecciones generadas en el proceso de soldadura**

Las características geométricas adquiridas por el proceso la soldadura son parcialmente indefinidas y a veces muy dispersas, ya sea del radio de la curvatura del pie o raíz de la soldadura o la pendiente del contorno del pie de la soldadura, las cuales son variables dentro de un rango de dispersión, ya que aunque se modelen geoméricamente, en el proceso real de soldadura existen variaciones que logran una dispersión de dimensiones. Estos parámetros geométricos dependen del tipo y ajuste del proceso de la soldadura, sobre el material soldado, el ancho de la placa y el margen de tolerancia cuando se posicionan los componentes estructurales a ser unidos, lo cual podría producir des-alineamientos. Estas características geométricas pueden ser determinadas, hasta cierto punto, con mediciones realizadas a muestras resultantes en el proceso experimental.

Aspectos que merecen atención son los esfuerzos residuales y distorsiones a causa del proceso de soldadura. Debido a que la soldadura es la fusión de superficies de las partes que se están uniendo junto con el material de aporte usando una fuente concentrada de calor, el rápido enfriamiento produce esfuerzos residuales de tensión y compresión provocando distorsiones a través de esfuerzos térmicos y transformaciones micro-estructurales. Esto esfuerzos residuales podrían alcanzar el límite elástico y un decremento de resistencia en el área adjunta como se visualiza en la Figura 4.7. Generalmente tienen un bajo nivel fuera del área soldada, pero produce la concentración de esfuerzos locales en muescas [9, 10].

En fatiga a altos ciclos, los esfuerzos residuales de tensión son generalmente reducidos por la pérdida de esfuerzos con el tiempo en condiciones de esfuerzos variable, realizado por el proceso conocido como relajación de esfuerzos [29], cambiando de una manera favorable si la ductilidad del material es adecuada y la carga cíclica suficientemente severa. La resistencia a fatiga a altos ciclos de uniones soldadas es modificada por efectos de esfuerzo residual cuando existe una distorsión resultante del proceso de soldadura, esta modificación de resistencia a fatiga no solo es con respecto a esfuerzos residuales no favorables producidos por

el proceso de soldadura, también lo es con respecto a esfuerzos residuales favorables de compresión producidos por el proceso de soldadura, este incremento es basado en el cierre de grieta [9, 10].

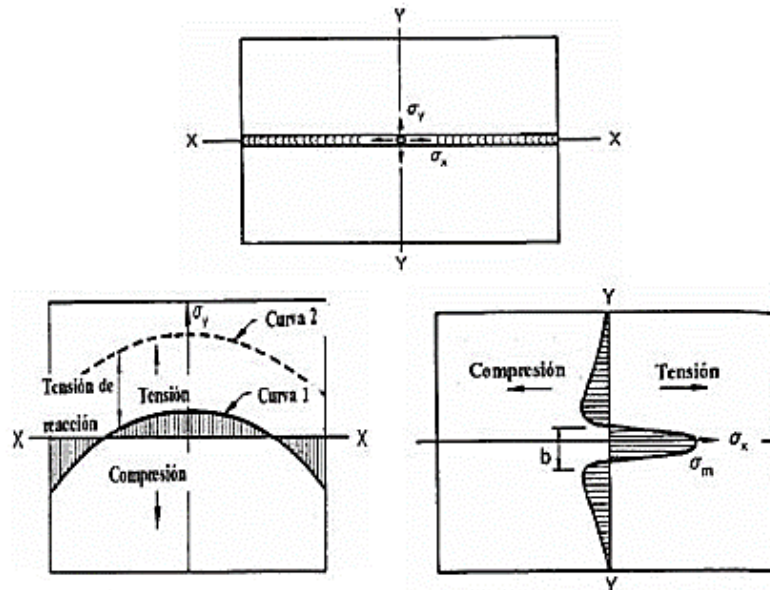


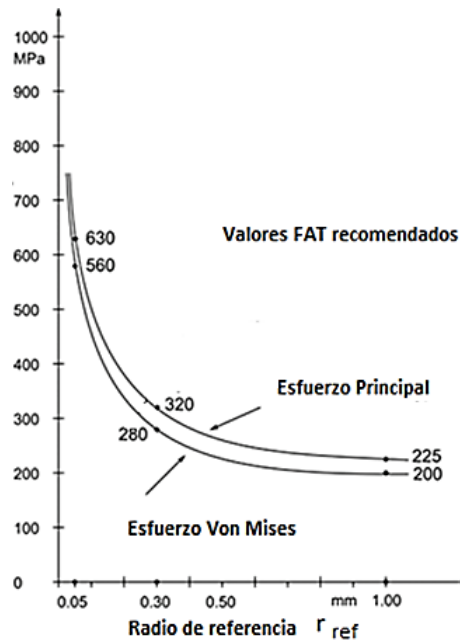
Figura 4.7. Distribución de esfuerzos residuales en unión soldada (a) transversales (b) longitudinales [26]

Defectos de la soldadura e imperfecciones, des-alineamientos, esfuerzo residual e in-homogeneidad del material son tomados en cuenta dentro de la aproximación de esfuerzo de muesca basándose en los peores casos, es decir, alto esfuerzo residual y con un alto porcentaje de supervivencia de  $P_s=97.7\%$ . En el proceso final del análisis, el factor de esfuerzo medio y esfuerzo residual tienen que ser tomados en cuenta individualmente de acuerdo a parámetros observados en el proceso real por medio de factores de modificación su resistencia a la fatiga [9], para que estos sean incluidos en comparaciones con la aproximación de esfuerzo de muesca.

#### 4.2.5. Valores FAT recomendados de aproximación de esfuerzo de muesca

Las curvas  $S - N$  de diseño *FAT* son aplicables para una probabilidad de supervivencia de 97.7 %, para razones de esfuerzo entre  $R=0$  y  $R=0.5$  [21, de acuerdo a recomendaciones de diversos organismos como el Eurocódigo 3 y el

IIW, estas curvas permiten una tolerancia para alto esfuerzo residual [17, 23, 27], sirven como referencia importante para la normalización de procedimientos e incorporación en códigos de diseño. En placas delgadas la pendiente  $m$  varía con respecto a espesores  $t \leq 5\text{mm}$  en cargas normales  $m = 5$  y  $m = 7$  para cargas cortantes.



**Figura 4.8. Rangos de esfuerzo FAT para aproximación de esfuerzo de muesca, recomendados para ( $N= 2 \times 10^6$ ,  $P_s= 97.7\%$ ) [18]**

En la aproximación de esfuerzo de muesca los esfuerzos recomendados *FAT* para los radios de referencia 1, 0.3 y 0.05, son el resultados de la interacción entre el espesor de la placa, geometría local (concentrador de esfuerzo), rigidez estructural, tipo de carga y por supuesto del esfuerzo residual, al final, los valores resultantes de proceso de análisis de fatiga son comparados con valores recomendados de diseño tomado en cuenta Esfuerzos Principales Máximos (*EPM*) o Esfuerzos de Von Mises (*EVM*), mostrados en las gráficas de la Figura 4.8.

#### 4.2.6. Requisitos de aplicación de método

Para la aplicación del método de aproximación de esfuerzo de muesca en la evaluación de resistencia y límite de fatiga, es necesario tomar en cuenta varios

puntos que influyen en los resultados que se obtiene y su aproximación a recomendaciones y modelos reales [9, 10]. Los puntos de mayor relevancia son mencionados a continuación:

- Comprensión de principios teóricos y antecedentes en un carácter general, así como fórmulas de aproximación.
- Habilidad en métodos numéricos para la determinación de esfuerzos de muesca en la raíz y pie por medio de FEM.
- Conocimiento de parámetros geométricos, dimensiones y formas de la estructura y de la unión, incluyendo desviaciones de valores de diseño causados por la manufactura.
- Conocimiento de curvas de esfuerzo-deformación  $S - N$  y propiedades características de la material metal base.
- Conocimiento de la acumulación del daño en el material.
- En pruebas físicas, es necesaria la habilidad con el equipo de prueba de fatiga.
- Conocimiento del estado de esfuerzos residuales en la muesca de raíz y pie de la unión soldada.

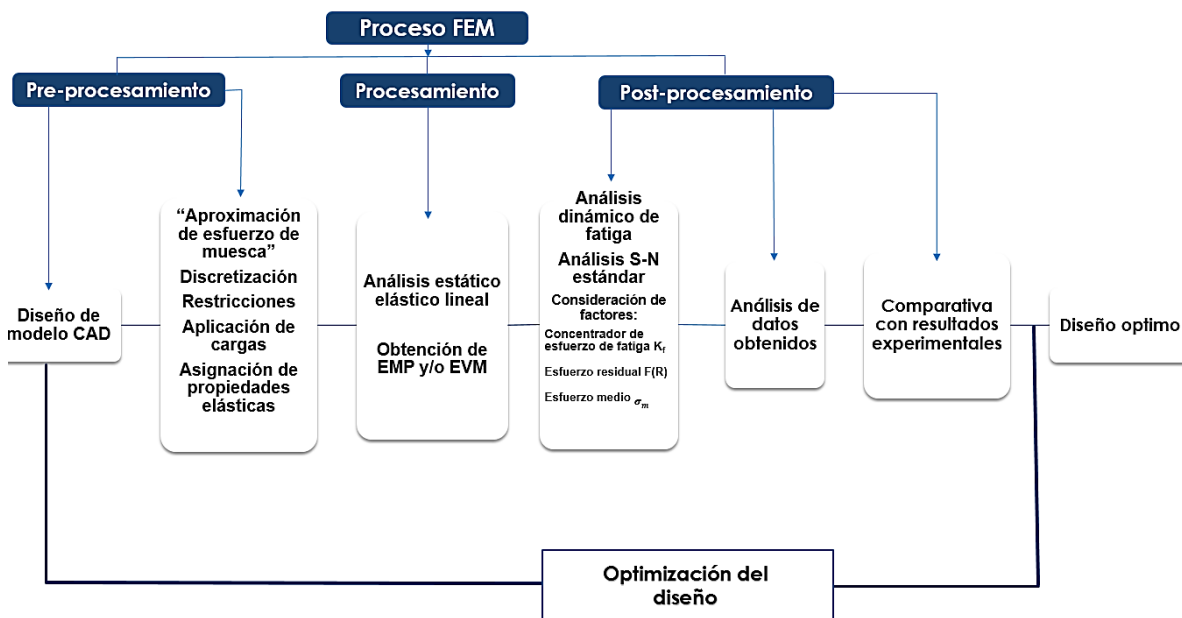
Estos prerrequisitos difícilmente son cubiertos en su totalidad y solo pueden ser cubiertos completamente en casos particulares. Sin embargo hay simplificaciones de la aproximación de esfuerzo de muesca posibles que permiten la aplicación práctica del método, las cuales se abordaran en la metodología siguiente.

#### **4.3. Metodología de aproximación de esfuerzo de muesca por análisis FEM**

A continuación se describe el proceso de modelado FEM implementando el método de aproximación de esfuerzo de muesca, el cual es descrito en el esquema de la Figura 4.9. En un principio en el pre-procesamiento, con el modelo utilizado se utilizan la técnica de mallado para el pie y raíz de la unión, también, se toman en cuenta condiciones de frontera y restricciones, teniendo como objetivo en el procesamiento el cálculo por medio de un análisis estático lineal de Esfuerzos

Principales y de Von Mises, para la posterior obtención del factor de concentrador de esfuerzo de fatiga ( $K_f$ ).

Posteriormente, en el post-procesamiento se realiza el análisis dinámico de fatiga utilizando los datos obtenidos en el procesamiento, tomando en cuenta a los principales factores que influyen en la evaluación a fatiga en una unión soldada. Una vez que ya se han obtenido los valores respectivos de resistencia a la fatiga a diferentes esfuerzos propuestos se gráfica la curva  $S - N$  para determinar el límite de fatiga en los ciclos determinados (5 millones).



**Figura 4.9. Diagrama de modelado FEM aplicando método de aproximación de esfuerzo de muesca para obtener resistencia y límite de fatiga aplicado en uniones soldadas**

Finamente, como parte del post-proceso se realiza la evaluación de resultados de fatiga comparándolos con datos que han sido obtenidos de manera experimental, para así determinar y concluir la relación entre datos simulados y experimentales.

#### 4.3.1. Pre – procesamiento

En el pre-procesamiento se realiza la generación y entrada de parámetros del problema, definiéndose la geometría, generación de mallado y la entrada directa de variables físicas que intervienen en el modelo para su inclusión en el modelo matemático, como son:

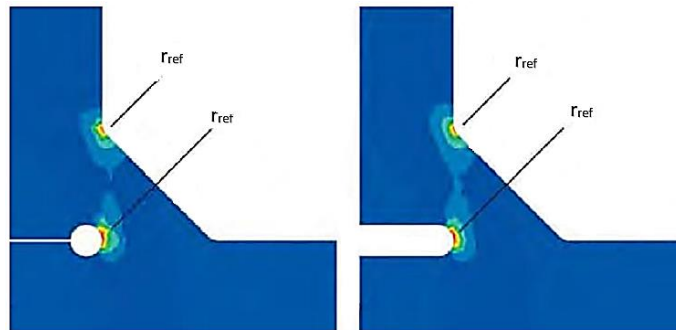
- Asignación de condiciones de frontera.
- Aplicación de cargas.
- Asignación de propiedades de material.

Aspectos del pre-procesamiento y propios de la aproximación de esfuerzo de muesca se describen a continuación:

#### 4.3.1.1. Modelado de geometría

Una vez que se ha determinado que unión se analizará y los radios de referencia ( $r_{ref}$ ) que serán utilizados, tomado en cuenta las recomendaciones, se realiza el diseño y modelado geométrico mediante diseño asistido por computadora (*Computer Aided Desing* o CAD) de la unión a evaluar, donde el punto esencial es realizar una geometría con un apropiado diseño de los radios, de tal manera que el preprocesador sea capaz de crear un mapeo con elementos sólidos permitiendo un control directo sobre la calidad de la malla y de los elementos creados.

Al asigna la muesca de raíz de la soldadura en modelos FE, se hace una distinción entre las que se conocen como muescas-O (muecas de ojo de cerradura) y muescas-U (Figura 4.10), en el caso donde existe brecha entre placas las muesca-O o muesca-U pueden ser modeladas [18, 22].



**Figura 4.10. Ejemplo de modelado de unión soldada aplicando método de aproximación de esfuerzo de muesca [18]**

#### 4.3.1.2. Mallado

Con la finalidad de calcular los esfuerzos locales en las muescas de pie y raíz en una unión soldada aplicando el método de aproximación de esfuerzo de muesca,

se han desarrollado técnicas de mallado eficiente que permiten obtener los gradientes de esfuerzo de manera eficaz [18, 22]. Para aplicar esta técnica de mallado se debe identificar a la raíz y pie de la unión con la correspondiente geometría de muesca. Esta técnica permitirá el desarrollo de diversos tamaños de elementos, los gradientes de esfuerzo se obtendrán para determinar el punto donde teóricamente iniciara la grieta.

Para determinar el esfuerzo de muesca se eligen elementos hexaédricos para una mejor distribución en la geometría de la muesca y mejor conexión con elementos adjuntos, el uso de elementos tetraédricos se excluye en zonas de muesca debido a la falta de control del elemento una vez que se realiza el mallado en 3D, pero estos elementos tetraédricos pueden ser utilizados en los subsecuentes elementos dentro del volumen, ya que en zonas alejadas de la muesca no influyen en los cálculos de la esfuerzo de la muesca.

La densidad y calidad de la malla principalmente cerca de la superficie de muesca son de gran importancia, para garantizar esto se toman en cuenta tanto en elementos hexaédricos y tetraédricos criterios de calidad de elementos como:

- Jacobian (medida de desviación del elemento de su forma idealizada)
- *Skew* (simetría)
- *Warpage* (deformación)
- *Aspect ratio* (relación de aspecto)

De tal manera que también el algoritmo de mallador pueda generar mallas simétricas o que éste permita realizar funciones de ajuste de malla por medio de mapeo manual. *Aspect ratio* no se toma en cuenta en el desarrollo de la malla 3D por la considerable diferencia de tamaño entre elementos de zonas de muesca y zonas alejadas de no interés.

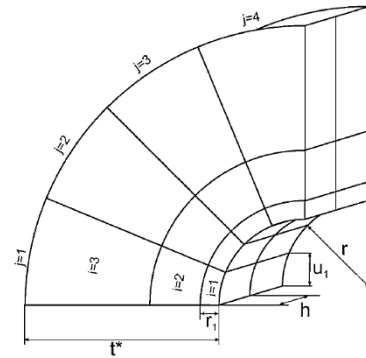
#### **4.3.1.2.1. Parámetros de discretización de muesca**

Los parámetros de las expresiones 4.2 que describen el mapeo de elementos hexaédricos alrededor de la muesca son mostrados en la Figura 4.11. Para comenzar a determinar estos parámetros es necesario definir el número de



elementos ( $j$ ) que encajen en la raíz y pie de la unión soldada con los radios  $r_{ref}$  definidos y modelados por CAD, este número de elementos es relacionado a la muesca con un ángulo de  $360^\circ$ .

- Factor de radial  $f_{r,i} = \frac{r_{i+1}}{r_i}$
- Factor de circunferencia  $f_{u,j} = \frac{u_{j+1}}{u_j}$
- Factor geométrico  $Z = \frac{f_{r,i}}{f_{u,j}}$
- Relación de aspecto 2D  $V = \frac{u_1}{r_1}$
- Relación de aspecto 3D  $X = \frac{h}{u_1}$
- $h \leq 10 * r_1$



**Figura 4.11. Parámetros de discretización [22]**

Una vez que se define el número de elementos  $j$  se puede determinar la longitud de arco  $u_1$ , eligiendo una relación de aspecto  $V$  (1, 2 o 3) en 2D [22] la longitud  $r_1$  en dirección radial puede ser determinada, de ésta manera la geometría del primer elemento puede ser determinado y en consecuencia se pueden definir el primer anillo de elementos de la muesca.

La geometría de los elementos siguientes es determinada basándose en el teorema de la intersección de líneas tomando en cuenta al factor  $f_r$  que describe el alargamiento de los anillos, del anillo  $i$  al anillo  $i + 1$  dependiente al número de elementos de la muesca y al factor geométrico  $Z$  que describe un crecimiento adicional de la longitud de la arista en dirección radial del elemento. Adicionalmente, la longitud del eje  $h$  describe el crecimiento de los elementos en dirección transversal en mallas 3D, entonces, la relación de aspecto  $X$  de tamaño de elementos en 3D puede ser calculada en combinación con la longitud de arco  $u_1$ .

De acuerdo a esta técnica de mallado, los elementos generados son geoméricamente equivalentes. La denotación de los modelos sigue el esquema "Modelo  $j/V/Z$ " [22].

### 4.3.2. Procesamiento

#### 4.3.2.1. Análisis estático lineal

Es la parte del programa donde se realiza el ensamblaje de la matriz global o matriz de rigidez del sistema y la resolución de sistema de ecuaciones por medio del análisis estático lineal, generándose las primeras soluciones indispensables para el cálculo de fatiga de la unión soldada por medio de la determinación de esfuerzos de muesca como lo son esfuerzo principales máximos (*EPM*) o esfuerzos de Von Mises (*EVM*), para la obtención del factor de concentración de esfuerzos de fatiga  $K_f$ .

Este análisis consiste en la generación de un número finito de ecuaciones e incógnitas igual al número total de grados de libertad presentes en el sistema (es decir al número total del nodos multiplicado por el número de grados de libertad por nodo de la estructura). Con el análisis estático lineal se plantea y resuelve el sistema de ecuaciones resultante con la expresión 4.3, obteniéndose en un principio los desplazamientos de cada nodo. Una vez conocidos dichos desplazamientos, se pueden determinar de una forma aproximada esfuerzos y deformaciones de cada elemento de la estructura.

$$\{F\} = \{K\}\{U\} \quad [4.3]$$

Donde:

$F$ =Vector de fuerzas nodales (cargas), es donde están todas las fuerzas exteriores (las directamente aplicadas y reacciones producidas por restricciones) que actúan sobre el modelo.

$K$ =Matriz global del sistema o matriz de rigidez, la cual se obtiene de la suma directa de los coeficientes de rigidez de cada elemento.

$U$ =Vector global de desplazamientos nodales, que presenta de manera todos los desplazamientos que experimentan los nodos del modelo.

### 4.3.3. Post-Procesamiento (análisis da fatiga)

Aquí se presentan los resultados del análisis por FEM, usualmente son de manera gráfica, permitiendo transferir las soluciones del cálculo del procesador para un análisis posterior, es decir, al análisis dinámico de fatiga y así obtener los valores característicos de resistencia y límite a la fatiga. Para realizar esto se toma en cuenta a los parámetros característicos de fatiga, que se describe a continuación.

#### 4.3.3.1. Criterios de falla

Considerando a un elemento que está sujeto a un estado general de esfuerzos,  $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$  en donde 1, 2 y 3 se refieren a las direcciones principales de esfuerzo. La aparición de deformaciones y grietas por fatiga es más aparente en situaciones donde están involucrados esfuerzos combinados y hay presencia de esfuerzos multi-axiales en la unión evaluada [29].

Para conocer y entender las bases de las fallas en materiales se han desarrollado criterios de falla que son aplicadas a clases particulares de materiales como:

**Materiales dúctiles:** Materiales capaces de soportar una apreciable cantidad de cedencia o permanente deformación cuando son sometidos a esfuerzos, ejemplo: aceros dulce, aluminio, aleaciones de acero [29].

**Materiales frágiles:** Materiales que sometidos a esfuerzos soportan poca cedencia ( $5\% <$ ) [29], por lo general se rompen al aplicarles una fuerza y no presentan deformación previa, es decir, su fase elástica y plástica son muy reducidas, algunos ejemplos son: concreto, hierro fundido, cerámicos.

En la aplicación de estos criterios en el método de aproximación de esfuerzo de muesca, se distinguen dos principales criterios.

- **Esfuerzo máximo principal (EMP)**

Es el esfuerzo máximo principal es definido como el esfuerzo principal con mayor magnitud, es en punto donde se presenta este esfuerzo donde con seguridad

comenzara la grieta en un material frágil. Este esfuerzo principal es tomado en cuenta cuando no existe esfuerzo cortante sobre la superficie [16].

$$\sigma_{EMP} = \sigma_3 \quad \text{Si } |\sigma_3| > |\sigma_1| \quad \text{O de otra manera} \quad \sigma_{EMP} = \sigma_1 \quad [4.4]$$

- **Esfuerzo de von Mises (EVM)**

Esfuerzos de Von Mises es una magnitud física proporcional a la energía máxima de distorsión, se usa en el contexto de teorías de falla para materiales dúctiles. Puede calcularse a partir de los esfuerzos principales  $\sigma_1, \sigma_2$  y  $\sigma_3$  del tensor de esfuerzos mediante la expresión 4.5 en términos de los esfuerzos principales.

$$\sigma_{EVM} = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2}} \quad [4.5]$$

#### 4.3.3.2. Factores que modifican la resistencia a la fatiga en aproximación de esfuerzo de muesca.

El análisis dinámico de fatiga es realizado tomando en cuenta a los factores que modifican la resistencia a la fatiga en uniones soldadas, incorporándolas al método de aproximación de esfuerzo de muesca [9, 10].

##### 4.3.3.2.1. Factor de concentración de esfuerzos de fatiga $K_f$

En la aproximación de esfuerzo de muesca se toma en cuenta la variación de los parámetros de la forma de la soldadura y comportamiento no lineal del material local, una vez que el contorno de raíz o pie son sustituidos por un radio efectivo [17]. El cociente de la relación 4.1, de esfuerzos efectivo de muesca (EMP o EVM) relacionado al esfuerzo nominal, da como resultado al factor concentrador de esfuerzos de fatiga de muesca  $K_f$ , usado para la obtención de datos de fatiga de la unión analizada.

$$K_f = \frac{\text{Esfuerzo maximo obtenido con aproximación de muesca}}{\text{Esfuerzo nominal sin concentrador de esfuerzo}}$$

La resistencia a la fatiga de uniones soldadas es estimada incorporando el factor de concentrador de esfuerzo de fatiga, con la relación 4.6.

$$\sigma_{FAT} = \frac{\Delta\sigma_{se}}{K_f} \quad [4.6]$$

Donde:

$\Delta\sigma_{FAT}$  = Resistencia a la fatiga con factor  $K_f$ .

$K_f$  = Factor de concentración de esfuerzos de fatiga

$\Delta\sigma_{se}$  = Limite de fatiga de material base (se consideran características geométricas de la unión)

#### 4.3.3.2.2. Factor de esfuerzo residual

En la aproximación de esfuerzo de muesca todos los tipos de esfuerzo que no son considerados en un análisis de fatiga y que son efectivos en la carga, son considerados como esfuerzos residuales [10, 17]. Se considera al factor de aumento de fatiga con respecto al esfuerzo residual en tres diferentes casos:

1. Para materiales no soldados o piezas con esfuerzo residual despreciable y donde los efectos de esfuerzos secundarios ya han sido considerados en el análisis.

$$\begin{aligned} f(R) &= 1.6 && \text{Para } R < -1 \\ f(R) &= -0.4 * R + 1.2 && \text{Para } -1 \leq R \leq 0.5 \\ f(R) &= 1 && \text{Para } R > 0.5 \end{aligned} \quad [4.7]$$

2. Elementos estructurales simples y escala pequeña con placa delgada menor a 5 mm, que contienen pequeñas soldaduras.

$$\begin{aligned} f(R) &= 1 && \text{Para } R < -1 \\ f(R) &= -0.4 * R + 0.9 && \text{Para } -1 \leq R \leq -0.25 \\ f(R) &= 1 && \text{Para } R > -0.25 \end{aligned} \quad [4.8]$$

3. Componentes complejos o de placa gruesa mayor a 5 mm.

$$f(R) = 1 \quad \text{No hay factor de aumento} \quad [4.9]$$

El valor del factor resultante es considerado para la multiplicación por el valor de resistencia a la fatiga obtenido. Si no existe información confiable sobre el esfuerzo residual, se toma en cuenta un factor de aumento de  $f(R) = 1$  [17]. La resistencia a la fatiga de uniones soldadas puede ser estimada incorporando el factor de concentrador de esfuerzo de fatiga, utilizando la ecuación 4.9.

$$\sigma_{FAT} f(R) = \frac{\Delta\sigma_{se}}{K_f} * f(R) \quad [4.10]$$

Donde:

$\Delta\sigma_{FAT}$  = Resistencia a la fatiga con factor  $f(R)$

$F(R)$  = Factor de esfuerzos residual

#### 4.3.3.2.3. Factor de esfuerzo medio

Los métodos de corrección de resistencia a la fatiga por el esfuerzo medio, considerados en el método de esfuerzo de muesca son:

- **Método de Goodman**

Es recomendada para materiales frágiles. Para calcular el esfuerzo equivalente permisible para cualquier razón de carga ( $R$ ), es utilizada la siguiente relación [30, 39].

$$\sigma_{FAT}(R) = \sigma_a \frac{UTS}{\sigma_m} \quad [4.11]$$

- **Método de Gerber:**

Este método de corrección de esfuerzo es utilizado para materiales dúctiles. No es recomendado en esfuerzos de compresión y es calculado para cualquier razón de carga  $R$  con la siguiente expresión [30, 39]:

$$\sigma_{FAT}(R) = \sigma_a \frac{UTS^2}{S_m^2} \quad [4.12]$$

Donde:

$\sigma_{FAT}(R)$  = Resistencia a la fatiga modificada por esfuerzo medio.

$R$  = Razon de carga

## 5. Fase experimental

En este capítulo se describe el desarrollo de la etapa experimental del proyecto. En un primer punto se da la descripción del acero CP780 y de la de la unión soldada a traslape utilizada, explicando la importancia que tienen en el diseño de componentes estructurales. Posteriormente, se da la descripción, desarrollo y obtención de resultados de las pruebas experimentales realizadas, como son: macroscopía, tensión y fatiga.

Finalmente, los resultados obtenidos son analizados con base a normas establecidas, utilizándose técnicas estadísticas para el análisis de resultados, poniéndose el principal enfoque en la pruebas de fatiga.

### 5.1. Caracterización del material

La realización del proyecto tiene un carácter complementario al acero CP780 clasificado como AHSS adquirido del fabricante “*TATA Steel*”, y es especialmente utilizado componentes estructurales de VCL. Por su alta ductilidad y resistencia, el acero CP780 es cada vez más utilizado en la industria automotriz. La composición química mostrada en la Tabla 5.1 y propiedades mecánicas en la Tabla 5.2 son descritas a continuación.

ID	%C	%Si	%Mn	%P	%S	%Cr	%Mo	%Ni	%Al	%Cu	%Ti	%Nb	%V	%Sn	E %
CP	0.087	0.167	1.094	0.016	0.002	0.96	0.004	0.018	0.032	0.012	0.093	0.001	0.007	0.002	17.6

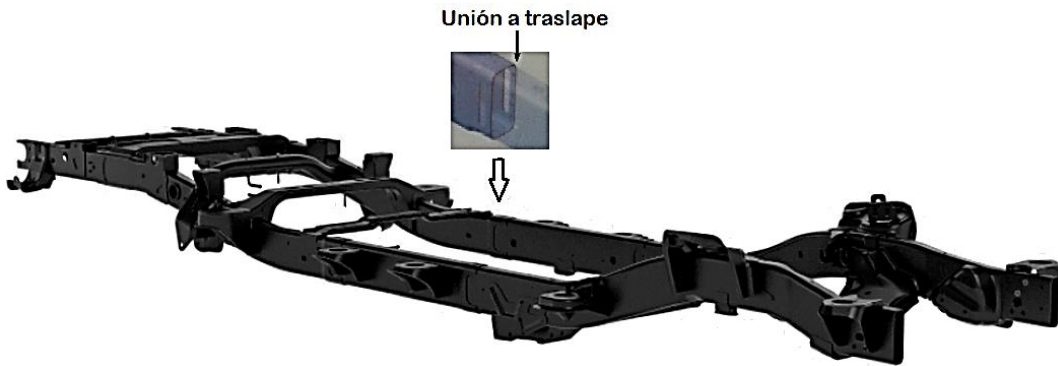
**Tabla 5.1. Composición química de acero TATA CP780**

Propiedad mecánicas	Valor	Unidad
Resistencia última a la tensión	783	MPa
Limite elástico o esfuerzo de cedencia	682	MPa
Espesor	3.2	mm
Coficiente de Poisson	0.33	
Modulo elástico (E)	206	GPa
Densidad	7.9x10 <sup>9</sup>	Kg/m <sup>3</sup>

**Tabla 5.2. Propiedades mecánicas del acero CP780**

## 5.2. Descripción de unión soldada a traslape

Las uniones soldadas a traslape (solape) son muy utilizadas en uniones de largueros de componentes estructurales de vehículos de carga ligeros VCL, como es mostrado en la figura 5.1, son un detalle crítico de la unión en el diseño de la estructura dado que en los elementos que tienen estas uniones soportan grandes cargas que generan concentración de esfuerzos que favorecen el desarrollo de grietas.



**Figura 5.1. Representación de unión a traslape en componente estructural**

Los esfuerzos generados en estas uniones son causados por el peso del vehículo y grandes cargas, también las vibraciones a las que se someten por el movimiento del vehículo juegan un papel importante. Estas cargas generan esfuerzos que se ven muy incrementados en las zonas de soldadura, teniendo en cuenta que el mismo proceso de soldadura se modifica la microestructura del material y por lo tanto sus propiedades mecánicas.

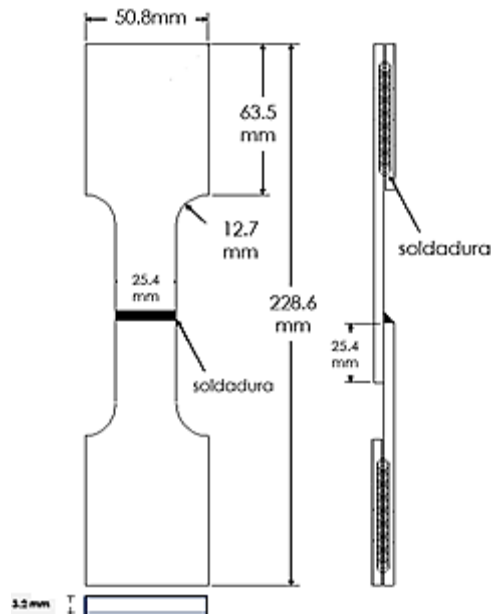
### 5.2.1. Diseño de muestras de unión soldadas para fase experimental

Para el diseño y fabricación de las probetas (muestras) que se utilizaron en las pruebas experimentales se tomó como base a las recomendaciones de la norma ASTM E466 “Ensayo axial de fatiga con fuerza controlada y amplitud constante de materiales mecánicos” [41]. La norma especifica que para probetas con discontinuidades no hay restricciones en su diseño, mientras que el diseño sea coherente con los objetivos del programa de prueba [41].



Las especificaciones de la geometría e información asociada al concentrador de esfuerzos de fatiga  $K_f$  y el diseño de éstas son reportadas a lo largo de este capítulo, así como el proceso de fabricación de la probeta, ya que también puede en los datos de fatiga resultantes.

Se tomó como base de diseño para la probeta al modelo utilizado en estudios de propiedades mecánicas previos realizados por la empresa donde se realizaron las pruebas experimentales y por instituciones como EWI, AWS y WRC [45, 46, 47], el cual es mostrado en la Figura 5.2.



**Figura 5.2. Geometría de probeta utilizada en pruebas experimentales [45, 46, 47]**

El material disponible para la fabricación de las muestras fue una placa de 600 mm de ancho, 800 mm de largo y 3.2 mm de espesor del material de acero CP780, maquinándose 30 probetas con las dimensiones especificadas del diseño. En un principio se realizó un plan de corte y realización del proceso de soldadura con los parámetros de la Tabla 5.3 y finalmente el maquinado con corte de cizalla. Debido a que se evaluó el proceso utilizado actualmente en la empresa, las probetas no recibieron tratamiento térmico posterior al maquinado y solo fueron inspeccionadas visualmente y consideradas óptimas para pruebas de fatiga.

El proceso de soldadura GMAW utilizado para soldar las placas es un proceso estandarizado, actualmente, es utilizado para la soldadura de uniones estructurales de chasis de VCL, fue realizada con equipo robótico marca MOTOMAN con fuente de soldadura FRONIUS modelos TPS5000, utilizando el procedimiento de soldadura de arco pulsado robótico, pudiéndose configurar los parámetros óptimos resultado de un diseño de experimentos (DOE) realizados en las instalaciones de la empresa.

Parámetro	Valor	Unidad
Espesor del material base	3.2	mm
Corriente de soldadura	243	A
Voltaje	26.6	V
Razón de flujo de gas de protección	29.68	Cph
Tipo de gas de protección	80/20	Argón/CO2
Diámetro	1.2	Mm
Velocidad de soldeo	1	m/min
Ángulo de trabajo	0°	Posición 2F
Ángulo de avance	10° y 15°	° (grados)
Ángulo de ataque	45°	° (grados)
Resistencia material de aporte	90	Ksi
	620	MPa

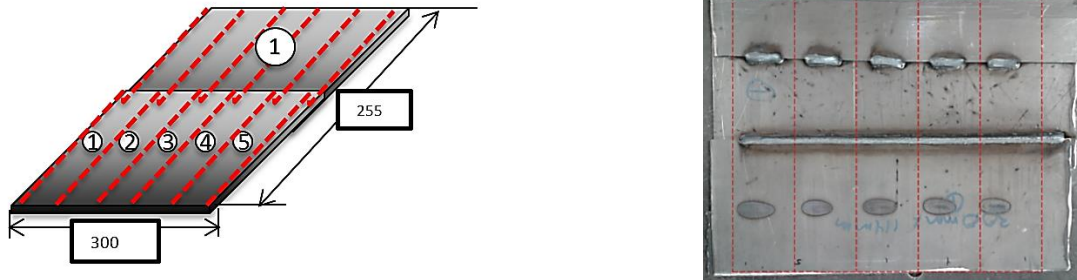
**Tabla 5.3. Principales parámetros de proceso de soldadura**

A continuación se muestran imágenes de proceso de soldadura de placas para muestras experimentales en la Figura 5.3.

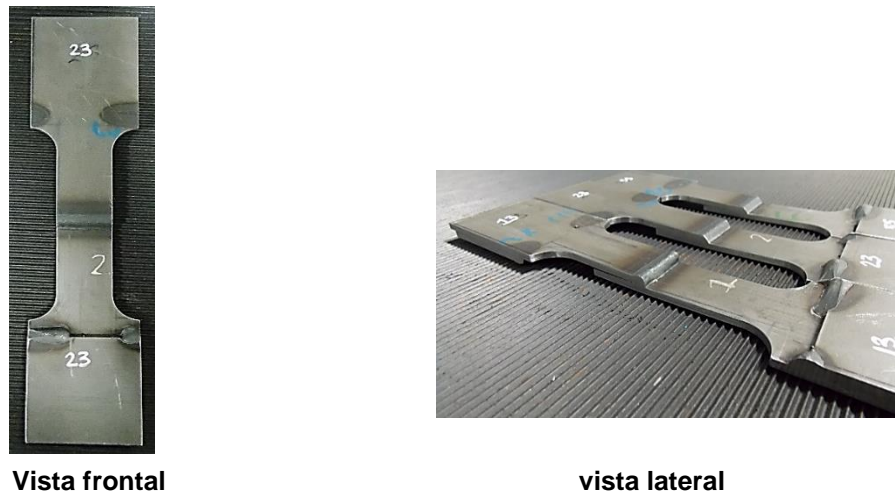


**Figura 5.3. Soldeo de placas con proceso GMAW**

Se obtuvieron en total 5 pares de placas de la placa original, éstas fueron identificadas del 1 al 6, de la misma manera se identificó a cada una de las 5 probetas obtenidas de cada placa, tal y como se visualiza en la Figura 5.4 y Figura 5.5.



**Figura 5.4. Placa soldada con capacidad de 5 muestras**



**Figura 5.5. Vistas frontal y lateral de muestras maquinadas resultantes**

### 5.3. Pruebas de macroscopía

Por medio del procedimiento macroscópico se obtuvieron las imágenes de 5 probetas representativas de los diferentes pares de placas (Figura 5.6), éstas fueron obtenidas realizando un ataque químico con 95% de metanol y 5% de ácido nítrico, permitiendo identificar las zonas que se generan en el proceso de soldadura como: zona afectada por el calor (ZAC), cordón de soldadura y material base. El equipo utilizado fue un estereoscopio Axion Cam con un factor de magnificación de 8X.

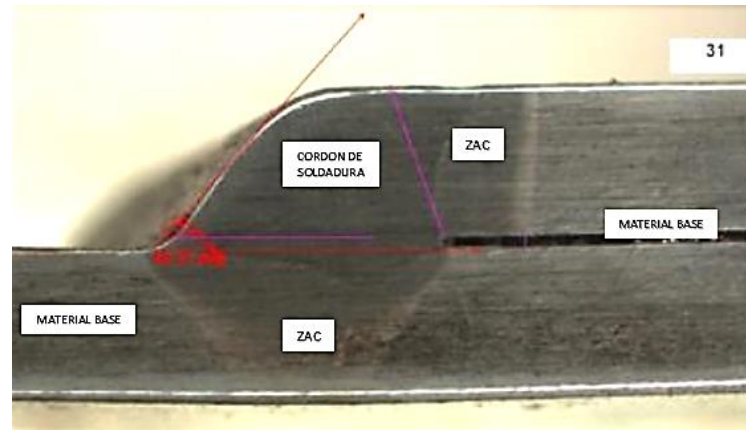


Figura 5.6. Macrografía y visualización de zonas generadas por soldadura

### 5.3.1. Resultados de pruebas macroscópicas

Se realizó la medición de diversos puntos de interés de las 5 probetas seleccionadas aleatoriamente. Con los datos recopilados en la Tabla 5.4, se obtuvieron parámetros geométricos promedio de las muestras, los cuales fueron utilizados para el diseño CAD utilizado en la etapa de simulación (Figura 5.7).

- 1-Angulo de pie
- 2-Cuello
- 3-Gap (separación entre placas superior e inferior).
- 4-Distancia de placa superior a pie
- 5-Radio de pie de soldadura

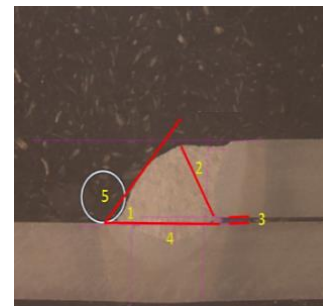


Figura 5.7. Zonas geométricas de interés de unión soldada

ID de muestra	Calibre de placa mm	Angulo de pie °	Cuello mm	Gap mm	Distancia de placa superior a pie mm	Radio del pie mm
25	3.2	48.30	3.28	0.19	4.53	0.00
31	3.2	48.37	3.22	0.24	4.10	0.00
33	3.2	54.10	3.20	0.00	4.52	0.00
43	3.2	51.79	3.10	0.30	4.60	0.00
53	3.2	42.53	3.14	0.00	4.17	0.21
62	3.2	44.15	3.28	0.00	5.21	0.00
Media		<b>48.21</b>	<b>3.20</b>	<b>0.12</b>	<b>4.52</b>	<b>0.042</b>

Tabla 5.4. Resultados de mediciones de macrografía de uniones soldadas

Debido a que proceso de soldadura fue realizado tomando como base a las especificaciones de estándares de calidad para soldadura de la norma AWS D8.8M [47], se obtuvo buena calidad en las uniones soldadas en continuidad y penetración, descartando en gran parte a imperfecciones como: porosidad y grietas. No se obtuvieron distorsiones de las uniones soldadas, lo cual indicó un mínimo efecto de esfuerzos residuales.

#### 5.4. Prueba de tensión

La normativa consultada para los ensayos de tensión fue ASTM E8 [44] “Métodos estándar para pruebas estándar para pruebas de tensión de materiales metálicos”. Estas pruebas de tensión fueron realizadas a 3 probetas elegidas aleatoriamente, las cuales permitieron caracterizar al material soldado en términos del esfuerzo de cedencia (YS) y resistencia última a la tensión (UTS), datos útiles para determinar el valor de los niveles de esfuerzos utilizados en las pruebas de fatiga.

Para la realización de estas pruebas se contó con equipo de tensión hidráulico Zwisch Roell Z250, configurado con una precarga de 3 MPa y una velocidad de prueba de 50 Kpsi/min (344737.95 GPa/min) (Figura 5.8). Los datos fueron registrados a través del software especial configurado para la prueba.

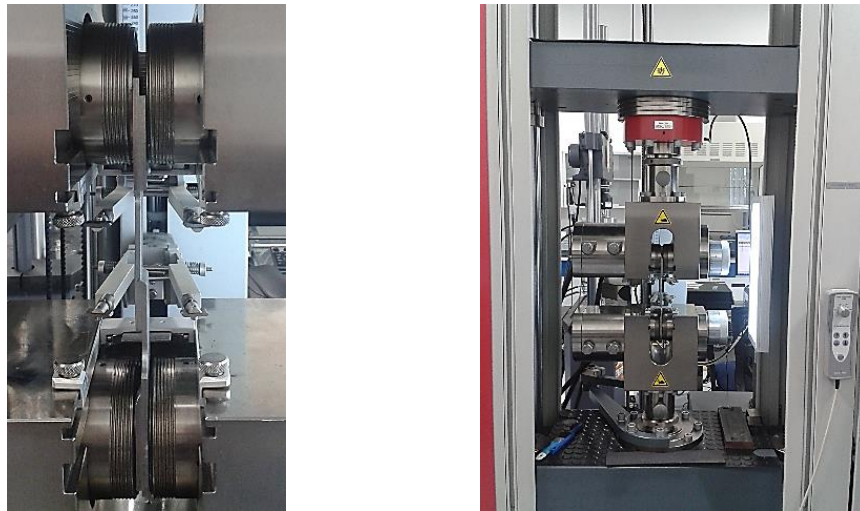


Figura 5.8. Pruebas de tensión con equipo hidráulico Zwisch Roell Z250

### 5.4.1. Resultados de pruebas de tensión.

A continuación se representan la gráficas en la Figura 5.9 y Tabla 5.5 que relacionan el esfuerzo (relación entre la fuerza aplicada y el área transversal inicial de la muestra) con la deformación (cociente entre el alargamiento de la muestra respecto a su longitud inicial), para las tres 3 ensayadas obtenidas del material soldado.

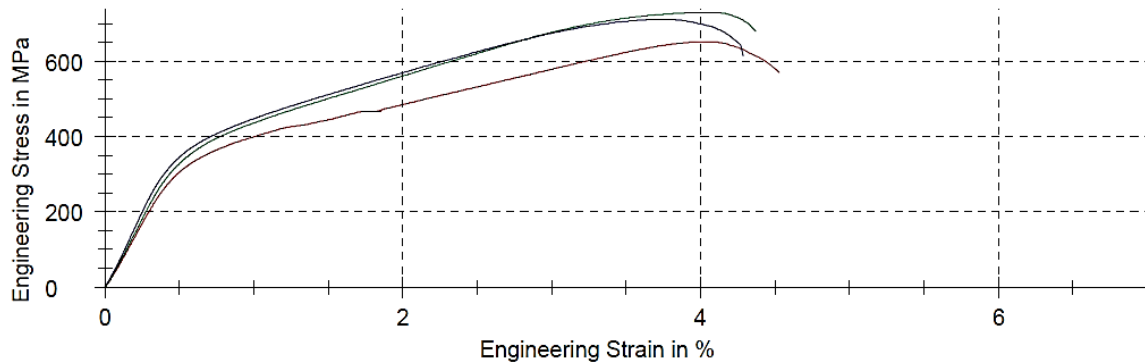


Figura 5.9. Curvas esfuerzo deformación ( $\sigma$ - $\epsilon$ ) representativas de pruebas de tensión

Material	ID de Muestra	Área	YS MPa	UTS MPa	Elongación
CP800	13	81.28	359	653	3.70%
CP800	23	81.28	391	731	3.50%
CP800	55	81.28	395	712	3.50%

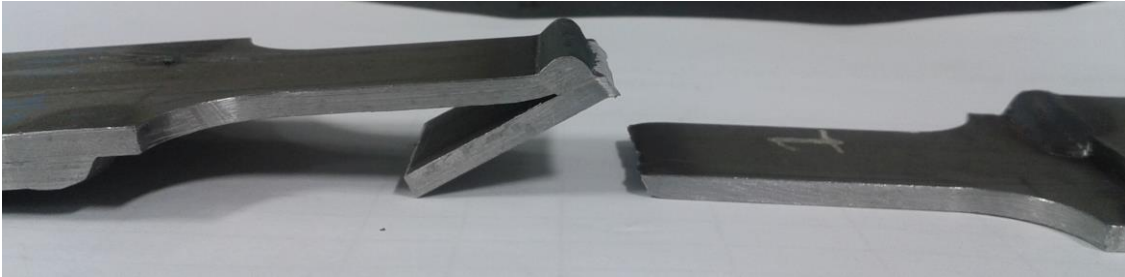
Parámetro	Material base MPa	Material soldado MPa	Eficiencia %
Media de esfuerzo de cedencia (YS)	682	381.67	55.96
Media de resistencia última a la tensión (UTS)	783	698.67	89.22
	17.6	3.56 %	

Tabla 5.5. Valores de YS, UTS y porcentaje de elongación

Debido a los cambios de propiedades del material base, por la adición del material de aporte y el calor generado en el proceso de soldadura, se generó fragilidad principalmente el pie de la unión soldada, generándose la ruptura en las pruebas de tensión en esta zona, tal y como se ve en la Figura 5.10. Los resultados

fueron utilizados para determinar la clasificación y aproximación del tipo de unión recomendado para la evaluación de fatiga usando recomendaciones del IIW [17].

Como era de esperarse se obtuvo una reducción de resistencia en tensión de la unión soldada con respecto al material base, obteniéndose una eficiencia de soldadura de 89.22 %, superando el 85 % de eficiencia del soldadura tomando en cuenta de especificaciones de la Auto Steel Partnership [47].



**Figura 5.10. Muestras rotas que fueron sometidas a pruebas de tensión**

## 5.5. Pruebas de fatiga

Las normas y procedimientos utilizados en los ensayos de fatiga bajo cargas de amplitud constante, son las siguientes:

- ASTM E466-96 “Prácticas estándar para la realización de pruebas de fatiga axiales de fuerza controlada de amplitud constante para materiales metálicos” [41].
- ASTM E468-90 “Prácticas estándar para la presentación de resultados de pruebas de fatiga de amplitud constante para materiales metálicos” [42].
- ASTM E739-91 “Prácticas estándar para análisis estadístico de datos de fatiga lineal esfuerzo-vida (S-N) y deformación-vida ( $\epsilon$ -N)” [40].
- ASTM E1823-96 “Terminología estándar relacionada a pruebas de fatiga y fractura” [43].

Las pruebas de fatiga se realizaron en dos etapas (Figura 5.11), para cada una se realizó el análisis estadístico respectivo:

1. Determinación de curva de vida finita  $S - N$  o resistencia a la fatiga mediante regresión lineal y logarítmica (potencial), análisis de confiabilidad de prueba experimental y análisis de probabilidad de supervivencia por medio de distribución log-normal.
2. Determinación de límite de fatiga por medio de método estadístico de escalera.

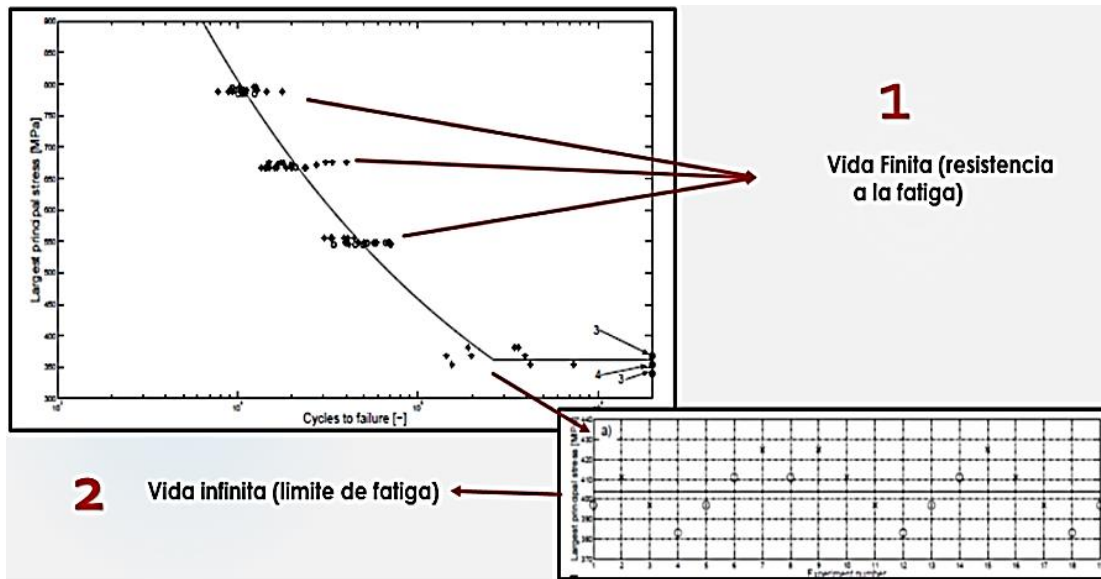


Figura 5.11. Etapas de desarrollo experimental para determinar resistencia y vida a fatiga de unión soldada [37]

### 5.5.1. Procedimiento de ensayo

Para la realización de las pruebas de fatiga se empleó la máquina servo-hidráulica universal de ensayos de fatiga MTS con capacidad de 100 KN de carga máxima, aplicándose frecuencia de onda de carga de 20 Hz. En la Figura 5.12 se puede observar la colocación de las muestras en la máquina durante los ensayos. Todas las pruebas de fatiga fueron llevadas a cabo a una temperatura de 23°C.

En este procedimiento se sometieron a las muestras a cargas axiales cíclicas senoidales con una razón de carga  $R = 0.1$ , a amplitud constante de esfuerzo para cada muestra. La razón de carga  $R$  fue elegida para complementar estudios previos realizados por el proveedor [47].



En muchos casos la fase de propagación de la grieta representa una proporción considerable de vida en el caso de muestras. El IIW considera como falla a un “tamaño técnico de inicio de grieta” a la longitud mínima de  $a \approx 0.1 * t$  en profundidad, o la “fractura total” [17]. Debido a que en las pruebas experimentales no fue posible completar la fractura en las muestras de las pruebas de fatiga dentro de los ciclos seleccionados como límite de fatiga (5 millones), se consideró en el desarrollo del proyecto al “tamaño técnico de inicio de grieta” como criterio de falla. A las muestras que no rompían dentro del límite de los 5 millones se les consideró “Run out”.



Figura 5.12. Montaje de muestra en equipo de pruebas de fatiga

### 5.5.2. Etapa 1 Evaluación de resistencia a la fatiga para obtención de curva S-N

La primera etapa se realizó para determinar a la curva de vida finita  $S - N$ , para la cual se utilizó el diagrama de la Figura 5.13 y Tabla 5.6, el procedimiento es dependiente del número de muestras y niveles de carga, para determinar un nivel de confiabilidad y aplicación en diseño con base al porcentaje de replicación de a prueba. Este procedimiento fue realizado con base a las normas ASTM E466 y ASTM E739.

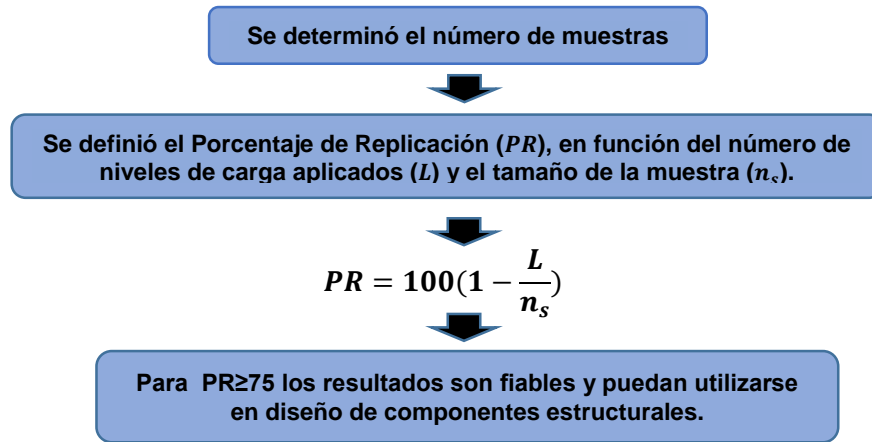


Figura 5.13. Diagrama de planeación de pruebas experimentales para determinar curva  $S - N$

$L$	$n_s$	$PR \%$
4	16	75

Tabla 5.6. Niveles y número de muestras para primera etapa experimental

Los cuatro niveles de carga de la Tabla 5.7 se calcularon tomando como base a porcentajes de la media del UTS del material soldado, obtenidos de las pruebas de tensión. Para determinar estos niveles de carga se tomaron también recomendaciones de aproximación de esfuerzo nominal en uniones soldadas del IIW (Figura 5.14), en la categoría de uniones a traslape se considera al FAT 63, tomándose como referencia la concentración de esfuerzo y falla originada en el pie descrito en la Figura 5.15.

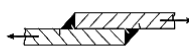
No.	Structural Detail	Description (St.= steel; Al.= aluminium)	FAT St.	FAT Al.	Requirements and Remarks
600	Lap joints				
614		Transverse loaded overlap joint with fillet welds. Stress in plate at weld toe (toe crack) Stress in weld throat (root crack)	63 36	22 12	Stresses to be calculated using a plate width equalling the weld length. For stress in plate, eccentricity to be considered, as given in chapters 3.8.2 and 6.3. Both failure modes have to be assessed separately

Figura 5.14. Clasificación de unión a solape según IIW [17]

Stress ranges		Values of constant C: $N=C/\Delta\sigma^m$ or $N=C/\Delta\tau^m$		
FAT class [MPa]	Stress at knee point $\Delta\sigma_{IRK}$ [MPa]	For stress ranges above knee point	For stress ranges below knee point	
$\Delta\sigma$ at $2E+6$ cycles	$\Delta\sigma$ at $1E+7$ cycles		Constant C: $N=C/\Delta\sigma^m$	
		$m=3$	constant amplitude $m=22$	variable amplitude $m=5$
63	36.9	$5.001E+11$	$2.983E+41$	$6.800E+14$

Figura 5.15. Valores recomendados por el IIW de curva S-N de unión a solape [17]

También, se tomaron como referencia resultados previos de fatiga de una unión soldada con el mismo material, del cual no se especificaba el procedimiento con el cual se obtuvo la curva S-N (Figura 5.16).

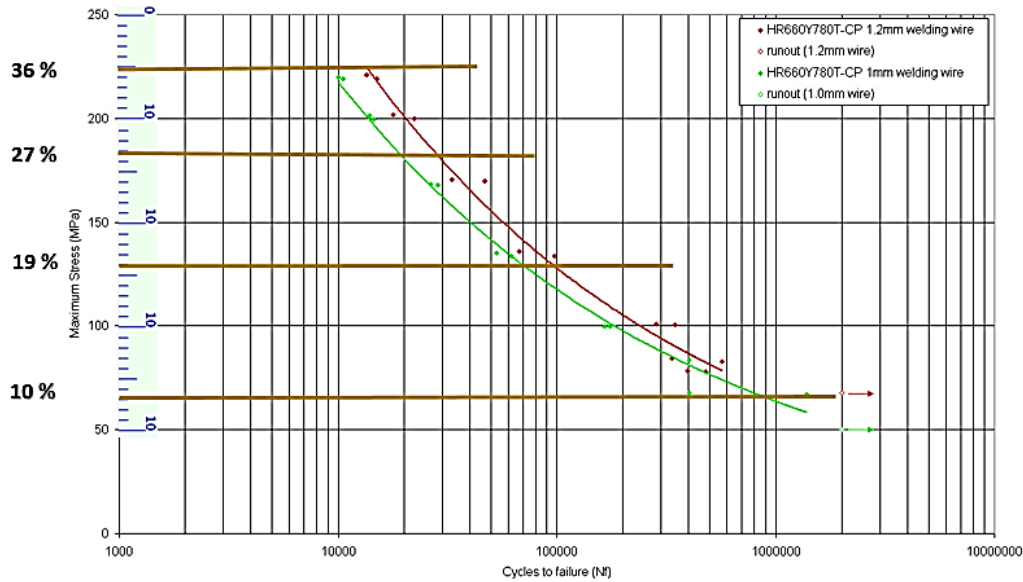


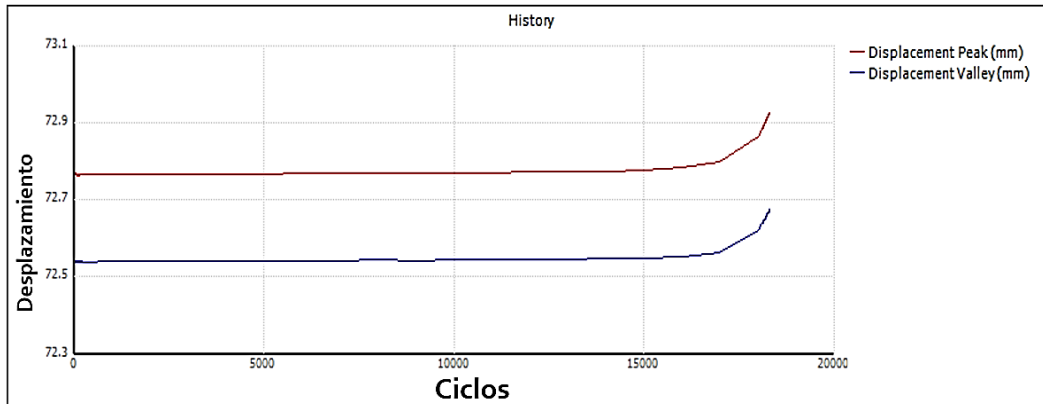
Figura 5.16. Curva de fatiga de unión soldada obtenida por datos de proveedor [47]

Esfuerzo máximo recomendado MPa	UTS %
250	36
188	27
132	19
70	10

Tabla 5.7. Niveles de carga determinados

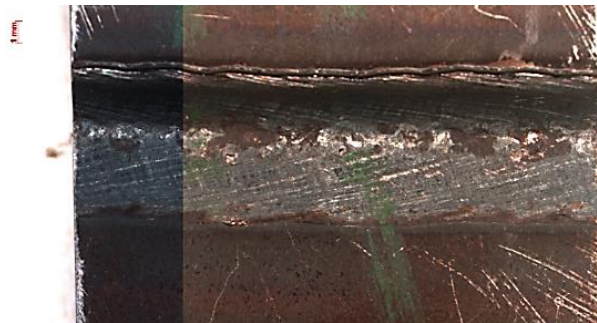
### 5.5.2.1. Resultados de primera etapa experimental de fatiga

De acuerdo al criterio de “tamaño técnico de inicio de grieta” se registró el número de ciclos de cada una de las muestras, registrándose los esfuerzos aplicados y posteriormente repitiéndose el experimento con niveles de carga diferente. El control y registro de los datos se realizó por medio del equipo de cómputo conectado al equipo de cargas, cuando se registraron desplazamientos como en la Figura 5.17 se determinaba una grieta considerable.

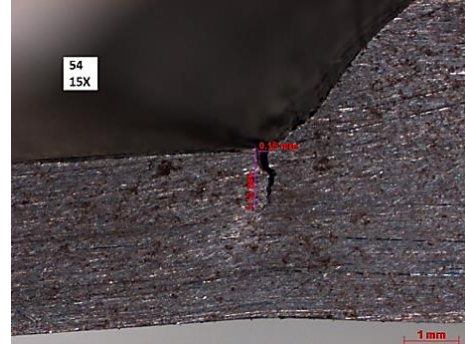
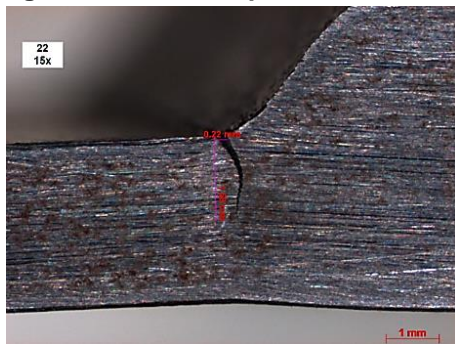


**Figura 5.17. Desplazamiento en probeta 12 que presentó falla en prueba de fatiga**

Se observó que en las muestras que fallaron, las grietas se originaron en el pie de la soldadura. En las siguientes imágenes (Figura 5.18) se puede visualizar el inicio de grieta de algunas muestras vistos por macrografía con un factor de magnificación de 15X. A las muestras que presentaron grieta antes de los 5 millones se consideraron como “falla” y las que soportaron los 5 millones de ciclos como “Run out”.



**Figura 5.18 Vista superior de muestra de grieta originada por fatiga de muestra 22**



**Figura 5.18 Vista lateral de grietas resultantes de pruebas de fatiga en muestras 22 y 54**

A continuación se muestran los resultados obtenidos por el procedimiento experimental en la Tabla 5.8, utilizados posteriormente para realizar el análisis estadístico y obtención de función de resistencia a la fatiga de curva  $S - N$ .

Orden de prueba	ID de Muestra	Área real mm <sup>2</sup>	Nivel de carga	Esfuerzo máximo MPa	Carga máxima CMAX kN	Carga mínima CMIN kN	Ciclos de falla	Falla "o" Run Out
1	11	80.20	1	251.52	20.17	2.01	5136	Falla
2	12	79.91	2	188.64	15.07	1.50	18320	Falla
3	14	80.64	3	132.75	10.70	1.07	70520	Falla
4	24	81.21	4	69.87	5.67	0.56	2640332	Falla
5	25	79.69	1	251.52	20.04	2.00	7360	Falla
6	31	81.21	2	188.64	15.32	1.53	24740	Falla
7	32	81.53	3	132.75	10.82	1.08	124060	Falla
8	41	82.23	4	64.84	5.33	0.53	5000000+	Run out
9	42	82.39	1	251.52	20.72	2.07	6240	Falla
10	43	81.94	2	188.64	15.45	1.54	23920	Falla
11	44	82.17	3	132.75	10.90	1.09	170020	Falla
12	53	82.33	4	67.35	5.54	0.55	5000000+	Run out
13	54	81.28	1	251.52	20.44	2.04	8801	Falla
14	61	81.72	2	188.64	15.41	1.54	52920	Falla
15	62	84.19	3	132.75	11.17	1.1	127921	Falla
16	63	81.98	4	69.87	5.72	0.57	5000000+	Run out

Tabla 5.8. Resultados de pruebas para determinación de curva de vida finita

### 5.5.2.2. Análisis estadístico de primera etapa experimental.

- Regresión logarítmica

La regresión lineal fue realizada con datos obtenidos, presentando un comportamiento logarítmico debido a la gran magnitud en los ciclos obtenidos. La función de la curva S-N se determinó con la relación de Basquin con la expresión 5.2, obtenida por medio de expresiones de regresión lineal 5.1.

$$\text{Log}N = a + b\text{Log} \sigma$$

$$Y = \text{Log}N \quad X = \text{Log} \sigma \quad b = -m$$

$$Y = a + bX \quad [5.1]$$

$$b = \frac{n \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \quad a = \frac{1}{n} (\sum y_i - b \sum x_i)$$

$$\alpha = (10^a)^{\frac{1}{m}} \quad \sigma = a * N^{\frac{1}{b}} \quad [5.2]$$

Donde:

$N$  = Numero de ciclos.

$\sigma$  = Esfuerzo máximo aplicado.

$b$  = Parámetros de ajuste de pendiente de la recta

$m$  = Pendiente de recta

$a$  = Parámetros de ajuste (intersección con eje de esfuerzo)

$n$  = Número de muestras

Con la Tabla 5.9 se pudo realizar la interpretación de resultados para la obtención de las curvas  $S - N$  (Figuras 5.19 y 5.20) y cálculo de límite de fatiga obtenidos a 5 millones. Los resultados 14 y 15 resultantes en la segunda fase experimental fueron considerados para complementar significativamente el análisis desarrollado. Solo se tomaron en consideración aquellas muestras que presentaron falla antes de los 5 millones de ciclos.

Orden de prueba	Ciclos N	Esfuerzo máximo ( $\sigma$ ) MPa	Log Ni	log $\sigma_i$			
					$y_i^2$	$x_i^2$	$x_i * y_i$
1	5136	251.52	3.711	2.401	13.769	5.763	8.908
2	6240	251.52	3.795	2.401	14.403	5.763	9.111
3	7360	251.52	3.867	2.401	14.953	5.763	9.283
4	8801	251.52	3.945	2.401	15.559	5.763	9.469
5	18320	188.64	4.263	2.276	18.173	5.179	9.701
6	23920	188.64	4.379	2.276	19.174	5.179	9.964
7	24740	188.64	4.393	2.276	19.302	5.179	9.998
8	52920	188.64	4.724	2.276	22.313	5.179	10.749
9	70520	132.75	4.848	2.123	23.506	4.507	10.293
10	124060	132.75	5.094	2.123	25.945	4.507	10.814
11	127920	132.75	5.107	2.123	26.081	4.507	10.842
12	170020	132.75	5.231	2.123	27.358	4.507	11.105
13	2640332	69.87	6.422	1.844	41.238	3.401	11.843
14	4004025	75	6.602	1.875	43.593	3.516	12.380
15	314746	80	5.498	1.903	30.228	3.622	10.463
Sumatorias			<b>71.877</b>	<b>32.819</b>	<b>355.593</b>	<b>72.333</b>	<b>154.923</b>

Tabla 5.9. Resultados para análisis de regresión lineal de la prueba

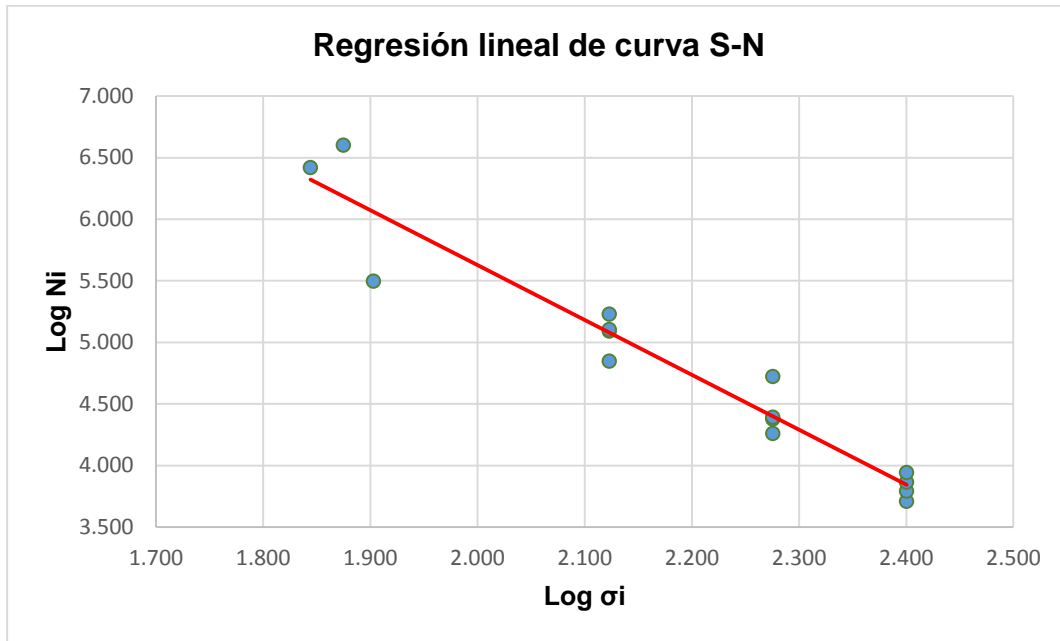


Figura 5.19. Curva de regresión lineal de los valores experimentales

**Ecuación de regresión lineal:**  $Log N = 14.542 - 4.4562 Log \sigma$

- **Correlación**

Fue determinada por datos de esfuerzo aplicado y número de ciclos que soporta este tipo de unión y fue calculada por la expresión 5.3.

$$R^2 = \frac{b * \left( \sum x_i * y_i - \frac{\sum x_i * \sum y_i}{n} \right)}{\sum y_i^2 - \frac{(\sum y_i)^2}{n}} \quad [5.3]$$

La correlación de los resultados experimentales fue:

$$R^2 = 0.9344$$

La correlación indica que cuanto más próximo sea  $R^2$  a 1 mayor será su relación, por lo tanto, los resultados experimentales de la evaluación de fatiga de la unión soldada demostraron buena relación.

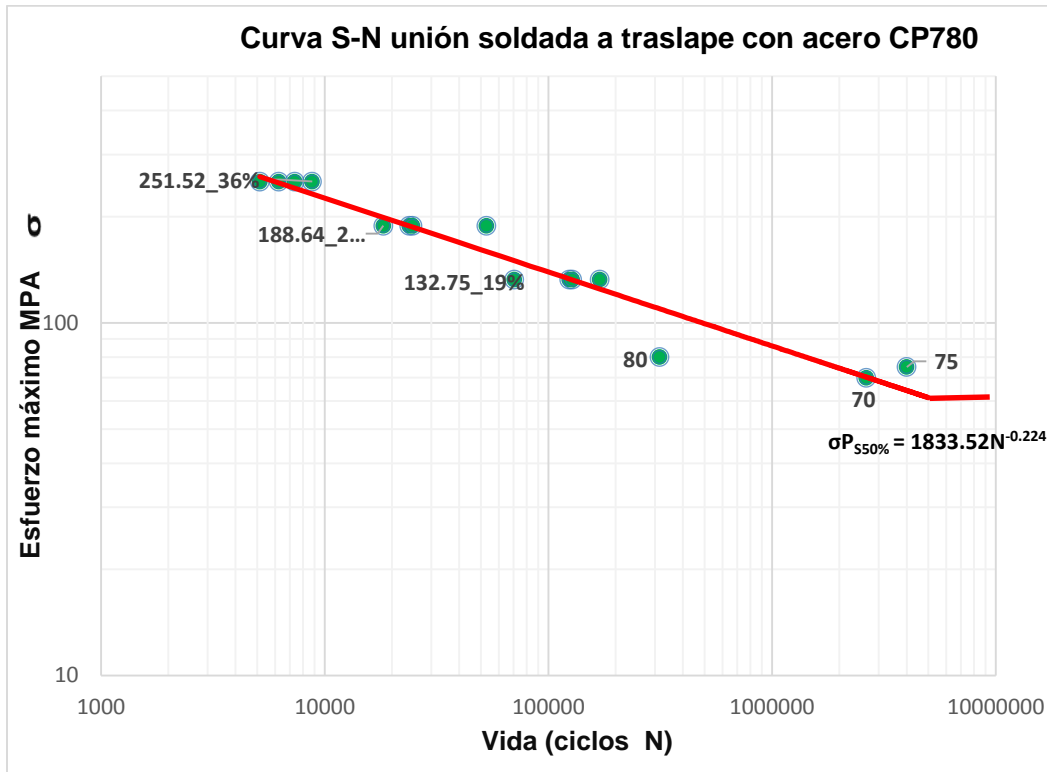


Figura 5.20. Curva S-N de regresión logarítmica de unión a traslape con acero CP780

En la Tabla 5.10 se obtiene el estimado límite de fatiga a 5 millones de ciclos.

Límite de fatiga	
Ciclos N	Esfuerzo máximo ( $\sigma$ ) MPa
$2 \times 10^6$	71.09
$5 \times 10^6$	57.54

Tabla 5.10. Resistencia a fatiga a 5 millones de ciclos

- **Probabilidad de supervivencia**

Como verificación del apropiado ajuste de las curvas  $S - N$ , se analizó la bondad de la hipótesis de una distribución de probabilidad log-normal, dibujándose los valores logarítmicos del total de ciclos de falla en un diagrama de probabilidad normal [34], en el eje de abscisas tiene el valor del logaritmo del número de ciclos hasta rotura y en el de ordenadas los cuantiles ( $P_i$ ) correspondientes de la Tabla 5.11, calculados con la relación 5.4, obteniéndose una correlación bien ajustada para cada nivel de esfuerzo ( $R^2 > 0.828$ ), tal y como muestra la Figura 5.21.



$$P_i = \frac{i-0.3}{n+0.4} \quad [5.4]$$

Falla (i)	Ciclos N	Esfuerzo máximo MPa	Log N	$P_i$
			x	y
1	5136	251.52	3.71	0.16
2	6240	251.52	3.80	0.39
3	7360	251.52	3.87	0.61
4	8801	251.52	3.94	0.84
1	18320	188.64	4.26	0.16
2	23920	188.64	4.38	0.39
3	24740	188.64	4.39	0.61
4	52920	188.64	4.72	0.84
1	70520	132.75	4.85	0.16
2	124060	132.75	5.09	0.39
3	127921	132.75	5.11	0.61
4	170020	132.75	5.23	0.84

Tabla 5.11 Valores de probabilidad para comprobación de distribución log-normal

Esta técnica es de uso común en estadística para comprobar si una serie de valores se ajusta a un tipo de distribución, en este caso a la distribución log-normal [34]. Se puede observar en la Figura 5.21, que la distribución con los datos del ensayo está centrada y sin sesgos significativos para cada nivel de esfuerzos.

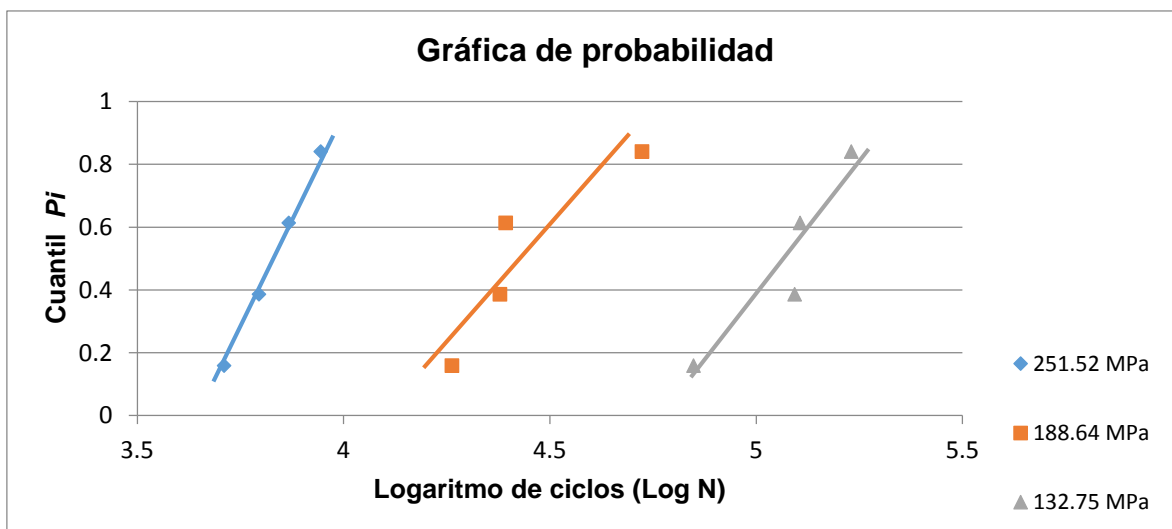


Figura 5.21. Gráfica de probabilidad de niveles de esfuerzo experimentales

$$\begin{array}{ll}
 y_{251.52} = 2.9357x - 10.742 & R^2 = 0.999 \\
 y_{188.64} = 1.3483x - 5.486 & R^2 = 0.828 \\
 y_{132.75} = 1.7156x - 8.1976 & R^2 = 0.875
 \end{array}$$

- **Distribución log-normal**

Distribución asociada a la distribución normal, utilizada para modelar porcentajes de probabilidad de supervivencia y modela la probabilidad a priori de un suceso, aplicada en especial cuando el rango de observaciones abarca varios órdenes de magnitud.

Es el resultado de aplicarle una función exponencial a una variable aleatoria normal dando ésta una variable aleatoria log-normal, la distribución tiene una orientación positiva (Figura 5.22). Por lo tanto, si se tiene una variable aleatoria log-normal, por medio de la aplicación de logaritmo natural ( $\ln$ ) se puede obtener una variable normal. Matemáticamente se denota  $X \sim N(\mu, \sigma^2)$  si la variable aleatoria  $Y = \ln X$  tiene una distribución normal, su función de probabilidad está dada por la función 5.5.

$$f(x) = \frac{e^{-\left[\frac{(\ln x - \mu)^2}{2\sigma^2}\right]}}{x\sigma\sqrt{2\pi}} \quad \text{si } x \geq 0 \quad [5.5]$$

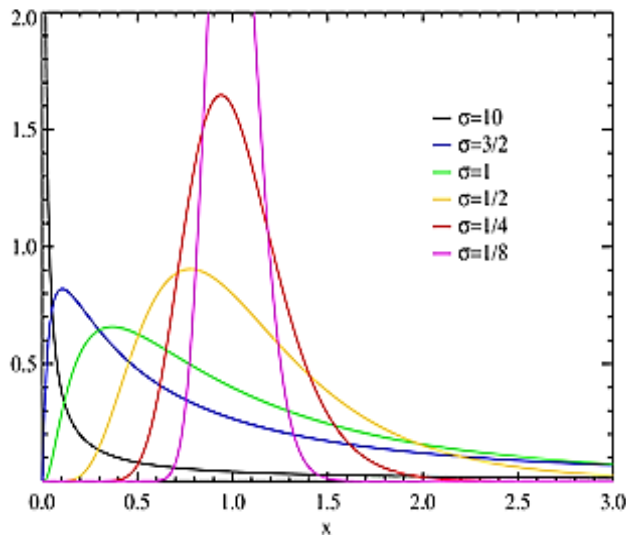


Figura 5.22. Distribución de probabilidad log-normal aplicada en análisis de probabilidad de supervivencia [34]

Los parámetros asociados a la distribución normal  $\mu$  y  $\sigma$  se pueden obtener a partir de la media y la varianza  $E(x)$  y  $V(x)$  de la distribución log-normal con las relaciones 5.6. Por lo tanto, si el valor  $x_i$  es una unidad seleccionada de una población normal (relación 5.7), la unidad estándar equivalente a  $x_i$  es el número  $z$ , representa un elemento extraído de una población normal con media 0 y desviación estándar 1 (relación 5.8), llamada “población normal estándar”. De manera práctica puede ser determinada auxiliándose de tablas  $z$  (Anexo A.1).

$$E(x) = e^{\left[\mu + \frac{\sigma^2}{2}\right]} \quad V(x) = (e^{\sigma^2} - 1)e^{2\mu + \sigma^2} \quad [5.6]$$

La probabilidad está dada por:

$$P[X \leq x_i] \quad P[X \geq x_i] = 1 - P[X \leq x_i] \quad [5.7]$$

$$z \sim N(0,1) \quad z = \frac{\ln x_i - \mu}{\sigma} \quad x_i = e^{z\sigma + \mu} \quad [5.8]$$

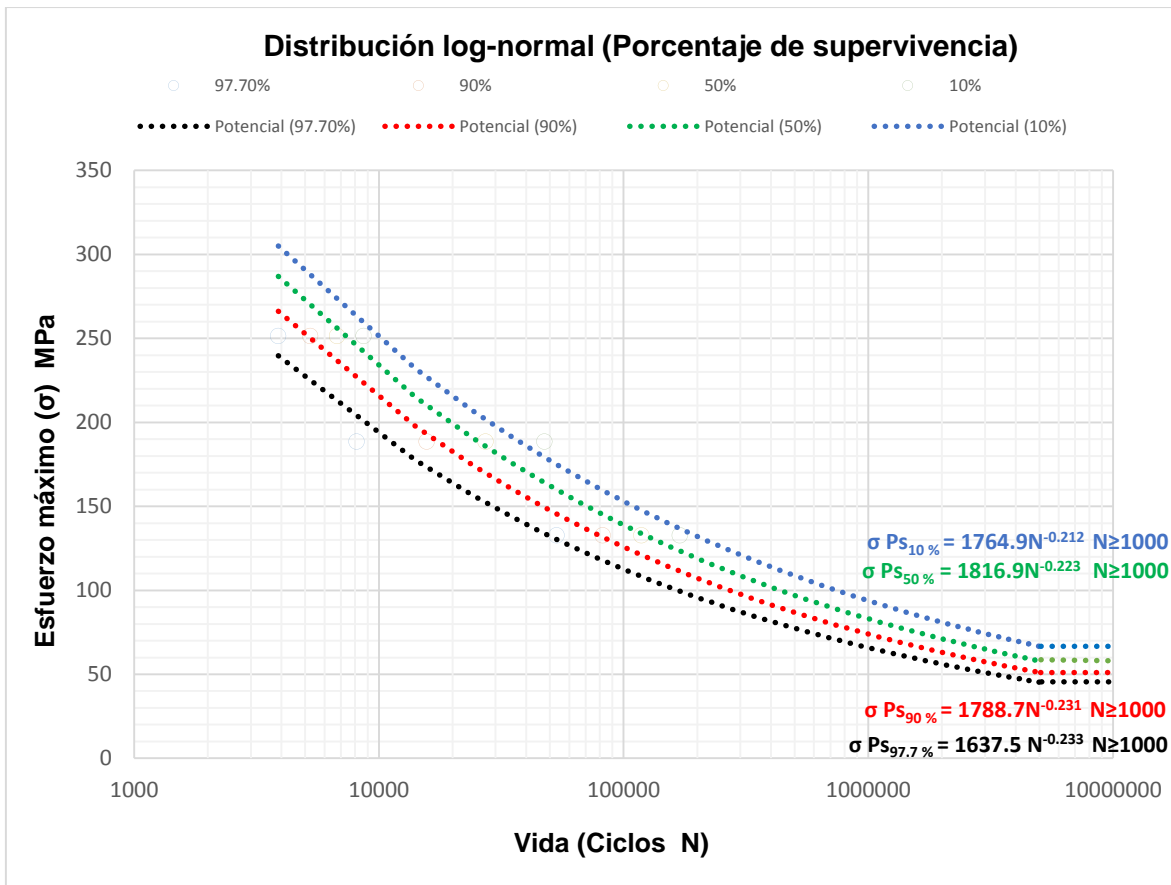


Figura 5.23. Gráficas de varios porcentajes probabilidad de supervivencia

Por medio del análisis realizado con la distribución log-normal, se obtuvieron los porcentajes de probabilidad de supervivencia para los primeros tres niveles de esfuerzo, considerando a los ciclos de ruptura  $N$  como variable aleatoria continúa.

Se consideraron cuatro porcentajes de probabilidad: 97.7%, 90%, 50% y 10%. El porcentaje de 97.7% es utilizado para compararlos con valores recomendados de resistencia a la fatiga para el tipo de unión analizado según del IIW [18], el porcentaje 90% es utilizado en la práctica (introduciendo factores de seguridad) y 10% es usado para investigaciones científicas debido a que se considera que los efectos de la soldadura son eliminados, ambos son utilizados para determinar la relación dispersión obtenida de las pruebas y para visualizar un valor medio se obtuvo el 50% [10].

Para cada nivel de esfuerzo y con el número de ciclos obtenidos respectivamente se realizó la regresión lineal para obtener las curvas de cada uno de los respectivos porcentajes de probabilidad de supervivencia. Estas curvas resultantes de la Figura 5.23, nos dan el porcentaje de probabilidad de supervivencia, indicando también la probabilidad de que la falla suceda a cierto esfuerzo aplicado, por ejemplo  $\sigma P_{s90\%}$  es el número de ciclos para el cual se espera fallen no más del 10% de la uniones soldadas (es decir, se espera que el 90% sobreviva).

- **Dispersión**

Es una relación determinada con los datos de probabilidad de supervivencia es la dispersión, es la relación entre porcentajes de confiabilidad de los resultados experimentales. Los valores de dispersión logrados en la Tabla 5.12 para la curva de referencia  $S - N$  son importantes indicadores de la calidad de los datos obtenidos en la prueba, se obtiene con la siguiente la expresión 5.9 [18]. Comparado con el 1.50 recomendado por el IIW [17] demuestra poca dispersión de probabilidad de supervivencia.

$$T_{\sigma} = 1: \left[ \frac{\sigma(10\%)}{\sigma(90\%)} \right] \quad [5.9]$$

Porcentaje de esfuerzo	Resistencia a la fatiga Mpa
$\sigma(10\%)$	103.8
$\sigma(90\%)$	62.66

Dispersión	$T_\sigma = 1:1.657$
------------	----------------------

Tabla 5.12. Resultados de análisis de dispersión

- **Análisis de confiabilidad**

Se obtuvo el intervalo de confianza de 95 % recomendado y utilizado en las normas [40]. Para realizar el análisis se utilizó la distribución *t-student* recomendada para pruebas con 30 datos o menos (Anexo A.2). Para estimar el valor de esfuerzo  $\sigma$  con respecto a un valor particular de número de ciclos  $N$  se utilizó la fórmula estadística 5.10 [32].

$$1 - p = P \left( \frac{a - t_a S \sqrt{1 + \frac{1}{n} + \frac{(X_c - \bar{X})^2}{S_x}} - Y_c}{-b} \leq X \leq \frac{a + t_a S \sqrt{1 + \frac{1}{n} + \frac{(X_c - \bar{X})^2}{S_x}} - Y_c}{-b} \right) \quad [5.10]$$

Donde:

$1-p$  = Porcentaje de confiabilidad.

$N_c$  = Valor particular de número de ciclos donde se calcula el intervalo

$Y_c$  = Log  $N_c$  (valor particular de ciclos)

$X_c$  = Valor de  $\sigma$  valuado en regresión lineal a número determinado de ciclos

$\bar{X}$  = Media de logaritmo de  $\sigma$

$t_{95}$  = Distribución probabilística *t* –estudent con  $n - 2$  grados de libertad

$S$  = Desviación estándar de los valores estimados con la regresión lineal

$$S = \sqrt{\frac{S_y - b \cdot S_{xy}}{n-2}}$$

$$S_x = \sum x_i^2 - \frac{(\sum x_i)^2}{n} \quad S_y = \sum y_i^2 - \frac{(\sum y_i)^2}{n} \quad S_{xy} = \sum x_i y_i - \frac{\sum x_i y_i}{n} \quad [5.11]$$

Para determinar el intervalo de confiabilidad resultante del procedimiento de fatiga se tomaron de entre  $1 \times 10^3$  y  $5 \times 10^6$  números de ciclos aleatorios, para poder realizar las curvas de regresión de los límites inferiores y superior del intervalo de confiabilidad de 95%. La Tabla 5.13 fue utilizada para los cálculos de intervalo de confianza.

Esfuerzo máximo							
	Ciclos (N)	( $\sigma$ ) MPa	log N	log $\sigma$			
	Y	X	Y <sub>i</sub>	X <sub>i</sub>	Y <sub>i</sub> <sup>2</sup>	X <sub>i</sub> <sup>2</sup>	X <sub>i</sub> * Y <sub>i</sub>
1	5136	251.52	3.711	2.401	13.769	5.763	8.908
2	6240	251.52	3.795	2.401	14.403	5.763	9.111
3	7360	251.52	3.867	2.401	14.953	5.763	9.283
4	8801	251.52	3.945	2.401	15.559	5.763	9.469
5	18320	188.64	4.263	2.276	18.173	5.179	9.701
6	23920	188.64	4.379	2.276	19.174	5.179	9.964
7	24740	188.64	4.393	2.276	19.302	5.179	9.998
8	52920	188.64	4.724	2.276	22.313	5.179	10.749
9	70520	132.75	4.848	2.123	23.506	4.507	10.293
10	124060	132.75	5.094	2.123	25.945	4.507	10.814
11	127921	132.75	5.107	2.123	26.081	4.507	10.842
12	170020	132.75	5.231	2.123	27.358	4.507	11.105
15	2640332	69.87	6.422	1.844	41.238	3.401	11.843
13	4004025	75	6.602	1.875	43.593	3.516	12.380
14	314746	80	5.498	1.903	30.228	3.622	10.463
N=15	Sumatoria	<b>2516.51</b>	<b>71.877</b>	<b>32.819</b>	<b>355.593</b>	<b>72.333</b>	<b>154.923</b>

**Tabla 5.13. Valores para cálculo de intervalo de confianza**

A continuación se puede visualizar en la gráfica 5.24 el intervalo de confianza de 95 %, en donde las líneas inferior y superior delimitan el intervalo de seguridad, se muestran las respectivas expresiones de Basquin para cada curva.

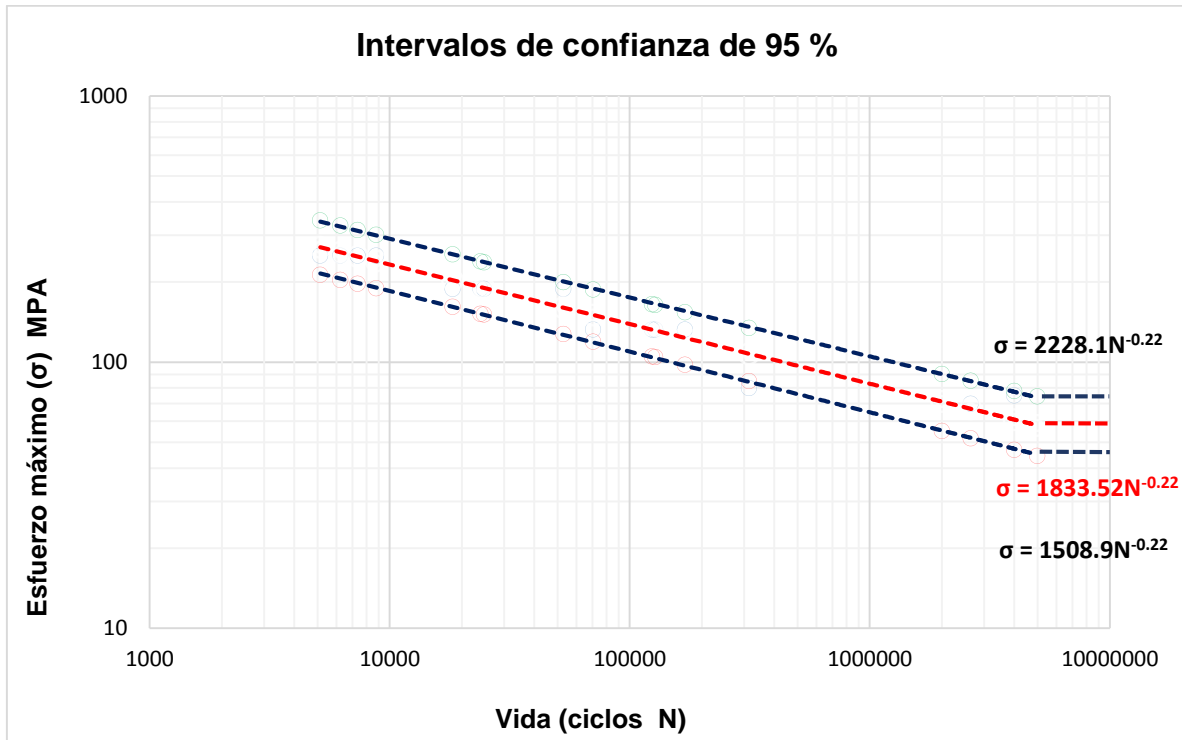


Figura 5.24. Gráfica de intervalo de confianza de 95 % de pruebas experimentales

En el intervalo de confianza  $X = \text{Log}(\sigma)$ , tomando el logaritmo inverso se obtiene un intervalo de confianza del 95 % para el esfuerzo  $\sigma$ , como se muestra en la Tabla 5.14.

Intervalo de confianza a $5 \times 10^6$ ciclos			
95 %	1.644	$\leq X \leq$	1.872
95 %	44.44	$\leq \sigma \leq$	74.50

Tabla 5.14. Valores límites de intervalos de confianza a 5 millones de ciclos

Con el cálculo de intervalo de confianza se tiene una seguridad del 95% de que la media poblacional, es decir los valores de resistencia y el límite de fatiga calculado a 5 millones de la curva S-N de la unión soldada a traslape con acero CP780 se localizan dentro de este rango de esfuerzo, y puede ser utilizado para fines de diseño.

### 5.5.3. Etapa 2 Evaluación de límite de fatiga con método de escalera

El límite de fatiga de la unión soldada, es decir en punto en el que la línea  $S - N$  pasa a ser una línea horizontal, depende principalmente de características geométricas, magnitud de esfuerzo aplicado y propiedades del material. Para el límite de fatiga con cargas de amplitud constante el IIW adopta 10 millones de ciclos [17], mientras que el Eurocódigo 3 un límite de 5 millones de ciclos [27].

Tomando en cuenta estas recomendaciones, desde un principio para usos prácticos, tiempo de desarrollo experimental del proyecto y de acuerdo a limitantes de la empresa, se utilizó un límite de fatiga en 5 millones de ciclos.

#### 5.5.3.1. Resultados de segunda fase experimental

Los resultados obtenidos siguiendo el procedimiento del método de escalera (ME) se muestran en la Tabla 5.15, estos fueron analizados estadísticamente para determinar el límite de fatiga de la unión evaluada.

Orden de prueba	ID de Muestra	Prueba	Nivel de carga	Esfuerzo Nominal máximo MPA	Carga máxima CMAX kN	Carga mínima CMIN kN	Ciclos de falla	Observaciones
4	24	Fatiga	4 (ME)	69.87(70)	5.67	0.56	2640332	falla
8	41	Fatiga	4 (ME)	64.84(65)	5.33	0.53	5000000+	run out
12	53	Fatiga	4 (ME)	67.35(67.5)	5.54	0.55	5000000+	run out
16	63	Fatiga	4 (ME)	69.87 (70)	5.72	0.57	5000000+	run out
17	15	Fatiga	ME	75.00	6.01	0.60	4004025	falla
18	21	Fatiga	ME	70.00	5.61	0.56	5000000+	run out
19	22	Fatiga	ME	80.00	6.41	0.64	314746	falla
20	33	Fatiga	ME	75.00	6.05	0.60	5000000+	run out

Tabla 5.15. Resultados de pruebas de fatiga con método de escalera

#### 5.5.3.2. Análisis estadístico de segunda etapa experimental

El límite de fatiga y desviación estándar (Tabla 5.17) con el método de escalera (Figura 5.25), se obtuvieron interpretando las aproximaciones estadísticas de la Tabla 5.16 calculadas con las ecuaciones en 5.12 y 5.13 [10]:

$$\bar{X} = X_o + d * \left[ \frac{B}{A} - \frac{1}{2} \right] \quad [5.12]$$



$$s = 1.620 * d * \left[ \frac{A * C - B^2}{A^2} + 0.029 \right] \quad \text{"si" } \frac{A * C - B^2}{A^2} \geq 0.3$$

$$\text{"O" } s = 0.53 * d \quad \text{"si" } \frac{A * C - B^2}{A^2} < 0.3 \quad [5.13]$$

Dónde:  $A = ni$                        $B = i * ni$                        $C = i^2 * ni$

- $X_0$ = Primer nivel de esfuerzo
- $d$ = Incremento de esfuerzo
- $i$ = Numero nivel de esfuerzo
- $ni$ = Numero de muestras rotas por nivel
- $\bar{X}$ = Valor límite de fatiga (media)
- $s$  = Desviación estándar

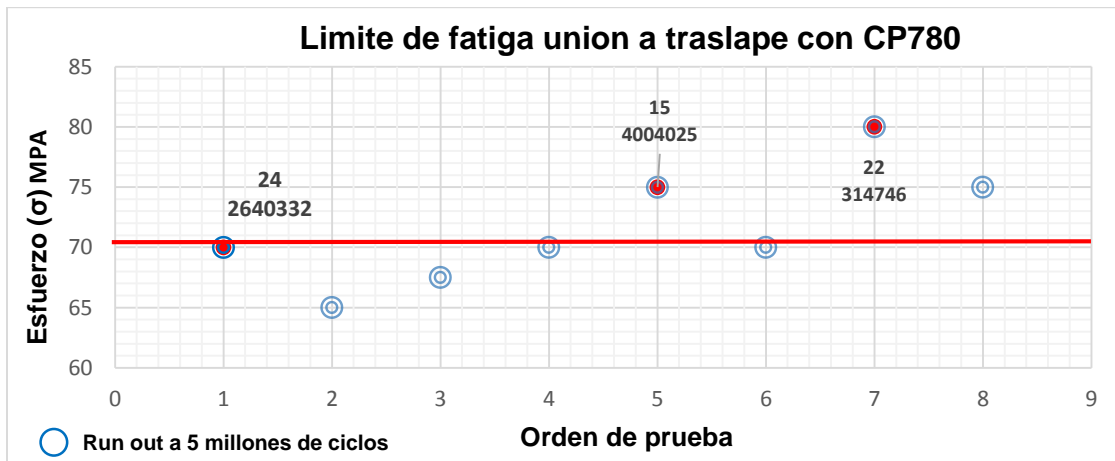


Figura 5.25. Gráfica de resultados de límite de fatiga aplicando método de escalera

Nivel de esfuerzo (i)	Esfuerzo máximo (σ)	ni	i * ni	i <sup>2</sup> * ni
0	65	0	0	0
1	70	1	1	1
2	75	1	2	4
3	80	1	3	9
Sumatoria		A = 3	B = 6	C = 14

Tabla 5.16. Interpretación de resultados utilizando método de escalera

Límite de fatiga	
$\bar{X}$	72.5
$S$	5.6349

Tabla 5.17. Límite de fatiga y desviación estándar a 5 millones de ciclos

### 5.6. Análisis de resultados experimentales con recomendaciones de normativa

Se realizó la comparativa de la curva de regresión lineal de los resultados experimentales con la S-N del material base (Figura 5.26), en la Tabla 5.18 se muestran los valores comparativos de límite de fatiga a 2 y 5 millones de ciclos.

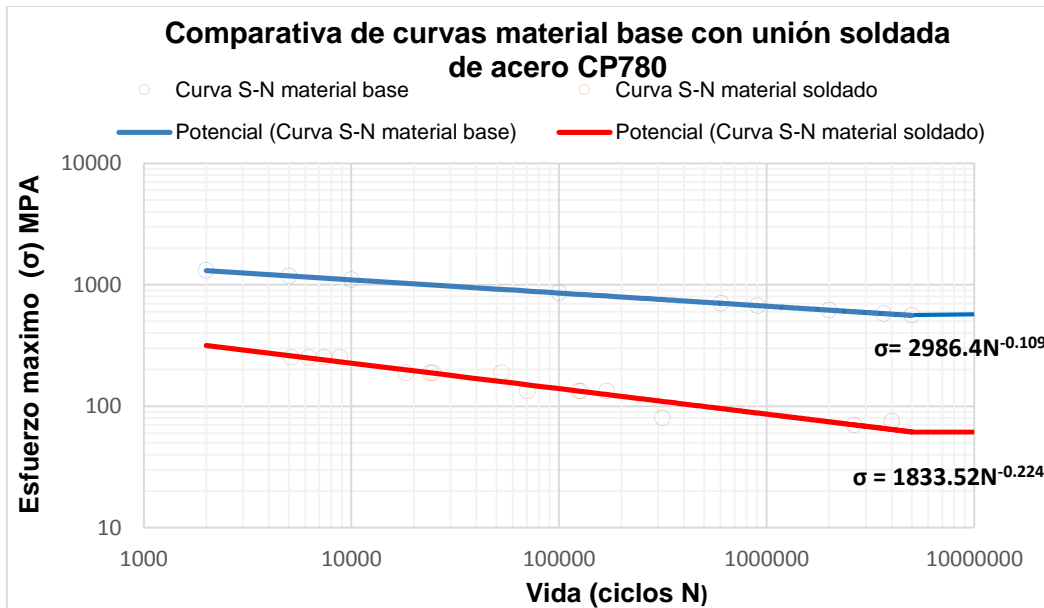


Figura 5.26. Gráfica de comparativa de curva S-N unión soldada y material base

Curva S-N	Límite a la fatiga MPa
Material base CP780	555.77
Unión soldada a traslape	57.90

Tabla 5.18. Comparativo de curvas S-N de material CP780 base con unión soldada

La reducción de resistencia en este tipo de unión soldada disminuye de manera considerable cuando es sometida a fatiga, con estos se comprueba que la

resistencia del material base no influye de manera significativa. También, se realiza la comparación de curva experimental con la curva de diseño FAT 63 recomendada por el IIW (Figura 5.27) para el tipo de unión a traslape, para poder realizar esta comparación se toma el rango de esfuerzo aplicado, posteriormente en la tabla 5.19 se presentan los valores comparativos de límite de fatiga a 2 y 5 millones de ciclos.

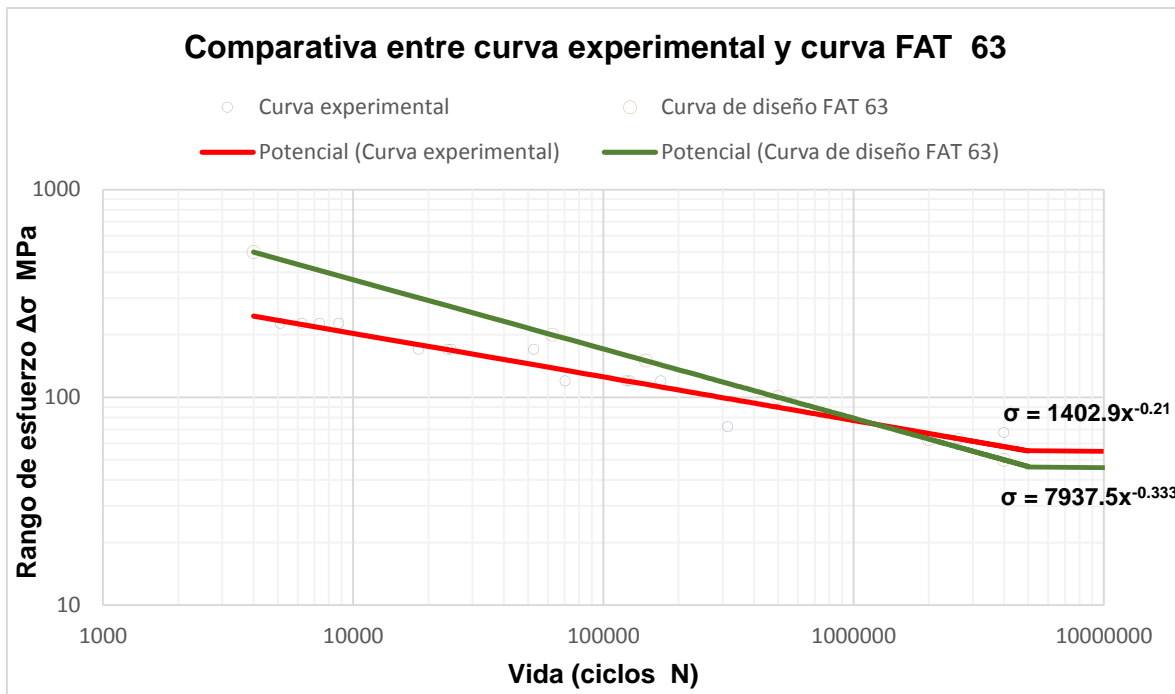


Figura 5.27 Gráfica de comparativa de curva S-N de unión soldada y curva de diseño FAT 63

Comparativa de límite de fatiga		
CICLOS	FAT 63 MPa	Unión soldada MPa
$2 \times 10^6$	63	63.60
$5 \times 10^6$	46.65	51.78

Tabla 5.19. Comparativo de curvas S-N soldada de material CP780 con normativa IIW

Los resultados obtenidos de límite de fatiga a 2 y 5 millones de ciclos en las pruebas experimentales son superiores a los recomendados por la norma, con lo cual se garantiza un buen proceso de soldadura utilizando aceros CP780 un este tipo de unión a traslape.

## 6. Fase de simulación

La simulación por FEM en el área de ingeniería mecánica se realiza generalmente para prever el comportamiento mecánico de una estructura completa o parte de ella en la etapa de diseño. En el presente proyecto la simulación FEM fue realizada modelando la unión a traslape utilizada en las uniones del chasis de VCL que también fue analizada en la etapa experimental.

La fase de simulación fue desarrollada en tres etapas. Comenzando con el pre-procesamiento, en donde se realizó el diseño de un modelo CAD que representó a la geometría de la unión soldada, con el fin de que este fuera compatible con software de elementos finitos, para la discretización, aplicación de fuerzas y condiciones de frontera y así realizar el análisis en simulación en el procesamiento.

Posteriormente, estos datos obtenidos en el procesamiento se post-procesaron y utilizaron para el análisis de fatiga para la obtención de las curvas S-N resultantes de manera gráfica y sus funciones correspondientes. Finalmente, se realizó la comparativa con los resultados experimentales para la obtención de conclusiones. El desarrollo del análisis FEM fue realizado siguiendo las etapas del modelo propuesto de la Figura 4.8 del capítulo 4.

### 6.1. Pre-procesamiento

#### 6.1.1. Diseños CAD de unión soldada a traslape

Como primera etapa se realizó el modelado CAD con el uso del software CATIA V5, realizado a partir del modelo experimental de la probeta. Proponiéndose a la raíz con un radio de  $r_{ref} = 0.3$  y el pie el radio de  $r_{ref} = 0.05$ , de tal manera que la geometría fuera próxima a la utilizada en la fase experimental, estos radios se apegaron a recomendaciones descritas en la Figura 4.6 del capítulo 4. Inevitablemente, la geometría fue modificada para poder generar la malla propuesta por el método, respetándose la funcionalidad real de la unión.

Las medidas fueron representativas de las probetas resultantes del proceso de soldadura, tomándose los parámetros geométricos de la muestra 25 que contaba con las dimensiones más cercanas a las medidas promedio, estas son mostradas

en la Tabla 6.1, resultado de mediciones realizadas por macrografía. A continuación se visualizan el modelo CAD de la probeta en la Figuras 6.1 y 6.2.

ID de muestra	Calibre de placa mm	Angulo de pie mm	Cuello mm	Gap mm	Distancia de placa superior a pie mm	Radio del pie de la soldadura °
25	3.2	48.30	3.28	0.19	4.53	0.00

Tabla 6.1. Medidas de muestra 25 utilizada para modelado de muescas

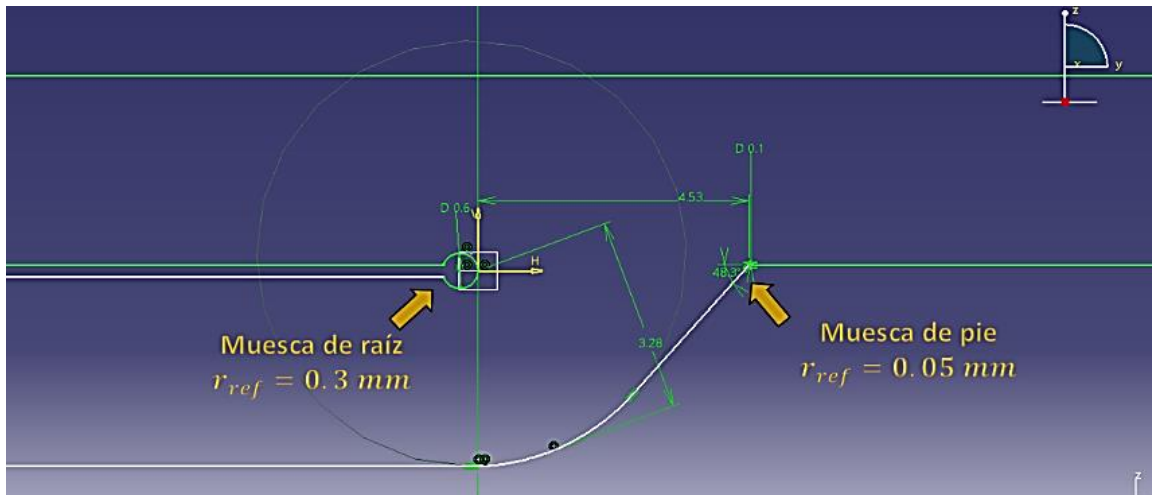


Figura 6.1. Geometría CAD de probeta con radios de referencia

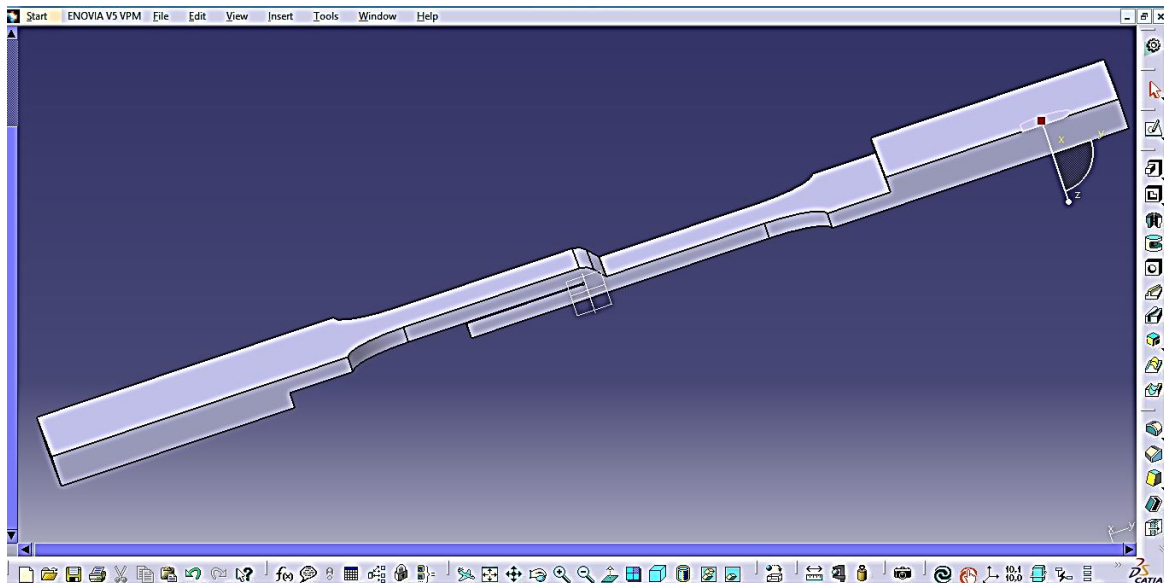


Figura 6.2. Modelo CAD 3D de probeta para la aproximación de esfuerzo de muesca

### 6.1.2. Discretización aplicando técnica de mallado

La discretización o mallado fue realizado en Hypermesh que es el módulo para mallado del software Hyperworks 12.0. Primero se importó la geometría del módulo CAD con la extensión .stp o .igs., después, el mapeo de la unión se realizó por medio de parámetros de discretización obtenidos de la técnica de mallado [22] utilizando el procedimiento descrito en el capítulo 4. Los parámetros de mapeo de muesca en la raíz fueron obtenidos con base al diseño  $j/V/Z$  siendo éste 24/1/1 (Figura 6.3), que contiene las siguientes distancias entre los anillos mostrados en la Tabla 6.2.

R1	R2	R3	R4	R5	R6
0.078	0.102	0.132	0.172	0.224	0.291

Tabla 6.2. Distancias entre anillos de diseño de raíz

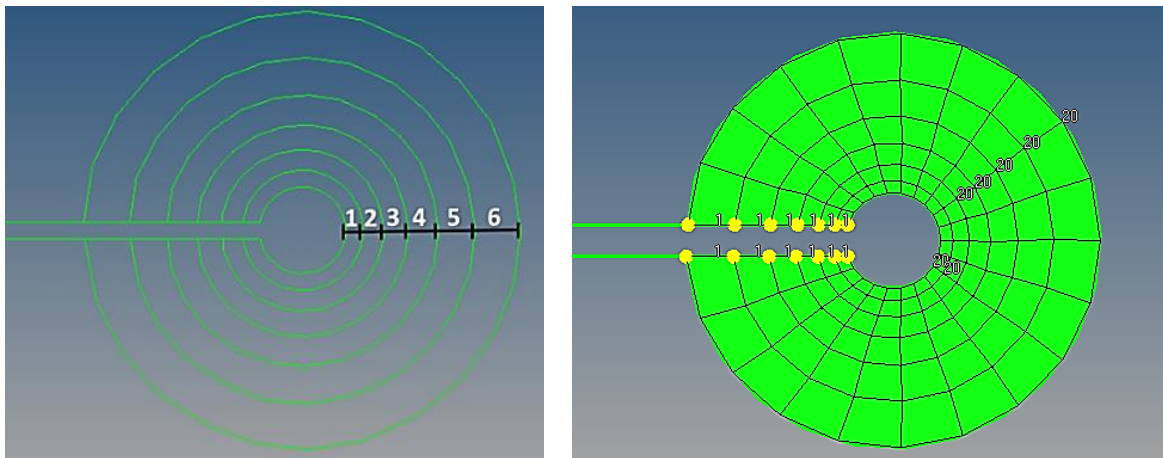


Figura 6.3. Discretización de la raíz de unión soldada

El diseño  $j/V/Z$  realizado para el pie de la unión fue 16/1/1 (Figura 6.4), que contiene las siguientes distancias entre los anillos descritos en la Tabla 6.3.

R1	R2	R3	R4	R5	R6
0.019	0.024	0.029	0.035	0.043	0.053

Tabla 6.3. Distancias entre anillos de diseño de pie

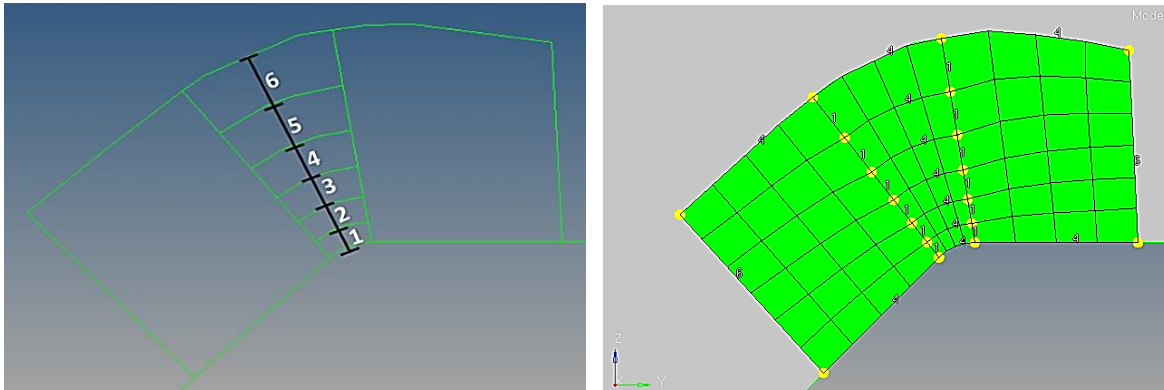
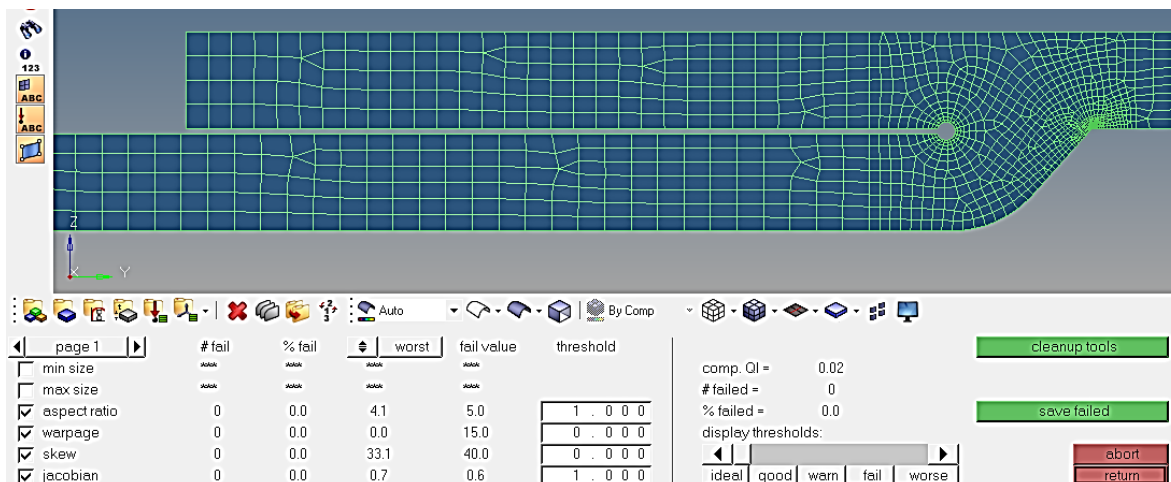


Figura 6.4. Discretización del pie de unión soldada

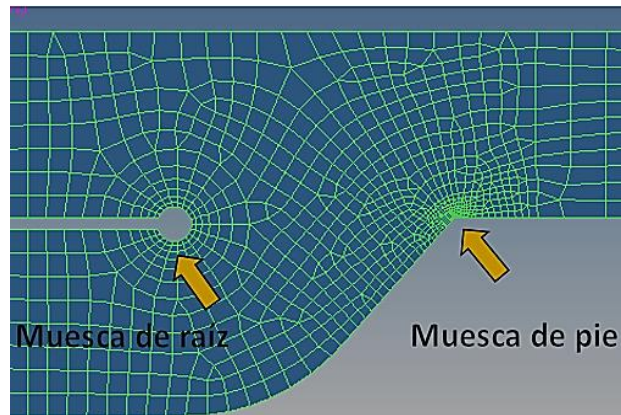
Para garantizar la calidad de la malla en el modelo, se enfocó a que el mallado fino se concentrara en el pie y la raíz de la unión soldada y en las partes alejadas de estas zonas con elementos más gruesos, con el fin ahorrar tiempo en el procesamiento FEM [18,21, 22].

Este mallado se realizó tomando en cuenta parámetros como Jacobiano, Skew (oblicuidad), Warpage (deformación) y Aspect ratio (relación de aspecto), para el control de calidad general de los elementos como en la Figura 6.5 (a). El ajuste se hizo de manera manual, debido a la transición de tamaños en los puntos de interés.

La malla 2D puede visualizarse en la Figura 6.5 (b), garantizando una buena calidad de mallado, permitiendo obtener mejores aproximaciones en el análisis por FEM.



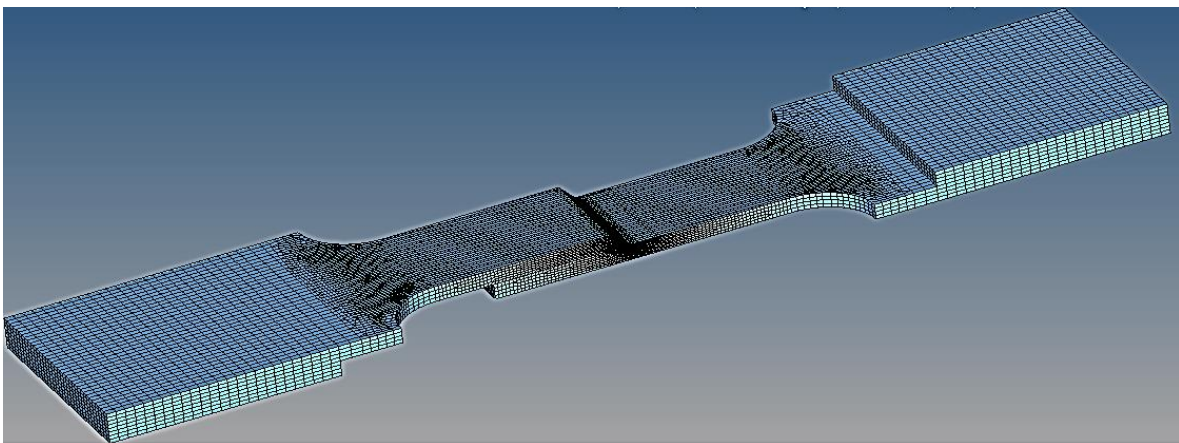
(a)



(b)

**Figura 6.5. Visualización de calidad de malla 2D**

El mallado 3D se realizó con una correcta transición de mallas fina a mallas gruesas, tomando en cuenta la continuidad de los elementos. Los elementos utilizados fueron hexaédricos en la zona de muesca y se combinaron elementos tipo hexaédrico y tetraédrico en zonas más alejadas, pudo ser configurada de esta forma por su menor influencia en el resultado, de igual forma se puso interés en la calidad de malla de la Figura 6.6. El número total de elementos en la probeta 3D son 101804 y 115227 nodos.

**Figura 6.6. Visualización de mallado 3D de probeta**



### 6.1.3. Asignación de propiedades elásticas

Las propiedades elásticas asignadas en Hypermesh con las herramientas de procesador Optistruct fueron módulo elástico de 205 GPa y un módulo de Poisson de 0.33. Estas propiedades son características de varios aceros dúctiles, se consideró al material como isotrópico, es decir, con propiedades idénticas en todas las direcciones de la unión.

### 6.1.4. Asignación de cargas y restricciones

La asignación de cargas y restricciones se realizó de acuerdo a como fueron aplicadas a la muestra en el procedimiento experimental. En la Figura 6.7 se visualiza como estuvieron asignadas las restricción de desplazamientos en los ejes X, Y y Z en el plano cartesiano. Las fuerzas aplicadas (cargas) fueron asignadas en dirección al eje Y positivo (tensión).

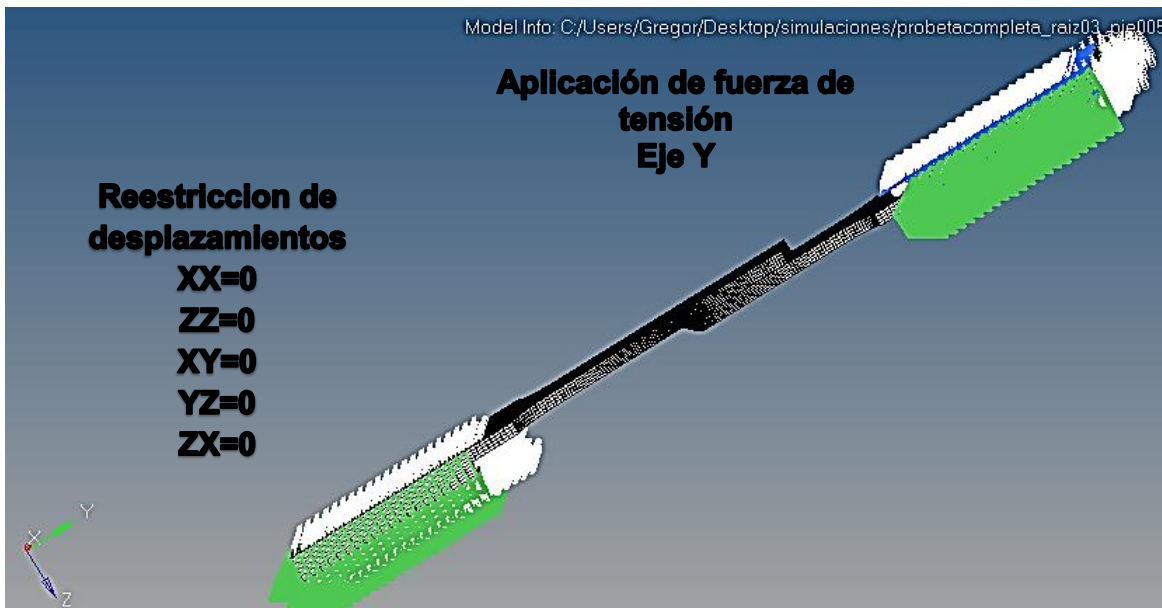


Figura 6.7. Aplicación de cargas y restricciones en la pieza simulada en las diferentes direcciones del sistema cartesiano

## 6.2. Procesamiento (análisis estático lineal)

El análisis FEM elástico estático lineal se realizó con el procesador OptiStruc de Hyperworks 12.0. De los resultados de este análisis se obtuvieron los Esfuerzos

Principales Máximos ( $EPM$ ) y Esfuerzos de Von Mises ( $EVM$ ), ya que a partir de estos valores se pudo determinar a los valores de los concentradores de esfuerzo de fatiga ( $K_f$ ) de la unión, tanto de la raíz y el pie de la unión soldada usando la ecuación 4.1 [11].

Se pudo visualizar por medio del módulo HyperView a las zonas afectadas en donde existe la mayor concentración de esfuerzos, estáticamente más propensas a la falla tanto de raíz y pie de la unión (Figura 6.8).

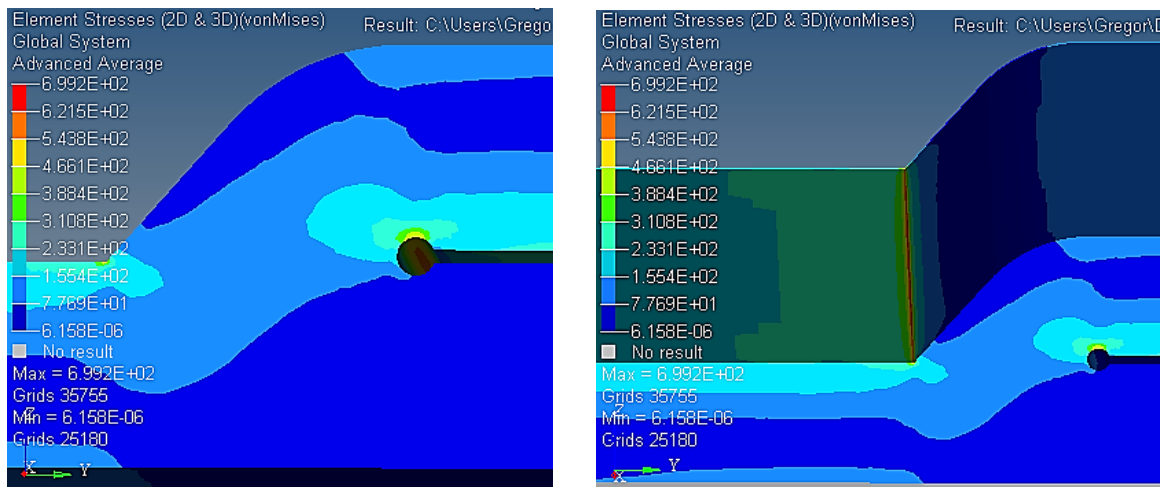


Figura 6.8. Concentración de esfuerzos en la raíz y pie de la unión

Se calcularon los concentradores de esfuerzo de fatiga con los  $EVM$  y  $EPM$ , estos son mostrados en la Tabla 6.4.

Radio mm	Ubicación	$K_f$ EVM	$K_f$ EPM
0.05	Pie	9.71	12.49
0.3	Raíz	8.08	10.24

Tabla 6.4 Factor de concentrador de esfuerzos de fatiga de pie y raíz de la unión soldada

Con este modelo FE desarrollado de la unión soldada, los cálculos del factor de intensidad de esfuerzo de fatiga ( $K_f$ ) mostraron que en el pie de la unión se encuentra un mayor  $K_f$  en comparación con el  $K_f$  calculado en la raíz, esto es debido principalmente a la discontinuidad geométrica y a un existente esfuerzo de flexión en el pie de la unión, cuando es aplicada una fuerza de tensión. Observándose

también que tanto en simulaciones al igual el desarrollo experimental se muestra a la falla con origen en el pie de la soldadura cuando ésta es sometida a esfuerzo de tensión.

### 6.3. Post-procesamiento (Análisis dinámico de fatiga)

Este análisis se realizó utilizando el software nCode DesingLife, aquí se realizó el cálculo de fatiga utilizando los resultados del análisis FEM. El método de análisis de fatiga y de cálculo de daño acumulado fue realizado por medio del análisis estándar  $S - N$ , aplicado en la unión soldada siguiendo la metodología propuesta.

#### 6.3.1. Etapas de análisis estándar S-N con software nCode

A continuación en el diagrama 6.9 se puede visualizar las etapas de análisis de fatiga estándar, es descrito de acuerdo a las funciones de cada bloque del módulo nCode DesingLife.

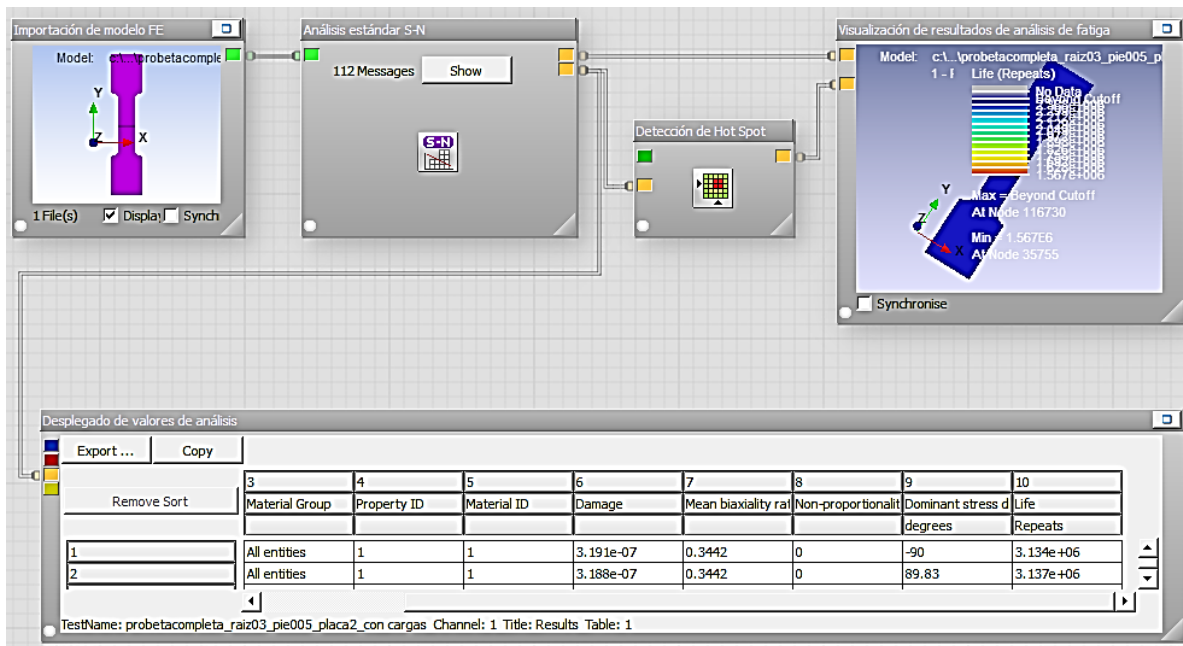


Figura 6.9. Análisis de fatiga en DesingLife de nCode

### 6.3.1.1. Importación de modelo FEM

En este bloque se realizó la importación del modelo con los resultados FEM con la extensión .op2, se pudieron visualizar los resultados de esfuerzo  $EVM$ ,  $EPM$  y desplazamientos obtenidos en el análisis estático lineal.

### 6.3.1.2. Análisis estándar S-N

La operación básica del análisis de fatiga estándar  $S - N$  se puede resumir en el diagrama (Figura 6.10).

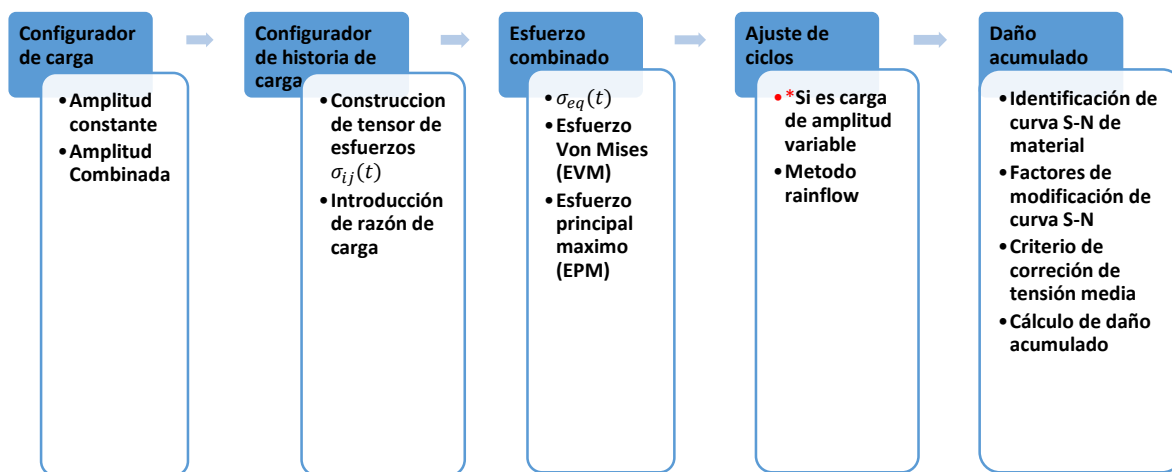


Figura 6.10. Configuración de análisis de fatiga estándar  $S - N$  [39]

#### 6.3.1.2.1. Configuración de carga

Este proceso se realizó configurando el análisis  $S - N$  para una carga con una amplitud constante, tal como fue realizado en las pruebas físicas con el tipo de carga de tensión-tensión.

#### 6.3.1.2.2. Configurador de historia de tensor de esfuerzos

Aquí se configuraron las cargas como una función de tiempo, el tensor de esfuerzos es ensamblado a partir de la información de la razón de carga  $R$  aplicada a la carga de amplitud constante. El post-procesador usa una superposición lineal para crear en el caso de esfuerzo estático dos puntos de historia de esfuerzo  $\sigma_{ij}(t)$  para todas las cargas.

Primer punto:

$$\sigma_{ij} = \sum_k (Maxfactor) k * \sigma_{sij,k,static} \quad Maxfactor = 1 \quad [6.2]$$

Segundo punto:

$$\sigma_{ij} = \sum_k (Minfactor) k * \sigma_{sij,k,static} \quad Minfactor = 0.1 \quad [6.3]$$

Con razón de carga de:

$$R = \frac{Maxfactor}{Minfactor} = 0.1 \quad [6.4]$$

Donde  $k$  es el identificador de caso de carga.

#### **6.3.1.2.3. Esfuerzo combinado.**

En este análisis se extrajeron los parámetros del tensor esfuerzo, con el fin de realizar los cálculos de fatiga es necesario reducir el tensor de esfuerzos a un valor escalar, de modo que se pudieron contar los ciclos y comparar los resultantes ciclos a una curva S – N. Este proceso es llamado combinación de esfuerzos.

La opción disponible para calcular el daño por esfuerzo combinado que fue tomada en cuenta fueron los esfuerzos resultantes de Von Mises (EVM). Estos EVM son una magnitud física proporcional a la energía de distorsión, se usa en el contexto de teorías de fallo como criterio de falla en diseño para materiales dúctiles [48].

#### **6.3.1.2.4. Daño acumulado**

En esta etapa, se tomó en cuenta la curva S-N del material base y factores que influyen en la resistencia a la fatiga de una unión soldada, el software calculó el daño de la unión, así obtuvo los ciclos de vida a determinada carga. Este proceso es descrito a continuación.

##### **6.3.1.2.4.1. Identificación de curva S-N de material**

Con la información de propiedades mecánicas y elásticas del material base CP780 se calcularon los parámetros de la curva S-N de acuerdo a la Figura 6.11,

los datos fueron calculados en base a teoría de fatiga de materiales con las formulas 6.5, descritas en los fundamentos teóricos del software [39], los parámetros de la curva son mostrados en la Tabla 6.4.

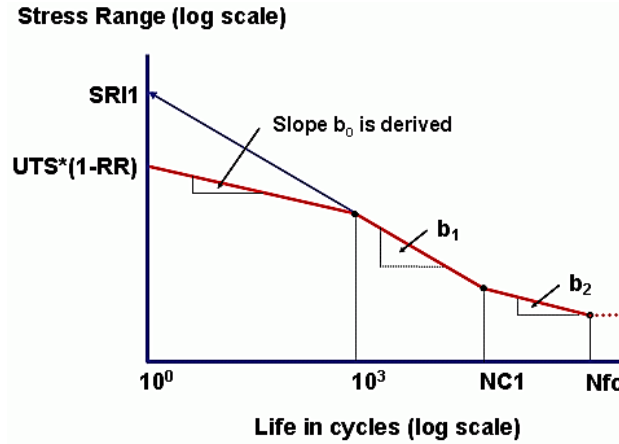


Figura 6.11. Parámetros de curva característica S-N de software nCode utilizados en fase de simulación [39]

$$S1 = 0.9 \times UTS \quad S2 = 0.357 \times UTS$$

$$b1 = \frac{\log(S2) - \log(S1)}{\log(Nc1) - 3} \quad SR1 = \frac{(2 \times S2)}{(Nc1)^{b1}} \quad [6.5]$$

	Dato	Valor
	S1	704.7
	S2	279.531
Esfuerzo de cedencia	YS	682
Esfuerzo último de tensión	UTS	783
Módulo elástico	E	2.06x10 <sup>5</sup>
Coefficiente de Poisson	me	0.33
Intercepción de esfuerzo con eje de esfuerzo	SR1	2986.44
Primer exponente de resistencia a la fatiga	b1	-0.1086
Transición de la segunda pendiente b2 (limite)	NC1	5e6
Segundo exponente de resistencia a la fatiga.	b2	0
Razón de esfuerzo	RR	-1

Tabla 6.5. Parámetros y nomenclatura de curva utilizados para el análisis

La curva teórica S-N del acero CP780 fue definida por los valores de esfuerzo a  $1 \times 10^3$  ciclos (SR1) y  $N_{c1}$  (S2) tomando  $5 \times 10^6$  ciclos como se ve en la Figura 6.12, sus valores de límite de fatiga a 2 y 5 millones se encuentran en la Tabla 6.6.

- Función potencial de la curva  $S - N$   $\sigma = 2986.44 N^{-0.1086}$
- Función de regresión lineal de la curva  $S - N$ .  $Y = 31.97 - 9.2X$

La función de la curva S-N del fabricante es  $3010.3N^{-1099}$ , es es próxima a la curva teórica, por lo que la curva teórica fue usada para fines de simulación.

Curva S-N teórica de CP 780	
Ciclos	Límite de fatiga MPa
$2 \times 10^6$	617.82
$5 \times 10^6$	559.30

Tabla 6.6. Valores teóricos de resistencia a la fatiga de metal base

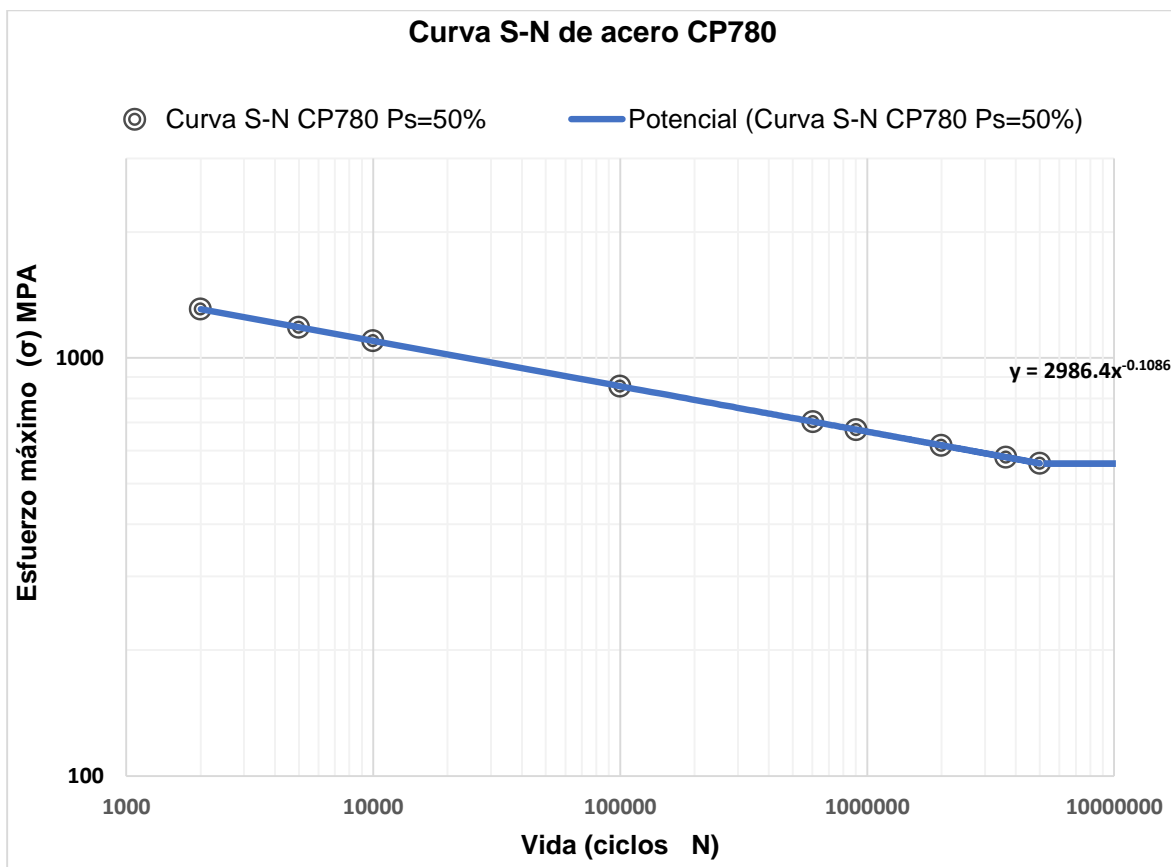


Figura 6.12. Curva teórica S-N obtenida con propiedades mecánicas y elásticas de acero CP780

#### 6.3.1.2.4.2. Consideración de factores que modifican la resistencia a la fatiga

Dentro del análisis estándar  $S - N$  se estiman diversos factores de modificación de resistencia a la fatiga en la unión soldada estudiada.

En la evaluación a fatiga de la unión soldada a traslape los factores relacionados a la geometría (espesor, desalineamiento y características geométricas de la unión) fueron tomados en cuenta en el modelo FEM. La consideración del factor de esfuerzo residual y factor de esfuerzo medio son consideradas como se describe a continuación.

- **Factor de esfuerzo residual.**

Se consideraron dos casos en los modelos de aproximación de muesca utilizando el factor de aumento de esfuerzo residual  $f(R)$ .

1. En el primer caso se consideró un esfuerzo residual de alta tensión o cuando este esfuerzo se desconoce, tomando un factor:

$$f(R) = 1$$

2. El segundo caso se consideró un esfuerzo residual despreciable, se tomó un factor:

$$f(R) = -0.4 * R + 1.2 \quad \text{Con } R = 0.1$$

$$f(R) = 1.16$$

- **Factor de esfuerzo medio**

Se tomó como factor de corrección de esfuerzo medio al método de Gerber. Esta corrección de esfuerzo es utilizado para materiales dúctiles [33]. Se utiliza para cualquier razón de carga  $R$  con la expresión siguiente.

$$\sigma_{\text{FAT}}(\mathbf{R}) = \sigma_a \frac{UTS^2}{S_m^2}$$



### 6.3.1.2.4.3. Cálculo de daño acumulado

El daño de cada ciclo es definido como  $1/N_f$ , donde  $N_f$  es el número de ciclos a la falla calculado, tomando en cuenta los efectos de: Concentrador de esfuerzos de fatiga  $K_f$ , factor de esfuerzo residual, factor de esfuerzo medio, condiciones de superficie. Por medio de la regla de Miner se predijo que la falla ocurrirá cuando el daño acumulado sea 1, es decir, la vida en repeticiones del evento o ciclos de trabajo, se determinó con la expresión 6.6.

$$N_f = \frac{1}{D} \quad [6.6]$$

### 6.3.2. Visualización de resultados

Una vez realizado el análisis de fatiga a partir de condiciones ya determinadas y asignadas al proceso de fatiga en el software, se determinó mediante la función Hot Spot la lista de elementos y nodos que presentaron más daño en el proceso análisis tal, como se ve en la Figura 6.13. También, se visualizaron los resultados de la zona más afectada en el proceso de fatiga en la unión en cada uno de los elementos y de sus respectivos nodos (Figuras 6.14, 6.15), observándose concentraciones de mayor esfuerzo en donde zonas donde teóricamente se origina la grieta.

Nodo más afectado                      Daño acumulado calculado                      Ciclos de vida calculados

Node	Shell layer	Material Group	Property ID	Material ID	Damage	Mean biaxiality ratio	Non-proportionality	Dominant stress direction (degrees)	Life (Repeats)
35755	N/A	All entities	1	1	9.472E-6	0.3442	0	-90	1.056E5
49105	N/A	All entities	1	1	6.579E-7	0.3475	0	-90	1.52E6

Rotate model to selected feature  
 2 features displayed

Figura 6.13 Visualización en tabla de resultados de puntos Hot Spot

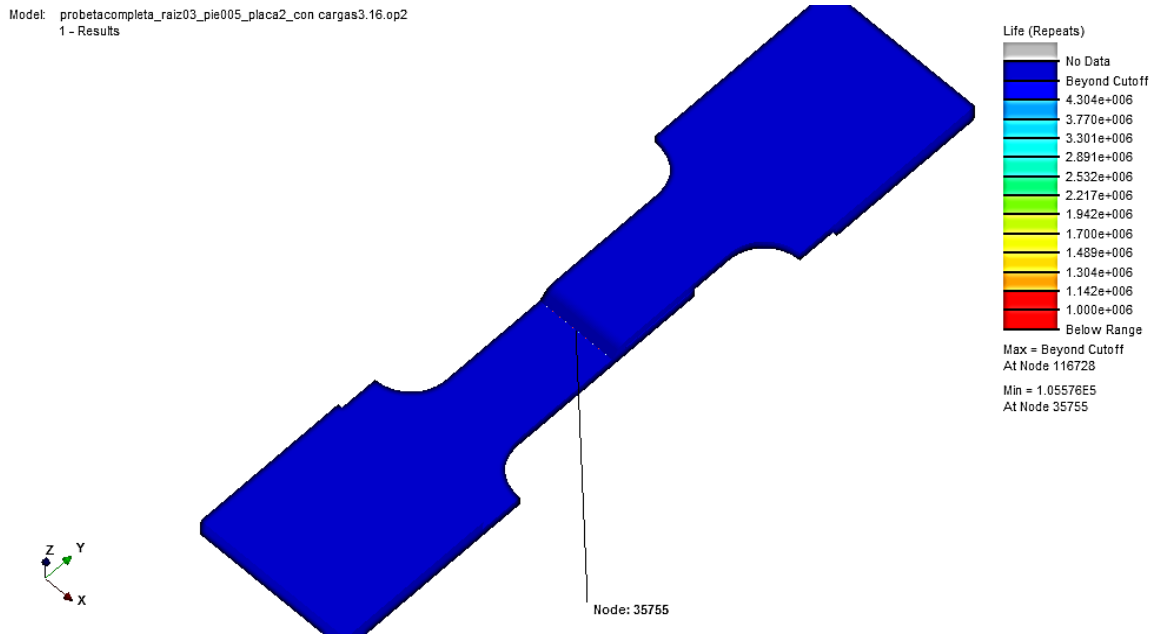


Figura 6.14. Visualización de punto Hot Spot en pie de análisis fatiga en software nCode

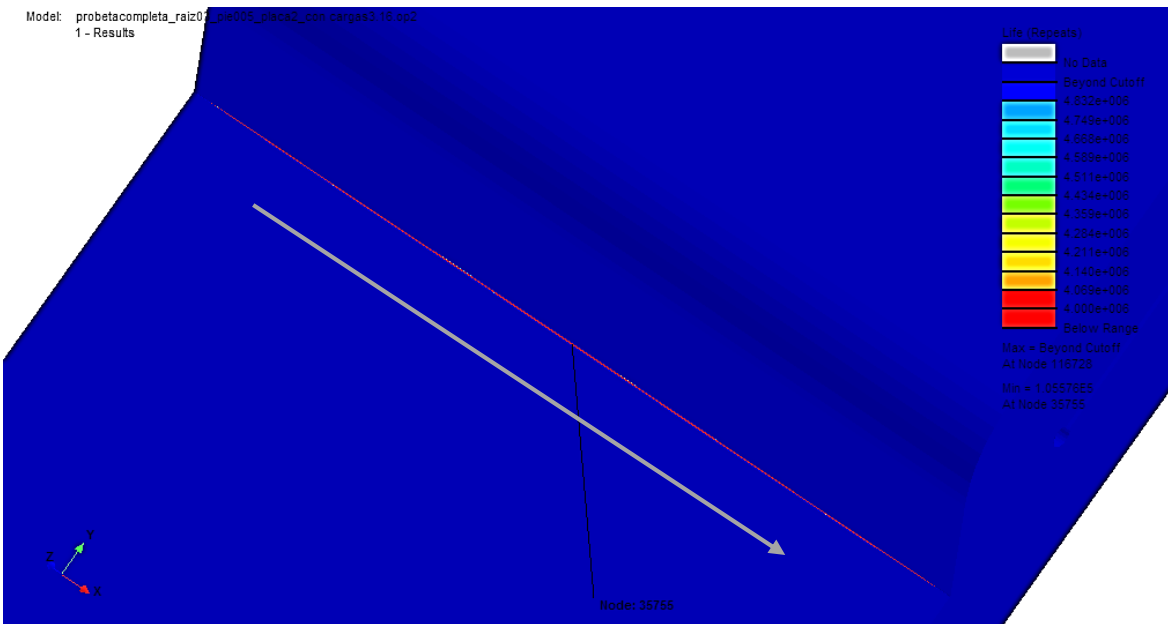


Figura 6.15. Visualización de zona afectada por fatiga en software nCode

Complementado con la gráfica de la Figura 6.16, se visualizó la distribución del daño generado en los elementos finitos a lo largo del pie de la unión soldada, en la dirección mostrada en la figura 6.15 en una escala de 0 a 1, cuando ésta es

sometida a fatiga con una razón de esfuerzo  $R=0.1$ . Con esto se puede proponer alguna modificación en el diseño de la unión para reforzar a la zona más afectada y lograr una mayor resistencia a la fatiga de la unión.

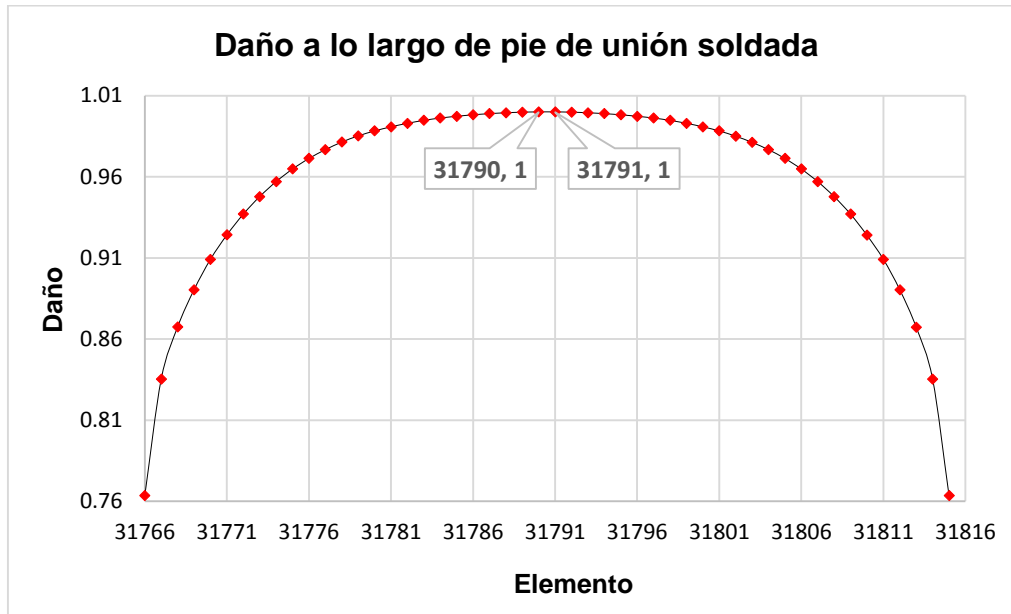


Figura 6.16 Magnitud de daño a lo largo de pie de la soldadura

### 6.3.3. Análisis de resultados de simulación FEM con método de aproximación de muesca

A continuación se visualiza las curvas S-N obtenidas en simulación para las pruebas de fatiga de la unión soldadas, tomándose en cuenta a diversos factores que influyen en la resistencia a la fatiga. La curva superior (azul) es considerada con esfuerzo residual bajo y la curva inferior (verde) es considerada un esfuerzo residual de tensión alto (Figura 6.17). Posteriormente, se visualiza en la Tabla 6.7 los valores de resistencia y límite de fatiga obtenidos para 2 y 5 millones de ciclos.

Con los resultados obtenidos aplicando la metodología propuesta con el uso de análisis FEM, se pudo evaluar la eficacia del método de aproximación de esfuerzo de muesca, una vez que las curvas S-N de simulación son comparadas con la curva S-N experimental.

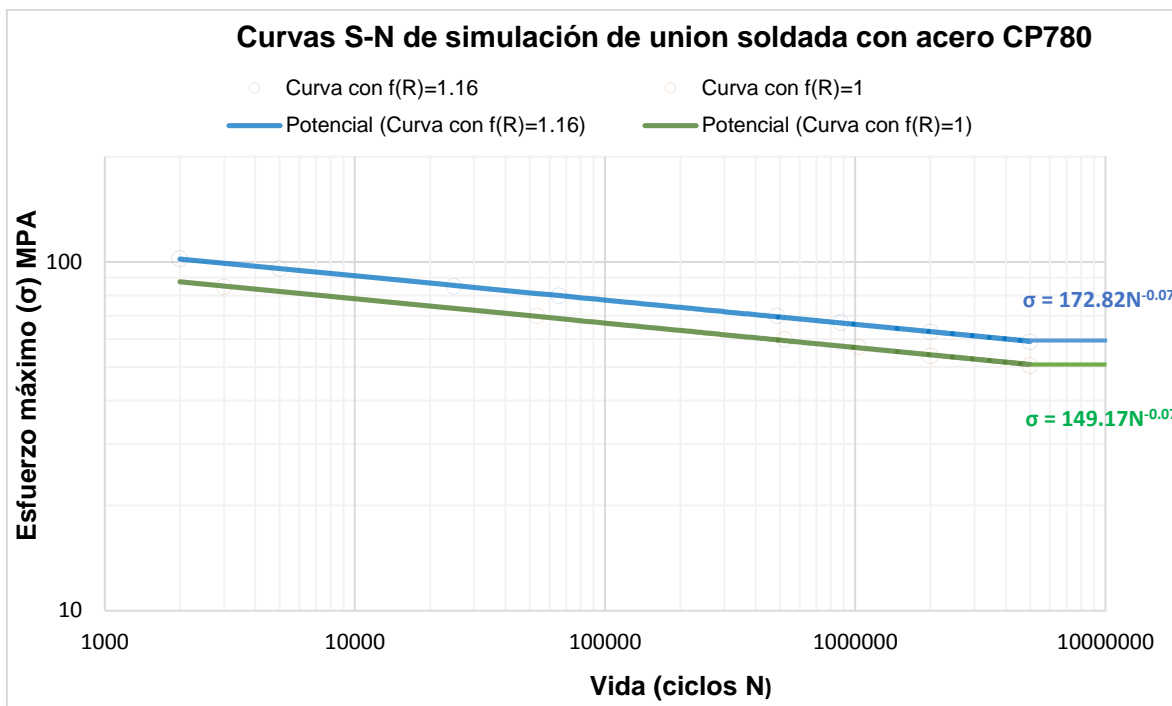


Figura 6.17. Curvas S-N de simulaciones ajustadas con factores de corrección de resistencia a fatiga

Comparativa de límite de fatiga de curvas de simulación		
Ciclos	Esfuerzo máximo MPa $f(R) = 1.16$	Esfuerzo máximo MPa $f(R) = 1$
$2 \times 10^6$	62.59	54.02
$5 \times 10^6$	58.70	50.67

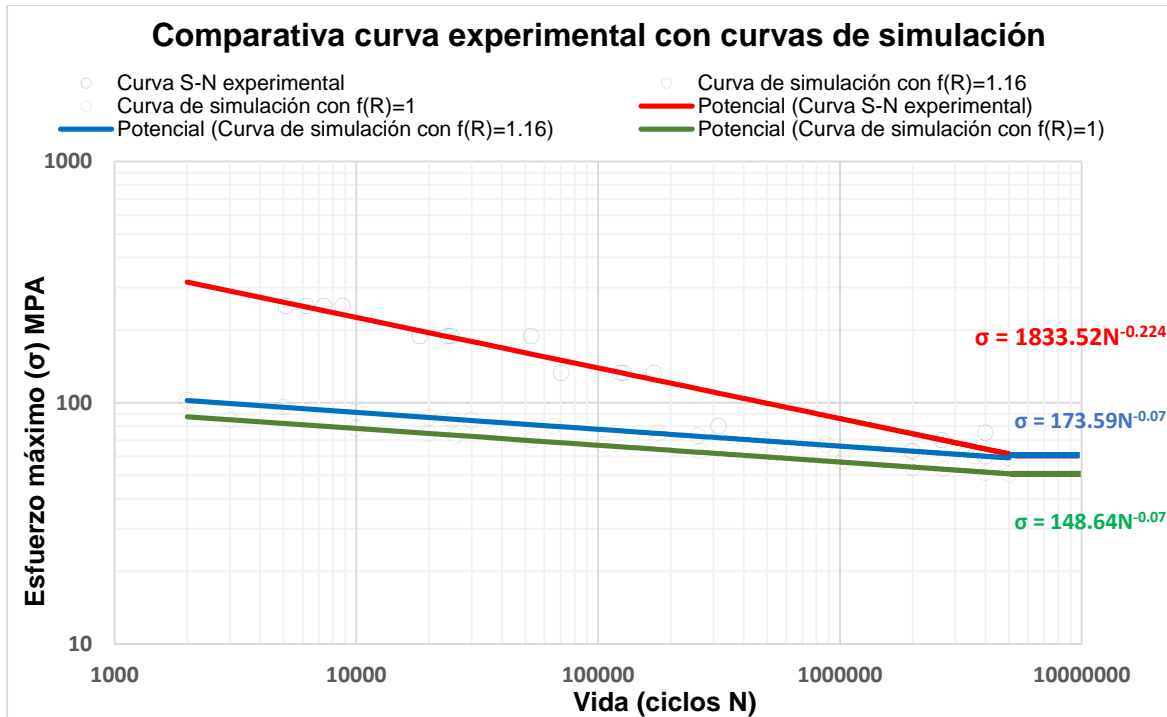
Tabla 6.7. Valores de esfuerzo con método de esfuerzo de muesca a 2 y 5 millones de ciclos

Se pudo observar que cuando se tiene presente a un esfuerzo residual de alta tensión ( $f(R)=1$ ) la resistencia a la fatiga es inferior que cuando se considera un esfuerzo residual despreciable ( $f(R)=1.16$ ). Interpretándose aquí, la importancia para que en el proceso experimental se tomen en cuenta métodos para aliviar el esfuerzo residual y se puede obtener mayor resistencia y límite a la fatiga.

### 6.3.3.1. Comparativa con resultados experimentales

En la gráfica de la Figura 6.18 se visualizan las curvas S-N obtenidas en las simulaciones comparadas con la curva S-N de resultados experimentales. Los

valores de resistencia y límite de fatiga que se obtuvieron tanto de manera experimental como de simulación y que podrían extrapolarse para valores de carga a los que se someten a un componente estructural en su vida útil de servicio.



**Figura 6.18. Comparativo de curvas S-N de simulación con curva de unión soldada**

En esta comparación, en el valor de límite de fatiga 2 y 5 millones de ciclos se consiguieron aproximaciones cercanas a las encontradas en la prueba experimental y que son mostradas en la Tabla 6.8, demostrándose la viabilidad de aplicación de método de aproximación de muesca una vez que se consideran los diversos factores que intervienen cuando se evalúa a fatiga a una unión soldada.

Se observa una mejor aproximación de límite de fatiga a 5 millones de ciclos con un esfuerzo residual aliviado ( $f(R)=1.16$ ), lo cual quiere decir que con el proceso experimental de soldadura los esfuerzos residuales no influyen de manera considerable cuando la unión es sometida a fatiga. En los resultados varía la pendiente de resistencia a la fatiga, tal variación puede ser provocada por los efectos de soldadura en el material en la etapa experimental, factores de esfuerzo medio considerados en el diseño, así como los radios en el pie y raíz de la unión soldada considerados en la simulación.

Comparativa de límite de fatiga de curvas de simulación con experimental			
Ciclos	$f(R) = 1.16 \text{ MPa}$	$f(R) = 1 \text{ MPa}$	S-N experimental MPa
$2 \times 10^6$	62.59	54.02	71.09
$5 \times 10^6$	58.70	50.67	57.10

Tabla 6.8. Valores de límite de fatiga de curvas S-N de simulación con curva experimental

### 6.3.3.2. Comparativa de resultados con normativa

En la siguiente gráfica de la Figura 6.19 se visualizan a las curvas  $S - N$  obtenidas en la simulación comparadas con la curva  $S - N$  de las pruebas experimentales y con la curva de diseño FAT 560 recomendada por el IIW [18] con valores de esfuerzo de aproximación de muesca generados con la fórmula 6.7, los resultados de límite de fatiga a 2 y 5 millones de ciclos se muestran en la Tabla 6.9.

$$\sigma_{IIW} = \frac{FAT}{2} * f(R) * \left( \frac{N}{2 \times 10^6} \right)^{-\frac{1}{m}} \quad [6.7]$$

Tomándose:  $f(R) = 1$        $m = 5$

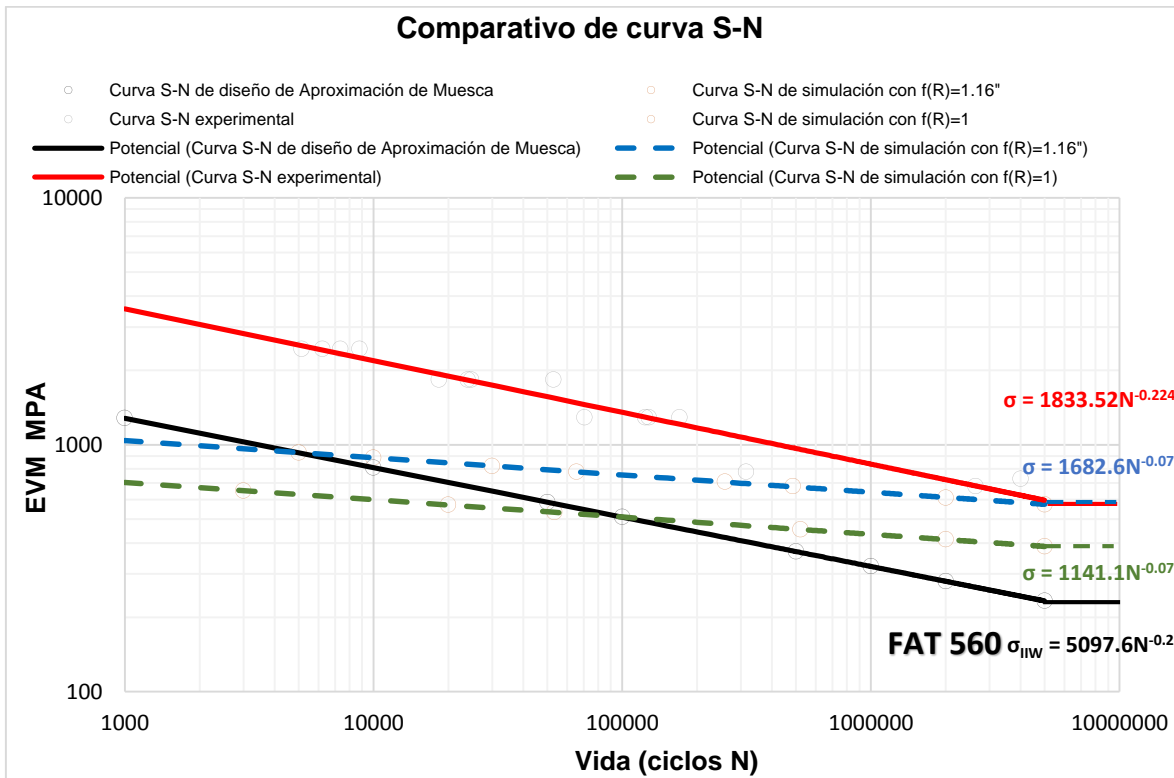


Figura 6.19. Comparativo de curvas S-N de simulación, de diseño y experimental

Comparativo de curvas S-N de simulación, experimentales con curva de diseño FAT 560				
Ciclos	Curva S-N de simulación $f(R) = 1.16$ MPa	Curva S-N de simulación $f(R) = 1$ MPa	Curva S-N experimental MPa	Curva S-N esfuerzo de muesca FAT 560 $\sigma_{IIW}$ MPa
$2 \times 10^6$	571.54	413.28	719.10	280
$5 \times 10^6$	609.40	387.61	593.10	233.115

**Tabla 6.9. Valores de límite de fatiga de curvas S-N de simulación con curva experimental, comparadas con curva de diseño FAT 560 de esfuerzo de muesca**

Los valores mostrados en la tabla 6.9 son expresados en términos de esfuerzos de Von Mises o esfuerzos de método aproximación de muesca, observándose a la curva de diseño S-N de esfuerzo de muesca FAT 560 (negro). En primer plano se observa que los valores de resistencia a la fatiga obtenidos con la curva S-N experimental (roja) son superiores a los recomendados por organismos internacionales como IIW. Con lo mencionado se determina que las uniones soldadas con proceso GMAW utilizando aceros CP780, aplicados a componentes estructurales automotrices fabricados en la empresa patrocinadora cumplen y superan los requerimientos de diseño recomendados internacionalmente.

En segundo plano se observa que las curvas obtenidas de proceso de simulación (verde y azul) con valores característicos de esfuerzos de Von Mises, también son superiores a los recomendados (FAT 560), esto es debido a que en el proceso de simulación fue lo más aproximado posible al proceso experimental, en características como, propiedades del material, geometría de la unión, cargas aplicadas en proceso de fatiga, reiterándose una viabilidad en la aplicación de método de aplicación de esfuerzo de muesca.

## 7. Conclusiones

Actualmente existen variedad de metodologías de análisis de fatiga que son aplicadas a estructuras automotrices, algunas de estas metodologías pueden tener origen y bases teóricas distintas. Además, la industria automotriz presenta un gran auge y desarrollo, con gran necesidad de producción de elementos estructurales con mejores características mecánicas. En este contexto surgió la necesidad de desarrollar esta tesis de Maestría, en la que se evalúa la metodología de aproximación de esfuerzo de muesca y la caracterización experimental a altos ciclos de fatiga, para el análisis y optimización del diseño de uniones soldadas utilizadas en uniones de componentes estructurales en VCL con AHSS CP780.

Una vez comprendido el estado de arte y metodologías de los primeros capítulos de la tesis, se desarrolló experimentalmente la evaluación a fatiga de una unión soldada traslape del material con AHSS CP780, con el fin determinar la función de la curva S-N de manera estadística y obtener los valores de resistencia y límite a la fatiga para compararlos con los valores de diseño. Las conclusiones fueron las siguientes:

- Se pudo determinar experimentalmente la validez del modelo que se construye a partir de la ecuación de la recta  $S - N$ :  $\text{Log } N = 14.542 - 4.4562 \text{ Log } \sigma$  con la cual se obtuvo un límite de fatiga de 57.54 MPa a 5 millones y 71.09 MPa a 2 millones de ciclos, estos valores son mayores a 63 MPa a 2 millones de ciclos recomendados por el IIW, resultados que son satisfactorios para las uniones soldadas utilizando acero CP780 con proceso de soldadura GMAW aplicadas en componentes estructurales como son el chasis de VCL. También, se obtuvo una buena correlación entre los datos de ciclos de vida y esfuerzo de  $R^2 = 0.9344$  obtenidos en el proceso experimental.
- Con el análisis estadístico de probabilidad de supervivencia, por medio de la regresión log-normal, se obtuvieron las curvas de probabilidad de supervivencia  $P_s$  de 97.7, 90, 50 y 10 con las cuales se predice la  $P_s$  a cierto esfuerzo aplicado, dependiendo al porcentaje de interés. Con la  $P_{s90}$  y  $P_{s10}$



se obtuvo una dispersión  $T\sigma = 1:1.657$  de datos, cercana al 1.5 recomendado por la literatura [10].

- Además, se realizó el análisis estadístico de confiabilidad de a prueba experimental con un intervalo de confianza de 95 % permitiendo considerar un rango de esfuerzo a 5 millones de ciclos de entre 44.44 MPa a 74.95 MPa. Por medio de la aplicación método de escalera se obtuvo un límite de fatiga de 72.5 MPa encontrándose éste dentro del límite de confiabilidad, demostrándose resultados confiables en la aplicación de este método, con lo cual se establece al método de escalera como una opción confiable para pruebas experimentales futuras.

Con los resultados de las pruebas experimentales se comprobó que cuando una unión soldada con AHSS es sujeta a cargas de fatiga se pierde gran ventaja de resistencia estática, debido a los altos efectos de concentración de esfuerzo locales generados principalmente por cambios de sección geométrica e imperfecciones adquiridas en el proceso de soldadura.

Las uniones soldadas con aceros de alto módulo de Young o de cedencia pueden ser adecuadas para componentes sujetos a espectros de carga con picos de esfuerzo alto cuando estos son utilizados moderadamente a altos ciclos, sin embargo, para mejorar el rendimiento se deben reducir los efectos de concentración de esfuerzo de muesca con tratamientos posteriores a la soldadura. Lo mencionado permitirá que los AHSS puedan competir con materiales establecidos en diferentes procesos de soldadura y configuraciones de uniones soldadas.

En el capítulo seis se desarrolló la fase de simulación aplicando una metodología con el método de aproximación de esfuerzo de muesca en la unión soldada a traslape, por medio de análisis estático lineal en el procesamiento FEM se obtuvieron los EVM utilizados para calcular el factor de fatiga de muesca  $K_f$ , indispensable para evaluar los valores de resistencia y límite a la fatiga en el pos-proceso. Las conclusiones obtenidas son las siguientes:

- Se obtuvo la mayor concentración de esfuerzo con una magnitud de  $K_f=9.71$  localizada en el pie de la unión, el cual coincidió con la falla generada en las pruebas a fatiga experimentales.
- Con la incorporación del modelo de análisis de aproximación de esfuerzo de muesca al análisis S-N estándar del software nCode se pudo configurar la carga de amplitud constante con razón de carga aplicada  $R=0.1$  y el criterio de falla de Von Mises,
- Por otra parte se hizo la inclusión del método de corrección de esfuerzo medio de Gerber que es utilizado para materiales dúctiles. Adicionalmente y debido a que se desconoce la magnitud de esfuerzos residuales se incorporó el factor de aumento de esfuerzo residual con recomendaciones del IIW en dos casos: el primero considerando a un esfuerzo residual despreciable con un  $F(R)=1.16$  y otro en donde hay esfuerzo residual de tensión alto al  $F(R)=1$ .
- Finalmente, se pudo visualizar en el software las zonas más afectadas de la unión con la localización del elemento con un daño mayor ubicado a lo largo del pie de la unión y su respectivo elemento y nodo, zona donde teóricamente se inicia la falla en la unión soldada.

Con la implementación del método de aproximación de esfuerzo de muesca utilizando aproximaciones lineales se demostraron resultados coherentes y aproximados, mostrando variación en la pendiente de la curva S-N de resistencia a la fatiga y un límite de fatiga comparado con lo obtenido experimentalmente, esto podrían ser provocado por efectos del proceso de soldadura en el material y el radio modelado para la obtención del factor de concentración de esfuerzos.

## 8. Recomendaciones y trabajos futuros

Para hacer frente a retos que involucran a la integridad estructural en el campo de la ingeniería automotriz, se desarrollan día a día líneas de investigación que apoyan a trabajos para alcanzar metas que permitan permanecer en el mercado a la empresa de manera competitiva.

Con el desarrollo de este trabajo se abren nuevas vías de investigación en el ámbito de análisis estructural automotriz, con las cuales se pueden obtener mejores aproximaciones de la resistencia y vida a la fatiga de elementos estructurales. Algunos de estos puntos son mencionados a continuación:

- Considerar ciclos reales de carga que están sometidas la unión soldada de la estructura en su vida de servicio.
- Incorporar métodos de manufactura para reducción de efectos de muesca como rectificado, para la reducción de factor de concentración de esfuerzo e incremento de resistencia a la fatiga.
- Realizar observaciones en el aspecto micrográfico, mediante microscopía electrónica de barrido o microscopía óptica, para la evaluación a detalle de grietas generadas en el proceso experimental en diferentes partes de la geometría de la unión.
- Considerar el determinar esfuerzos residuales de una manera más exacta mediante técnicas de difracción de rayos X, técnicas de agrietamiento, entre otras, así como, proponer métodos de mejora del efecto del esfuerzo residual por medio de:
  - Procesos de recocido, posteriores a la soldadura para eliminar esfuerzos residuales.
  - Incremento del esfuerzo residual de compresión o liberación técnica de los mismos.
- Este modelo de predicción de falla puede ser incorporado en etapas experimentales futuras con otros tipos de uniones soldadas utilizadas en componentes estructurales.

Respecto a las simulaciones con la aplicación del método de aproximación de esfuerzo de muesca se pueden mencionar algunas recomendaciones:

- Esta metodología se puede extrapolar para diferentes tipos de unión y configuraciones utilizadas en elementos estructurales de VCL. Además, pueden ser utilizada para uniones con proceso de soldadura GMAW, TIG, soldadura de punto, entre otras.
- Se recomienda utilizar la técnica de mallado fino mencionada en la unión y área de interés (cambio de materiales, concentrador de esfuerzo, zona crítica de carga) y considerar un mallado grueso en zonas alejadas. Se debe tomar en cuenta las capacidades del equipo de procesamiento utilizado.
- Para el análisis y determinación de factores que interviene en la evaluación a fatiga de uniones soldadas, se pueden utilizar otros modelos y herramientas para FEM, a fin de tener un modelos que se acerque más al comportamiento de la unión, por ejemplo, se puede simular el proceso de soldadura y determinar la condición de esfuerzos residuales, siempre y cuando se tengan bien determinadas las propiedades del material.

Los resultados obtenidos en este proyecto quedan como base para estudios más avanzados en el fenómeno de la fatiga, como son deformación por fatiga y crecimiento de grieta, quedando abiertas posibilidades y líneas futuras de investigación para que pueden serán analizadas por necesidad técnica, económica y de conocimiento, para ser abordadas tanto en industrias del área automotriz y otras áreas de conocimiento afines.

## Referencias

- [1] Auto/Steel PARTNERSHIP. *www.a-sp.org*, 2014.
- [2] R. KUZIAK, R. KAWALLA. *Advanced High Strength Steel for Automotive Industry*, Archives of civil and mechanical engineering, 2008.
- [3] D. ANDERSON. *Application and Reparability of AHSS*, 2008.
- [4] Welding Technology. *www.me-mechanicalengineering.com*, Gas Metal Arc Welding, 2014
- [5] J. SHAW [et al], *Ulsab-Advanced Vehicle Concepts-Materials*, 2003.
- [6] Sergio CICERO; F. GUTIÉRREZ. *Fracture And Fatigue Assessment of Welded Structures*. University of Cantabria, 2010.
- [7] Stuart KEELER. *Advanced High Strenght Steel Aplications Guidelines Versión 5.0*, Word Auto Steel, 2014.
- [8] Randall D. POLLAK. *Analysis of Methods for Determining High Cycle Fatigue Strength of a Material With Investigation of Ti-6al-4v Gigacycle Fatigue Behavior*, Air Force Air University, 2007.
- [9] Dieter RADAJ; Cetin M. SONSINO; Wolfram FRICKE. *Fatigue Assessment of Welded Joints by Local Approaches*, Woodhead Publishing, 2006.
- [10] Dieter RADAJ. *Design and Analysis of Fatigue Resistant Welded Structures*, Abington Publisging, 1990.
- [11] Departamento De Formación Lincoln-Kd. *Soldadura Semiautomática con Gas de Protección (Mig-Mag)*. Manual.
- [12] U. ZERBST [et al]. *Review on Fracture and Crack Propagation in Weldments*, Engineering Fracture Mechanics, 2014.
- [13] Peter HEYES. *Fatigue Analysis of Seam Welded Structures Using nCode Designlife*, nCode, 2013.
- [14] Zhili FENG [et al]. *Improving Fatigue Performance of AHSS Welds*, 2011-2014.
- [15] Dr. ROGER; A. HEIMBUCH, *Fatigue of AHSS Strain Rate Characterization*, Auto/Steel Partnership, 2009.
- [16] Zhili FENG. *Weldability and Performance of GMAW Joints of Advanced High-Strength Steels (AHSS)*

- [17] Adolf HOBACHER. *Recommendations for Fatigue Design of Welded Joints and Components*. International Institute Welding IIW, 2008.
- [18] T. BRUDER; K. STÖRZEL. *Evaluation of Nominal and Local Stress Based Approaches for the Fatigue Assessment of Seam Welds*. International Journal of Fatigue, 2011.
- [19] Myung HYUN [et al]. *Comparison of Hot Spot Stress Evaluation Methods for Welded Structures*, 2010.
- [20] Cetin M. SONSINO, *A Consideration of Allowable Equivalent Stresses for Fatigue Design of Welded Joints According to the Notch Stress Concept with the Reference Radio  $R_{ref} = 1.00$  and  $0.05$  mm*, 2009.
- [21] Cetin M. SONSINO, *Principles of Local Stress Concepts for the Assessment of Welded Joints*, ESIS, 2009.
- [22] J. BAUMGARTNER; T. BRUDER. *An Efficient Meshing Approach for the Calculation of Notch Stresses*. Weld World, 2013.
- [23] Yibo SUN [et al]. *Study on the Correction of S-N Distribution in the Welding Fatigue Analysis Method Based on the Battelle Equivalent Structural Stress by Rough Set Theory*. Dalian Jiaotong University, 2014.
- [24] Cetin M. SONSINO; Kranz B. *Verification of the Notch Stress Concept for the Reference Radio of  $R_{ref} = 1.00$  And  $0.05$ mm*. International Journal of Fatigue, 2009
- [25] Cetin SONSINO, *Notch Stress Concepts for the Fatigue Assessment of Welded Joints*, International Journal of Fatigue, 2010.
- [26] Fernando ARANCIBIA, *Consideraciones Sobre el Crecimiento de la Grieta por Fatiga en Materiales de ingeniería y Sus Uniones Soldadas*, [facingyconst.blogspot.mx/2010/07/consideraciones-sobre-el-Crecimiento-de.html](http://facingyconst.blogspot.mx/2010/07/consideraciones-sobre-el-Crecimiento-de.html), 2010.
- [27] Eurocódigo 3, *Proyecto de Estructuras de Acero*, Asociación española de normalización y certificación, 1993.
- [28] John WILSON, *Fatigue Design and Assessment of Steel Structures*, BS 7608, 1993.

- [29] Ansel C. UGURAL, Saul K. FENSTER. *Advanced Strength and Applied Elasticity*. Prentice Hall, 2003.
- [30] Richard G. BUDYNAS. *Diseño en Ingeniería Mecánica de Shigley*. Rochester Institute of Technology. Mc Graw Hill, 2008.
- [31] Paul D. TOASA. *Curvas de Wöhler y Análisis estadístico de Pruebas de Fractura por Fatiga*. AMARUN, 2009
- [32] Instituto Técnico de la Estructura en Acero, *Diseño para Fatiga*, ITEA, 2013
- [33] Elements of Metallurgy and Engineering Alloys, ASM Internacional, 2008
- [34] William NAVIDI, *Estadística para Ingenieros y Científicos*, Mc Graw Hill
- [35] S. J. Madox. *Fatigue Design Rules for Welded Structures*, Progress in Structural Engineering and Materials, Online, 2000.
- [36] K. A. BROWNLEE. *The Up-and-Down Method with Small Samples*, Journal of the American Statistical Association, 1953.
- [37] Kristoffer KARLEN. *Probabilistic Modeling of Fatigue Failures*, Tesis doctoral, 2012.
- [38] M. MALIKOUTSAKIS, *An Approach to the Effective Notch Stress Concept to Complex Geometry Welds Focusing on the FE Modeling of Weld Ends*, Aristotle University of Thessaloniki, 2009.
- [39] nCode, DesignLife Theory Guide, HMB, 2013.
- [40] ASTM International ASTM E739-91. *Standard Practice for Statistical Analysis of Linear or Linearized Stress-Life (S-N) and Strain-Life ( $\epsilon$ -N) Fatigue Data*. 2004.
- [41] ASTM International. ASTM E466-96. *Standard Practice for Conducting Force Controlled Constant Amplitude Axial Fatigue Tests of Metallic Materials*. 2002.
- [42] ASTM International. ASTM E468-90 “*Standard Practice for Presentation of Constant Amplitude Fatigue Test Results for Metallic Materials*”. 2004
- [43] ASTM International. ASTM E1823-96. *Standard Terminology Relating to Fatigue and Fracture Testing*. 2002.
- [44] ASTM International. ASTM E8/E8M-09. *Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials*”. 2010.

- [45] EWI Members Organizations. *Arc Welding of Advanced High trength Steel Sheet*, 2007.
- [46] N. KAPUSTKA [et al]. *Effect of GMAW Process and Material Conditions on DP 780 and TRIP 780 Welds*
- [47] Reportes y documentos confidenciales propiedad de Metalsa
- [48] Wilfram FRICKE, *Round-robin Study on Stress Analysis for the Effective Notch Stress Approach*, Hamburg University of Technology, 2010.

## **Anexos**



## A.1. Tabla de función de distribución normal estándar

	0.00	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09
-3.0	0.001350	0.001306	0.001264	0.001223	0.001183	0.001144	0.001107	0.001070	0.001035	0.001001
-2.9	0.001866	0.001807	0.001750	0.001695	0.001641	0.001589	0.001538	0.001489	0.001441	0.001395
-2.8	0.002555	0.002477	0.002401	0.002327	0.002256	0.002186	0.002118	0.002052	0.001988	0.001926
-2.7	0.003467	0.003364	0.003264	0.003167	0.003072	0.002980	0.002890	0.002803	0.002718	0.002635
-2.6	0.004661	0.004527	0.004396	0.004269	0.004145	0.004025	0.003907	0.003793	0.003681	0.003573
-2.5	0.006210	0.006037	0.005868	0.005703	0.005543	0.005386	0.005234	0.005085	0.004940	0.004799
-2.4	0.008198	0.007976	0.007760	0.007549	0.007344	0.007143	0.006947	0.006756	0.006569	0.006387
-2.3	0.010724	0.010444	0.010170	0.009903	0.009642	0.009387	0.009137	0.008894	0.008656	0.008424
-2.2	0.013903	0.013553	0.013209	0.012874	0.012545	0.012224	0.011911	0.011604	0.011304	0.011011
-2.1	0.017864	0.017429	0.017003	0.016586	0.016177	0.015778	0.015386	0.015003	0.014629	0.014262
-2.0	0.022750	0.022216	0.021692	0.021178	0.020675	0.020182	0.019699	0.019226	0.018763	0.018309
-1.9	0.028717	0.028067	0.027429	0.026803	0.026190	0.025588	0.024998	0.024419	0.023852	0.023295
-1.8	0.035930	0.035148	0.034380	0.033625	0.032884	0.032157	0.031443	0.030742	0.030054	0.029379
-1.7	0.044565	0.043633	0.042716	0.041815	0.040930	0.040059	0.039204	0.038364	0.037538	0.036727
-1.6	0.054799	0.053699	0.052616	0.051551	0.050503	0.049471	0.048457	0.047460	0.046479	0.045514
-1.5	0.066807	0.065522	0.064255	0.063008	0.061780	0.060571	0.059380	0.058208	0.057053	0.055917
-1.4	0.080757	0.079270	0.077804	0.076359	0.074934	0.073529	0.072145	0.070781	0.069437	0.068112
-1.3	0.096800	0.095098	0.093418	0.091759	0.090123	0.088508	0.086915	0.085343	0.083793	0.082264
-1.2	0.115070	0.113139	0.111232	0.109349	0.107488	0.105650	0.103835	0.102042	0.100273	0.098525
-1.1	0.135666	0.133500	0.131357	0.129238	0.127143	0.125072	0.123024	0.121000	0.119000	0.117023
-1.0	0.158655	0.156248	0.153864	0.151505	0.149170	0.146859	0.144572	0.142310	0.140071	0.137857
-0.9	0.184060	0.181411	0.178786	0.176186	0.173609	0.171056	0.168528	0.166023	0.163543	0.161087
-0.8	0.221855	0.208970	0.206108	0.203269	0.200454	0.197663	0.194895	0.192150	0.189430	0.186733
-0.7	0.241964	0.238852	0.235762	0.232695	0.229650	0.226627	0.223627	0.220650	0.217695	0.214764
-0.6	0.274253	0.270931	0.267629	0.264347	0.261086	0.257846	0.254627	0.251429	0.248252	0.245097
-0.5	0.308538	0.305026	0.301532	0.298056	0.294599	0.291160	0.287740	0.284339	0.280957	0.277595
-0.4	0.344578	0.340903	0.337243	0.333598	0.329969	0.326355	0.322758	0.319178	0.315614	0.312067
-0.3	0.382089	0.378280	0.374484	0.370700	0.366928	0.363169	0.359424	0.355691	0.351973	0.348268
-0.2	0.420740	0.416834	0.412936	0.409046	0.405165	0.401294	0.397432	0.393580	0.389739	0.385908
-0.1	0.460172	0.456205	0.452242	0.448283	0.444330	0.440382	0.436441	0.432505	0.428576	0.424655
0.0	0.500000	0.496011	0.492022	0.488034	0.484047	0.480061	0.476078	0.472097	0.468119	0.464144
0.0	0.500000	0.503989	0.507978	0.511966	0.515953	0.519939	0.523922	0.527903	0.531881	0.535856
0.1	0.539828	0.543795	0.547758	0.551717	0.555670	0.559618	0.563559	0.567495	0.571424	0.575345
0.2	0.579260	0.583166	0.587064	0.590954	0.594835	0.598706	0.602568	0.606420	0.610261	0.614092
0.3	0.617911	0.621720	0.625516	0.629300	0.633072	0.636831	0.640576	0.644309	0.648027	0.651732
0.4	0.655422	0.659097	0.662757	0.666402	0.670031	0.673645	0.677242	0.680822	0.684386	0.687933
0.5	0.691462	0.694974	0.698468	0.701944	0.705401	0.708840	0.712260	0.715661	0.719043	0.722405
0.6	0.725747	0.729069	0.732371	0.735653	0.738914	0.742154	0.745373	0.748571	0.751748	0.754903
0.7	0.758036	0.761148	0.764238	0.767305	0.770350	0.773373	0.776373	0.779350	0.782305	0.785236
0.8	0.788145	0.791030	0.793892	0.796731	0.799546	0.802337	0.805105	0.807850	0.810570	0.813267
0.9	0.815940	0.818589	0.821214	0.823814	0.826391	0.828944	0.831472	0.833977	0.836457	0.838913
1.0	0.841345	0.843752	0.846136	0.848495	0.850830	0.853141	0.855428	0.857690	0.859929	0.862143
1.1	0.864334	0.866500	0.868643	0.870762	0.872857	0.874928	0.876976	0.879000	0.881000	0.882977
1.2	0.884930	0.886861	0.888768	0.890651	0.892512	0.894350	0.896165	0.897958	0.899727	0.901475
1.3	0.903200	0.904902	0.906582	0.908241	0.909877	0.911492	0.913085	0.914657	0.916207	0.917736
1.4	0.919243	0.920730	0.922196	0.923641	0.925066	0.926471	0.927855	0.929219	0.930563	0.931888
1.5	0.933193	0.934478	0.935745	0.936992	0.938220	0.939429	0.940620	0.941792	0.942947	0.944083
1.6	0.945201	0.946301	0.947384	0.948449	0.949497	0.950529	0.951543	0.952540	0.953521	0.954486
1.7	0.955435	0.956367	0.957284	0.958185	0.959070	0.959941	0.960796	0.961636	0.962462	0.963273
1.8	0.964070	0.964852	0.965620	0.966375	0.967116	0.967843	0.968557	0.969258	0.969946	0.970621

	0.00	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09
1.9	0.971283	0.971933	0.972571	0.973197	0.973810	0.974412	0.975002	0.975581	0.976148	0.976705
2.0	0.977250	0.977784	0.978308	0.978822	0.979325	0.979818	0.980301	0.980774	0.981237	0.981691
2.1	0.982136	0.982571	0.982997	0.983414	0.983823	0.984222	0.984614	0.984997	0.985371	0.985738
2.2	0.986097	0.986447	0.986791	0.987126	0.987455	0.987776	0.988089	0.988396	0.988696	0.988989
2.3	0.989276	0.989556	0.989830	0.990097	0.990358	0.990613	0.990863	0.991106	0.991344	0.991576
2.4	0.991802	0.992024	0.992240	0.992451	0.992656	0.992857	0.993053	0.993244	0.993431	0.993613
2.5	0.993790	0.993963	0.994132	0.994297	0.994457	0.994614	0.994766	0.994915	0.995060	0.995201
2.6	0.995339	0.995473	0.995604	0.995731	0.995855	0.995975	0.996093	0.996207	0.996319	0.996427
2.7	0.996533	0.996636	0.996736	0.996833	0.996928	0.997020	0.997110	0.997197	0.997282	0.997365
2.8	0.997445	0.997523	0.997599	0.997673	0.997744	0.997814	0.997882	0.997948	0.998012	0.998074
2.9	0.998134	0.998193	0.998250	0.998305	0.998359	0.998411	0.998462	0.998511	0.998559	0.998605
3.0	0.998650	0.998694	0.998736	0.998777	0.998817	0.998856	0.998893	0.998930	0.998965	0.998999

Ejemplos: Si  $X \sim N(0,1)$ , entonces  $\Pr(X \leq -1.96) = 0.024998$  y  $\Pr(X \leq 2.00) = 0.977250$ .

Fuente: Tabla construida utilizando la función @enorm de EViews® 3.1.

## Anexos

## A.2. Tabla de función de distribución "t-student"

$\alpha$ $\Gamma$	0,25	0,2	0,15	0,1	0,05	0,025	0,01	0,005	0,0005
1	1,000	1,376	1,963	3,078	6,314	12,706	31,821	63,656	636,578
2	0,816	1,061	1,386	1,888	2,920	4,303	6,965	9,925	31,600
3	0,765	0,978	1,250	1,638	2,353	3,182	4,541	5,841	12,924
4	0,741	0,941	1,190	1,533	2,132	2,776	3,747	4,604	8,610
5	0,727	0,920	1,156	1,478	2,015	2,571	3,365	4,032	6,869
6	0,718	0,906	1,134	1,440	1,943	2,447	3,143	3,707	5,959
7	0,711	0,896	1,119	1,415	1,895	2,365	2,998	3,499	5,408
8	0,706	0,889	1,108	1,397	1,860	2,306	2,896	3,355	5,041
9	0,703	0,883	1,100	1,383	1,833	2,262	2,821	3,250	4,781
10	0,700	0,879	1,093	1,372	1,812	2,228	2,764	3,169	4,587
11	0,697	0,876	1,088	1,363	1,796	2,201	2,718	3,106	4,437
12	0,695	0,873	1,083	1,356	1,782	2,179	2,681	3,055	4,318
13	0,694	0,870	1,079	1,350	1,771	2,160	2,650	3,012	4,221
14	0,692	0,868	1,076	1,345	1,761	2,145	2,624	2,977	4,140
15	0,691	0,866	1,074	1,341	1,753	2,131	2,602	2,947	4,073
16	0,690	0,865	1,071	1,337	1,746	2,120	2,583	2,921	4,015
17	0,689	0,863	1,069	1,333	1,740	2,110	2,567	2,898	3,965
18	0,688	0,862	1,067	1,330	1,734	2,101	2,552	2,878	3,922
19	0,688	0,861	1,066	1,328	1,729	2,093	2,539	2,861	3,883
20	0,687	0,860	1,064	1,325	1,725	2,086	2,528	2,845	3,850
21	0,686	0,859	1,063	1,323	1,721	2,080	2,518	2,831	3,819
22	0,686	0,858	1,061	1,321	1,717	2,074	2,508	2,819	3,792
23	0,685	0,858	1,060	1,319	1,714	2,069	2,500	2,807	3,768
24	0,685	0,857	1,059	1,318	1,711	2,064	2,492	2,797	3,745
25	0,684	0,856	1,058	1,316	1,708	2,060	2,485	2,787	3,725
26	0,684	0,856	1,058	1,315	1,706	2,056	2,479	2,779	3,707
27	0,684	0,855	1,057	1,314	1,703	2,052	2,473	2,771	3,689
28	0,683	0,855	1,056	1,313	1,701	2,048	2,467	2,763	3,674
29	0,683	0,854	1,055	1,311	1,699	2,045	2,462	2,756	3,660
30	0,683	0,854	1,055	1,310	1,697	2,042	2,457	2,750	3,646
40	0,681	0,851	1,050	1,303	1,684	2,021	2,423	2,704	3,551
60	0,679	0,848	1,045	1,296	1,671	2,000	2,390	2,660	3,460
120	0,677	0,845	1,041	1,289	1,658	1,980	2,358	2,617	3,373
$\infty$	0,674	0,842	1,036	1,282	1,645	1,960	2,326	2,576	3,290