



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE
ESCUELA DE INGENIERÍA

**“ANÁLISIS DEL DISEÑO A FATIGA EN
DETALLES DE REFUERZO DE VIGAS
DE ACERO MEDIANTE ELEMENTOS
FINITOS”**

SALOMÓN CLAUDIO GUTIÉRREZ ALBORNOZ

Informe de Actividad de Graduación para optar al Grado de
Magíster en Ingeniería Estructural y Geotécnica

Profesor Supervisor:
SERGIO GUTIÉRREZ CID

Santiago de Chile, Diciembre, 2020.

A mi madre, por su ejemplo de vida,
apoyo incondicional y permanente
enseñanza.

ÍNDICE GENERAL

	Pág.
ÍNDICE DE TABLAS	1
ÍNDICE DE FIGURAS.....	2
RESUMEN.....	9
ABSTRACT	10
I. INTRODUCCIÓN.....	11
I.1 Objetivos	13
I.1.1 Objetivo general.....	13
I.1.2 Objetivos específicos	13
I.2 Metodología de trabajo.....	14
II. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	16
II.1 Estado límite de resistencia por fatiga en estructuras de acero	16
II.1.1 Cargas cíclicas solicitantes de fatiga	18
II.1.2 Componentes y distribución de tensiones en conexiones soldadas	23
II.1.3 Curvas de clasificación S-N	24
II.1.4 Métodos de diseño a fatiga.....	26
II.1.4.1 Método de tensión Nominal	28
II.1.4.2 Método de tensiones Hot-Spot	29
II.1.4.3 Método de tensión Effective Notch.....	36
II.1.4.4 Cuadro comparativo de las diferentes metodologías de diseño a fatiga.....	39
II.1.5 Factores de modificación de resistencia a fatiga	41
II.1.5.1 Razón de tensiones	41
II.1.5.2 Espesor de elementos	42
II.1.5.3 Técnicas de mejora pos-soldadura	44
II.1.5.4 Efectos de temperaturas elevadas.....	45
II.1.5.5 Efectos de la corrosión	45
II.1.6 Recomendaciones para el modelamiento por elementos finitos asociado al método de tensiones Hot-Spot	46
II.1.7 Verificación por fatiga utilizando curvas S-N.....	50

III.	CASO DE ESTUDIO	53
III.1	Introducción al caso de estudio	53
III.2	Desarrollo del caso de estudio.....	55
III.2.1	Descripción de cargas	58
III.2.2	Descripción de modelos FEM	59
III.2.3	Rangos de tensiones Nominal y Hot-Spot obtenidos de modelos FEM	60
III.2.3.1	Rangos de tensiones Nominal y Hot-Spot en Detalle D1	60
III.2.3.2	Rangos de tensiones Nominal y Hot-Spot en Detalle D2	68
III.2.3.3	Rangos de tensiones Nominal y Hot-Spot en Detalle D3	75
III.2.3.4	Rangos de tensiones Nominal y Hot-Spot en Detalle D4	83
III.3	Análisis de rangos de tensiones obtenidos de los modelos FEM.....	90
III.3.1	Análisis de rangos de tensiones obtenidos, detalle D1	92
III.3.2	Análisis de rangos de tensiones obtenidos, detalle D2	96
III.3.3	Análisis de rangos de tensiones obtenidos, detalle D3	100
III.3.4	Análisis de rangos de tensiones obtenidos, detalle D4	104
III.3.5	Análisis del coeficiente de concentración de tensiones	107
III.4	Evaluación de resultados de acuerdo al método de tensión Nominal	110
III.5	Evaluación de resultados de acuerdo al método de tensión Hot-Spot.....	111
IV.	CONCLUSIONES.....	115
IV.1	Conclusiones de la investigación	115
IV.2	Recomendaciones para futuras investigaciones	118
	BIBLIOGRAFÍA.....	120
	A N E X O S.....	121
	Anexo A1: Categorización de detalles estructurales, método de tensión nominal	122
	Anexo A2: Categorización de detalles estructurales, método de tensión hot-spot	123
	Anexo A3: Modelos FEM realizados, Mallado Fino	124
	A3.1 Modelo FEM detalle D1, elem. tipo <i>Solid</i> , filete de soldadura máximo ..	124
	A3.2 Modelo FEM detalle D1, elem. tipo <i>Solid</i> , filete de soldadura mínimo ..	124
	A3.3 Modelo FEM detalle D1, elem. tipo <i>Shell</i> oblicuo y perpendicular	125
	A3.4 Modelo FEM detalle D1, elem. tipo <i>Shell</i> perpendicular.....	125

A3.5	Modelo FEM detalle D2, elem. tipo Solid, filete de soldadura máximo..	126
A3.6	Modelo FEM detalle D2, elem. tipo Solid, filete de soldadura mínimo ..	126
A3.7	Modelo FEM detalle D2, elem. tipo Shell oblicuo y perpendicular	127
A3.8	Modelo FEM detalle D2, elem. tipo Shell perpendicular.....	127
A3.9	Modelo FEM detalle D3, elem. tipo Solid, filete de soldadura máximo..	128
A3.10	Modelo FEM detalle D3, elem. tipo Solid, filete de soldadura mínimo	128
A3.11	Modelo FEM detalle D3, elem. tipo Shell oblicuo y perpendicular	129
A3.12	Modelo FEM detalle D3, elem. tipo Shell perpendicular	129
A3.13	Modelo FEM detalle D4, elem. tipo Solid, filete de soldadura máximo	130
A3.14	Modelo FEM detalle D4, elem. tipo Solid, filete de soldadura mínimo	130
A3.15	Modelo FEM detalle D4, elem. tipo Shell oblicuo y perpendicular	131
A3.16	Modelo FEM detalle D4, elem. tipo Shell perpendicular	131

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla II-1: Tamaño de elementos finitos recomendados	38
Tabla II-2: Cuadro comparativo entre principales metodologías de diseño a fatiga.....	40
Tabla II-3: Exponentes para factor de reducción por espesor	43
Tabla II-4: Valores recomendados para factor parcial para rango de tensiones de resistencia a fatiga	52
Tabla III-1: Nomenclatura asignada a los modelos de investigación.....	92
Tabla III-2: Resumen de rangos de tensiones para los modelos analizados - D1	97
Tabla III-3: Resumen de rangos de tensiones para los modelos analizados - D2	99
Tabla III-4: Resumen de rangos de tensiones para los modelos analizados - D3	104
Tabla III-5: Resumen de rangos de tensiones para los modelos analizados - D4	107
Tabla III-6: Tabla de datos curva S-N resistencia a fatiga detalle D1	112
Tabla III-7: Tabla de datos curva S-N resistencia a fatiga detalle D2	112
Tabla III-8: Tabla de datos curva S-N resistencia a fatiga detalle D3	113
Tabla III-9: Tabla de datos curva S-N resistencia a fatiga detalle D4	113

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura I-1: Desarrollo histórico de la teoría de fatiga	11
Figura I-2: Distribución de tensiones en una placa a lo largo de una superficie contigua a una soldadura.....	13
Figura I-3: Diferentes terminaciones de placas de refuerzo.....	14
Figura I-4: Diagrama de flujo de la metodología de trabajo	15
Figura II-1: Diagrama general del fondo teórico del estado límite de fatiga	16
Figura II-2: Representación gráfica de proceso de iniciación.....	17
Figura II-3: Mecanismo de deslizamiento a nivel de los planos cristalinos de falla del material en el proceso de iniciación de grietas.....	17
Figura II-4: Características y parámetros de cargas cíclicas de fatiga	19
Figura II-5: Efecto de la tensión media en los ciclos a la falla por fatiga.....	20
Figura II-6: Efectos del entorno y la historia de carga en la capacidad a fatiga	20
Figura II-7: Efecto del rango de tensión en los ciclos a la falla por fatiga.....	21
Figura II-8: Método “reservoir” de conteo de ciclos de carga asociado a un historial de tensiones de terminado	22
Figura II-9: Espectro de tensiones cíclicas de fatiga.....	22
Figura II-10: Componentes de distribución de tensiones a través de un elemento en la zona contigua al punto agrietamiento en una soldadura	23
Figura II-11: Curvas S-N de resistencia a fatiga para tensiones normales.....	25
Figura II-12: Fases del proceso de propagación de la grieta, método de mecánica de fractura	27
Figura II-13: Ejemplos de configuraciones geométricas globales que tienen efectos sobre las tensiones Nominales	28
Figura II-14: Tensiones biaxiales al pie de soldadura, tensiones de diseño.....	31
Figura II-15: Tipología de tensiones Hot-Spot	32
Figura II-16: Puntos de referencia aplicados a diferentes mallados.....	34
Figura II-17: Idealización de radios de muesca en pie y raíz de soldadura	37

Figura II-18: Recomendación de ángulos de soldaduras y ubicación de radios idealizados.....	38
Figura II-19: Curvas S-N de clasificación FAT200, FAT225, FAT560 Y FAT630	39
Figura II-20: Factor f(R) según caso característico.....	42
Figura II-21: Parámetros para determinación de espesor efectivo.....	44
Figura II-22: Gráfica de factores de reducción de resistencia a fatiga por temp.	45
Figura II-23: Modelación por elementos finitos de una conexión soldada típica	46
Figura II-24: Alternativas de modelación de soldadura	47
Figura III-1: Clasificación a fatiga de extremos de placas de refuerzo en vigas doble T, basado en el método de tensión Nominal.....	53
Figura III-2: Componentes del sistema motriz de correa transportadora apoyada en viga en voladizo estudiada	54
Figura III-3: Brazo de torque	54
Figura III-4: Excentricidad de giro en sistema motriz de correa transportadora en ubicación del descanso.....	55
Figura III-5: Diferentes terminaciones de placas de refuerzo	56
Figura III-6: Configuraciones seleccionadas para la modelación por elem. finitos.....	57
Figura III-7: Diagrama de flujo de la metodología de trabajo	57
Figura III-8: Detalles dimensionales y solicitaciones del sistema motriz de correa transportadora apoyada en viga en voladizo estudiada	58
Figura III-9: Rango de tensiones detalle D1, elem. tipo <i>Solid</i> , filete de soldadura máximo - Mallado fino, elementos de segundo orden, extrapolación cuadrática	60
Figura III-10: Rango de tensiones detalle D1, elem. tipo <i>Solid</i> , filete de soldadura máximo - Mallado fino, elementos de primer orden, extrapolación lineal	61
Figura III-11: Rango de tensiones detalle D1, elem. tipo <i>Solid</i> , filete de soldadura máximo - Mallado grueso, elementos de segundo orden, extrapolación lineal	61
Figura III-12: Rango de tensiones detalle D1, elem. tipo <i>Solid</i> , filete de soldadura mínimo - Mallado fino, elementos de segundo orden, extrapolación cuadrática.....	62
Figura III-13: Rango de tensiones detalle D1, elem. tipo <i>Solid</i> , filete de soldadura mínimo - Mallado fino, elementos de primer orden, extrapolación lineal.....	62

Figura III-14: Rango de tensiones detalle D1, elem. tipo Solid, filete de soldadura mínimo - Mallado grueso, elementos de segundo orden, extrapolación lineal	63
Figura III-15: Rango de tensiones detalle D1, elem. tipo Shell oblicuo y perpendicular - Mallado fino, elementos de segundo orden, extrapolación cuadrática	63
Figura III-16: Rango de tensiones detalle D1, elem. tipo Shell oblicuo y perpendicular - Mallado fino, elementos de primer orden, extrapolación lineal.....	64
Figura III-17: Rango de tensiones detalle D1, elem. tipo Shell oblicuo y perpendicular - Mallado grueso, elementos de segundo orden, extrapolación lineal.....	64
Figura III-18: Rango de tensiones detalle D1, elem. tipo Shell perpendicular - Mallado fino, elementos de segundo orden, extrapolación cuadrática.....	65
Figura III-19: Rango de tensiones detalle D1, elem. tipo Shell perpendicular - Mallado fino, elementos de primer orden, extrapolación lineal	65
Figura III-20: Rango de tensiones detalle D1, elem. tipo Shell perpendicular - Mallado grueso, elementos de segundo orden, extrapolación lineal	66
Figura III-21: Rango de tensiones detalle D1, elem. tipo Shell perpendicular rígido - Mallado fino, elementos de segundo orden, extrapolación cuadrática	66
Figura III-22: Rango de tensiones detalle D1, elem. tipo Shell perpendicular rígido - Mallado fino, elementos de primer orden, extrapolación lineal.....	67
Figura III-23: Rango de tensiones detalle D1, elem. tipo Shell perpendicular rígido - Mallado grueso, elementos de segundo orden, extrapolación lineal.....	67
Figura III-24: Rango de tensiones detalle D2, elem. tipo <i>Solid</i> , filete de soldadura máximo - Mallado fino, elementos de segundo orden, extrapolación cuadrática	68
Figura III-25: Rango de tensiones detalle D2, elem. tipo Solid, filete de soldadura máximo - Mallado fino, elementos de primer orden, extrapolación lineal	68
Figura III-26: Rango de tensiones detalle D2, elem. tipo Solid, filete de soldadura máximo - Mallado grueso, elementos de segundo orden, extrapolación lineal	69
Figura III-27: Rango de tensiones detalle D2, elem. tipo Solid, filete de soldadura mínimo - Mallado fino, elementos de segundo orden, extrapolación cuadrática.....	69
Figura III-28: Rango de tensiones detalle D2, elem. tipo Solid, filete de soldadura mínimo - Mallado fino, elementos de primer orden, extrapolación lineal	70

Figura III-29: Rango de tensiones detalle D2, elem. tipo Solid, filete de soldadura mínimo - Mallado grueso, elementos de segundo orden, extrapolación lineal	70
Figura III-30: Rango de tensiones detalle D2, elem. tipo Shell oblicuo y perpendicular - Mallado fino, elementos de segundo orden, extrapolación cuadrática	71
Figura III-31: Rango de tensiones detalle D2, elem. tipo Shell oblicuo y perpendicular - Mallado fino, elementos de primer orden, extrapolación lineal.....	71
Figura III-32: Rango de tensiones detalle D2, elem. tipo Shell oblicuo y perpendicular - Mallado grueso, elementos de segundo orden, extrapolación lineal.....	72
Figura III-33: Rango de tensiones detalle D2, elem. tipo Shell perpendicular - Mallado fino, elementos de segundo orden, extrapolación cuadrática.....	72
Figura III-34: Rango de tensiones detalle D2, elem. tipo Shell perpendicular - Mallado fino, elementos de primer orden, extrapolación lineal	73
Figura III-35: Rango de tensiones detalle D2, elem. tipo Shell perpendicular - Mallado grueso, elementos de segundo orden, extrapolación lineal	73
Figura III-36: Rango de tensiones detalle D2, elem. tipo Shell perpendicular rígido - Mallado fino, elementos de segundo orden, extrapolación cuadrática	74
Figura III-37: Rango de tensiones detalle D2, elem. tipo Shell perpendicular rígido - Mallado fino, elementos de primer orden, extrapolación lineal.....	74
Figura III-38: Rango de tensiones detalle D2, elem. tipo Shell perpendicular rígido - Mallado grueso, elementos de segundo orden, extrapolación lineal.....	75
Figura III-39: Rango de tensiones detalle D3, elem. tipo <i>Solid</i> , filete de soldadura máximo - Mallado fino, elementos de segundo orden, extrapolación cuadrática	75
Figura III-40: Rango de tensiones detalle D3, elem. tipo Solid, filete de soldadura máximo - Mallado fino, elementos de primer orden, extrapolación lineal	76
Figura III-41: Rango de tensiones detalle D3, elem. tipo Solid, filete de soldadura máximo - Mallado grueso, elementos de segundo orden, extrapolación lineal	76
Figura III-42: Rango de tensiones detalle D3, elem. tipo Solid, filete de soldadura mínimo - Mallado fino, elementos de segundo orden, extrapolación cuadrática.....	77
Figura III-43: Rango de tensiones detalle D3, elem. tipo Solid, filete de soldadura mínimo - Mallado fino, elementos de primer orden, extrapolación lineal	77

Figura III-44: Rango de tensiones detalle D3, elem. tipo Solid, filete de soldadura mínimo - Mallado grueso, elementos de segundo orden, extrapolación lineal	78
Figura III-45: Rango de tensiones detalle D3, elem. tipo Shell oblicuo y perpendicular - Mallado fino, elementos de segundo orden, extrapolación cuadrática	78
Figura III-46: Rango de tensiones detalle D3, elem. tipo Shell oblicuo y perpendicular - Mallado fino, elementos de primer orden, extrapolación lineal.....	79
Figura III-47: Rango de tensiones detalle D3, elem. tipo Shell oblicuo y perpendicular - Mallado grueso, elementos de segundo orden, extrapolación lineal.....	79
Figura III-48: Rango de tensiones detalle D3, elem. tipo Shell perpendicular - Mallado fino, elementos de segundo orden, extrapolación cuadrática.....	80
Figura III-49: Rango de tensiones detalle D3, elem. tipo Shell perpendicular - Mallado fino, elementos de primer orden, extrapolación lineal	80
Figura III-50: Rango de tensiones detalle D3, elem. tipo Shell perpendicular - Mallado grueso, elementos de segundo orden, extrapolación lineal	81
Figura III-51: Rango de tensiones detalle D3, elem. tipo Shell perpendicular rígido - Mallado fino, elementos de segundo orden, extrapolación cuadrática	81
Figura III-52: Rango de tensiones detalle D3, elem. tipo Shell perpendicular rígido - Mallado fino, elementos de primer orden, extrapolación lineal.....	82
Figura III-53: Rango de tensiones detalle D3, elem. tipo Shell perpendicular rígido - Mallado grueso, elementos de segundo orden, extrapolación lineal.....	82
Figura III-54: Rango de tensiones detalle D4, elem. tipo <i>Solid</i> , filete de soldadura máximo - Mallado fino, elementos de segundo orden, extrapolación cuadrática	83
Figura III-55: Rango de tensiones detalle D4, elem. tipo Solid, filete de soldadura máximo - Mallado fino, elementos de primer orden, extrapolación lineal	83
Figura III-56: Rango de tensiones detalle D4, elem. tipo Solid, filete de soldadura máximo - Mallado grueso, elementos de segundo orden, extrapolación lineal	84
Figura III-57: Rango de tensiones detalle D4, elem. tipo Solid, filete de soldadura mínimo - Mallado fino, elementos de segundo orden, extrapolación cuadrática.....	84
Figura III-58: Rango de tensiones detalle D4, elem. tipo Solid, filete de soldadura mínimo - Mallado fino, elementos de primer orden, extrapolación lineal	85

Figura III-59: Rango de tensiones detalle D4, elem. tipo Solid, filete de soldadura mínimo - Mallado grueso, elementos de segundo orden, extrapolación lineal	85
Figura III-60: Rango de tensiones detalle D4, elem. tipo Shell oblicuo y perpendicular - Mallado fino, elementos de segundo orden, extrapolación cuadrática	86
Figura III-61: Rango de tensiones detalle D4, elem. tipo Shell oblicuo y perpendicular - Mallado fino, elementos de primer orden, extrapolación lineal.....	86
Figura III-62: Rango de tensiones detalle D4, elem. tipo Shell oblicuo y perpendicular - Mallado grueso, elementos de segundo orden, extrapolación lineal.....	87
Figura III-63: Rango de tensiones detalle D4, elem. tipo Shell perpendicular - Mallado fino, elementos de segundo orden, extrapolación cuadrática.....	87
Figura III-64: Rango de tensiones detalle D4, elem. tipo Shell perpendicular - Mallado fino, elementos de primer orden, extrapolación lineal	88
Figura III-65: Rango de tensiones detalle D4, elem. tipo Shell perpendicular - Mallado grueso, elementos de segundo orden, extrapolación lineal	88
Figura III-66: Rango de tensiones detalle D4, elem. tipo Shell perpendicular rígido - Mallado fino, elementos de segundo orden, extrapolación cuadrática	89
Figura III-67: Rango de tensiones detalle D4, elem. tipo Shell perpendicular rígido - Mallado fino, elementos de primer orden, extrapolación lineal.....	89
Figura III-68: Rango de tensiones detalle D4, elem. tipo Shell perpendicular rígido - Mallado grueso, elementos de segundo orden, extrapolación lineal.....	90
Figura III-69: Resumen de rangos de tensiones asociados al detalle D1	90
Figura III-70: Resumen de rangos de tensiones asociados al detalle D2	91
Figura III-71: Resumen de rangos de tensiones asociados al detalle D3	91
Figura III-72: Resumen de rangos de tensiones asociados al detalle D4	91
Figura III-73: Coeficientes de concentración de tensiones, detalle D1.....	108
Figura III-74: Coeficientes de concentración de tensiones, detalle D2.....	108
Figura III-75: Coeficientes de concentración de tensiones, detalle D3.....	109
Figura III-76: Coeficientes de concentración de tensiones, detalle D4.....	109
Figura III-77: Resumen de coeficientes de concentración de tensiones	109
Figura III-78: Curvas S-N resistencia a fatiga, método de tensión Nominal	110
Figura III-79: Curvas S-N resistencia a fatiga, método de tensión Hot-Spot	111

Figura A1-1: Extracto de tablas de clasificación de detalles según configuración estructural y de solicitaciones	122
Figura A2-1: Tablas de clasificación de detalles según configuración estructural y de solicitaciones, método de tensión Hot-Spot	123
Figura A3-1: Modelo FEM detalle D1, elem. tipo <i>Solid</i> , filete de soldadura máx	124
Figura A3-2: Modelo FEM detalle D1, elem. tipo <i>Solid</i> , filete de soldadura mín	124
Figura A3-3: Modelo FEM detalle D1, elem. tipo <i>Shell</i> oblicuo y perpendicular	125
Figura A3-4: Modelo FEM detalle D1, elem. tipo <i>Shell</i> perpendicular	125
Figura A3-5: Modelo FEM detalle D2, elem. tipo <i>Solid</i> , filete de soldadura máx	126
Figura A3-6: Modelo FEM detalle D2, elem. tipo <i>Solid</i> , filete de soldadura mín	126
Figura A3-7: Modelo FEM detalle D2, elem. tipo <i>Shell</i> oblicuo y perpendicular	127
Figura A3-8: Modelo FEM detalle D2, elem. tipo <i>Shell</i> perpendicular	127
Figura A3-9: Modelo FEM detalle D3, elem. tipo <i>Solid</i> , filete de soldadura máx	128
Figura A3-10: Modelo FEM detalle D3, elem. tipo <i>Solid</i> , filete de soldadura mín	128
Figura A3-11: Modelo FEM detalle D3, elem. tipo <i>Shell</i> oblicuo y perpendicular	129
Figura A3-12: Modelo FEM detalle D3, elem. tipo <i>Shell</i> perpendicular	129
Figura A3-13: Modelo FEM detalle D4, elem. tipo <i>Solid</i> , filete de soldadura máx	130
Figura A3-14: Modelo FEM detalle D4, elem. tipo <i>Solid</i> , filete de soldadura mín	130
Figura A3-15: Modelo FEM detalle D4, elem. tipo <i>Shell</i> oblicuo y perpendicular	131
Figura A3-16: Modelo FEM detalle D4, elem. tipo <i>Shell</i> perpendicular	131

RESUMEN

El estudio de la resistencia a fatiga de los detalles típicos de placas de refuerzo en alas de vigas en voladizo es relevante en los sistemas estructurales solicitados por cargas cíclicas. El presente estudio busca establecer en forma comparativa la resistencia a fatiga de cuatro detalles típicos de refuerzo de vigas mediante el método de tensión Nominal y el método de tensiones Hot-Spot, utilizando para esto, diferentes configuraciones de modelos de elementos finitos. Debido al alto costo computacional asociado a la generación de modelos de elementos finitos de tipo *Solid* para el caso de estudio en particular, se establece que la modelación y análisis mediante modelos de tipo *Shell* perpendicular permite obtener rangos de tensiones representativos y más conservadores que los modelos de referencia de tipo *Solid* en cada detalle estudiado (D1, D2, D3 y D4), lo que presenta una alternativa factible de modelación con resultados satisfactorios y de menor costo computacional. Adicionalmente a lo anterior, se establece que los rangos de tensiones obtenidos al aplicar el método de tensión Nominal son, en general, más conservadores que los obtenidos al considerar la metodología Hot-Spot bajo las hipótesis de análisis del presente estudio, según lo cual, se verifica que el método de tensión Nominal representa una alternativa de diseño válida y más conservadora en comparación con el método de tensiones Hot-Spot para el alcance del presente estudio.

ABSTRACT

The fatigue resistance study of typical details of reinforcement plates in cantilever beams is relevant in the structural systems resisting cyclical loads. The current study seeks to establish in a comparative way the fatigue resistance of four typical details of beam reinforcement using the Nominal stress method and the Hot-Spot stress method, through different configurations of finite element models. Due to the high computational cost of *Solid* models for this particular investigation, it is established that the perpendicular *Shell* models allows to obtain representative and more conservative stress ranges than the reference *Solid* models in each detail (D1, D2, D3 and D4), which presents a feasible alternative with satisfactory results and lower computational cost. Furthermore, it is established that the stress ranges obtained using the Nominal stress method is more conservative than those obtained using the Hot-Spot stress method under the analysis hypotheses of this study, therefore, it is concluded that the Nominal stress method represents a valid and more conservative design alternative compared to the Hot-Spot stress method.

I. INTRODUCCIÓN

La teoría subyacente a la presencia de fallas por cargas cíclicas toma especial relevancia con el surgimiento de la revolución industrial a fines del siglo XIX, en donde el desarrollo de estructuras metálicas se relaciona al estudio de diferentes accidentes y tragedias por colapso estructural (tal como el accidente ferroviario 1842 cerca de Versalles, Francia), hasta reconocer definitivamente su importancia con el avance del siglo XX (Accidente avión Comet Jet en la década del 50). La descripción gráfica del desarrollo histórico de la teoría de fatiga se indica en la figura I-1:

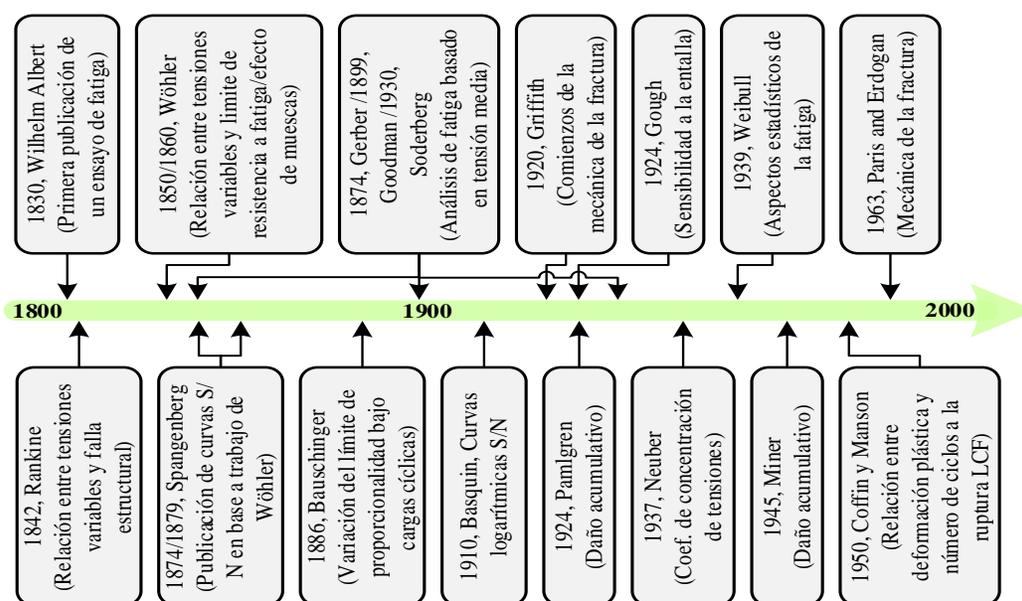


Figura I-1. Desarrollo histórico de la teoría de fatiga.

La condición de falla por fatiga ocurre por el surgimiento y propagación de grietas como resultado de cargas cíclicas repetitivas, las cuales ocurren principalmente en zonas con discontinuidades geométricas y/o metalúrgicas.

Dependiendo del número de ciclos hasta la rotura por fatiga, es posible identificar la teoría de fatiga con bajos número de ciclos (LCF) y la teoría de fatiga con alto número de ciclos (HCF). Esta última constituye el enfoque teórico de la presente investigación, y está determinada por deformaciones cíclicas en el rango elástico. Asimismo, la teoría LCF se basa en la ocurrencia de deformaciones cíclicas en el rango plástico. Debido a la diferencia entre ambas clasificaciones, no es posible aplicar las mismas metodologías de diseño a estas teorías.

Entre las principales metodologías de diseño a fatiga con alto número de ciclos (en adelante simplemente denominada fatiga), se pueden establecer los métodos de clasificación (basados en curvas experimentales de rango de tensiones respecto del número de ciclos hasta la falla S-N), y método de mecánica de fractura (la cual desarrolla los principios que rigen la propagación de grietas). En cuanto a las metodologías de clasificación, se distingue el método de tensión Nominal, el método de tensión Hot-Spot y el método de tensión Effective Notch, los cuales, consideran la teoría lineal elástica, así como también, la incorporación de métodos numéricos (tales como el método de elementos finitos) para la determinación del rango de tensiones solicitante, según lo cual, es posible determinar el número de ciclos hasta la falla del detalle estructural específico basado en las respectivas curvas experimentales de relación entre número de ciclos hasta la falla y rango de tensión S-N, denominadas comúnmente curvas de Wöhler. En forma representativa, la distribución de tensiones en una placa a lo largo de una superficie contigua a una soldadura se indica en la figura I-2:

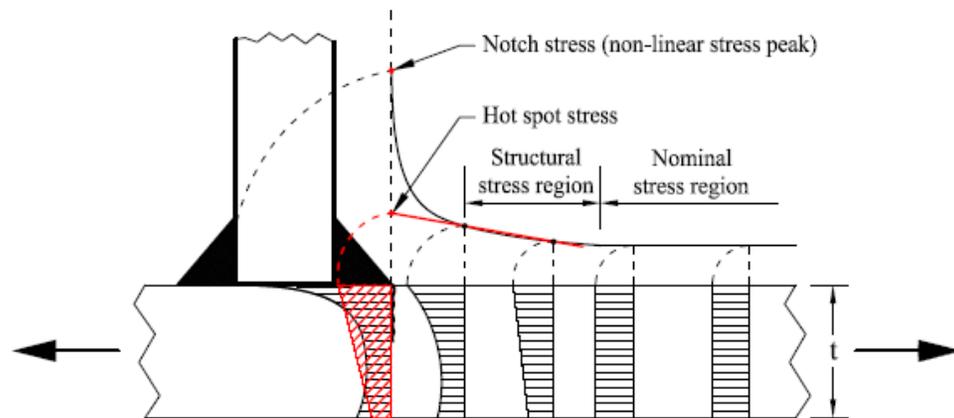


Figura I-2. Distribución de tensiones en una placa a lo largo de una superficie contigua a una soldadura. (Niemi E., 1995).

Las técnicas de modelación por elementos finitos (utilizadas en las metodologías de clasificación) tienen gran sensibilidad en el gradiente de tensiones del diseño a fatiga, esto ocurre debido a la existencia de singularidades en los puntos de interés, según lo cual, es relevante estudiar diferentes técnicas de modelación aplicadas a diversos detalles estructurales.

I.1 Objetivos

I.1.1 Objetivo general

Evaluación de metodologías de modelación por elementos finitos en el diseño a fatiga mediante los métodos de tensiones Nominal y Hot-Spot, aplicado a detalles típicos de refuerzos de vigas sometidas a cargas dinámicas de amplitud constante.

I.1.2 Objetivos específicos

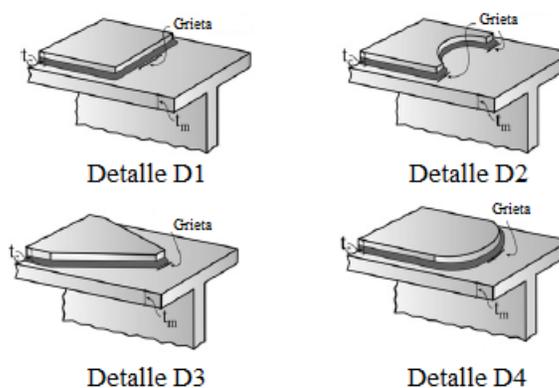
- a) Comparación del uso de elementos *Shell* y elementos *Solid* aplicado la modelación por elementos finitos en el diseño a fatiga mediante los métodos de tensiones Nominal y Hot-Spot.

- b) Evaluación comparativa del diseño a fatiga entre el método de tensión Nominal y el método de tensiones Hot-Spot.
- c) Sistematización y recomendaciones del procedimiento de diseño a fatiga mediante los métodos de tensiones Nominal y Hot-Spot.

I.2 Metodología de trabajo

La metodología de trabajo consiste en el estudio de la resistencia a fatiga de los detalles típicos de terminación de placas de refuerzo sobre alas de vigas (figura I-3).

Para cada uno de estos detalles se determina la resistencia a fatiga mediante el método de tensión Nominal, para luego determinar su capacidad mediante el método de tensiones Hot-Spot considerando diferentes configuraciones de modelación mediante elementos finitos (Elementos *Shell*, *Solid*).



Tipo de terminación	Ala de viga principal		Placa de refuerzo		t_c/t_m
	Espesor, t_m (mm)	Ancho (mm)	Espesor, t_c (mm)	Ancho (mm)	
Detalle D1	19.05	127	12.7	101.6	0.67
Detalle D2	19.05	127	12.7	101.6	0.67
Detalle D3	19.05	127	12.7	101.6	0.67
Detalle D4	19.05	127	12.7	101.6	0.67

Figura I-3. Diferentes terminaciones de placas de refuerzo (Adaptado de H. Mohsen)

En forma posterior, se procede al análisis comparativo entre las metodologías utilizadas para finalmente generar una sistematización y recomendaciones del procedimiento de diseño a fatiga mediante los métodos de tensiones Nominal y Hot-Spot. El diagrama de flujo de la metodología de trabajo utilizada se indica a continuación:

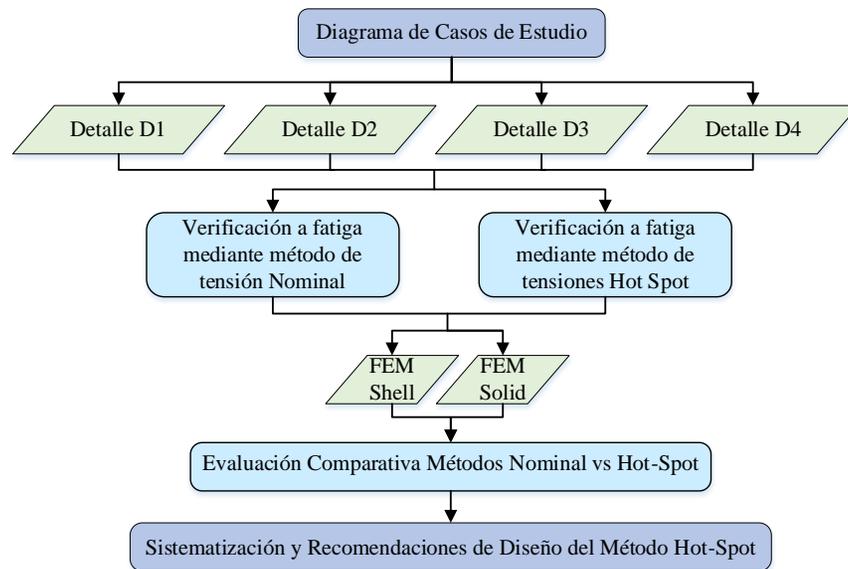


Figura I-4. Diagrama de flujo de la metodología de trabajo.

II. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

II.1 Estado límite de resistencia por fatiga en estructuras de acero

El estado límite de resistencia por fatiga constituye una condición de suma relevancia en estructuras sometidas a fluctuaciones de carga (tales como puentes, puentes grúa, estructuras de correas transportadoras, etc.). La fatiga corresponde al proceso de alteración estructural progresiva, localizada y permanente ocurrida en un material sujeto a fluctuaciones de tensiones y deformaciones en un punto (o puntos), lo cual, puede generar grietas o fracturas después de un número suficiente de fluctuaciones (ASTM E1823/2013). Un diagrama general del fondo teórico del estado límite de resistencia por fatiga se indica a continuación:

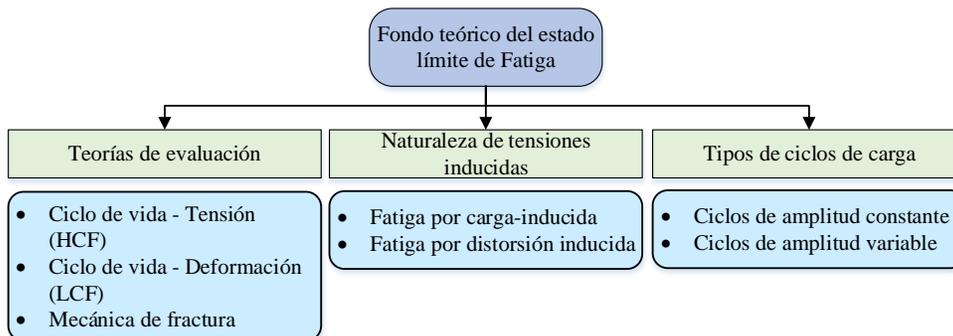


Figura II-1. Diagrama general del fondo teórico del estado límite de fatiga.

Tal como se indica en la figura II-2, el proceso de iniciación y propagación de las grietas es un proceso acumulativo de daño durante los ciclos de carga en la vida de servicio del material hasta que el mecanismo de falla puede ocurrir incluso ante solicitaciones estáticas. A pesar de que los procesos de iniciación y propagación de grietas ocurren en forma secuencial, los mecanismos que predominan en éstos difieren en su naturaleza. La iniciación de grietas depende mayormente de las propiedades del

material, en específico de las deformaciones plásticas producidas principalmente por ciclos de tensiones locales de corte, determinando un mecanismo de deslizamiento a nivel de los planos cristalinos de falla del material. Asimismo, el proceso de propagación de grieta está dominado por ciclos de tensiones locales de tracción.

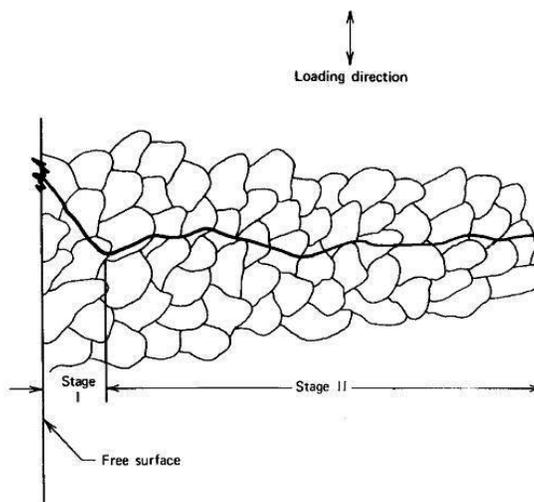


Figura II-2. Representación gráfica de proceso de iniciación (estado I, modo de corte) y propagación de grieta (estado II, modo de tracción). (Adaptado de Stephens R. I., Fatemi A., Stephens R. R., Fuchs H., 2000).

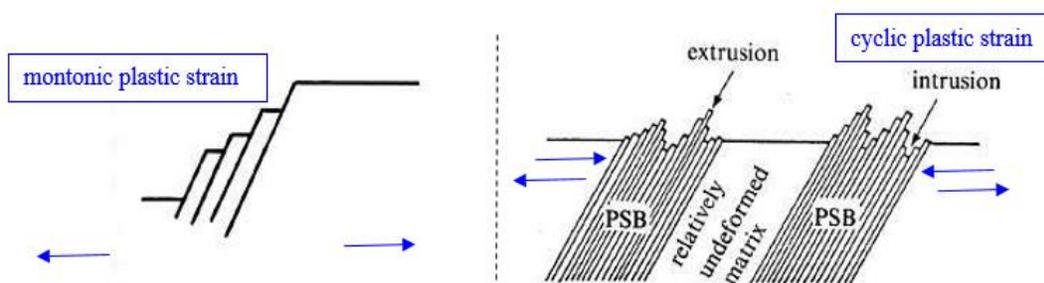


Figura II-3. Mecanismo de deslizamiento a nivel de los planos cristalinos de falla del material en el proceso de iniciación de grietas. (Levitin V., Loskutove S., 2009).

En el caso de estructuras soldadas, dependiendo del tipo y forma de la junta, es posible observar cambios localizados en la rigidez del material, según lo cual, se producen zonas de concentración de tensiones. Adicionalmente, el proceso de soldadura

introduce imperfecciones geométricas tanto en el metal base como en la soldadura misma, según lo cual, la condición de fatiga está dominada principalmente por la condición de propagación de grieta (estado II, modo de tracción).

Entre los factores de influencia de mayor relevancia en el diseño por fatiga de estructuras soldadas se destacan las cargas cíclicas solicitantes y los detalles estructurales de los elementos respectivos, tal como se describen a continuación:

II.1.1 Cargas cíclicas solicitantes de fatiga

Las solicitaciones cíclicas que a la vez inducen tensiones cíclicas en los elementos estructurales pueden ser de diferente naturaleza, identificando entre sus principales características: amplitud del rango de tensiones, tensión media y secuencia de carga. De acuerdo a lo anterior, se destacan los siguientes parámetros que caracterizan a las cargas solicitantes de fatiga para un ciclo de amplitud constante (ver figura II-4):

a) Rango de tensiones:

$$\Delta\sigma = \sigma_{\max} - \sigma_{\min} \quad (2.1)$$

b) Amplitud de tensiones:

$$\sigma_a = (\sigma_{\max} - \sigma_{\min}) / 2 \quad (2.2)$$

c) Tensión media:

$$\sigma_m = (\sigma_{\max} + \sigma_{\min}) / 2 \quad (2.3)$$

d) Relación de tensiones (R) para un ciclo de amplitud constante.

$$R = \sigma_{\max} / \sigma_{\min} \quad (2.4)$$

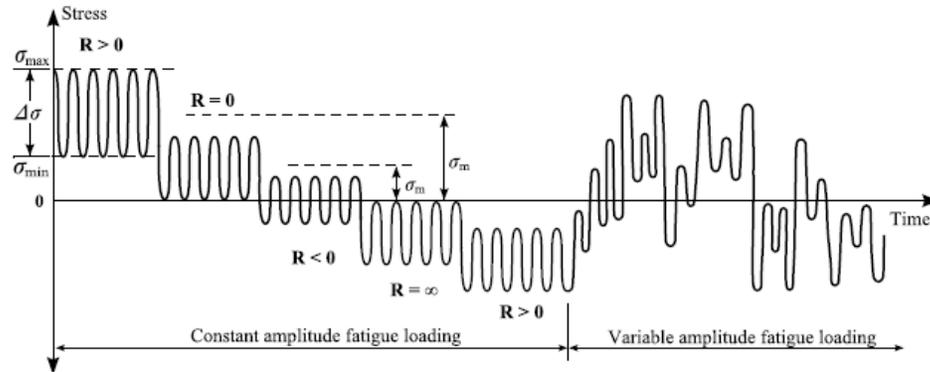


Figura II-4. Características y parámetros de cargas cíclicas de fatiga. (Aygül M., 2013).

Uno de los parámetros de mayor importancia que influye en la resistencia por fatiga lo constituye el rango de tensiones ($\Delta\sigma$) en donde cada ciclo contribuye a la acumulación de daño, otro parámetro de influencia lo constituye la tensión media (σ_m), sin embargo, en el caso de diseño a fatiga de elementos soldados, este parámetro es despreciado debido a la presencia de altas tensiones residuales (Gurney 1968; Maddox 1975). No obstante lo anterior, los efectos de la tensión media toman relevancia en casos de tratamiento post-soldadura para el alivio de tensiones.

Según se indica en la figura II-5, el número de ciclos a la falla por fatiga se reduce con el incremento de la tensión media, mientras que en la figura II-6, se indica la neutralización de la influencia de la tensión media a altos niveles del rango de tensiones. Por otra parte, para un determinado nivel de tensión máxima fija, el incremento en el rango de tensiones produce una reducción en el número de ciclos a la falla por fatiga (figura II-7).

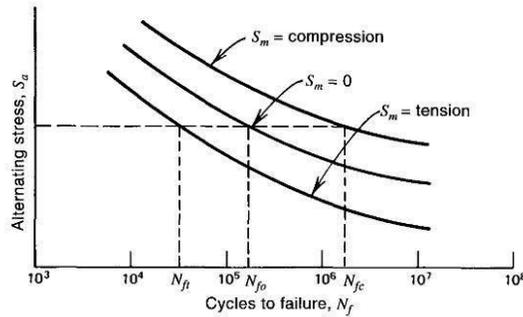


Figura II-5. Efecto de la tensión media en los ciclos a la falla por fatiga. (Stephens R. I., Fatemi A., Stephens R. R., Fuchs H., 2001).

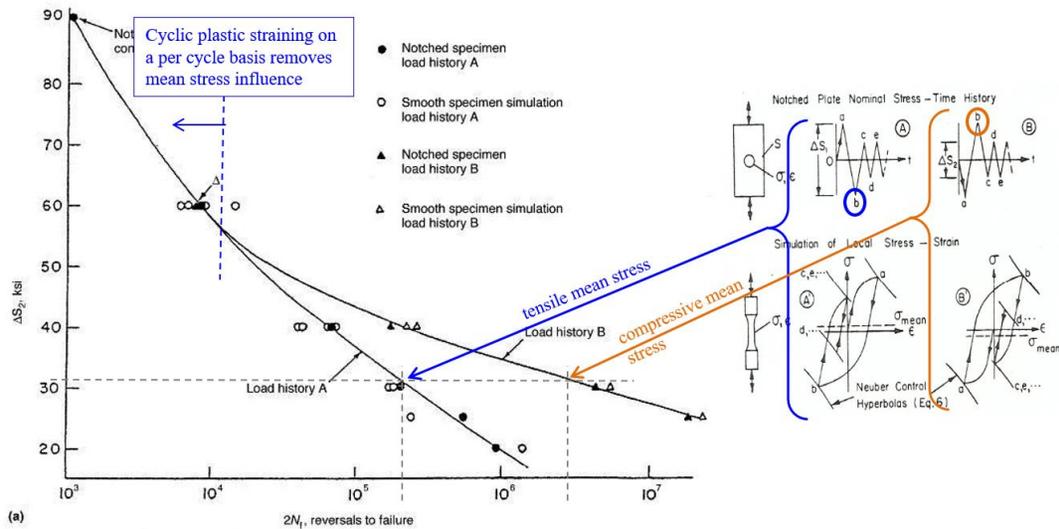


Figura II-6. Efectos del entorno y la historia de carga en la capacidad a fatiga. (Morrow JoDean, Wetzel R.M., Topper T.H., 1970).

Al considerar un rango de tensiones de diseño acotado por la tensión disponible elástica (el código ANSI/AISC 360-16 limita la tensión máxima a $0.66F_y$), se establece que, para un historial de ciclos de carga determinado en elementos que presentan únicamente tensiones de compresión, no se genera la condición de fatiga, salvo en zonas de elevadas tensiones de tracción residuales, donde se producen grietas localizadas. Adicionalmente, según se establece en el ANSI/AISC 360-10, “Para

niveles bajos de tensión de tracción cíclico, se alcanza un punto donde el rango de tensión es tan pequeño que el agrietamiento de fatiga no se iniciará, sin importar el número de ciclos de carga. Este nivel de tensión se define como el umbral de fatiga”.

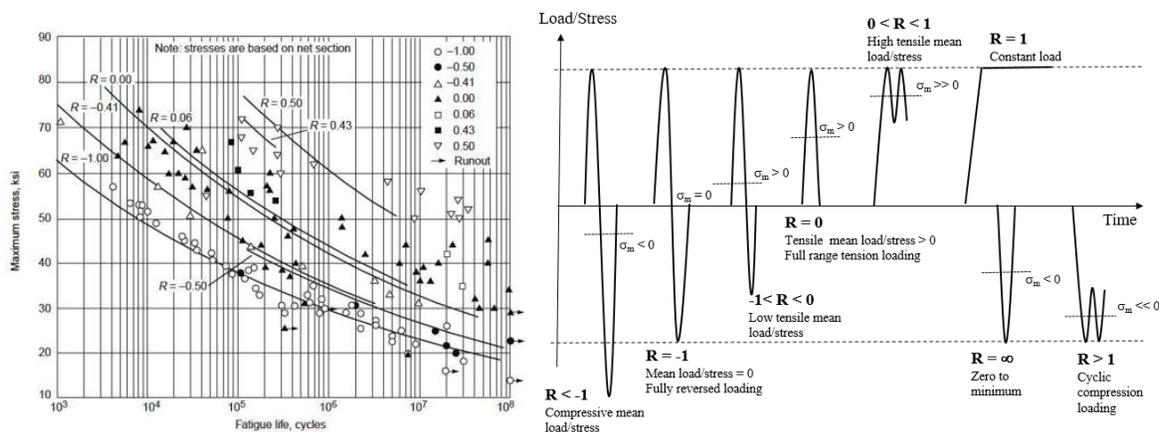


Figura II-7. Efecto del rango de tensión en los ciclos a la falla por fatiga. (Becker W.T., and Shipley R.J., 2002).

En la práctica es posible encontrar ciclos de carga de amplitud variable (extremo derecho de la figura II-4) los que pueden ser representados en forma aproximada mediante uno o más ciclos de carga de amplitud constante. Existen diferentes métodos que permiten la identificación y conteo de ciclos de carga asociado a un historial de tensiones determinado, tales como los métodos “reservoir” y “rainflow”. El método “reservoir” es posible describirlo mediante la analogía de un embalse de agua sobre la gráfica de historia tiempo-tensión, el que se va “drenando” sucesivamente desde cada punto inferior, obteniendo un rango de tensiones característico y un número de ciclos total en cada caso, tal como se indica en la figura II-8. Por otra parte el método “rainflow” permite resultados equivalentes en el conteo de rangos de tensiones y su

principio consiste en simular un flujo de agua siguiendo la trayectoria de la gráfica de historia tiempo-tensión.

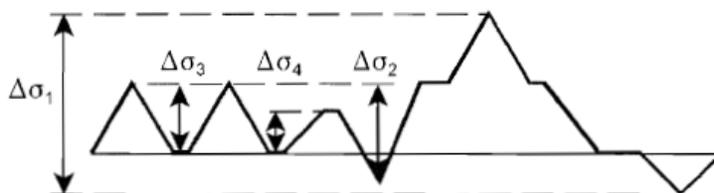


Figura II-8. Método “reservoir” de conteo de ciclos de carga asociado a un historial de tensiones de terminado. (EN 1993-1-9).

Lo anterior permite determinar un espectro de rangos de tensiones según números de ciclos en orden descendiente, tal como se indica en la figura II-9.

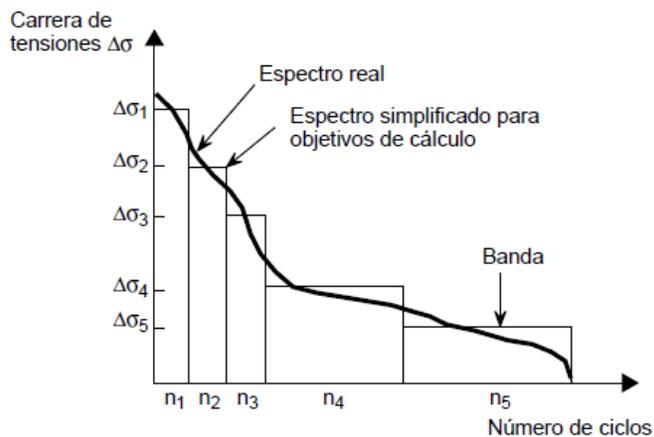


Figura II-9. Espectro de tensiones cíclicas de fatiga. (Adaptado de ITEA, Instituto técnico de la estructura en acero, diseño para fatiga).

Con cada ciclo de carga se produce una acumulación de daño, en donde el daño total para prevenir la rotura en la vida útil de diseño a fatiga, puede ser determinado por el modelo de Palmgren-Miner (1945) para acumulación de daño lineal considerando cada banda de tensiones:

$$n_1/N_1 + n_2/N_2 + \dots + n_n/N_n \leq 1 \quad (2.5)$$

Donde:

n_i : Número de ciclos en la banda de tensiones “i” durante la vida útil de diseño a fatiga.

N_i : Número de ciclos de resistencia a fatiga en la banda de tensiones “i” (Curva S-N).

II.1.2 Componentes y distribución de tensiones en conexiones soldadas

Los componentes de la distribución de tensiones a través de un elemento en la zona contigua al punto de agrietamiento en una soldadura pueden dividirse en: 1) tensiones Nominales de membrana, equivalentes a las tensiones medias a través del espesor del elemento, 2) tensiones flexurales por acción de la geometría del elemento, distribuidas en forma lineal a través del espesor del elemento y 3) tensiones no-lineales por acción de la geometría local de la soldadura, tal como se indica en la figura II-10.

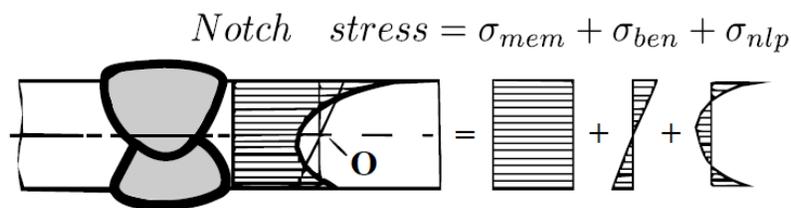


Figura II-10. Componentes de distribución de tensiones a través de un elemento en la zona contigua al punto agrietamiento en una soldadura. (IIW, 2003).

Para detalles de conexiones soldadas, la resistencia a fatiga depende principalmente de los siguientes parámetros:

- a) Concentración de tensiones por discontinuidades geométricas.
- b) Concentración de tensiones locales por geometría de la soldadura en las secciones contiguas.

- c) Defectos locales en la soldadura tales como porosidad, inclusiones, fisuras, socavamiento, etc.

II.1.3 Curvas de clasificación S-N

La resistencia a fatiga puede ser presentada en forma de curvas S-N (denominadas también curvas de Wöhler) obtenidas mediante el ensayo experimental de diversos detalles estructurales, las que corresponden a la relación logarítmica entre el rango de tensiones normales ($\Delta\sigma$) y el número de ciclos hasta la falla (N). La relación lineal en escala logarítmica puede expresarse como sigue:

$$N = \Delta\sigma_c^m \cdot N_c / \Delta\sigma^m \quad (2.6)$$

Donde:

N_c : Número de ciclos constante para curvas de resistencia a fatiga.

m: Pendiente de la curva S-N.

De acuerdo a lo establecido en el código EN 1993-1-9, para cada categoría de detalle estructural (tabulados según categoría) se asigna un valor que representa en N/mm^2 el valor referencial $\Delta\sigma_c$ para la resistencia a fatiga en 2 millones de ciclos ($N_c = 2 \cdot 10^6$). Considerando lo anterior, para un rango de tensiones de amplitud nominal constante, la curva de resistencia a fatiga puede ser obtenida como:

$$N = \Delta\sigma_c^m \cdot 2 \times 10^6 / \Delta\sigma^m \text{ con } m = 3, \text{ para } N \leq 5 \cdot 10^6 \quad (2.7)$$

Asimismo, en el caso de un espectro de tensiones nominales con un rango de tensiones sobre y por debajo del límite de tensiones de amplitud constante $\Delta\sigma_d$

($\Delta\sigma_d = \left(\frac{2}{5}\right)^{\frac{1}{3}} \cdot \Delta\sigma_c$), se adiciona a la expresión (2.7), la siguiente relación:

$$N = \frac{\Delta\sigma_d^m \cdot 5 \times 10^6}{\Delta\sigma^m} \text{ con } m = 5, \text{ para } 5 \cdot 10^6 \leq N \leq 10^8 \quad (2.8)$$

Finalmente, la tensión límite asociada al umbral de fatiga está dada por:

$$\Delta\sigma_L = \left(\frac{5}{100}\right)^{\frac{1}{5}} \cdot \Delta\sigma_d \quad (2.9)$$

Las curvas S-N de resistencia a fatiga para tensiones normales, propuestas en el código EN 1993-1-9 (y que serán la base de investigación en el presente estudio), se indican a continuación:

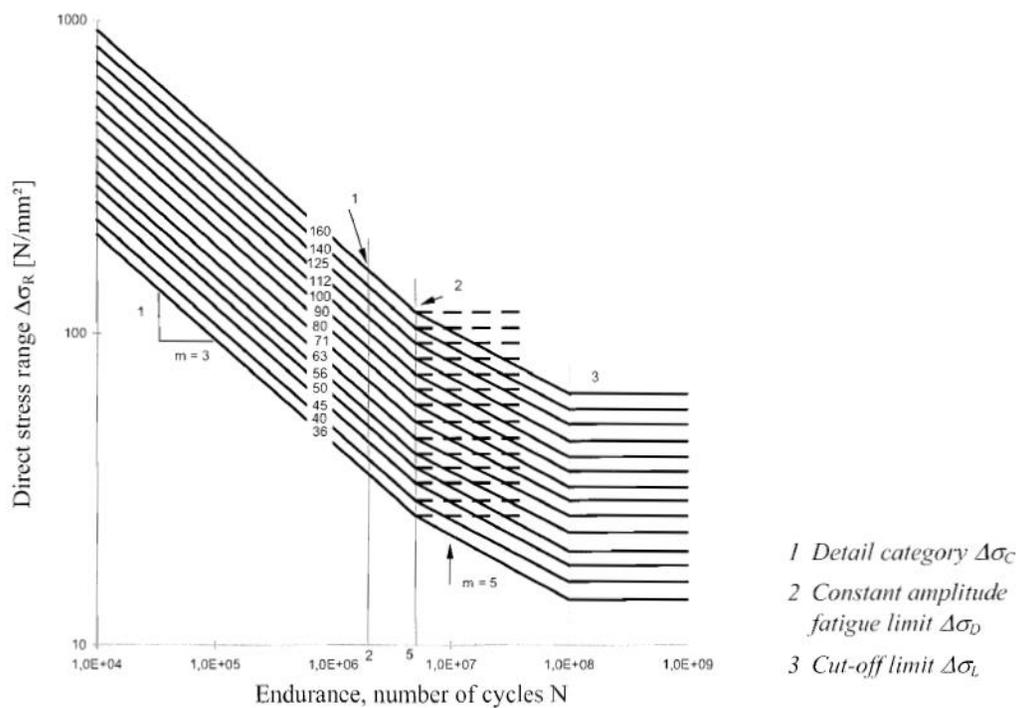


Figura II-11. Curvas S-N de resistencia a fatiga para tensiones normales. (EN 1993-1-9).

Las relaciones de rango de tensión de corte y ciclos hasta la falla se establecen en el código EN 1993-1-9 de forma similar a lo anteriormente expuesto, estableciéndose una tabulación de detalles estructurales asociados a sus curvas S-N respectivas.

II.1.4 Métodos de diseño a fatiga

Las principales metodologías de diseño a fatiga pueden clasificarse de acuerdo a lo señalado a continuación:

- a) Métodos de clasificación: están basados en la relación de curvas S-N, y corresponden a las metodologías recomendadas por los diferentes códigos de diseño y de mayor uso en la práctica. Comprenden los siguientes métodos de diseño:
 - i) Método de tensión Nominal
 - ii) Método de tensión Hot-Spot
 - iii) Método de tensión Effective Notch
- b) Método de mecánica de fractura: desarrolla los principios que rigen la propagación de grietas considerando la relación entre los defectos geométricos, las propiedades del material y las tensiones aplicadas, de esta manera se busca determinar el estado de las tensiones en la punta del avance de grieta mediante el parámetro de “factor de intensidad de tensiones”, según lo cual, es posible determinar la resistencia por fatiga (Andersson 2005; Barsom and Rolfe 1987; Schijve 2009). El proceso de propagación de la grieta producida por solicitaciones cíclicas comprende 3 fases desde su iniciación hasta la falla, tal como se indica en la figura II-12.

La primera fase corresponde al límite del material para la propagación de la grieta (ΔK_{th}) en donde el material posee una resistencia equiparable a la propagación de la grieta (para un factor de intensidad de tensiones dado), siendo ésta nula o de extrema lentitud. La segunda fase (para un factor de intensidad mayor al de la fase anterior) se caracteriza por una propagación estable de la grieta, donde la relación entre la propagación del agrietamiento y las tensiones en la punta del avance de grieta es lineal en escala logarítmica (ley de París se hace válida). Finalmente, en la tercera fase las tensiones en la punta del avance de grieta superan el límite crítico (ΔK_c), provocando la falla.

El desarrollo en detalle de las teorías asociadas al método de mecánica de fractura no es materia de la presente investigación.

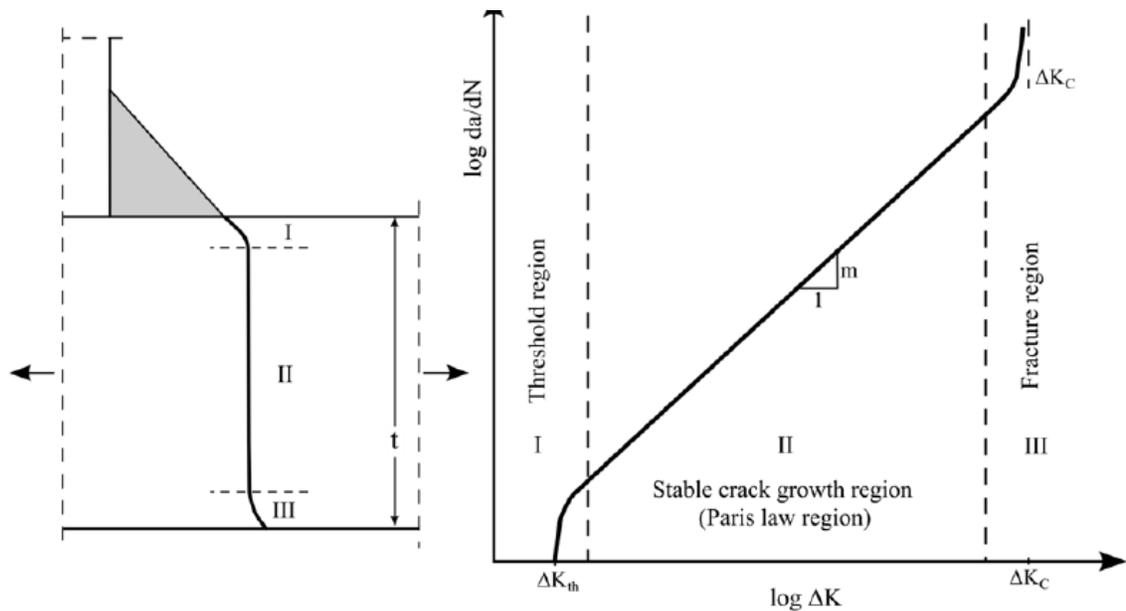


Figura II-12. Fases del proceso de propagación de la grieta, método de mecánica de fractura. (Aygül M., 2013).

II.1.4.1 Método de tensión Nominal

Corresponde a la metodología de diseño por fatiga de mayor simplicidad y utilización en la práctica. Este método se basa en la determinación de las tensiones promedio en el elemento estudiado mediante la teoría lineal elástica, en donde no se incluyen los efectos de concentración de tensiones por irregularidades locales propias de la soldadura, y en cambio, sí considera las configuraciones geométricas globales y concentraciones de carga que tienen efectos sobre la distribución de tensiones globales del elemento (ver figura II-13) y que pueden o no estar incluidas previamente en las respectivas curvas de relación S-N.

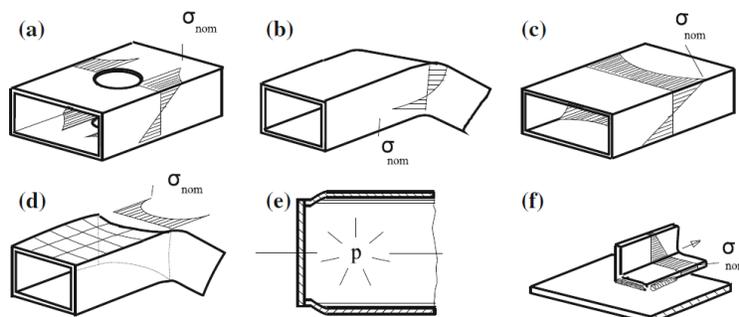


Figura II-13. Ejemplos de configuraciones geométricas globales que tienen efectos sobre las tensiones Nominales, a) Agujeros, b) Vigas curvadas, c) Vigas de ala ancha, d) Alas curvadas, e) Cargas concentradas, f) Excentricidades de carga. (IIW, 2016).

La clasificación de detalles estructurales y correspondientes curvas de relación S-N, basadas en el método de tensiones Nominales, están disponibles en diferentes códigos de diseño, e.g. ANSI/AISC360, EN1993-1-9, IIW 2008. De acuerdo a lo anterior, el uso de este método está restringido a la información disponible de las curvas de S-N asociadas a una configuración estructural y de solicitaciones determinadas, lo que constituye una restricción ante configuraciones de mayor complejidad, siendo

necesario en ese caso, la utilización de métodos alternativos para el diseño a fatiga. Adicionalmente a lo anterior, ante configuraciones de carga y geometrías complejas se dificulta la determinación del rango de tensiones de diseño mediante soluciones analíticas, en cuyo caso se hace necesaria la utilización de métodos numéricos (tales como el método de elementos finitos) teniendo en cuenta la no consideración de concentraciones de tensiones no-lineales por acción de la geometría local de la soldadura. Un extracto de las tablas con la clasificación de detalles según configuración estructural y de solicitaciones, de acuerdo al código EN1993-1-9, se indican en el Anexo A1, las que hacen directa relación con las curvas S-N de resistencia a fatiga señaladas en la figura II-11.

Las tensiones producto del posible desalineamiento en los elementos estudiados deben ser consideradas si exceden la tolerancia incluida en las respectivas curvas S-N, incorporando factores de modificación de resistencia tal como se indica en la sección II.1.5.

II.1.4.2 Método de tensiones Hot-Spot

El método de tensiones Hot-Spot, permite establecer una alternativa para la verificación del estado límite de fatiga en configuraciones geométricas de conexiones soldadas, que por su complejidad dificultan la determinación del rango de tensiones Nominales o no es posible asociarlas a una clasificación según el método de tensiones Nominales. Esta metodología establece la verificación de la resistencia a fatiga en el punto de iniciación de la grieta, la cual se restringe al pie de soldadura (también es posible extender el método a otros puntos de iniciación de agrietamiento al considerar

curvas S-N y factores de concentración de tensiones correspondientes a los parámetros geométricos y dimensionales del detalle específico) e incluye tanto tensiones globales como concentraciones de tensiones por efecto de posibles singularidades geométricas, no considerando los efectos de no-linealidad por acción de la geometría local propia de la soldadura. De esta manera, las tensiones de diseño bajo el método Hot-Spot se determinan asumiendo un comportamiento lineal elástico del material, según lo cual, es posible realizar modelos estructurales del detalle estudiado, utilizando por ejemplo, el método de elementos finitos, lo que permite incorporar los diferentes parámetros geométricos que influyen directamente en tensiones globales y locales por acción de las correspondientes cargas cíclicas. Los modelos realizados se llevan a cabo asumiendo una idealización de la geometría, libre de imperfecciones y desalineamientos, los cuales son considerados en forma directa a través de las curvas experimentales S-N que incluyen las imperfecciones (dentro de un rango específico) correspondientes a las probetas ensayadas, y en caso de existir desviaciones mayores a las toleradas por las diferentes curvas S-N, es posible aplicar en forma directa las variaciones geométricas al modelo o utilizar algún factor de concentración de tensiones en forma equivalente.

Al igual que en el método de tensiones Nominales existen tablas disponibles en diferentes códigos de diseño (e.g. EN1993-1-9, IIW, 2016), con la clasificación de detalles según configuración específica y de solicitaciones disponibles, tal como se indica en el Anexo A2.

Ante la existencia de tensiones biaxiales en la superficie de elementos tipo placa es posible establecer las tensiones de diseño en base a la tensión principal que actúa aproximadamente (en un rango menor o igual a 60°) en línea con la perpendicular al pie de soldadura, y en caso de existir un rango mayor a 60° se recomienda la determinación de la tensión perpendicular resultante, tal como se indica en la figura figura II-14 (de ser necesario, es posible analizar la otra tensión principal utilizando la curva S-N correspondiente).

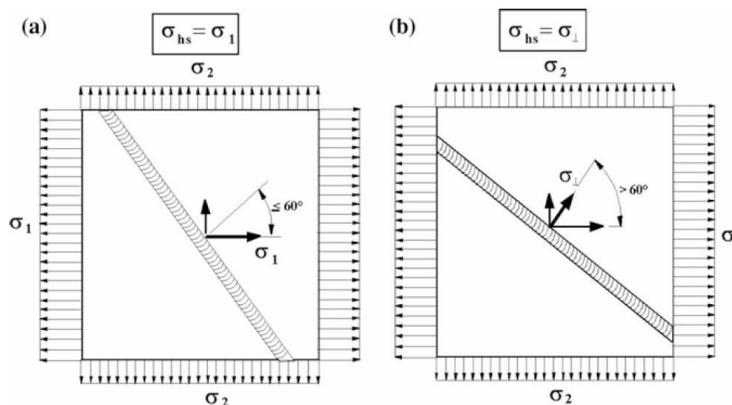


Figura II-14. Tensiones biaxiales al pie de soldadura, tensiones de diseño. a) Ángulo menor o igual a 60° , b) Ángulo mayor a 60° . (IIW, 2016).

Debido a que el método Hot-Spot se aplica en el punto de iniciación de la grieta (al pie de soldadura), en cuyo punto el valor teórico de las tensiones tiende a infinito, tal como se señaló previamente en la figura II-1, se requiere una metodología que permita linealizar las tensiones y evitar su rango no-lineal por efecto de la geometría local propia de la soldadura. Adicionalmente a lo anterior, es necesario establecer lineamientos consistentes en la modelación por elementos finitos para reducir la variación de las tensiones obtenidas, en donde factores como el tipo y tamaño de

elementos, definición de mallado, definición de soldadura, etc., influyen en los resultados.

Se distinguen 2 tipologías en el método de tensiones Hot-Spot, los cuales se definen de acuerdo a su ubicación y orientación respecto del pie de soldadura:

- a) Tipo “a”, donde las tensiones se ubican en forma transversal al pie de soldadura en la superficie del elemento y varían en forma significativa a través del espesor de éste.
- b) Tipo “b”, donde las tensiones se ubican en forma transversal al pie de soldadura en el borde del elemento y se mantienen mayormente uniformes a través de éste.

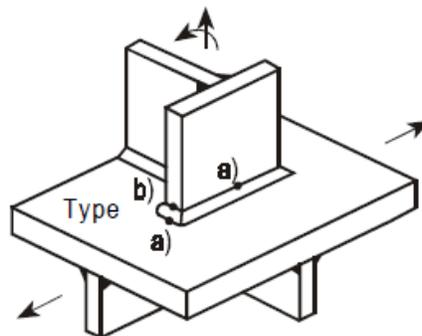


Figura II-15. Tipología de tensiones Hot-Spot. (IIW, 2016).

Es deseable entonces, que los métodos de linealización de tensiones para el Hot-Spot tipo “a” incorporen el espesor de placa en sus parámetros, mientras que para el tipo “b” la consideración del espesor de la placa no es relevante en la linealización.

La linealización de tensiones se realiza comúnmente mediante superficies lineales o cuadráticas determinadas mediante puntos referenciales ubicados a una distancia tal pie de soldadura, que permita evitar la región de concentración de tensiones de tipo no-

lineal, lo anterior permite determinar mediante extrapolación la tensión en el punto de inicio de la grieta (pie de soldadura). La linealización de tensiones mediante superficies lineales o cuadráticas es aplicable tanto a tensiones Hot-Spot tipo “a” como tipo “b”, y cada punto de referencia establecido depende del tipo, densidad de mallado y espesor de placa correspondiente.

Para el caso de tensiones Hot-Spot tipo “a” (cuyas tensiones se establecen en función del espesor de placa “t”) se tiene que (IIW, 2016):

- a) Para mallado fino utilizando una superficie de extrapolación lineal, el primer punto de referencia se establece a una distancia $0.4 \cdot t$ del pie de soldadura, mientras que el segundo punto se establece a una distancia de $1.0 \cdot t$ (la curva de extrapolación corresponde a $\sigma_{hs} = 1.67 \cdot \sigma_{0.4t} - 0.67 \cdot \sigma_{1.0t}$). En el caso de existir tensiones no-lineales de relevancia por las características locales de la soldadura o concentración de solicitaciones, se recomienda el uso de una superficie de extrapolación cuadrática con puntos de referencia establecidos a una distancia del pie de soldadura de $0.4 \cdot t$, $0.9 \cdot t$ y $1.4 \cdot t$, respectivamente (la curva de extrapolación en este caso corresponde a $\sigma_{hs} = 2.52 \cdot \sigma_{0.4t} - 2.24 \cdot \sigma_{0.9t} + 0.72 \cdot \sigma_{1.4t}$).
- b) Para mallado grueso, se utiliza una superficie de extrapolación lineal con elementos de orden superior (8 nodos caso 2D/20 nodos 3D). El primer punto de referencia se establece a una distancia $0.5 \cdot t$ del pie de soldadura (punto central del primer elemento), mientras que el segundo punto se establece a una distancia de $1.5 \cdot t$ (punto central del segundo elemento), cuya curva de extrapolación corresponde a $\sigma_{hs} = 1.50 \cdot \sigma_{0.5t} - 0.50 \cdot \sigma_{1.5t}$.

De acuerdo a lo señalado en el código IIW, 2016, la densidad de mallado de elementos se establece en base a la distancia entre el pie de soldadura y los puntos de referencia, de manera de evitar la influencia de sobretensiones en singularidades geométricas. Tal como se indica en la figura II-16, se considera un mallado fino para elementos de tamaño menor o igual a $0.4 \cdot t$, mientras que mallados gruesos son considerados tamaños equivalentes a $1.0 \cdot t$ en el caso de elementos finitos de orden superior.

Al obtener las tensiones Hot-Spot de tipo “a” mediante superficies de extrapolación, se requiere implementar la corrección por espesor de acuerdo a lo establecido en II.1.5 (para el caso de conexiones de elementos tubulares circulares se recomienda la aplicación de $n=0.4$ en el exponente de la expresión respectiva).

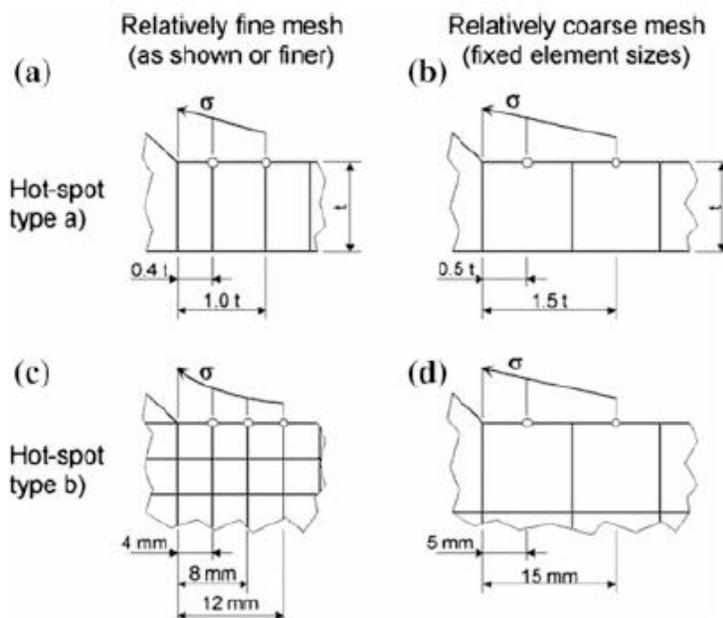


Figura II-16. Puntos de referencia aplicados a diferentes mallados. (IIW, 2016).

Para el caso de tensiones Hot-Spot tipo “b” (cuyas tensiones no dependen del espesor de placa “t”) se tiene que (IIW, 2016):

- a) Para mallado fino, se utiliza una superficie de extrapolación cuadrática, en donde el primer punto de referencia se establece a una distancia 4 mm del pie de soldadura, mientras que el segundo y tercer punto se establecen a una distancia de 8 mm y 12 mm, respectivamente. La curva de extrapolación aplicable corresponde a $\sigma_{hs}=3\cdot\sigma_{4mm} - 3\cdot\sigma_{8mm} + \sigma_{12mm}$.
- b) Para mallado grueso, se utiliza una superficie de extrapolación lineal con elementos de orden superior, el primer punto de referencia se establece a una distancia 5 mm del pie de soldadura (punto central de elemento), mientras que el segundo punto se establece a una distancia de 15 mm del primero (punto central del segundo elemento). De acuerdo a lo anterior, la curva de extrapolación aplicable corresponde a $\sigma_{hs}=1.5\cdot\sigma_{5mm} - 0.5\cdot\sigma_{15mm}$.

De acuerdo a lo señalado en el código IIW, 2016, y tal como se indica en la figura II-8, para el tipo “b” se considera un mallado fino correspondiente a elementos de tamaño menor o igual a 4 mm, mientras que para mallados gruesos se establece un tamaño equivalente a 10 mm en el caso de elementos finitos de orden superior.

Al obtener las tensiones Hot-Spot de tipo “b” mediante superficies de extrapolación, se requiere implementar la corrección por espesor de acuerdo a lo establecido en II.1.5 con la aplicación de $n=0.1$ en el exponente de la expresión respectiva.

Una aproximación alternativa establece una lectura directa de las tensiones a una distancia de $0.5\cdot t$ del pie de soldadura, sin necesidad de extrapolación (Fricke, 2001), según lo cual, se requiere un mallado de elementos cuadriláteros de orden superior de

tamaño equivalente al espesor de placa. Se evidencia una pequeña desviación al comprobar esta alternativa en ensayos de prueba (Fricke, 2001; Storsul et al., 2004). De acuerdo a lo anterior, se establece una mayor correlación entre los resultados al aumentar las tensiones obtenidas por un factor de 1.12 (lo que es equivalente a una reducción en la categoría de curva S-N correspondiente).

II.1.4.3 Método de tensión Effective Notch

El método de tensión Effective Notch en conexiones soldadas, corresponde a la tensión total en el punto de iniciación de la grieta (pie o raíz de soldadura) asumiendo un comportamiento lineal elástico del material, incluyendo los efectos de la geometría local de soldadura y de la geometría global del elemento. De esta manera, los componentes de la distribución de tensiones estudiada incorporan las tensiones medias a través del espesor del elemento, las tensiones flexurales por acción de su geometría y las tensiones no-lineales por acción de la geometría local de la soldadura.

Los puntos de concentración de tensiones en la zona de iniciación de la grieta (restringidas al pie o raíz de soldadura) pueden presentar valores teóricos de las tensiones tendientes a infinito en el caso de geometrías agudas o lo que se denomina radio de muesca tendiente a cero, por lo que se requiere predefinir un radio de la muesca en la zona de agrietamiento que permita establecer un rango válido de tensiones de diseño. El radio establecido para placas de espesor mayor a 5mm es de $r = 1$ mm. (IIW, 2016), mientras que para placas de menor espesor, se propone un radio de $r = 0.05$ mm (Zang and Richter, 2000). Una vez establecido el rango de tensiones de diseño, la verificación a fatiga se realiza mediante el uso de la respectiva curva S-

N, sin embargo, es necesario verificar, además, la resistencia a fatiga del metal base contiguo a la soldadura mediante el método Hot-Spot stress.

La determinación de las tensiones de diseño correspondientes al método Effective Notch stress requieren de una definición precisa de la geometría en estudio en la región cercana a la concentración de tensiones (incorporando las modificaciones al radio de muesca correspondiente), con un mallado de elementos suficientemente finos (comúnmente realizados con elementos sólidos 3D) que permita determinar la máxima tensión en el punto de concentración de tensiones, tal como se indica en la figura II-17 y tabla II-1. Se debe verificar, además, que tanto al pie como en la raíz de soldadura la máxima tensión determinada mediante el método Effective Notch sea al menos 1.6 veces la tensión obtenida por el método de tensión Hot-Spot.

De no existir una definición al respecto, los filetes de soldadura y las soldaduras de tope pueden ser modelados en ángulos $\theta = 45^\circ$ y $\theta = 30^\circ$, respectivamente, según se señala en la figura II-18.

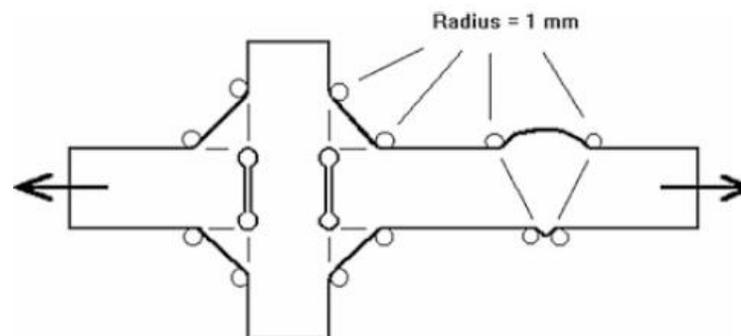


Figura II-17. Idealización de radios de muesca en pie y raíz de soldadura. (IIW, 2016).

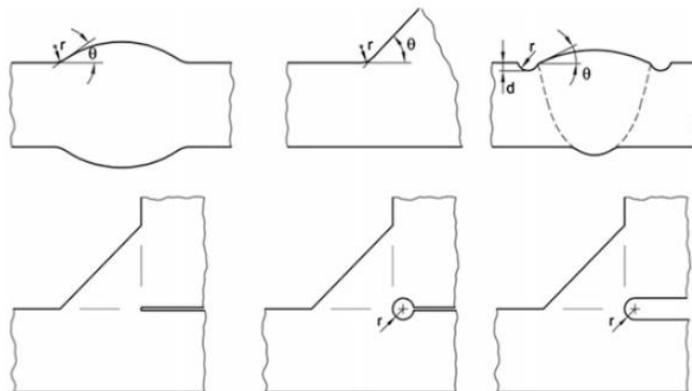


Figura II-18. Recomendación de ángulos de soldaduras y ubicación de radios idealizados. (IIW, 2016).

Tabla II-1. Tamaño de elementos finitos recomendados. (Adaptado de IIW, 2016).

Element type	Relative size	Absolute size [mm]	No. of elements in 45° arc	No. of elements in 360° arc
Quadratic with mid-side nodes	$\leq r/4$	≤ 0.25	≥ 3	≥ 24
Linear	$\leq r/6$	≤ 0.15	≥ 5	≥ 40

Según lo establecido en IIW, 2016, para elementos de espesor mayor a 5mm, se recomienda la curva S-N de clasificación FAT225 si la verificación a fatiga está basada en las tensiones principales máximas, mientras que se recomienda la curva S-N de clasificación FAT200 al utilizar tensiones de Von Mises. Asimismo, de acuerdo a Sonsino, 2009, se propone para elementos de espesor menor a 5mm, se recomienda la curva S-N de clasificación FAT630 si la verificación a fatiga está basada en las tensiones principales máximas, mientras que se recomienda la curva S-N de clasificación FAT560 al utilizar tensiones de Von Mises.

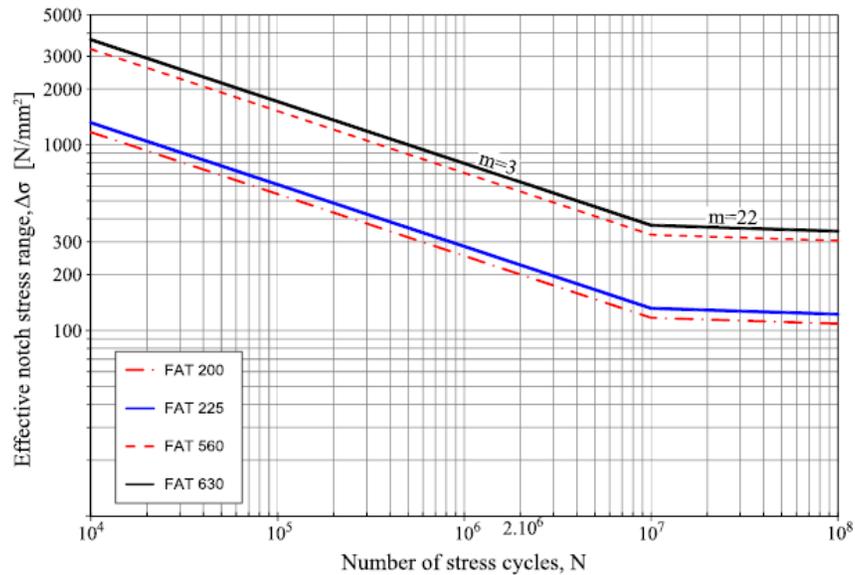


Figura II-19. Curvas S-N de clasificación FAT200, FAT225, FAT560 Y FAT630. (Aygül M., 2013).

II.1.4.4 Cuadro comparativo de las diferentes metodologías de diseño a fatiga

De acuerdo a lo expuesto en los capítulos previos, el cuadro comparativo entre las principales metodologías de diseño a fatiga, resaltando sus ventajas y desventajas, se indica en la tabla II-2.

Tabla II-2. Cuadro comparativo entre las principales metodologías de diseño a fatiga.

(Adaptado de Aygül M., 2013).

Método de tensión Nominal	
Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> - Cálculos simplificados. - Amplia implementación en la práctica. - Información experimental disponible. - Formulas paramétricas disponibles. - Disponible categorización en códigos de diseño. - Aplicable al pie y raíz de soldadura. 	<ul style="list-style-type: none"> - Dependencia de detalles estructurales específicos. - Limitada ante desalineamientos y cambios macrogeométricos. - Más imprecisa en estructuras de mayor complejidad.
Método de tensión Hot-Spot	
Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> - Menor número de curvas S-N requeridas. - Menor requerimiento de complejidad de elementos finitos. - Efectos macrogeométricos incorporados. - Mayor precisión en resultados obtenidos. 	<ul style="list-style-type: none"> - Depende de las dimensiones y configuración de los elementos verificados. - Diferentes procedimientos para la determinación de tensiones. - Aplicación limitada al pie de soldadura.
Método de tensión Effective Notch	
Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> - Efecto del espesor de elementos incorporado en los cálculos. - Independiente del tipo de elemento. - Aplicable al pie y raíz de soldadura. - Única curva S-N requerida. 	<ul style="list-style-type: none"> - Aplicable solo con modelos de elementos finitos. - Dependiente de la densidad de mallado. - Alto esfuerzo de modelación.
Método de mecánica de fractura	
Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> - Efecto del espesor de elementos incorporado en los cálculos. - No es afectado por la dirección de las tensiones. - Aplicable al pie y raíz de soldadura. - Permite establecer la resistencia a fatiga entre intervalos de inspección. - Incorpora directamente el efecto de cargas de amplitud variable. 	<ul style="list-style-type: none"> - Alto esfuerzo de modelación y cálculo. - Dependiente de múltiples parámetros: tamaño de grieta inicial y final, incremento de grieta, propiedades del material, etc.

II.1.5 Factores de modificación de resistencia a fatiga

Los principales factores de modificación de resistencia a fatiga se indican a continuación (IIW, 2016):

II.1.5.1 Razón de tensiones

Para relaciones de tensiones efectivas con $R < 0.5$ (considerando tensiones aplicadas y residuales) es posible incrementar la categoría de fatiga de los elementos estructurales estudiados mediante su multiplicación por un factor $f(R)$, el cual, depende del nivel y dirección de las tensiones residuales. Las tensiones residuales son establecidas como toda tensión que actúa durante la acción de las cargas de servicio de la estructura, y que no son consideradas en el análisis a fatiga. De no existir información confiable respecto de las tensiones residuales se recomienda utilizar un factor $f(R)=1$.

El factor $f(R)$ se determina de acuerdo a la figura II-20 y según los 3 casos señalados a continuación:

- a) Caso I: Estructuras con metal base libre de soldadura y elementos forjados con tensiones residuales despreciables ($< 0.2F_y$), así como también, estructuras soldadas con tratamiento de alivio de tensiones, donde las tensiones secundarias han sido consideradas en el análisis. Estructuras no restringidas en el montaje.
- b) Caso II: Estructuras simples a baja escala, de pared delgada y con soldaduras cortas, componentes con bordes cortados térmicamente. Estructuras no restringidas en el montaje.

- c) Caso III: Estructuras complejas con componentes soldados en 2 y 3 dimensiones, con tensiones residuales globales y elementos de pared gruesa. Caso normal de estructuras y componentes soldados.

Debido a que el tratamiento de estructuras para el alivio de tensiones residuales no es completamente efectivo (y en algunos tipos de acero actúa limitando incluso la capacidad de fatiga por reducir tensiones residuales en compresión) y, además, por la adición a tensiones residuales propias del montaje, se recomienda que el factor $f(R) > 1$ se adopte para elementos soldados sólo en casos especiales.

Para estructuras con alivio de tensiones y no soldadas, se puede usar en forma aproximada solo el 60% de las tensiones en compresión.

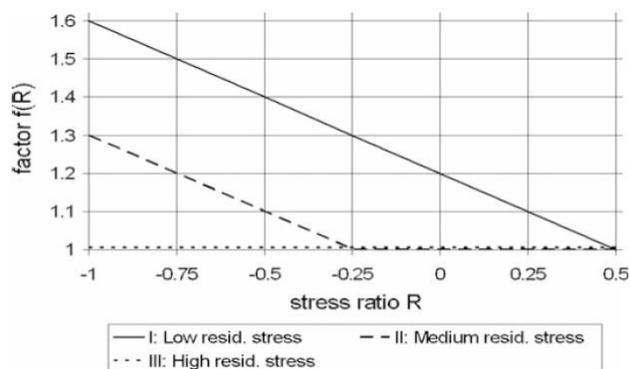


Figura II-20. Factor $f(R)$ según caso característico. (IIW, 2016).

II.1.5.2 Espesor de elementos

De acuerdo a la evidencia experimental realizada por Gurney, 1968, es posible señalar una reducción de la resistencia a fatiga con el incremento del espesor de placa, lo cual, se asocia a un incremento en el campo de tensiones en el pie de soldadura y que las tensiones en la placa en la dirección opuesta a éste disminuyen más lentamente en

comparación con placas de menor espesor. Adicionalmente, las tensiones residuales inducidas al metal base por el proceso de soldadura generalmente son mayores con el aumento del espesor de placa.

Este factor de reducción de resistencia a fatiga se aplica a elementos de espesor mayor a 25mm (IIW, 2016) y no comprende los métodos de tensión Effective Notch y Método de mecánica de fractura. La reducción se obtiene al multiplicar el factor por el rango de tensiones respectivo, según se indica a continuación:

$$\Delta\sigma = \left(\frac{t_{ref}}{t_{eff}} \right)^n \cdot \Delta\sigma_{nom,hss} \quad (2.10)$$

Donde $t_{ref}=25\text{mm}$ y corresponde al espesor de referencia, mientras que el exponente n , depende del espesor efectivo t_{eff} , y de la categoría de conexión, tal como se indica en la tabla II-3.

Tabla II-3. Exponentes para factor de reducción por espesor. (Adaptado de IIW, 2016).

Joint category	Condition	n
Cruciform joints, transverse T-joints, plates with transverse attachments, ends of longitudinal stiffeners	as-welded	0.3
Cruciform joints, transverse T-joints, plates with transverse attachments, ends of longitudinal stiffeners	toe ground	0.2
Transverse butt welds	as-welded	0.2
Butt welds ground flush, base material, longitudinal welds or attachments to plate edges	any	0.1

Asimismo, el espesor efectivo t_{eff} , se determina según lo señalado a continuación:

$$t_{eff} = \begin{cases} t, & \text{si } \frac{L}{t} < 2 \\ 0.5 \cdot L \geq t, & \text{si } \frac{L}{t} \geq 2 \end{cases} \quad (2.10)$$

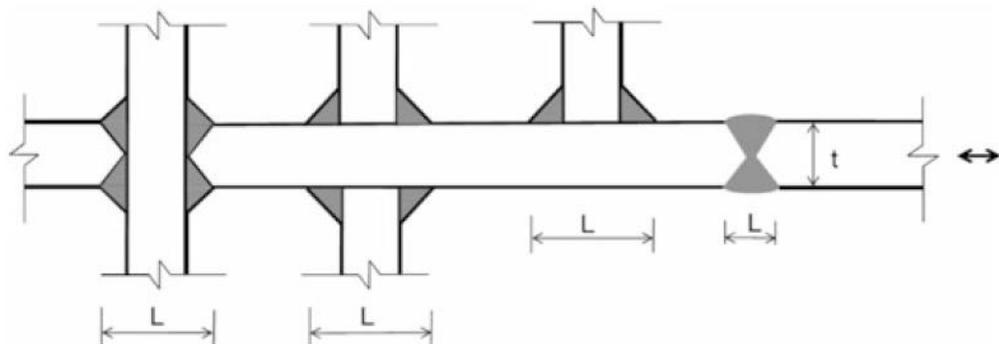


Figura II-21. Parámetros para determinación de espesor efectivo. (IIW, 2016).

II.1.5.3 Técnicas de mejora pos-soldadura

Los métodos de mejora pos-soldadura incluyen técnicas que pueden incrementar la resistencia a fatiga tanto de estructuras nuevas como existentes. Las principales técnicas de mejora incluyen:

- a) Métodos de mejora del perfil de soldadura.
- b) Métodos de alivio de tensiones residuales.
- c) Métodos de protección de condiciones atmosféricas.

Los efectos de mejora en la resistencia a fatiga son sensibles a las características de cada método utilizado, a las características del elemento estructural analizado, así como también, a las tensiones solicitantes respectivas, siendo más efectiva la aplicación de estas técnicas en el caso de bajas tensiones producidas por solicitaciones cíclicas de tipo HCF. La descripción en detalle de algunas de las principales técnicas de mejora pos-soldadura se desarrolla en reglamentos de diseño tal como código IIW, 2016.

II.1.5.4 Efectos de temperaturas elevadas

De acuerdo a lo señalado en el código IIW, 2016, para altas temperaturas la resistencia a fatiga puede verse disminuida de acuerdo a lo señalado en la figura II-22, estos factores de reducción de resistencia son conservadores y pueden ser ajustados de acuerdo a ensayos de elementos estructurales o códigos de diseño pertinentes.

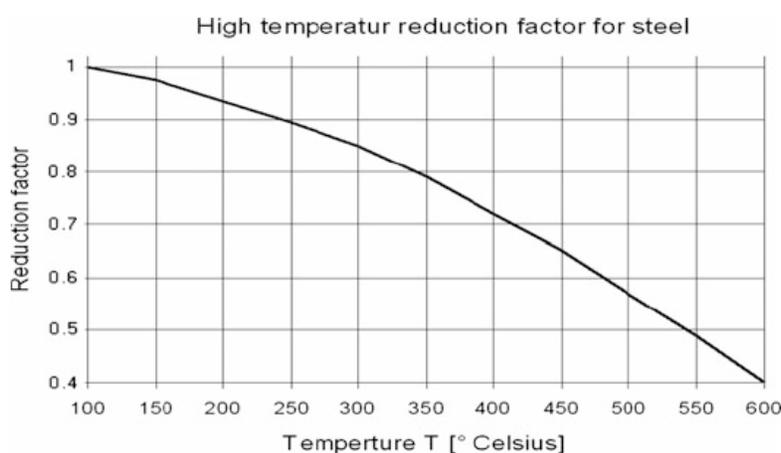


Figura II-22. Gráfica de factores de reducción de resistencia a fatiga por temperatura. (IIW, 2016).

II.1.5.5 Efectos de la corrosión

Los métodos de diseño previamente establecidos son aplicables a elementos estructurales protegidos ante ambientes corrosivos. En caso de presentarse una condición de posible daño o corrosión ambiental, puede existir una reducción de la resistencia a fatiga en el elemento respectivo, dependiente del tiempo de exposición y espectro de solicitaciones.

Según lo señalado en el código IIW, 2016, se limita la resistencia máxima a fatiga para elementos sin protección superficial según las características del entorno ambiental (70% en caso de ambientes marinos), sin embargo, ante la limitada información

específica en esta materia, es recomendable controlar las condiciones de exposición mediante la aplicación de protección superficial adecuada.

II.1.6 Recomendaciones para el modelamiento por elementos finitos asociado al método de tensiones Hot-Spot

Tal como se indicó anteriormente, las técnicas de modelación por elementos finitos tienen gran sensibilidad en el gradiente de tensiones en la zona contigua a la región de soldadura, según lo cual, se establecen diferentes recomendaciones de modelación aplicadas a diversos detalles estructurales. En la sección II.1.4.2. se establecieron las recomendaciones generales para linealización de tensiones y tamaño de elementos, a lo cual es necesario agregar lineamientos en lo respectivo a los elementos más comúnmente utilizados en la modelación por elementos finitos, tales como los elementos tipo *Shell* o *Solid* (Ver figura II-23). Entre estas 2 alternativas, la que consume menos recursos computacionales y es más ampliamente utilizada en la práctica corresponde a la modelación con elementos tipo *Shell*.

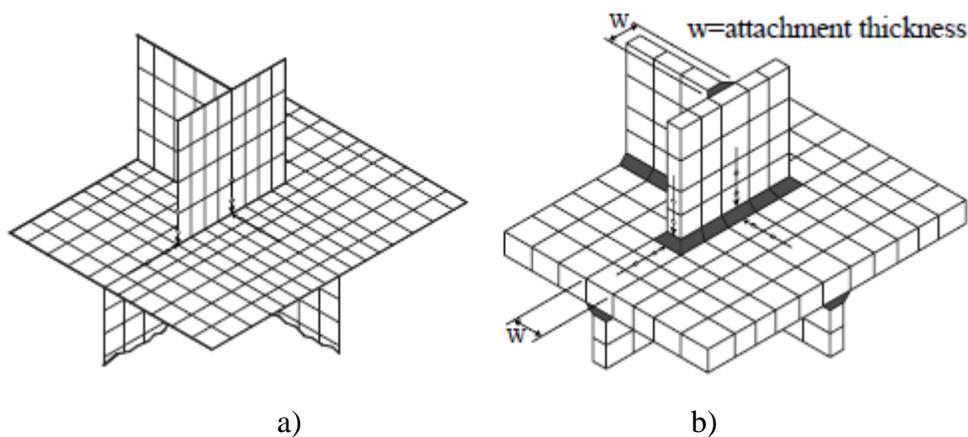


Figura II-23. Modelación por elementos finitos de una conexión soldada típica. a) Modelo con elementos tipo *Shell* sin soldaduras. b) Modelo con elementos tipo *Solid*. (H. Mohsen, 2012).

En términos generales, existen 2 tipologías de elementos tipo *Shell*; elementos de clasificación *Thin* (delgados) o *Thick* (gruesos). Los elementos tipo *Shell* de clasificación *Thin* tienen un comportamiento de acuerdo a la teoría de placas de Kirchoff, en la cual, la deformación de corte a través del espesor del elemento respectivo es despreciada, por lo que son más adecuados para representar elementos delgados. Por otra parte, en el caso de los elementos de clasificación *Thick*, se asume un comportamiento según la teoría de placas de Mindlin, donde sí se considera la deformación de corte a través del espesor del elemento, y son más adecuados en elementos gruesos donde la rigidez de la placa representada es relevante.

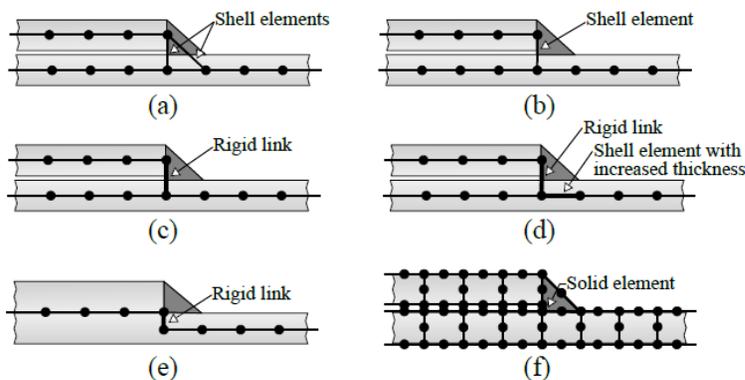


Figura II-24. Alternativas de modelación de soldadura. a) Modelación con elemento *Shell* oblicuo y perpendicular. b) Modelación con elemento *Shell* perpendicular. c) Modelación con elemento *link* rígido perpendicular. d) Modelación con elemento *link* rígido perpendicular y elemento *Shell* de espesor incrementado. e) Modelación con elemento *link* rígido perpendicular entre elementos *Shell* de espesor modificado. f) Modelo con elementos tipo *Solid*. (H. Mohsen, 2012).

En general las soldaduras no son representadas al utilizar elementos tipo *Shell*, se considera de esta manera, únicamente la conexión entre elementos finitos a través de sus nodos en los extremos ubicados en el eje transversal central en cada placa. Lo

anterior, pese a duplicar el material en la zona de intersección entre elementos, puede llevar a una subestimación de la rigidez de soldadura. No obstante lo anterior, en el caso de conexiones soldadas tales como placas de refuerzo, se requiere la modelación de la soldadura, cuyas alternativas se indican en la figura II-24.

En el caso de estructuras complejas es recomendable utilizar modelos con elementos tipo *Solid*, según lo cual es posible obtener resultados satisfactorios utilizando una única capa de elementos isoparamétricos de orden superior (20 Nodos), en la dirección de la placa.

En la modelación de elementos estructurales de mayor envergadura, para evitar complicaciones por el uso de gran cantidad de recursos computacionales, es posible la combinación de elementos *Shell* y elementos *Solid*, utilizando estos últimos para la modelación de las zonas contiguas a la soldadura, y los elementos *Shell* en las zonas correspondientes a los elementos conectados, teniendo en consideración la correcta transferencia de solicitaciones entre los elementos en sus nodos de conexión. Otra alternativa para optimizar la utilización de recursos computacionales, comprende un mallado diferenciado, reduciendo el tamaño de elementos en las zonas donde se presenta mayor concentración de tensiones (pie de soldadura). Adicionalmente a lo anterior, y también con el objetivo de reducir el esfuerzo computacional, es posible utilizar *sub modelos* con un mallado fino de elementos finitos que representen en forma independiente la zona de interés en la estructura (sección contigua a la soldadura). Los *sub modelos* dependen de un *modelo global* de la estructura general, realizado con un mallado de mayor tamaño, y que permite determinar las deformaciones y tensiones

globales de la estructura, cuya información posibilita establecer las condiciones de borde del *sub modelo* respectivo.

H. Mohsen, 2012 establece las siguientes recomendaciones generales para la generación de modelos de elementos finitos para el método de tensiones Hot-Spot:

- a) Los elementos finitos utilizados en el modelo deben permitir una distribución lineal de tensiones a través del espesor de los elementos estructurales (lo que puede obtenerse mediante elementos de orden superior de 8 nodos para tipo *Shell* y 20 nodos para tipo *Solid* en una capa).
- b) Al utilizar elementos tipo *Shell*, es posible omitir la modelación de la soldadura, lo cual puede llevar a una subestimación de la rigidez de la conexión en esa zona, por lo que el pie de soldadura se recomienda se considere en el punto de intersección nodal entre elementos, según corresponda.
- c) Se considera un comportamiento lineal elástico de los elementos estructurales, así como también, es posible asignar a la soldadura, en caso de ser modelada, las mismas características mecánicas que el metal base.
- d) El mallado contiguo la soldadura estudiada deber ser realizado de tal manera que los puntos de lectura de tensiones (establecidos en el código de diseño correspondiente) coincidan con los puntos de integración o nodos de los elementos respectivos.
- e) Al obtener los valores nodales en los puntos de evaluación establecidos (en elementos *Shell* o *Solid*) no deben ser consideradas las opciones que permiten

promediar las tensiones entre elementos finitos adyacentes a un nodo en particular, considerando solo los elementos de interés frente a la zona de soldadura estudiada.

- f) La proporción entre las longitudes mayor y menor de los lados de un elemento *Shell* o *Solid* no debe ser mayor a 3. Adicionalmente, el mallado deberá reducir su tamaño en forma gradual al acercarse a la zona de la soldadura estudiada.
- g) Las tensiones obtenidas en los puntos de lectura deben ser las tensiones máximas principales siempre que estas actúen en un rango menor o igual a 60° en línea con la perpendicular al pie de soldadura, y en caso contrario se recomienda la determinación de la tensión perpendicular correspondiente.
- h) En caso de existir desalineamientos no considerados en el modelo de elementos finitos, es posible utilizar algún factor de magnificación de tensiones en forma equivalente.

II.1.7 Verificación por fatiga utilizando curvas S-N

De acuerdo a lo establecido en el código EN1993-1-9, 2005, la verificación por fatiga incluye los siguientes requisitos:

- a) El rango de tensiones generadas por sollicitación de cargas cíclicas (determinado mediante el método de tensiones nominales, así como también, por el método de tensiones Hot-Spot) deben cumplir los límites siguientes:

$$\Delta\sigma \leq 1.5 f_y, \text{ para rango de tensiones normales} \quad (2.11)$$

$$\Delta\tau \leq 1.5 f_y/\sqrt{3}, \text{ para rango de tensiones de corte} \quad (2.12)$$

b) Se debe verificar que bajo cargas cíclicas se cumpla lo siguiente:

$$\gamma_F \Delta\sigma_E \leq \Delta\sigma_C/\gamma_M, \text{ para rango de tensiones normales} \quad (2.13)$$

$$\gamma_F \Delta\tau_E \leq \Delta\tau_C/\gamma_M, \text{ para rango de tensiones de corte} \quad (2.14)$$

c) En el caso de combinación simultánea de tensiones cíclicas de corte y normal se debe verificar que:

$$\left(\frac{\gamma_F \Delta\sigma_E}{\sigma_C/\gamma_M}\right)^3 + \left(\frac{\gamma_F \Delta\tau_E}{\Delta\tau_C/\gamma_M}\right)^5 \leq 1, \text{ para rango de tensiones de corte} \quad (2.15)$$

Donde:

$\Delta\sigma$: Rango de tensiones normales.

$\Delta\tau$: Rango de tensiones de corte.

$\Delta\sigma_C$: Rango de tensiones normales de resistencia a fatiga en 2 millones de ciclos.

$\Delta\tau_C$: Rango de tensiones de corte de resistencia a fatiga en 2 millones de ciclos.

$\Delta\sigma_E$: Rango de tensiones normales equivalentes de amplitud constante relativa a 2 millones de ciclos.

$\Delta\tau_E$: Rango de tensiones de corte equivalentes de amplitud constante relativa a 2 millones de ciclos.

γ_F : Factor parcial para rango de tensiones equivalentes de amplitud constante.

γ_M : Factor parcial para rango de tensiones de resistencia a fatiga. Algunos valores referenciales para este factor se indican a continuación:

Tabla II-4. Valores recomendados para factor parcial para rango de tensiones de resistencia a fatiga. (Adaptado de EN1993-1-9, 2005).

Método de evaluación	Consecuencia de falla	
	Baja	Alta
Tolerancia de daño	1.00	1.15
Vida útil	1.15	1.35

III. CASO DE ESTUDIO

III.1 Introducción al caso de estudio

Con el objetivo de aumentar la resistencia flexural global en elementos tipo viga, usualmente son incorporadas placas de refuerzo soldadas en sus respectivas alas. Considerando lo anterior, es importante señalar que de acuerdo a diferentes investigaciones en la materia (e. g. R.E. Slockbower and J.W. Fisher, 1977) y a la categorización de los códigos de diseño respectivos, la sección extrema de placas de refuerzo soldadas, en general, posee una baja resistencia a la fatiga. En la figura III-1, se indica un extracto de la clasificación correspondiente al método de tensión Nominal del detalle de placas de refuerzo en su extremo según el código EN1993-1-9.

Detail category	Constructional detail		Description	Requirements
	$t_c < t$	$t_c \geq t$		
56*	$t \leq 20$	-		6) If the cover plate is wider than the flange, a transverse end weld is needed. This weld should be carefully ground to remove undercut. The minimum length of the cover plate is 300 mm. For shorter attachments size effects see detail 1).
50	$20 < t \leq 30$	$t \leq 20$		
45	$30 < t \leq 50$	$20 < t \leq 30$		
40	$t > 50$	$30 < t \leq 50$		
36	-	$t > 50$		

Figura III-1. Clasificación a fatiga de extremos de placas de refuerzo en vigas doble T, basado en el método de tensión Nominal. (EN1993-1-9).

La categorización señalada en la figura III-1 está basada principalmente en la relación entre el espesor de la placa de refuerzo y el ala del elemento tipo viga, además se establece que en el caso que la placa de refuerzo sea de espesor menor al del ala, la soldadura transversal extrema puede ser omitida si se requiere. El caso de estudio comprende el análisis de una viga en voladizo en la cual se apoya el sistema motriz de una correa transportadora, tal como se indica en la figura III-2.

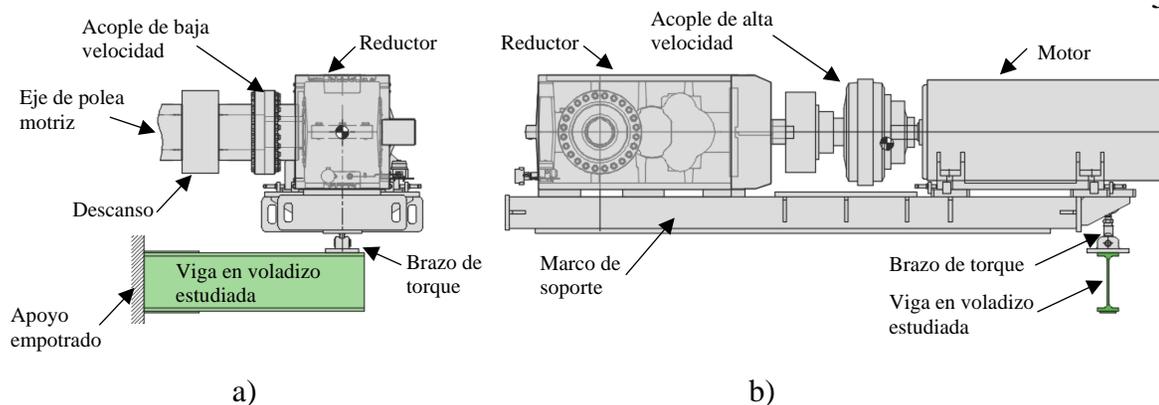


Figura III-2. Componentes del sistema motriz de correa transportadora apoyada en viga en voladizo estudiada. a) Vista transversal. b) Vista longitudinal.

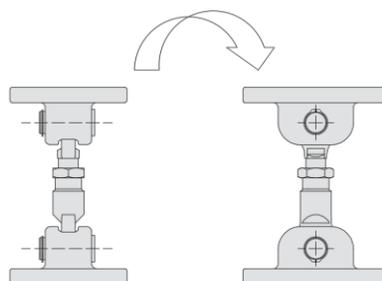


Figura III-3. Brazo de torque.

A través de la conexión en el brazo de torque (figura III-3), se traspan las solicitaciones al punto de apoyo sobre la viga. Este punto de apoyo se diseña preferentemente para restringir el desplazamiento en la dirección vertical, dejando sus otros 5 grados de libertad sin restricción, permitiendo el movimiento relativo (limitado a los rangos de tolerancia) del conjunto en operación, lo cual, reduce la ocurrencia de sobretensiones inesperadas en el punto de conexión (Wolf T., 2000). No obstante lo anterior, debido a la configuración propia del sistema motriz considerado (el que posee un punto de apoyo directo en la polea motriz del conjunto y un punto de apoyo sobre la viga en voladizo en estudio), se produce normalmente un desplazamiento inducido sobre la viga asociado a la tolerancia de excentricidad de giro en la sección del descanso del eje de la polea del conjunto en operación (figura III-4). De esta manera,

se generan cargas cíclicas con una frecuencia asociada al ciclo de rotación de la polea motriz y que pueden ser caracterizadas con una de inversión total en su amplitud respectiva.

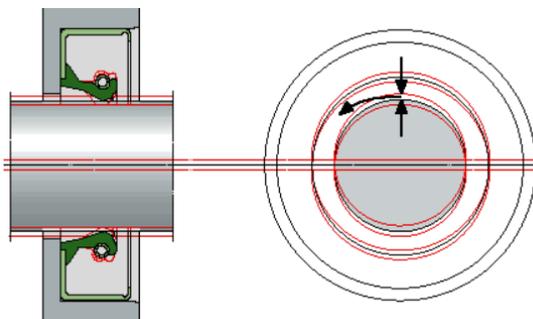


Figura III-4. Excentricidad de giro en sistema motriz de correa transportadora en ubicación del descanso (www.SKF.com).

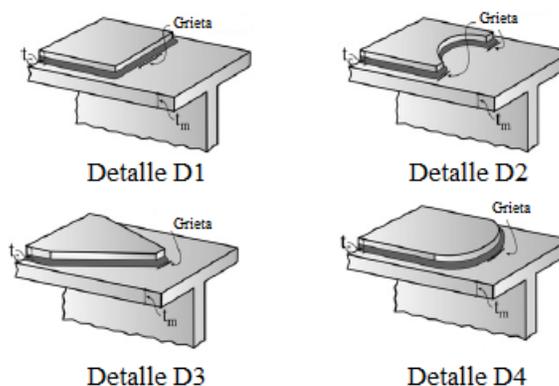
Debido a la relevancia de la resistencia a fatiga en los detalles de la sección extrema de las placas de refuerzo de la viga en voladizo estudiada, se lleva a cabo la investigación de capacidad de estos elementos utilizando los métodos tensión Nominal y el método de tensiones Hot-Spot, considerando diferentes configuraciones de modelación mediante elementos finitos (Elementos Shell, Solid).

III.2 Desarrollo del caso de estudio

El caso de estudio busca establecer la resistencia a fatiga de los detalles típicos de terminación de placas de refuerzo sobre alas de vigas en voladizo solicitadas por la acción de un sistema motriz de correa transportadora, tal como se indicó en la sección III.1. Es importante establecer que debido a las características de la presente investigación (refuerzo de alas de viga en voladizo) se estudia la resistencia por fatiga de acuerdo al rango de tensiones normales, no considerando la influencia del rango de tensiones de corte y ciclos hasta la falla respectivos, adicionalmente, no se considera

la influencia de factores de modificación de respuesta, según lo señalado en la sección II.1.5.

Los detalles de terminación de placas de refuerzo señalados en la figura III-5 (indicados previamente en la figura III-3 del capítulo III, y que se repiten aquí por comodidad) serán analizados determinando su resistencia a fatiga mediante el método de tensión Nominal, para luego determinar su capacidad mediante el método de tensiones Hot-Spot de Tipo “a” (dependientes del espesor del elemento). Estos detalles de terminación fueron elegidos debido a su amplia utilización en la práctica y a que existen datos de ensayos empíricos de cada uno.



Tipo de terminación	Ala de viga principal		Placa de refuerzo		t_c/t_m
	Espesor, t_m (mm)	Ancho (mm)	Espesor, t_c (mm)	Ancho (mm)	
Detalle D1	19.05	127	12.7	101.6	0.67
Detalle D2	19.05	127	12.7	101.6	0.67
Detalle D3	19.05	127	12.7	101.6	0.67
Detalle D4	19.05	127	12.7	101.6	0.67

Figura III-5. Diferentes terminaciones de placas de refuerzo (Adaptado de H. Mohsen, 2012).

Las configuraciones seleccionadas para la modelación mediante elementos finitos (adaptadas a partir de las configuraciones propuestas en la figura III-24) se indican en la figura III-6, según lo cual, las letras a), b) y c) corresponden a las alternativas

utilizadas en elementos *Shell*, y la letra d) corresponde a la configuración utilizada para elementos de tipo *Solid*. Cada una de las configuraciones consideradas incluyen las recomendaciones establecidas en la sección III.1.6, según lo cual, en cada caso se establecen 2 alternativas para la densidad de mallado de elementos; un mallado fino con elementos de 1er y 2do orden de longitud de arista máxima $0.2 \cdot t = 3.81 \text{ mm}$, y un mallado grueso con elementos de 2do orden de longitud de arista máxima $1.0 \cdot t = 19.05 \text{ mm}$.

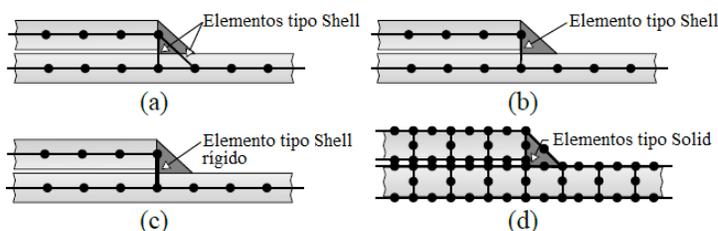


Figura III-6. Configuraciones seleccionadas para la modelación por elementos finitos. a) Modelación con elemento *Shell* oblicuo y perpendicular. b) Modelación con elemento *Shell* perpendicular. c) Modelación con elemento *Shell* rígido perpendicular. d) Modelo con elementos tipo *Solid*. (Adaptado de H. Mohsen, 2012).

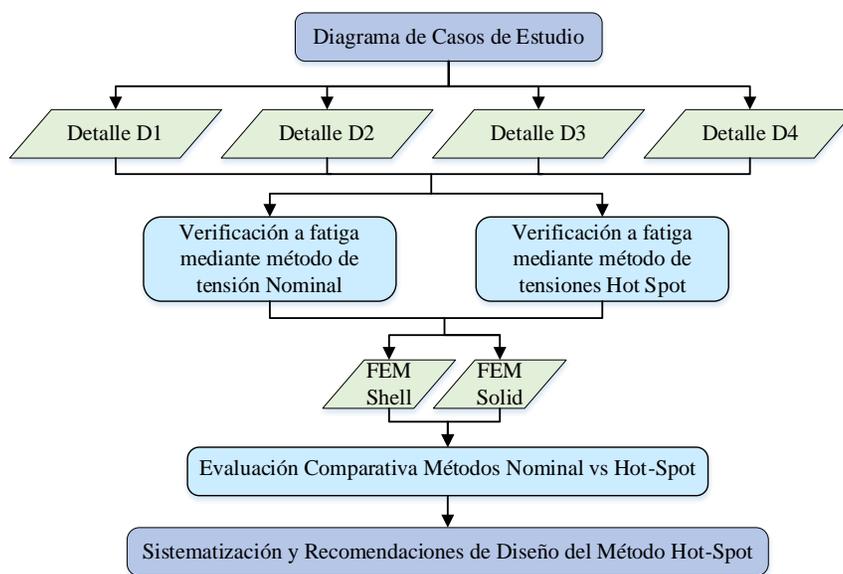
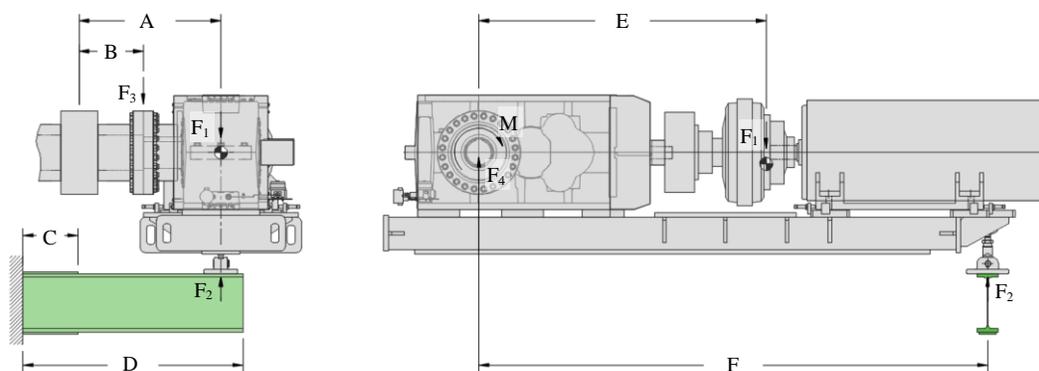


Figura III-7. Diagrama de flujo de la metodología de trabajo.

El análisis comparativo entre las metodologías utilizadas para la generación de una sistematización y recomendaciones del procedimiento de diseño a fatiga se indica en la Figura III-7 (indicada previamente en la figura III-3 y repetido aquí por conveniencia).

III.2.1 Descripción de cargas

Las respectivas dimensiones y solicitaciones estáticas sobre el sistema motriz se detallan en la figura III-8.



Características del Sistema Motriz			
Dimensiones		Solicitaciones	
A	1092 mm	F ₁	7.71 tonf
B	381 mm	F ₂	3.95 tonf
C	500 mm	F ₃	0.23 tonf
D	2000 mm	F ₄	3.76 tonf
E	1651 mm	M	4.19 tonf-m
F	4623 mm		

Figura III-8. Detalles dimensionales y solicitaciones del sistema motriz de correa transportadora apoyada en viga en voladizo estudiada. a) Vista transversal. b) Vista longitudinal.

Adicionalmente a lo anterior, las solicitaciones dinámicas cíclicas son generadas por el desplazamiento inducido sobre la viga en voladizo estudiada, lo cual, ocurre por una excentricidad de giro máxima de 0.5‰ en la sección del descanso del eje de la polea

del conjunto en operación (eje de baja velocidad) con una velocidad de giro de 125.3 RPM. Tal desplazamiento en el punto de ubicación del brazo de torque se establece como:

$$\delta = 0.5\%_0 \cdot F = 2.3 \text{ mm} \quad (3.1)$$

De acuerdo a lo anterior, la fuerza dinámica cíclica asociada al desplazamiento en el punto de ubicación del brazo de torque se establece como $F_{sol} = 3.77 \text{ tonf}$ a una frecuencia de excitación de 2.09 Hz.

Cualquier sollicitación de otra naturaleza no descrita previamente no es considerada para efectos de esta investigación.

III.2.2 Descripción de modelos FEM

Para cada uno de los detalles de terminación de placas de refuerzo (D1, D2, D3 y D4) se determina el rango de tensiones Nominal y Hot-Spot utilizando modelos FEM para cada caso particular de estudio (previamente señalados en la sección III.2 y mostrados gráficamente en el Anexo A3 para el caso de densidad de mallado fino), según lo cual, se establecen 3 alternativas de modelamiento mediante elementos *Shell*:

- Modelo FEM con elementos *Shell* oblicuo y perpendicular en el punto de soldadura del refuerzo.
- Modelo FEM con elementos *Shell* perpendicular en el punto de soldadura del refuerzo.
- Modelo FEM con elementos *Shell* perpendicular rígido (doble de la rigidez del acero) en el punto de soldadura del refuerzo.

Respecto de los elementos tipo *Solid* se establecen 2 alternativas de modelamiento:

- Modelo FEM con elementos *Solid*, filete de soldadura máximo de 10.7 mm.
- Modelo FEM con elementos *Solid*, filete de soldadura mínimo de 5 mm.

Para cada una de las configuraciones señaladas previamente se establecen 2 alternativas para la densidad de mallado de elementos; un mallado fino con elementos de 1er y 2do orden de longitud de arista máxima $0.2 \cdot t = 3.81$ mm, y un mallado grueso con elementos de 2do orden de longitud de arista máxima $1.0 \cdot t = 19.05$ mm.

III.2.3 Rangos de tensiones Nominal y Hot-Spot obtenidos de modelos FEM

III.2.3.1 Rangos de tensiones Nominal y Hot-Spot en Detalle D1

- **Modelo FEM elementos tipo *Solid*, filete de soldadura máximo - Mallado fino, elementos de 2do orden, extrapolación cuadrática.**

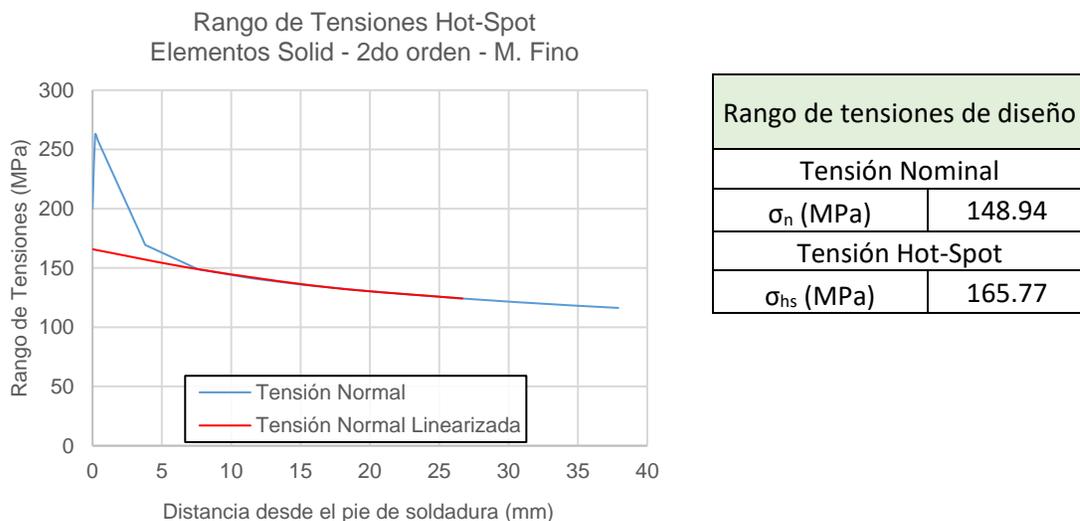
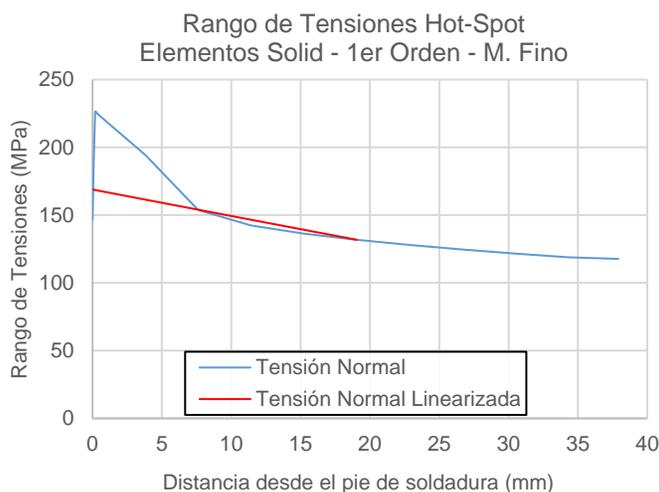


Figura III-9. Rango de tensiones detalle D1, elementos tipo *Solid*, filete de soldadura máximo - Mallado fino, elementos de segundo orden, extrapolación cuadrática.

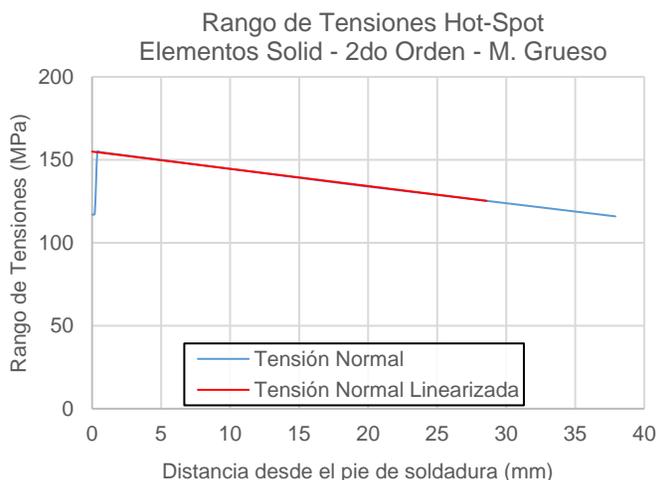
- **Modelo FEM elementos tipo *Solid*, filete de soldadura máximo - Mallado fino, elementos de 1er orden, extrapolación lineal.**



Rango de tensiones de diseño	
Tensión Nominal	
σ_n (MPa)	153.99
Tensión Hot-Spot	
σ_{hs} (MPa)	168.87

Figura III-10. Rango de tensiones detalle D1, elementos tipo *Solid*, filete de soldadura máximo - Mallado fino, elementos de primer orden, extrapolación lineal.

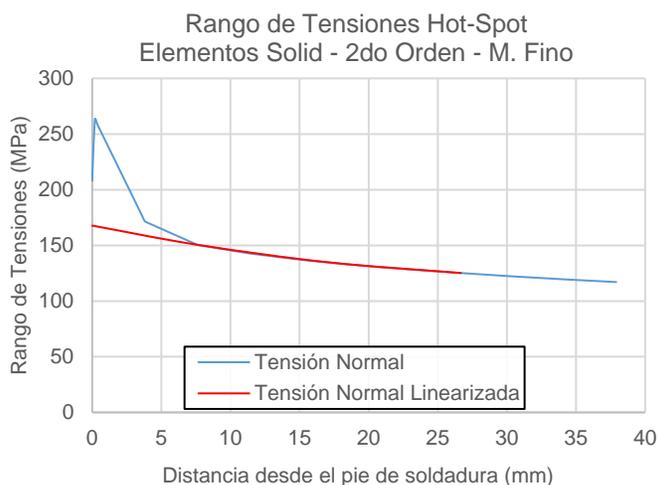
- **Modelo FEM elementos tipo *Solid*, filete de soldadura máximo - Mallado grueso, elementos de 2do orden, extrapolación lineal.**



Rango de tensiones de diseño	
Tensión Nominal	
σ_n (MPa)	145.08
Tensión Hot-Spot	
σ_{hs} (MPa)	154.97

Figura III-11. Rango de tensiones detalle D1, elementos tipo *Solid*, filete de soldadura máximo - Mallado grueso, elementos de segundo orden, extrapolación lineal.

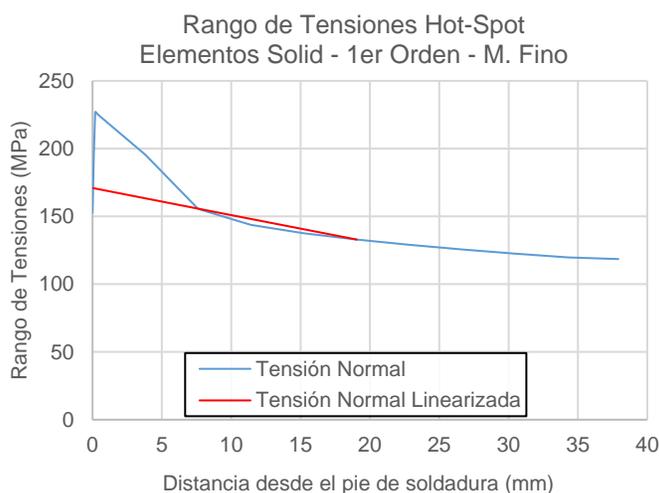
- **Modelo FEM elementos tipo *Solid*, filete de soldadura mínimo - Mallado fino, elementos de 2do orden, extrapolación cuadrática.**



Rango de tensiones de diseño	
Tensión Nominal	
σ_n (MPa)	150.52
Tensión Hot-Spot	
σ_{hs} (MPa)	167.80

Figura III-12. Rango de tensiones detalle D1, elementos tipo *Solid*, filete de soldadura mínimo - Mallado fino, elementos de segundo orden, extrapolación cuadrática.

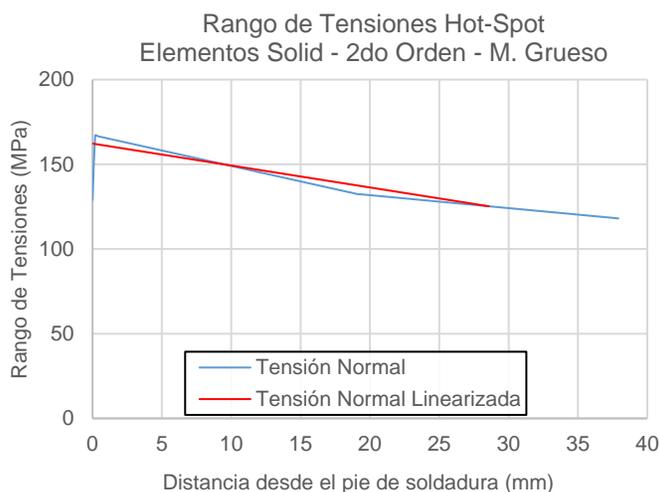
- **Modelo FEM elementos tipo *Solid*, filete de soldadura mínimo - Mallado fino, elementos de 1er orden, extrapolación lineal.**



Rango de tensiones de diseño	
Tensión Nominal	
σ_n (MPa)	155.71
Tensión Hot-Spot	
σ_{hs} (MPa)	170.98

Figura III-13. Rango de tensiones detalle D1, elementos tipo *Solid*, filete de soldadura mínimo - Mallado fino, elementos de primer orden, extrapolación lineal.

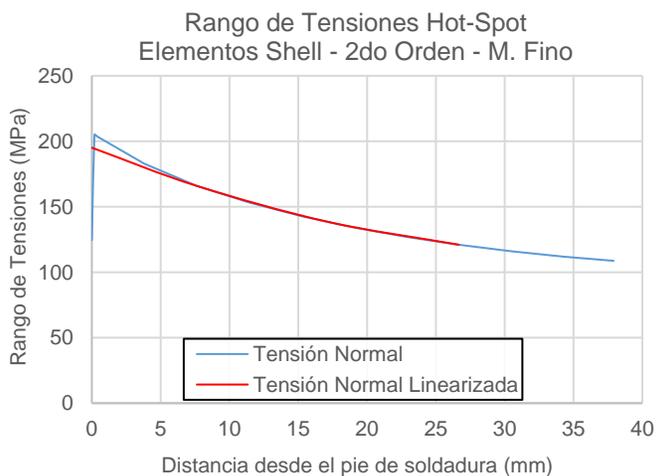
- **Modelo FEM elementos tipo *Solid*, filete de soldadura mínimo - Mallado grueso, elementos de 2do orden, extrapolación lineal.**



Rango de tensiones de diseño	
Tensión Nominal	
σ_n (MPa)	149.89
Tensión Hot-Spot	
σ_{hs} (MPa)	162.23

Figura III-14. Rango de tensiones detalle D1, elementos tipo *Solid*, filete de soldadura mínimo - Mallado grueso, elementos de segundo orden, extrapolación lineal.

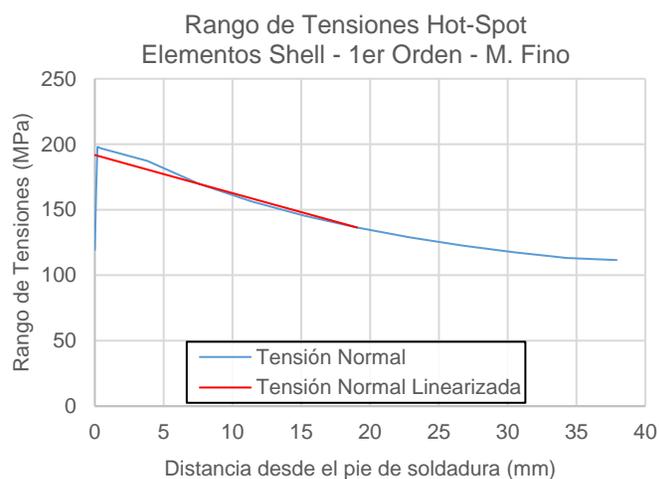
- **Modelo FEM elementos tipo *Shell* oblicuo y perpendicular - Mallado fino, elementos de 2do orden, extrapolación cuadrática.**



Rango de tensiones de diseño	
Tensión Nominal	
σ_n (MPa)	165.94
Tensión Hot-Spot	
σ_{hs} (MPa)	195.10

Figura III-15. Rango de tensiones detalle D1, elementos tipo *Shell* oblicuo y perpendicular - Mallado fino, elementos de segundo orden, extrapolación cuadrática.

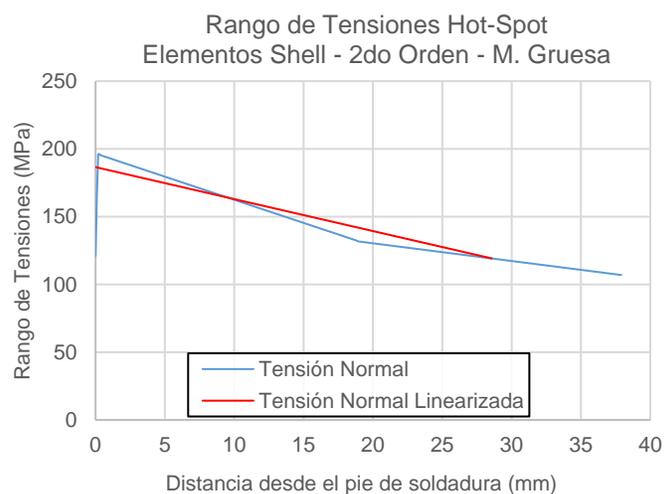
- **Modelo FEM elementos tipo *Shell* oblicuo y perpendicular - Mallado fino, elementos de 1er orden, extrapolación lineal.**



Rango de tensiones de diseño	
Tensión Nominal	
σ_n (MPa)	169.58
Tensión Hot-Spot	
σ_{hs} (MPa)	191.79

Figura III-16. Rango de tensiones detalle D1, elementos tipo *Shell* oblicuo y perpendicular - Mallado fino, elementos de primer orden, extrapolación lineal.

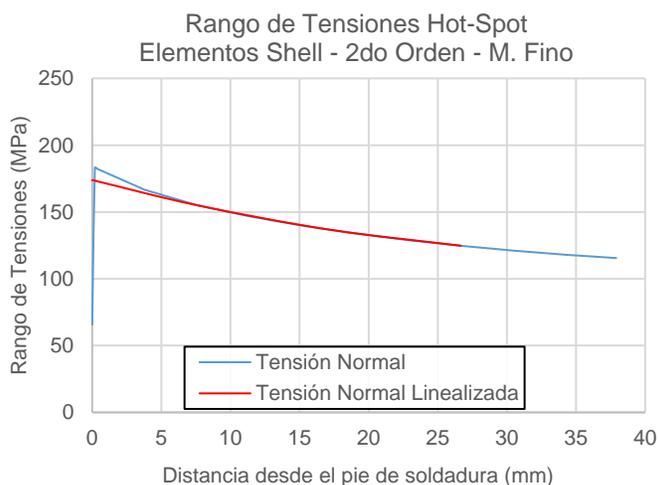
- **Modelo FEM elementos tipo *Shell* oblicuo y perpendicular - Mallado grueso, elementos de 2do orden, extrapolación lineal.**



Rango de tensiones de diseño	
Tensión Nominal	
σ_n (MPa)	164.09
Tensión Hot-Spot	
σ_{hs} (MPa)	186.56

Figura III-17. Rango de tensiones detalle D1, elementos tipo *Shell* oblicuo y perpendicular - Mallado grueso, elementos de segundo orden, extrapolación lineal.

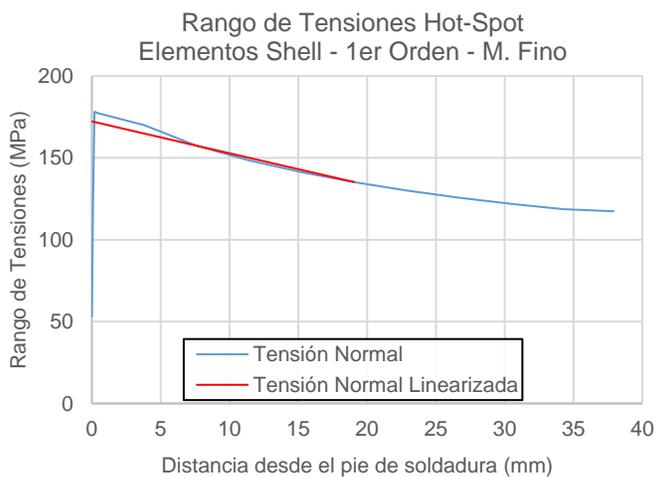
- **Modelo FEM elementos tipo *Shell* perpendicular – Mallado fino, elementos de 2do orden, extrapolación cuadrática.**



Rango de tensiones de diseño	
Tensión Nominal	
σ_n (MPa)	154.98
Tensión Hot-Spot	
σ_{hs} (MPa)	173.91

Figura III-18. Rango de tensiones detalle D1, elementos tipo *Shell* perpendicular - Mallado fino, elementos de segundo orden, extrapolación cuadrática.

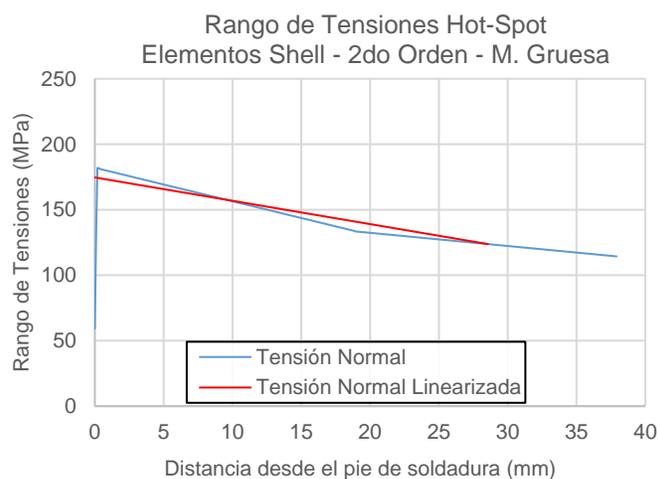
- **Modelo FEM elementos tipo *Shell* perpendicular - Mallado fino, elementos de 1er orden, extrapolación lineal.**



Rango de tensiones de diseño	
Tensión Nominal	
σ_n (MPa)	157.44
Tensión Hot-Spot	
σ_{hs} (MPa)	172.31

Figura III-19. Rango de tensiones detalle D1, elementos tipo *Shell* perpendicular - Mallado fino, elementos de primer orden, extrapolación lineal.

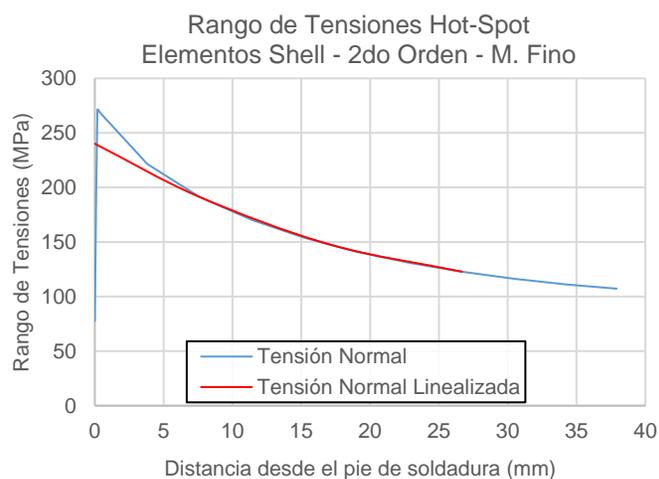
- **Modelo FEM elementos tipo *Shell* perpendicular - Mallado grueso, elementos de 2do orden, extrapolación lineal.**



Rango de tensiones de diseño	
Tensión Nominal	
σ_n (MPa)	157.68
Tensión Hot-Spot	
σ_{hs} (MPa)	174.65

Figura III-20. Rango de tensiones detalle D1, elementos tipo *Shell* perpendicular - Mallado grueso, elementos de segundo orden, extrapolación lineal.

- **Modelo FEM elementos tipo *Shell* perpendicular rígido - Mallado fino, elementos de 2do orden, extrapolación cuadrática.**



Rango de tensiones de diseño	
Tensión Nominal	
σ_n (MPa)	191.26
Tensión Hot-Spot	
σ_{hs} (MPa)	240.10

Figura III-21. Rango de tensiones detalle D1, elementos tipo *Shell* perpendicular rígido - Mallado fino, elementos de segundo orden, extrapolación cuadrática.

- **Modelo FEM elementos tipo *Shell* perpendicular rígido - Mallado fino, elementos de 1er orden, extrapolación lineal.**

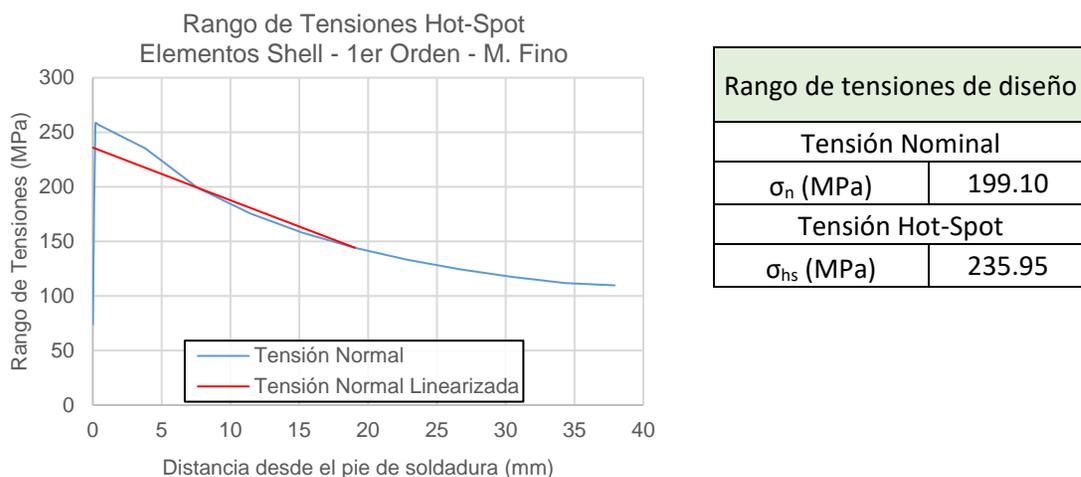


Figura III-22. Rango de tensiones detalle D1, elementos tipo *Shell* perpendicular rígido - Mallado fino, elementos de primer orden, extrapolación lineal.

- **Modelo FEM elementos tipo *Shell* perpendicular rígido - Mallado grueso, elementos de 2do orden, extrapolación lineal.**

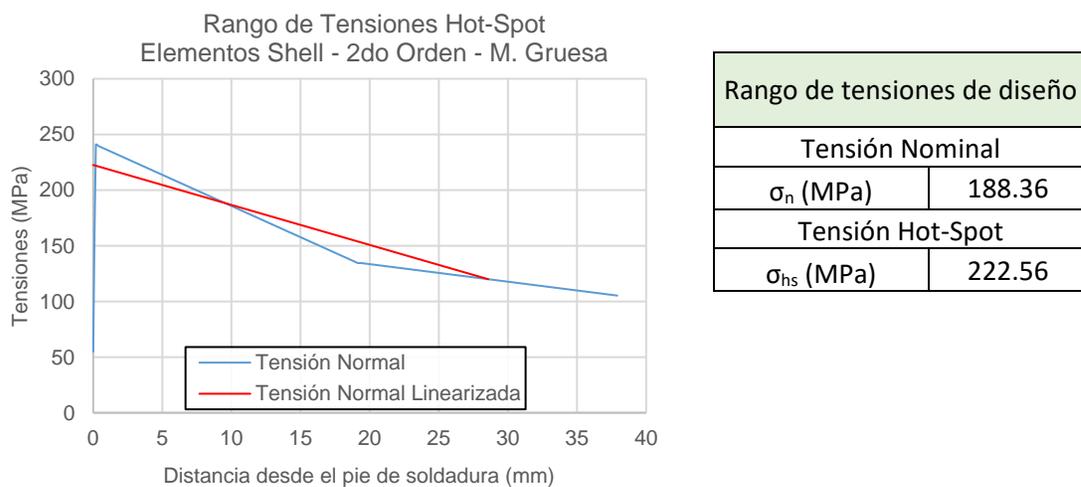


Figura III-23. Rango de tensiones detalle D1, elementos tipo *Shell* perpendicular rígido - Mallado grueso, elementos de segundo orden, extrapolación lineal.

III.2.3.2 Rangos de tensiones Nominal y Hot-Spot en Detalle D2

- **Modelo FEM elementos tipo *Solid*, filete de soldadura máximo - Mallado fino, elementos de 2do orden, extrapolación cuadrática.**

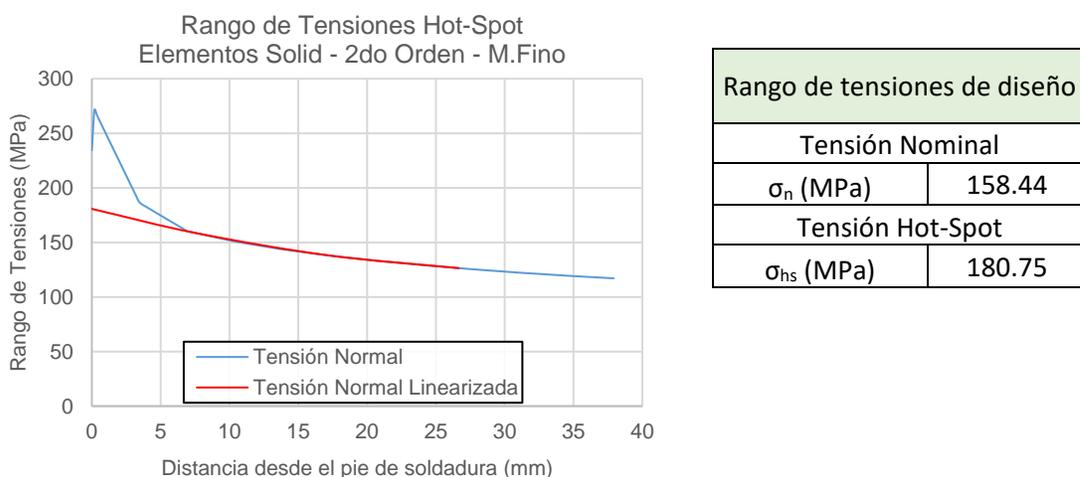


Figura III-24. Rango de tensiones detalle D2, elementos tipo *Solid*, filete de soldadura máximo - Mallado fino, elementos de segundo orden, extrapolación cuadrática.

- **Modelo FEM elementos tipo *Solid*, filete de soldadura máximo - Mallado fino, elementos de 1er orden, extrapolación lineal.**

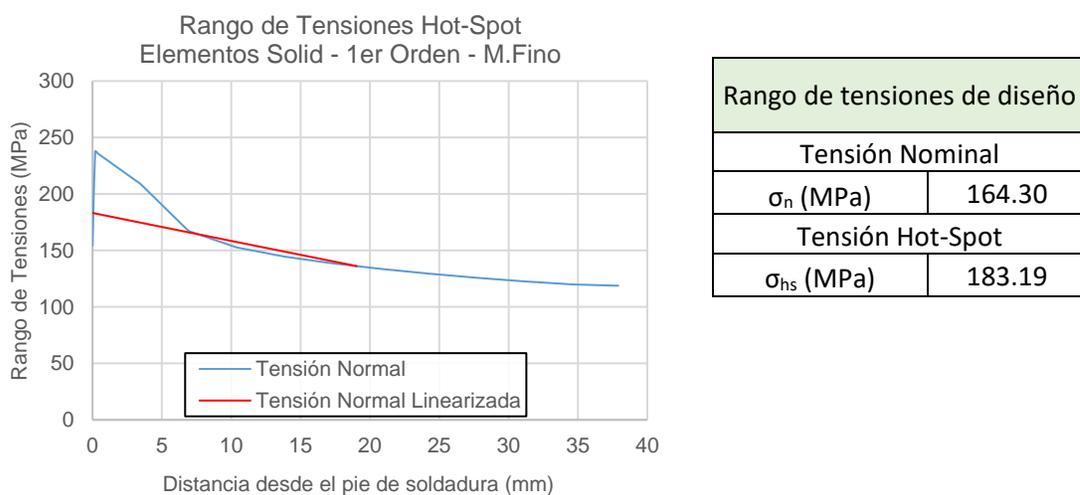


Figura III-25. Rango de tensiones detalle D2, elementos tipo *Solid*, filete de soldadura máximo - Mallado fino, elementos de primer orden, extrapolación lineal.

- **Modelo FEM elementos tipo *Solid*, filete de soldadura máximo - Mallado grueso, elementos de 2do orden, extrapolación lineal.**

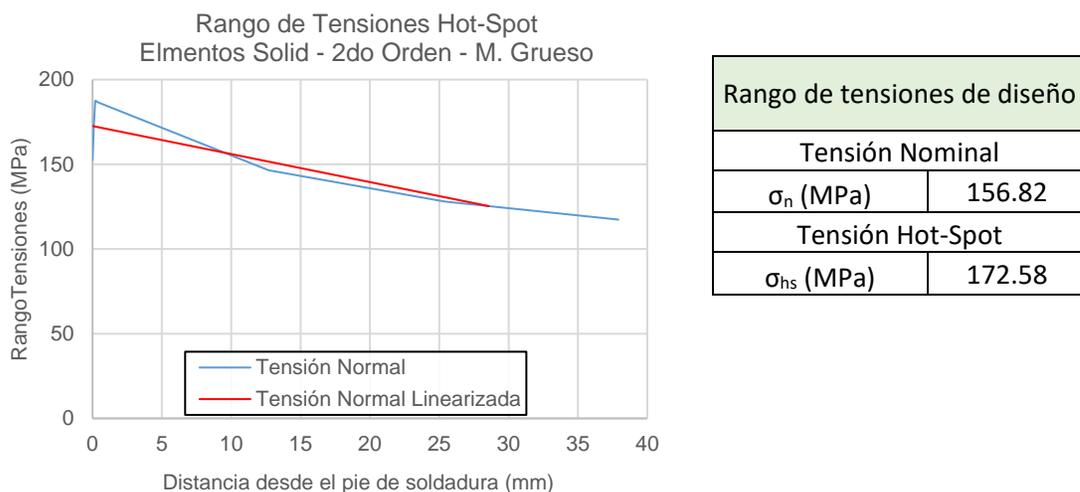


Figura III-26. Rango de tensiones detalle D2, elementos tipo *Solid*, filete de soldadura máximo - Mallado grueso, elementos de segundo orden, extrapolación lineal.

- **Modelo FEM elementos tipo *Solid*, filete de soldadura mínimo - Mallado fino, elementos de 2do orden, extrapolación cuadrática.**

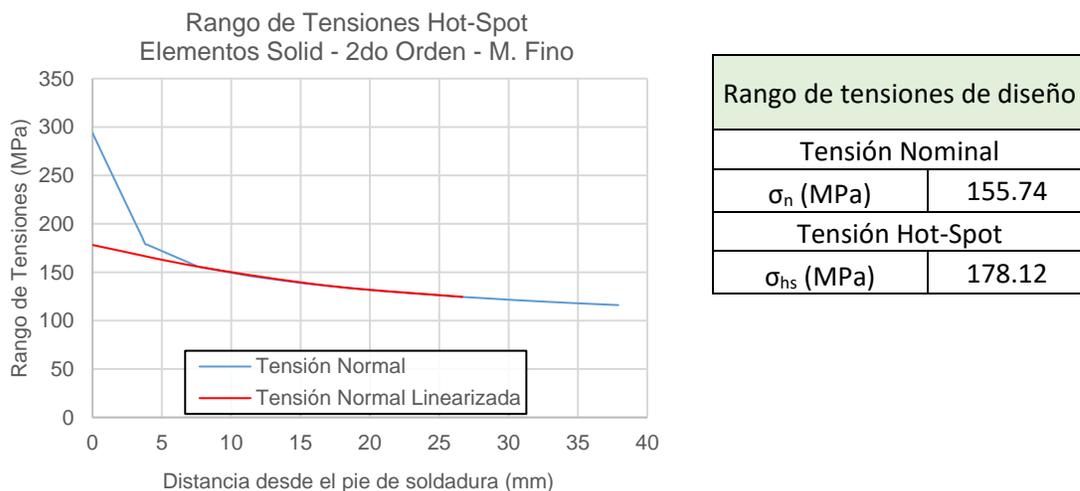
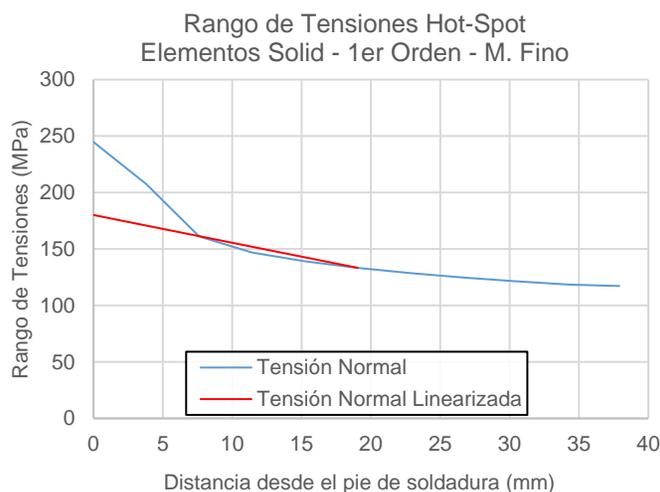


Figura III-27. Rango de tensiones detalle D2, elementos tipo *Solid*, filete de soldadura mínimo - Mallado fino, elementos de segundo orden, extrapolación cuadrática.

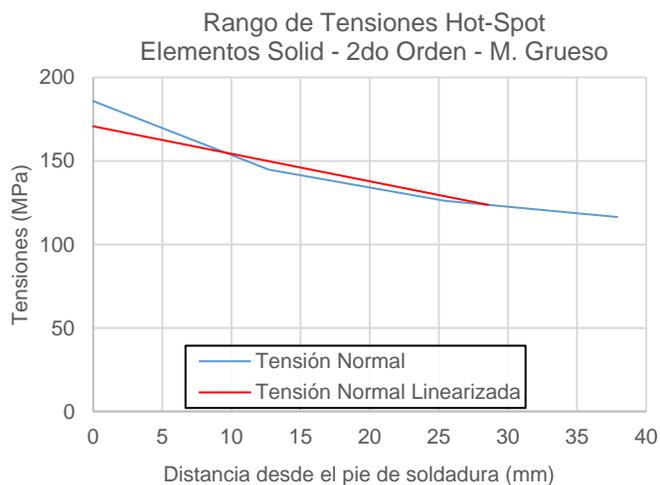
- **Modelo FEM elementos tipo *Solid*, filete de soldadura mínimo - Mallado fino, elementos de 1er orden, extrapolación lineal.**



Rango de tensiones de diseño	
Tensión Nominal	
σ_n (MPa)	161.33
Tensión Hot-Spot	
σ_{hs} (MPa)	180.12

Figura III-28. Rango de tensiones detalle D2, elementos tipo *Solid*, filete de soldadura mínimo - Mallado fino, elementos de primer orden, extrapolación lineal.

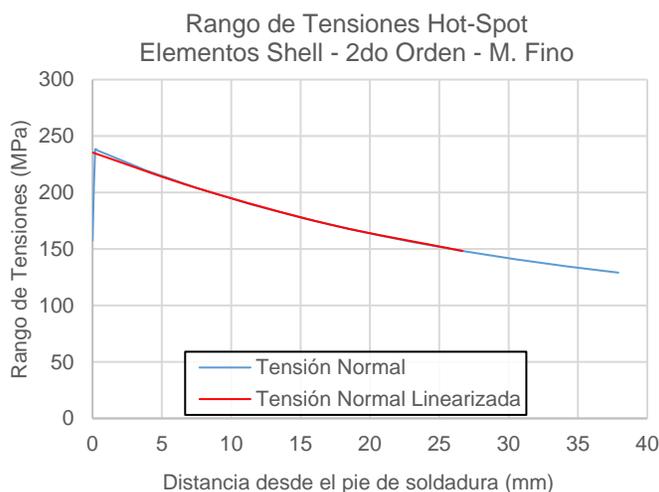
- **Modelo FEM elementos tipo *Solid*, filete de soldadura mínimo - Mallado grueso, elementos de 2do orden, extrapolación lineal.**



Rango de tensiones de diseño	
Tensión Nominal	
σ_n (MPa)	155.05
Tensión Hot-Spot	
σ_{hs} (MPa)	170.73

Figura III-29. Rango de tensiones detalle D2, elementos tipo *Solid*, filete de soldadura mínimo - Mallado grueso, elementos de segundo orden, extrapolación lineal.

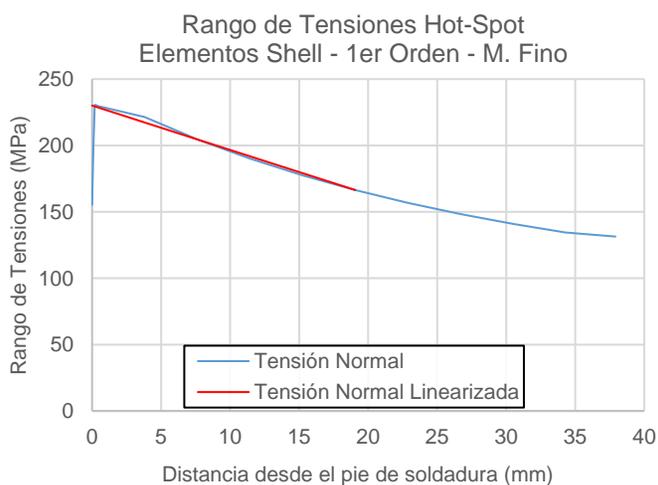
- **Modelo FEM elementos tipo *Shell* oblicuo y perpendicular - Mallado fino, elementos de 2do orden, extrapolación cuadrática.**



Rango de tensiones de diseño	
Tensión Nominal	
σ_n (MPa)	203.59
Tensión Hot-Spot	
σ_{hs} (MPa)	235.45

Figura III-30. Rango de tensiones detalle D2, elementos tipo *Shell* oblicuo y perpendicular - Mallado fino, elementos de segundo orden, extrapolación cuadrática.

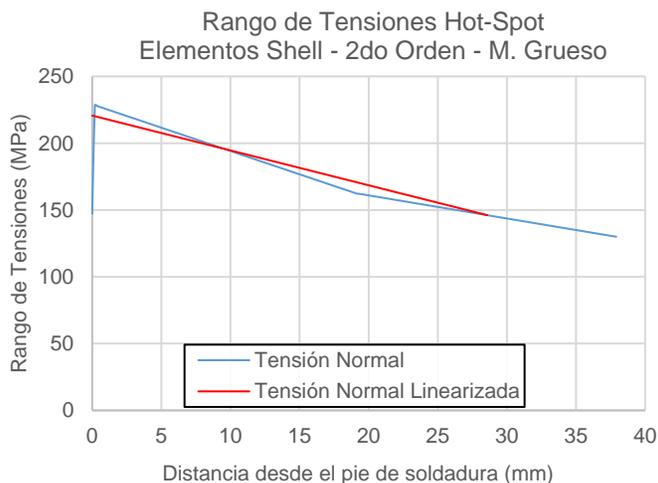
- **Modelo FEM elementos tipo *Shell* oblicuo y perpendicular - Mallado fino, elementos de 1er orden, extrapolación lineal.**



Rango de tensiones de diseño	
Tensión Nominal	
σ_n (MPa)	204.58
Tensión Hot-Spot	
σ_{hs} (MPa)	230.10

Figura III-31. Rango de tensiones detalle D2, elementos tipo *Shell* oblicuo y perpendicular - Mallado fino, elementos de primer orden, extrapolación lineal.

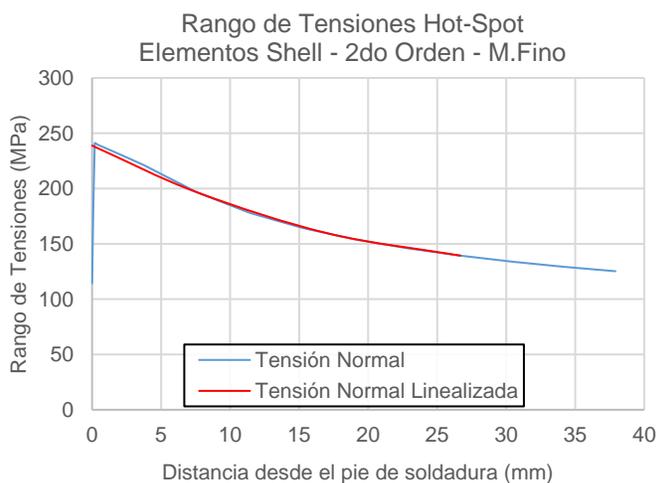
- **Modelo FEM elementos tipo *Shell* oblicuo y perpendicular - Mallado grueso, elementos de 2do orden, extrapolación lineal.**



Rango de tensiones de diseño	
Tensión Nominal	
σ_n (MPa)	195.82
Tensión Hot-Spot	
σ_{hs} (MPa)	220.67

Figura III-32. Rango de tensiones detalle D2, elementos tipo *Shell* oblicuo y perpendicular - Mallado grueso, elementos de segundo orden, extrapolación lineal.

- **Modelo FEM elementos tipo *Shell* perpendicular - Mallado fino, elementos de 2do orden, extrapolación cuadrática.**



Rango de tensiones de diseño	
Tensión Nominal	
σ_n (MPa)	196.52
Tensión Hot-Spot	
σ_{hs} (MPa)	238.85

Figura III-33. Rango de tensiones detalle D2, elementos tipo *Shell* perpendicular - Mallado fino, elementos de segundo orden, extrapolación cuadrática.

- **Modelo FEM elementos tipo *Shell* perpendicular - Mallado fino, elementos de 1er orden, extrapolación lineal.**

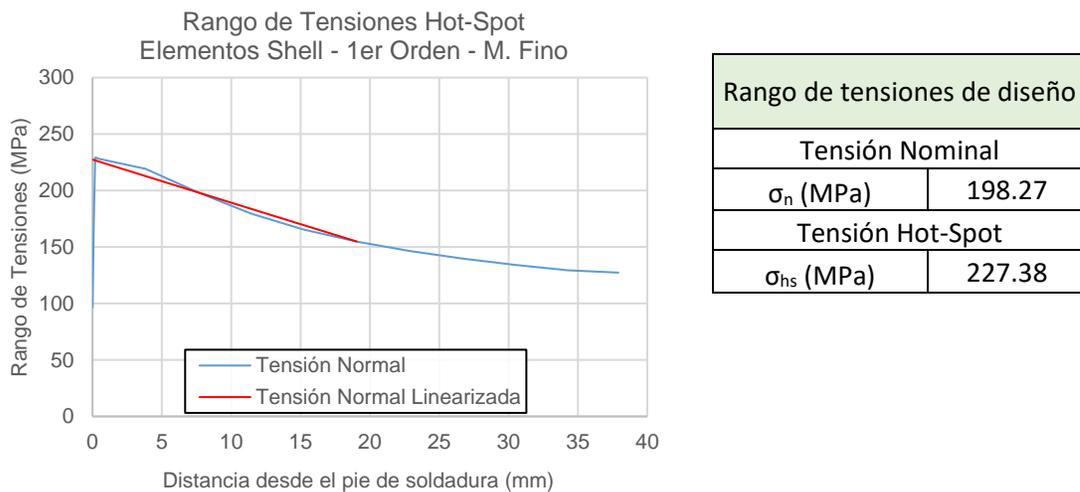


Figura III-34. Rango de tensiones detalle D2, elementos tipo *Shell* perpendicular - Mallado fino, elementos de primer orden, extrapolación lineal.

- **Modelo FEM elementos tipo *Shell* perpendicular - Mallado grueso, elementos de 2do orden, extrapolación lineal.**

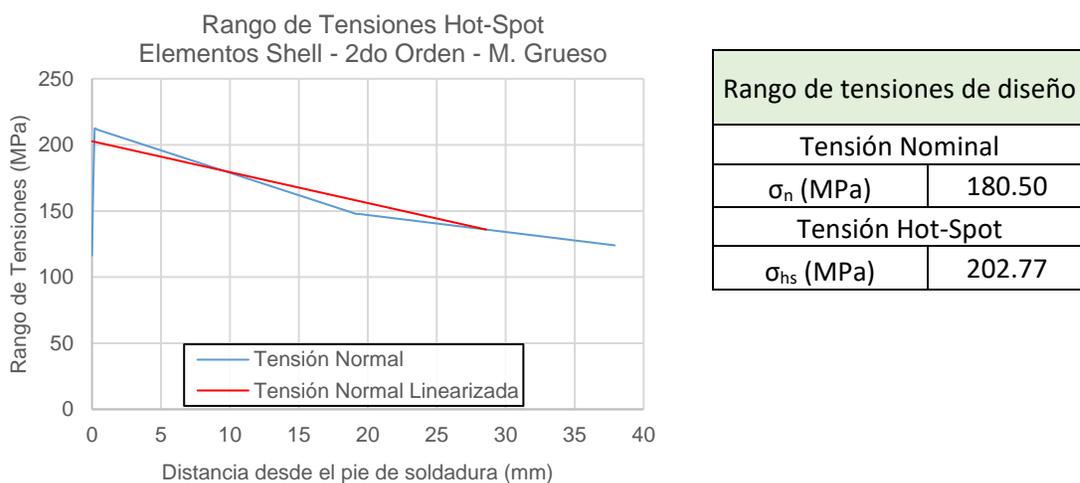
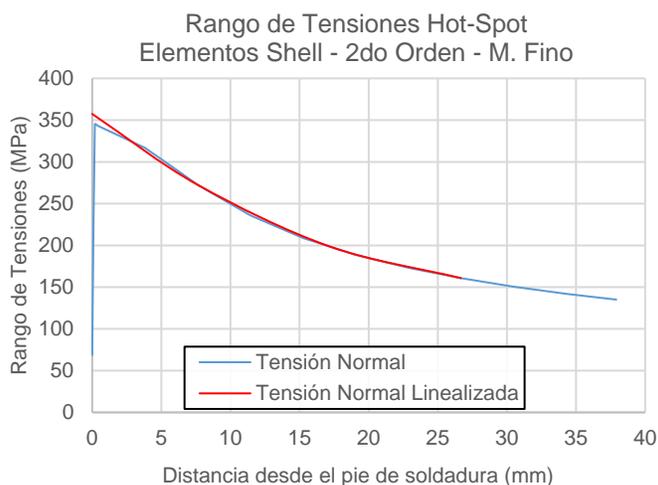


Figura III-35. Rango de tensiones detalle D2, elementos tipo *Shell* perpendicular - Mallado grueso, elementos de segundo orden, extrapolación lineal.

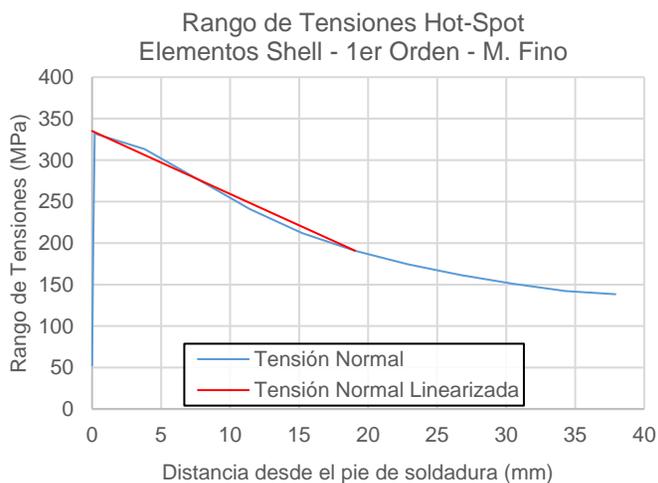
- **Modelo FEM elementos tipo *Shell* perpendicular rígido - Mallado fino, elementos de 2do orden, extrapolación cuadrática.**



Rango de tensiones de diseño	
Tensión Nominal	
σ_n (MPa)	272.63
Tensión Hot-Spot	
σ_{hs} (MPa)	357.38

Figura III-36. Rango de tensiones detalle D2, elementos tipo *Shell* perpendicular rígido - Mallado fino, elementos de segundo orden, extrapolación cuadrática.

- **Modelo FEM elementos tipo *Shell* perpendicular rígido - Mallado fino, elementos de 1er orden, extrapolación lineal.**



Rango de tensiones de diseño	
Tensión Nominal	
σ_n (MPa)	277.22
Tensión Hot-Spot	
σ_{hs} (MPa)	335.12

Figura III-37. Rango de tensiones detalle D2, elementos tipo *Shell* perpendicular rígido - Mallado fino, elementos de primer orden, extrapolación lineal.

- **Modelo FEM elementos tipo *Shell* perpendicular rígido - Mallado grueso, elementos de 2do orden, extrapolación lineal.**

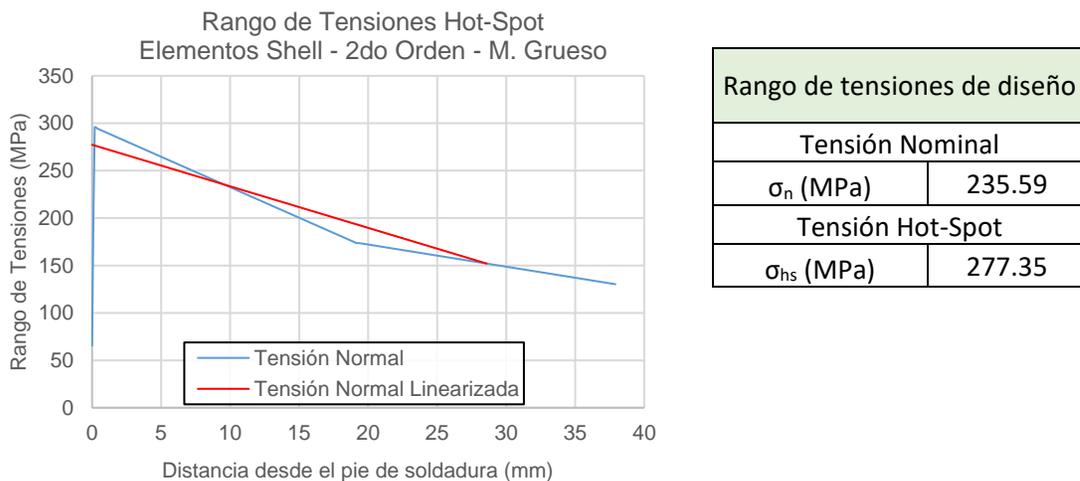


Figura III-38. Rango de tensiones detalle D2, elementos tipo *Shell* perpendicular rígido - Mallado grueso, elementos de segundo orden, extrapolación lineal.

III.2.3.3 Rangos de tensiones Nominal y Hot-Spot en Detalle D3

- **Modelo FEM elementos tipo *Solid*, filete de soldadura máximo - Mallado fino, elementos de 2do orden, extrapolación cuadrática.**

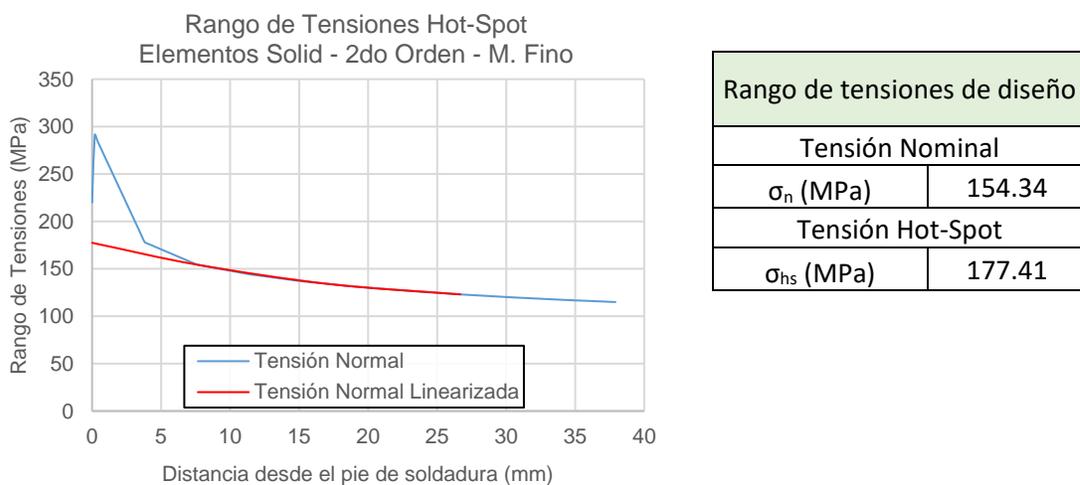


Figura III-39. Rango de tensiones detalle D3, elementos tipo *Solid*, filete de soldadura máximo - Mallado fino, elementos de segundo orden, extrapolación cuadrática.

- **Modelo FEM elementos tipo *Solid*, filete de soldadura máximo - Mallado fino, elementos de 1er orden, extrapolación lineal.**

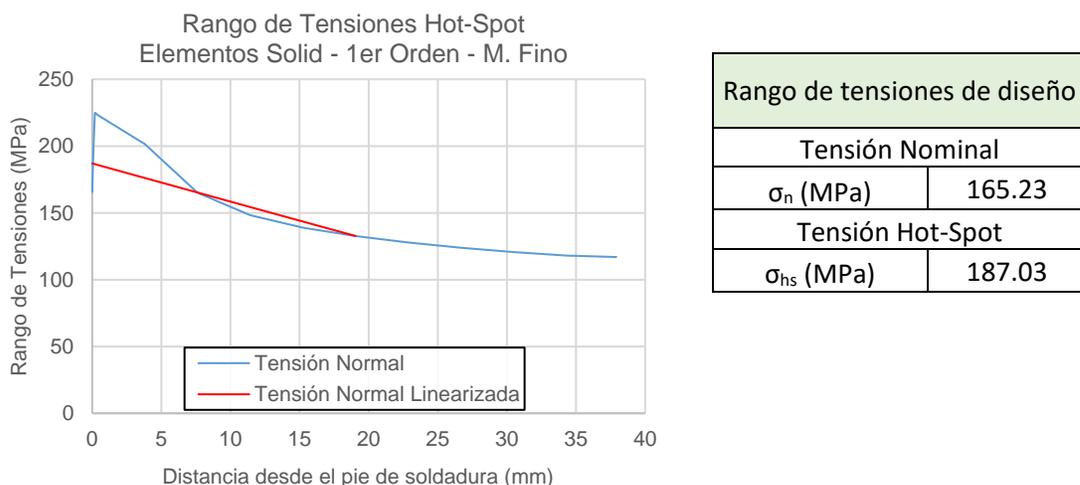


Figura III-40. Rango de tensiones detalle D3, elementos tipo *Solid*, filete de soldadura máximo - Mallado fino, elementos de primer orden, extrapolación lineal.

- **Modelo FEM elementos tipo *Solid*, filete de soldadura máximo - Mallado grueso, elementos de 2do orden, extrapolación lineal.**

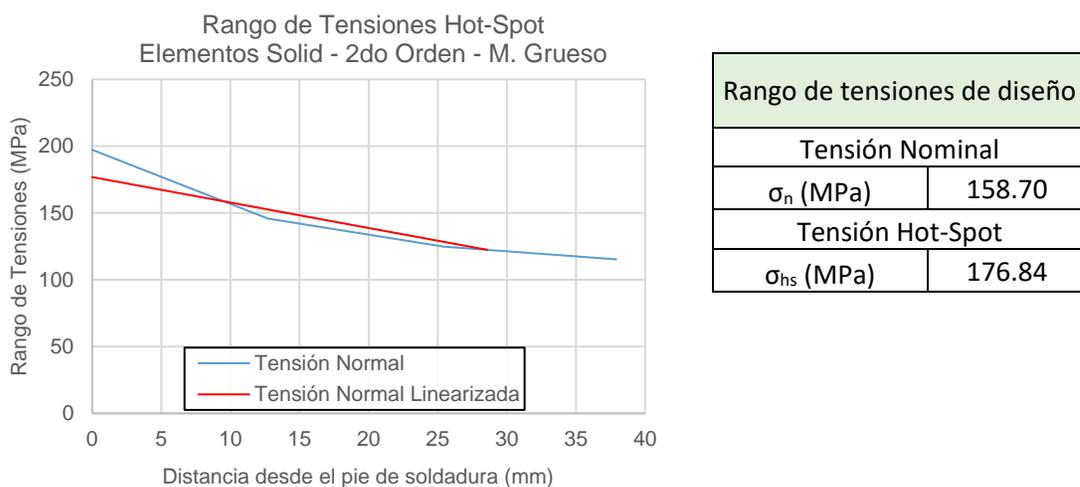
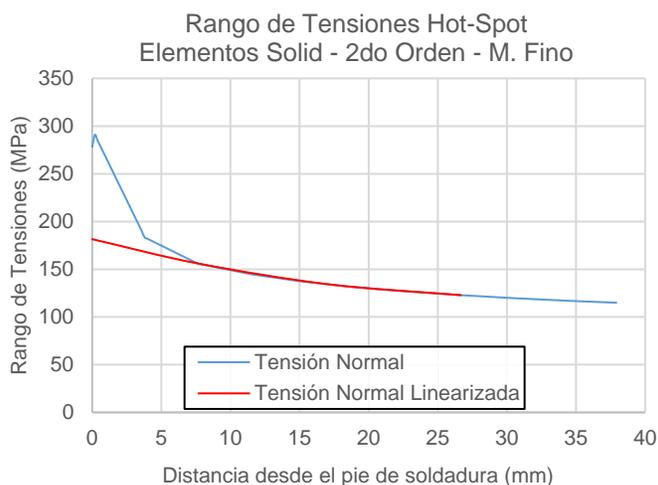


Figura III-41. Rango de tensiones detalle D3, elementos tipo *Solid*, filete de soldadura máximo - Mallado grueso, elementos de segundo orden, extrapolación lineal.

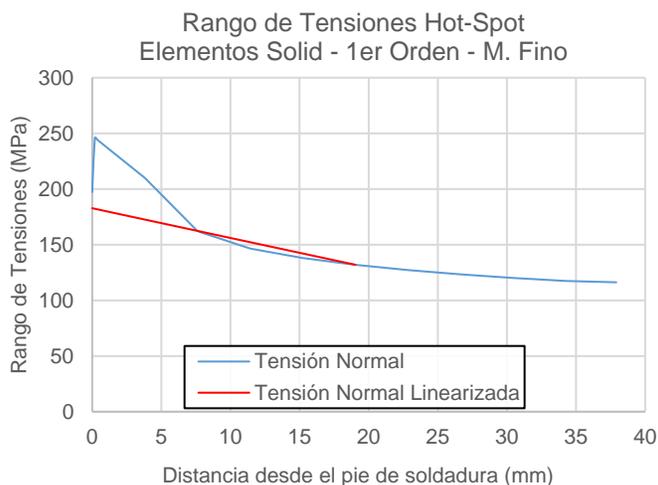
- **Modelo FEM elementos tipo *Solid*, filete de soldadura mínimo - Mallado fino, elementos de 2do orden, extrapolación cuadrática.**



Rango de tensiones de diseño	
Tensión Nominal	
σ_n (MPa)	156.15
Tensión Hot-Spot	
σ_{hs} (MPa)	181.52

Figura III-42. Rango de tensiones detalle D3, elementos tipo *Solid*, filete de soldadura mínimo - Mallado fino, elementos de segundo orden, extrapolación cuadrática.

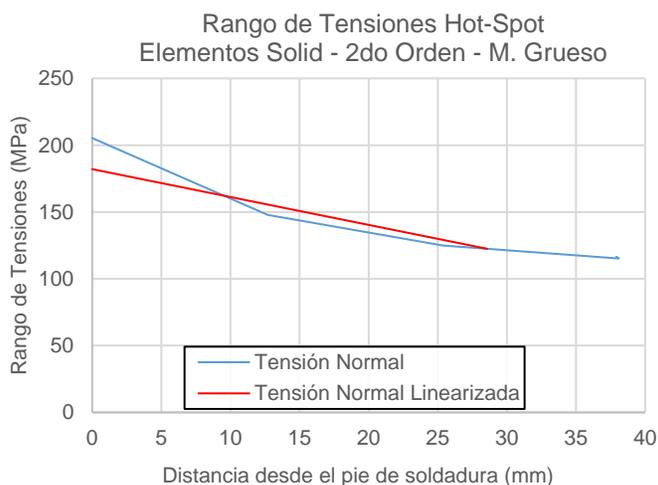
- **Modelo FEM elementos tipo *Solid*, filete de soldadura mínimo - Mallado fino, elementos de 1er orden, extrapolación lineal.**



Rango de tensiones de diseño	
Tensión Nominal	
σ_n (MPa)	162.37
Tensión Hot-Spot	
σ_{hs} (MPa)	182.76

Figura III-43. Rango de tensiones detalle D3, elementos tipo *Solid*, filete de soldadura mínimo - Mallado fino, elementos de primer orden, extrapolación lineal.

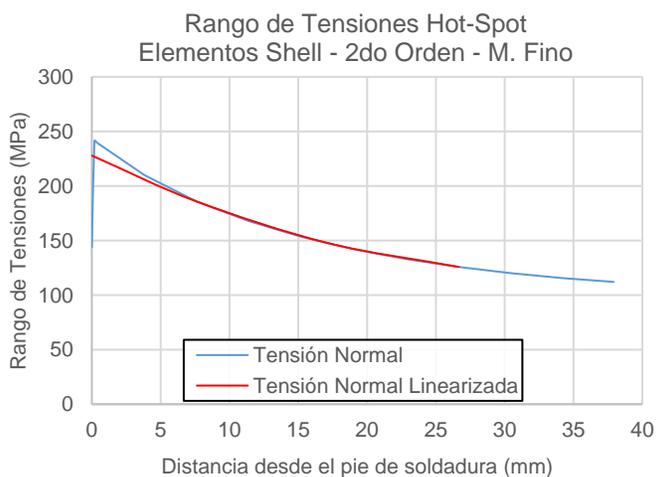
- **Modelo FEM elementos tipo *Solid*, filete de soldadura mínimo - Mallado grueso, elementos de 2do orden, extrapolación lineal.**



Rango de tensiones de diseño	
Tensión Nominal	
σ_n (MPa)	162.20
Tensión Hot-Spot	
σ_{hs} (MPa)	182.08

Figura III-44. Rango de tensiones detalle D3, elementos tipo *Solid*, filete de soldadura mínimo - Mallado grueso, elementos de segundo orden, extrapolación lineal.

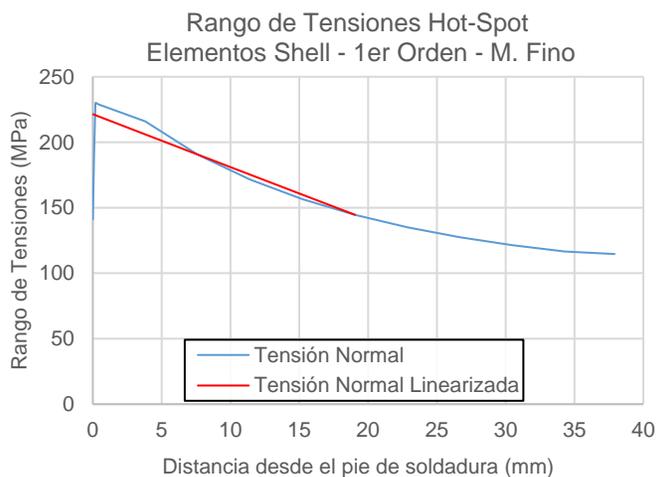
- **Modelo FEM elementos tipo *Shell* oblicuo y perpendicular - Mallado fino, elementos de 2do orden, extrapolación cuadrática.**



Rango de tensiones de diseño	
Tensión Nominal	
σ_n (MPa)	185.76
Tensión Hot-Spot	
σ_{hs} (MPa)	227.85

Figura III-45. Rango de tensiones detalle D3, elementos tipo *Shell* oblicuo y perpendicular - Mallado fino, elementos de segundo orden, extrapolación cuadrática.

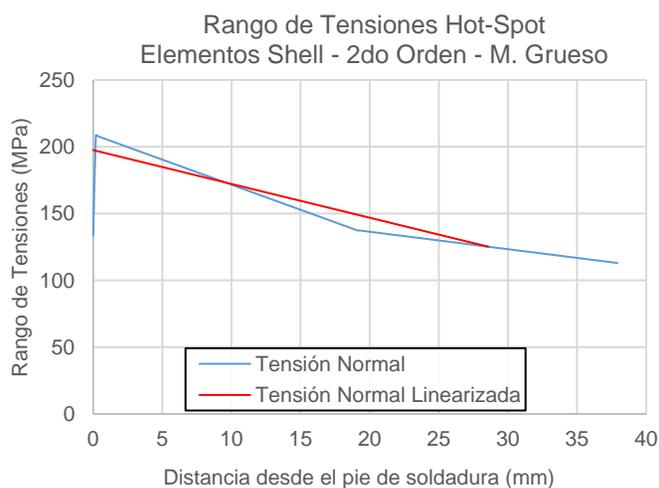
- **Modelo FEM elementos tipo *Shell* oblicuo y perpendicular - Mallado fino, elementos de 1er orden, extrapolación lineal.**



Rango de tensiones de diseño	
Tensión Nominal	
σ_n (MPa)	190.59
Tensión Hot-Spot	
σ_{hs} (MPa)	221.42

Figura III-46. Rango de tensiones detalle D3, elementos tipo *Shell* oblicuo y perpendicular - Mallado fino, elementos de primer orden, extrapolación lineal.

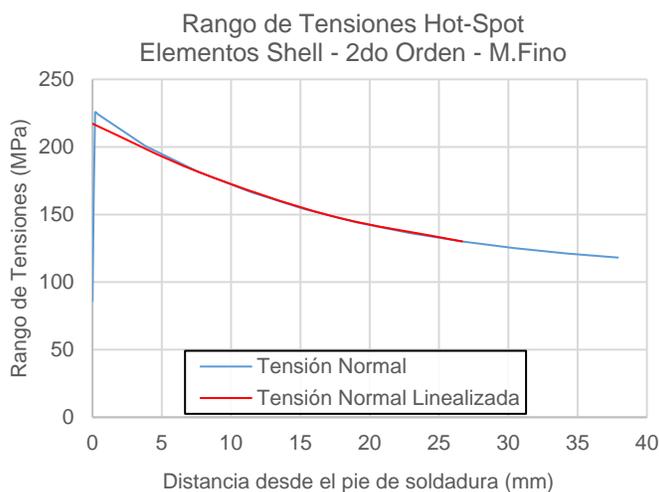
- **Modelo FEM elementos tipo *Shell* oblicuo y perpendicular - Mallado grueso, elementos de 2do orden, extrapolación lineal.**



Rango de tensiones de diseño	
Tensión Nominal	
σ_n (MPa)	173.78
Tensión Hot-Spot	
σ_{hs} (MPa)	197.47

Figura III-47. Rango de tensiones detalle D3, elementos tipo *Shell* oblicuo y perpendicular - Mallado grueso, elementos de segundo orden, extrapolación lineal.

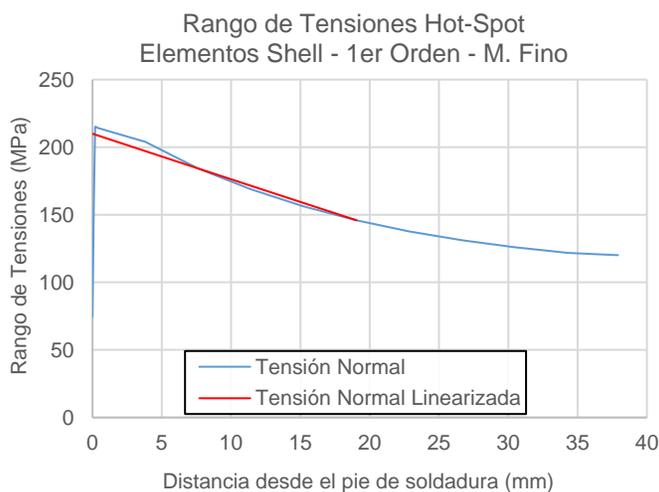
- **Modelo FEM elementos tipo *Shell* perpendicular - Mallado fino, elementos de 2do orden, extrapolación cuadrática.**



Rango de tensiones de diseño	
Tensión Nominal	
σ_n (MPa)	181.64
Tensión Hot-Spot	
σ_{hs} (MPa)	217.22

Figura III-48. Rango de tensiones detalle D3, elementos tipo *Shell* perpendicular - Mallado fino, elementos de segundo orden, extrapolación cuadrática.

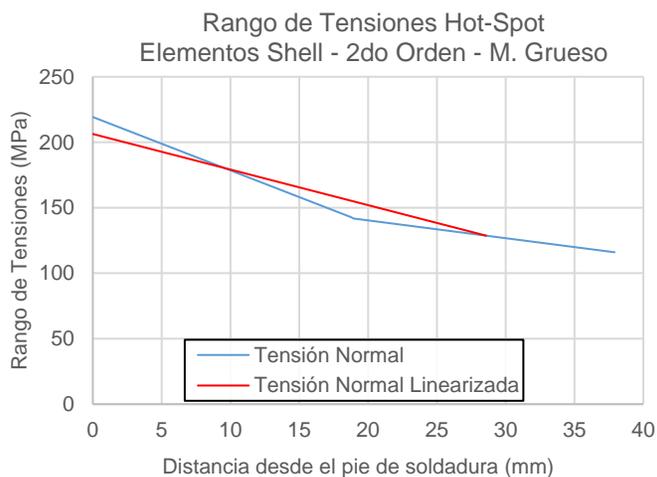
- **Modelo FEM elementos tipo *Shell* perpendicular - Mallado fino, elementos de 1er orden, extrapolación lineal.**



Rango de tensiones de diseño	
Tensión Nominal	
σ_n (MPa)	184.24
Tensión Hot-Spot	
σ_{hs} (MPa)	209.95

Figura III-49. Rango de tensiones detalle D3, elementos tipo *Shell* perpendicular - Mallado fino, elementos de primer orden, extrapolación lineal.

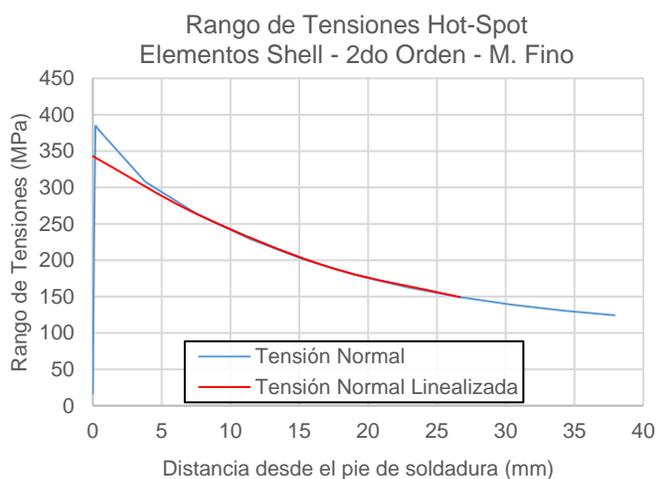
- **Modelo FEM elementos tipo *Shell* perpendicular - Mallado grueso, elementos de 2do orden, extrapolación lineal.**



Rango de tensiones de diseño	
Tensión Nominal	
σ_n (MPa)	180.43
Tensión Hot-Spot	
σ_{hs} (MPa)	206.31

Figura III-50. Rango de tensiones detalle D3, elementos tipo *Shell* perpendicular - Mallado grueso, elementos de segundo orden, extrapolación lineal.

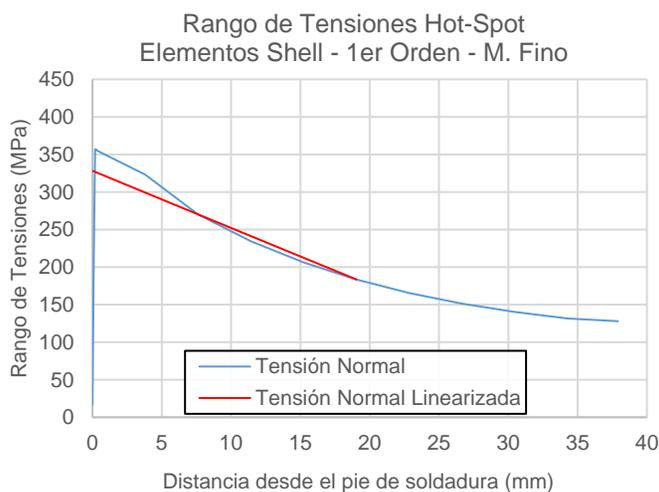
- **Modelo FEM elementos tipo *Shell* perpendicular rígido - Mallado fino, elementos de 2do orden, extrapolación cuadrática.**



Rango de tensiones de diseño	
Tensión Nominal	
σ_n (MPa)	262.97
Tensión Hot-Spot	
σ_{hs} (MPa)	343.04

Figura III-51. Rango de tensiones detalle D3, elementos tipo *Shell* perpendicular rígido - Mallado fino, elementos de segundo orden, extrapolación cuadrática.

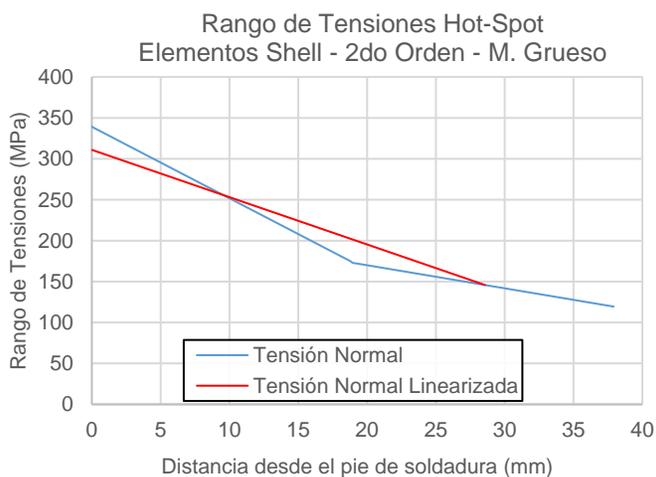
- **Modelo FEM elementos tipo *Shell* perpendicular rígido - Mallado fino, elementos de 1er orden, extrapolación lineal.**



Rango de tensiones de diseño	
Tensión Nominal	
σ_n (MPa)	270.18
Tensión Hot-Spot	
σ_{hs} (MPa)	328.26

Figura III-52. Rango de tensiones detalle D3, elementos tipo *Shell* perpendicular rígido - Mallado fino, elementos de primer orden, extrapolación lineal.

- **Modelo FEM elementos tipo *Shell* perpendicular rígido - Mallado grueso, elementos de 2do orden, extrapolación lineal.**



Rango de tensiones de diseño	
Tensión Nominal	
σ_n (MPa)	255.90
Tensión Hot-Spot	
σ_{hs} (MPa)	310.95

Figura III-53. Rango de tensiones detalle D3, elementos tipo *Shell* perpendicular rígido - Mallado grueso, elementos de segundo orden, extrapolación lineal.

III.2.3.4 Rangos de tensiones Nominal y Hot-Spot en Detalle D4

- **Modelo FEM elementos tipo *Solid*, filete de soldadura máximo - Mallado fino, elementos de 2do orden, extrapolación cuadrática.**

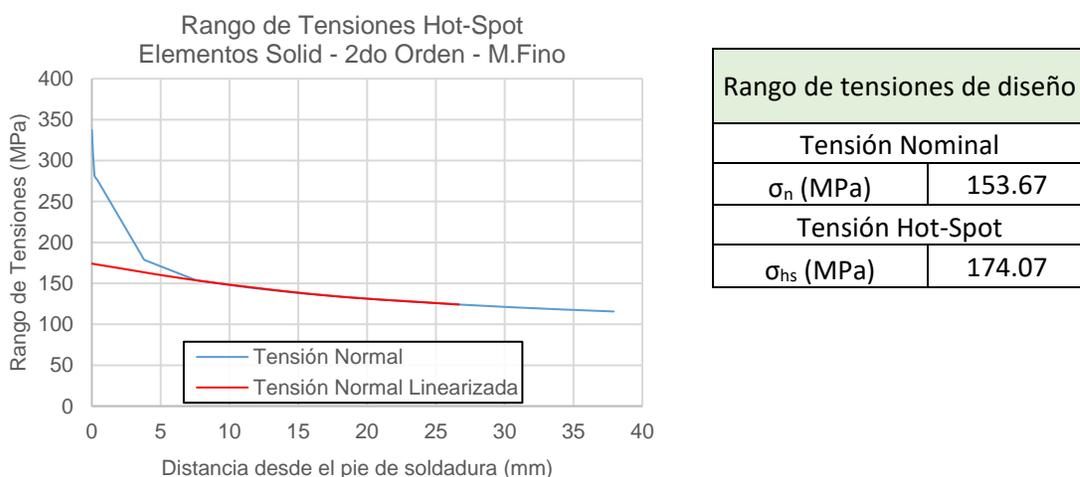


Figura III-54. Rango de tensiones detalle D4, elementos tipo *Solid*, filete de soldadura máximo - Mallado fino, elementos de segundo orden, extrapolación cuadrática.

- **Modelo FEM elementos tipo *Solid*, filete de soldadura máximo - Mallado fino, elementos de 1er orden, extrapolación lineal.**

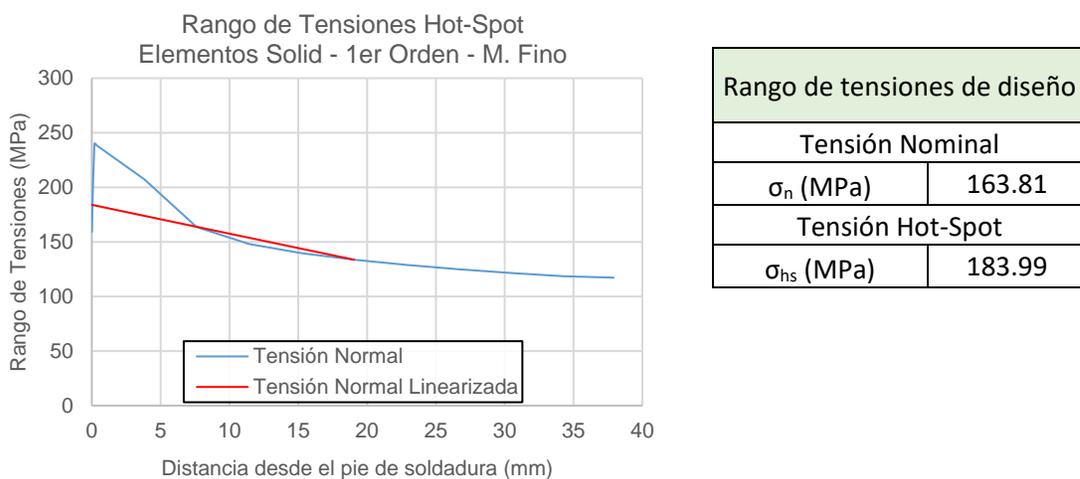
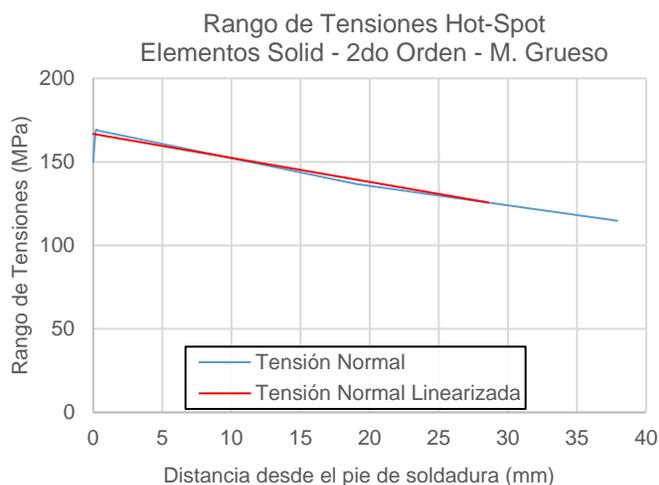


Figura III-55. Rango de tensiones detalle D4, elementos tipo *Solid*, filete de soldadura máximo - Mallado fino, elementos de primer orden, extrapolación lineal.

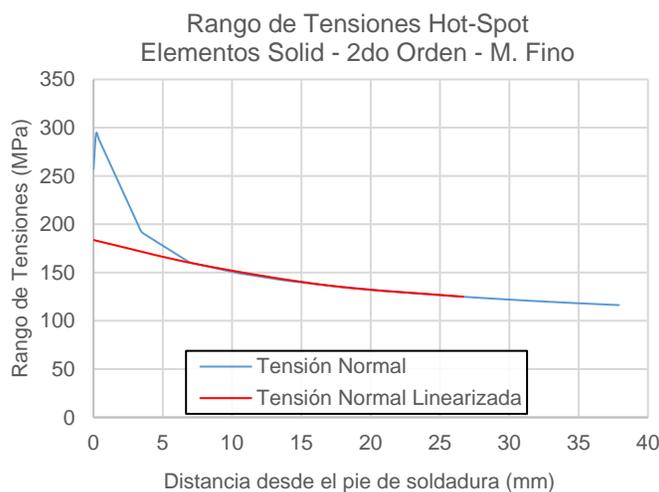
- **Modelo FEM elementos tipo *Solid*, filete de soldadura máximo - Mallado grueso, elementos de 2do orden, extrapolación lineal.**



Rango de tensiones de diseño	
Tensión Nominal	
σ_n (MPa)	153.05
Tensión Hot-Spot	
σ_{hs} (MPa)	166.76

Figura III-56. Rango de tensiones detalle D4, elementos tipo *Solid*, filete de soldadura máximo - Mallado grueso, elementos de segundo orden, extrapolación lineal.

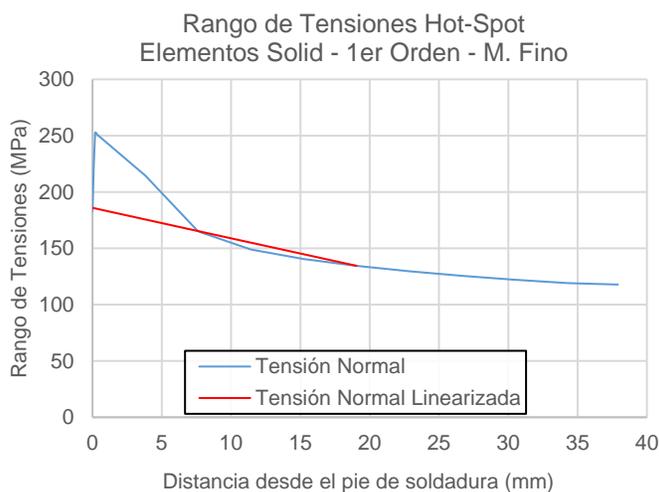
- **Modelo FEM elementos tipo *Solid*, filete de soldadura mínimo - Mallado fino, elementos de 2do orden, extrapolación cuadrática.**



Rango de tensiones de diseño	
Tensión Nominal	
σ_n (MPa)	158.26
Tensión Hot-Spot	
σ_{hs} (MPa)	183.67

Figura III-57. Rango de tensiones detalle D4, elementos tipo *Solid*, filete de soldadura mínimo - Mallado fino, elementos de segundo orden, extrapolación cuadrática.

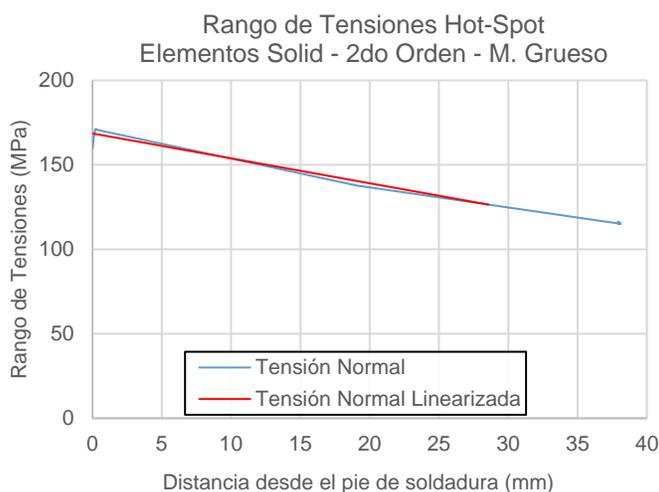
- **Modelo FEM elementos tipo *Solid*, filete de soldadura mínimo - Mallado fino, elementos de 1er orden, extrapolación lineal.**



Rango de tensiones de diseño	
Tensión Nominal	
σ_n (MPa)	165.30
Tensión Hot-Spot	
σ_{hs} (MPa)	185.96

Figura III-58. Rango de tensiones detalle D4, elementos tipo *Solid*, filete de soldadura mínimo - Mallado fino, elementos de primer orden, extrapolación lineal.

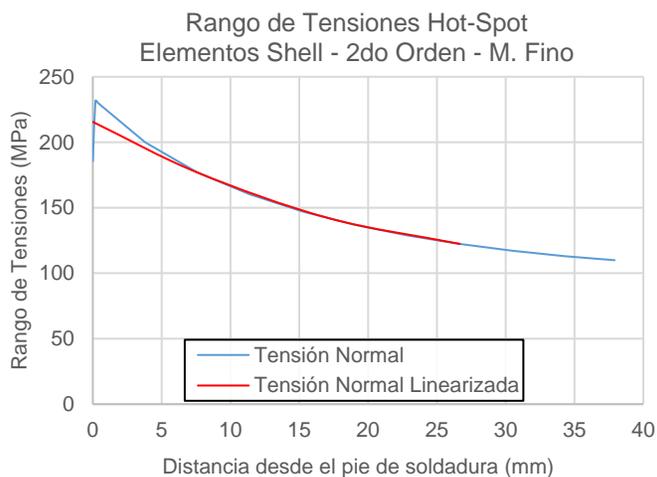
- **Modelo FEM elementos tipo *Solid*, filete de soldadura mínimo - Mallado grueso, elementos de 2do orden, extrapolación lineal.**



Rango de tensiones de diseño	
Tensión Nominal	
σ_n (MPa)	154.52
Tensión Hot-Spot	
σ_{hs} (MPa)	168.57

Figura III-59. Rango de tensiones detalle D4, elementos tipo *Solid*, filete de soldadura mínimo - Mallado grueso, elementos de segundo orden, extrapolación lineal.

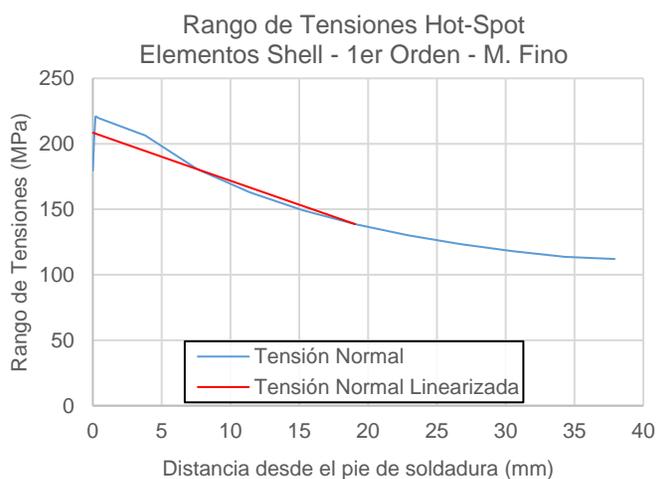
- **Modelo FEM elementos tipo *Shell* oblicuo y perpendicular - Mallado fino, elementos de 2do orden, extrapolación cuadrática.**



Rango de tensiones de diseño	
Tensión Nominal	
σ_n (MPa)	176.81
Tensión Hot-Spot	
σ_{hs} (MPa)	215.54

Figura III-60. Rango de tensiones detalle D4, elementos tipo *Shell* oblicuo y perpendicular - Mallado fino, elementos de segundo orden, extrapolación cuadrática.

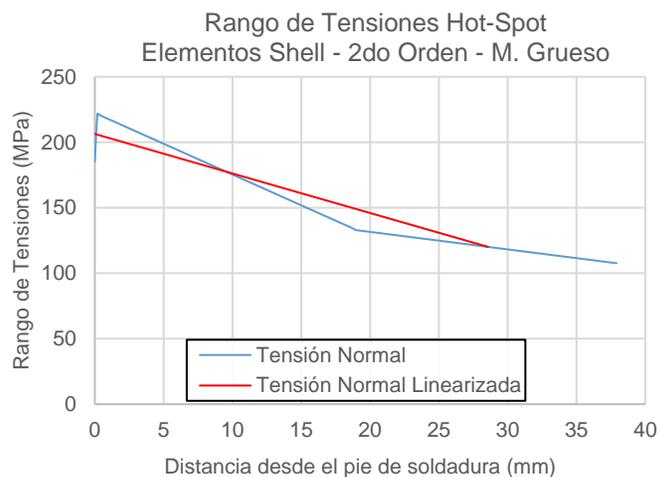
- **Modelo FEM elementos tipo *Shell* oblicuo y perpendicular - Mallado fino, elementos de 1er orden, extrapolación lineal.**



Rango de tensiones de diseño	
Tensión Nominal	
σ_n (MPa)	180.50
Tensión Hot-Spot	
σ_{hs} (MPa)	208.50

Figura III-61. Rango de tensiones detalle D4, elementos tipo *Shell* oblicuo y perpendicular - Mallado fino, elementos de primer orden, extrapolación lineal.

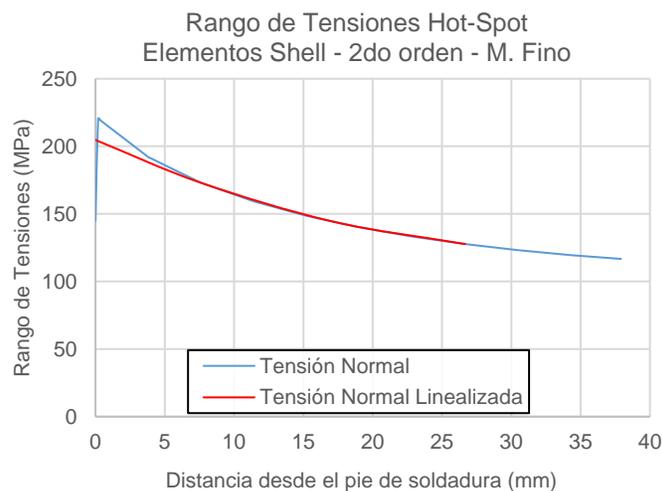
- **Modelo FEM elementos tipo *Shell* oblicuo y perpendicular - Mallado grueso, elementos de 2do orden, extrapolación lineal.**



Rango de tensiones de diseño	
Tensión Nominal	
σ_n (MPa)	177.58
Tensión Hot-Spot	
σ_{hs} (MPa)	206.33

Figura III-62. Rango de tensiones detalle D4, elementos tipo *Shell* oblicuo y perpendicular - Mallado grueso, elementos de segundo orden, extrapolación lineal.

- **Modelo FEM elementos tipo *Shell* perpendicular - Mallado fino, elementos de 2do orden, extrapolación cuadrática.**



Rango de tensiones de diseño	
Tensión Nominal	
σ_n (MPa)	172.95
Tensión Hot-Spot	
σ_{hs} (MPa)	204.66

Figura III-63. Rango de tensiones detalle D4, elementos tipo *Shell* perpendicular - Mallado fino, elementos de segundo orden, extrapolación cuadrática.

- **Modelo FEM elementos tipo *Shell* perpendicular - Mallado fino, elementos de 1er orden, extrapolación lineal.**

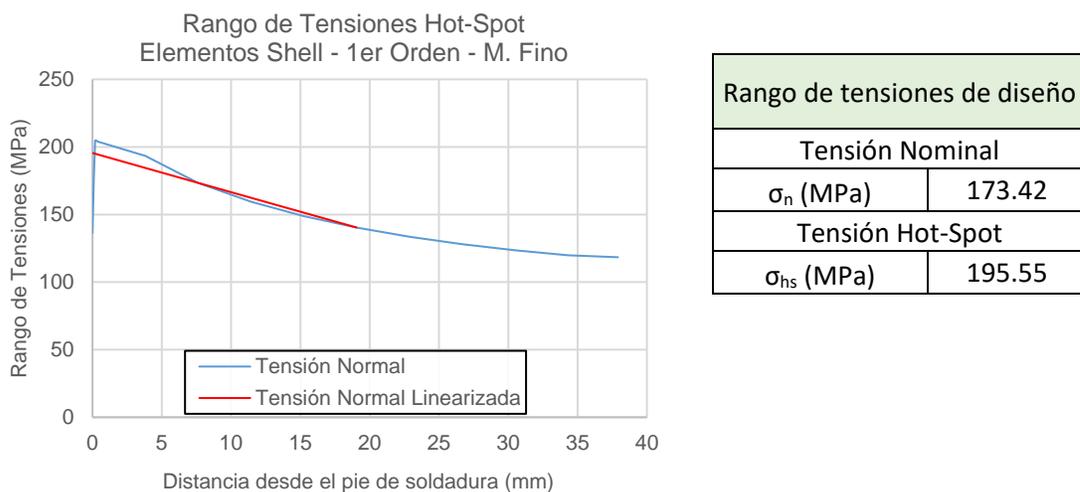


Figura III-64. Rango de tensiones detalle D4, elementos tipo *Shell* perpendicular - Mallado fino, elementos de primer orden, extrapolación lineal.

- **Modelo FEM elementos tipo *Shell* perpendicular - Mallado grueso, elementos de 2do orden, extrapolación lineal.**

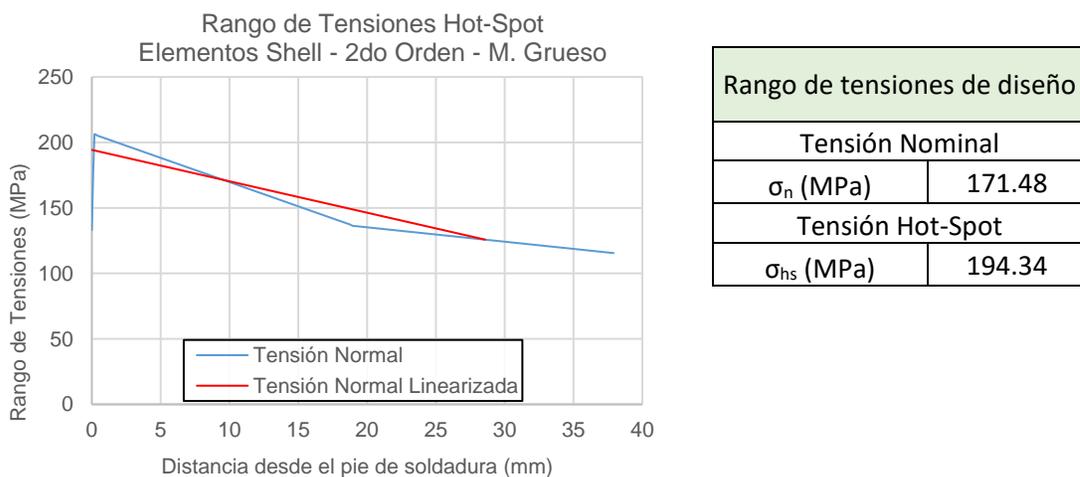
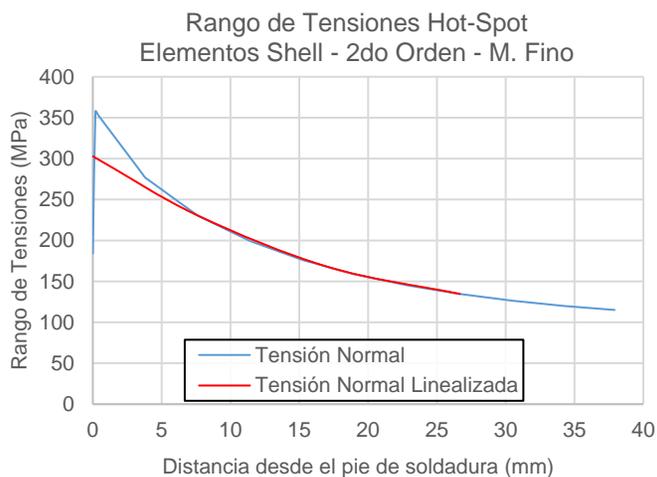


Figura III-65. Rango de tensiones detalle D4, elementos tipo *Shell* perpendicular - Mallado grueso, elementos de segundo orden, extrapolación lineal.

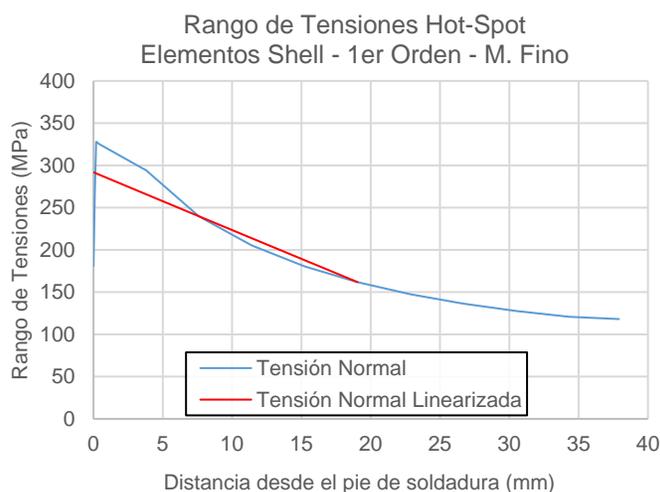
- **Modelo FEM elementos tipo *Shell* perpendicular rígido - Mallado fino, elementos de 2do orden, extrapolación cuadrática.**



Rango de tensiones de diseño	
Tensión Nominal	
σ_n (MPa)	230.49
Tensión Hot-Spot	
σ_{hs} (MPa)	302.89

Figura III-66. Rango de tensiones detalle D4, elementos tipo *Shell* perpendicular rígido - Mallado fino, elementos de segundo orden, extrapolación cuadrática.

- **Modelo FEM elementos tipo *Shell* perpendicular rígido - Mallado fino, elementos de 1er orden, extrapolación lineal.**



Rango de tensiones de diseño	
Tensión Nominal	
σ_n (MPa)	239.69
Tensión Hot-Spot	
σ_{hs} (MPa)	291.84

Figura III-67. Rango de tensiones detalle D4, elementos tipo *Shell* perpendicular rígido - Mallado fino, elementos de primer orden, extrapolación lineal.

- **Modelo FEM elementos tipo *Shell* perpendicular rígido - Mallado grueso, elementos de 2do orden, extrapolación lineal.**

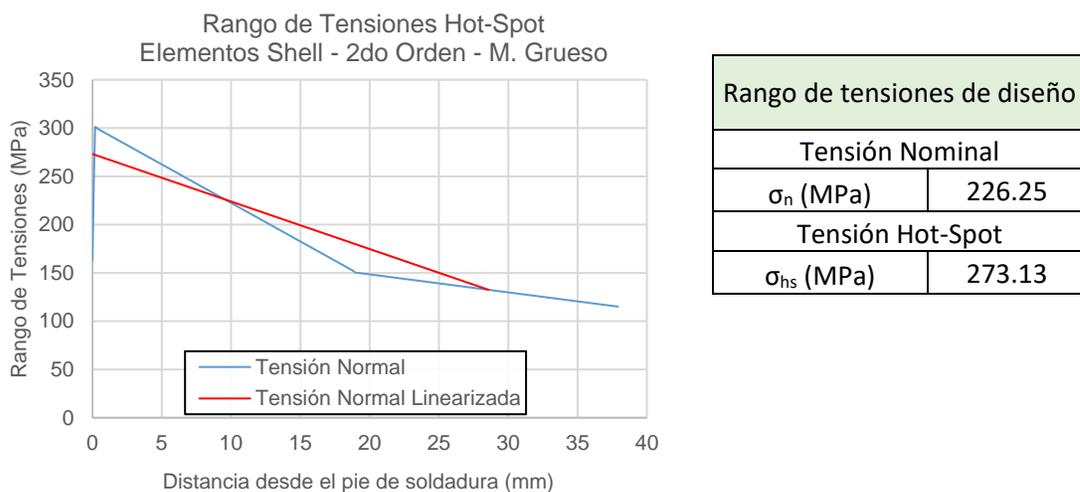


Figura III-68. Rango de tensiones detalle D4, elementos tipo *Shell* perpendicular rígido - Mallado grueso, elementos de segundo orden, extrapolación lineal.

III.3 Análisis de rangos de tensiones obtenidos de los modelos FEM

El resumen de los valores asociados a los detalles D1, D2, D3 y D4 para los rangos de tensiones Nominal y Hot-Spot se indican en las figuras III-69, III-70, III-71 y III-72, respectivamente.

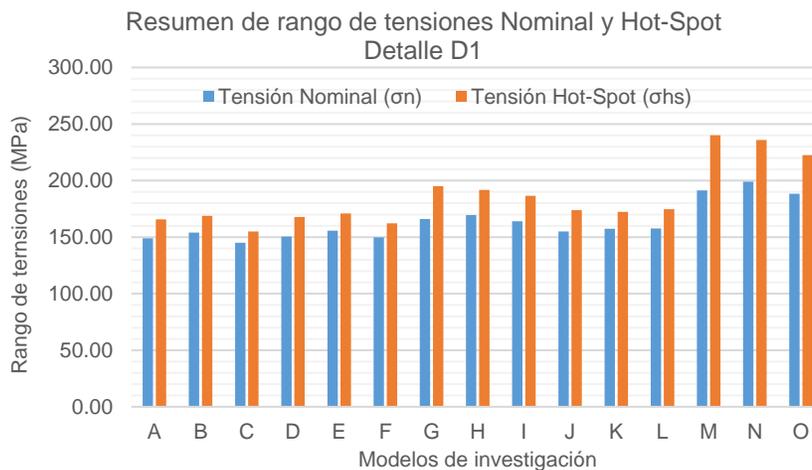


Figura III-69. Resumen de rangos de tensiones asociados al detalle D1.

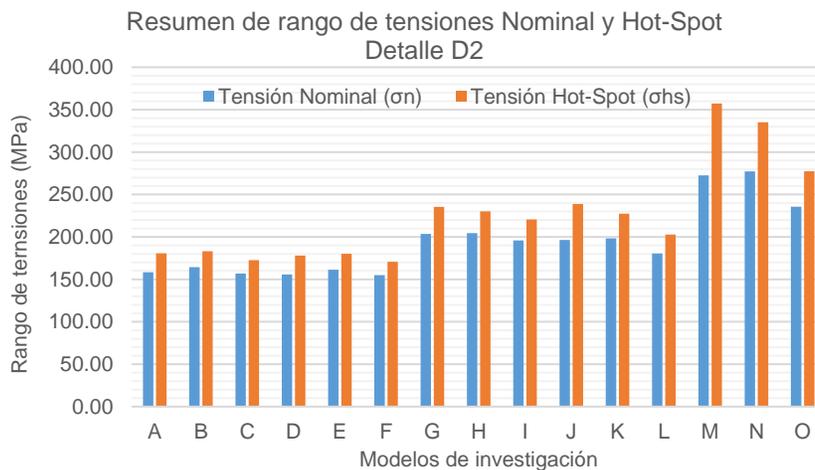


Figura III-70. Resumen de rangos de tensiones asociados al detalle D2.

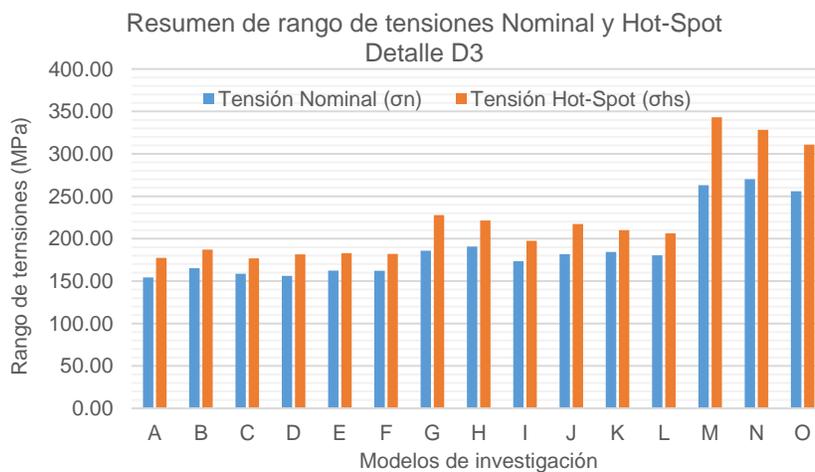


Figura III-71. Resumen de rangos de tensiones asociados al detalle D3.

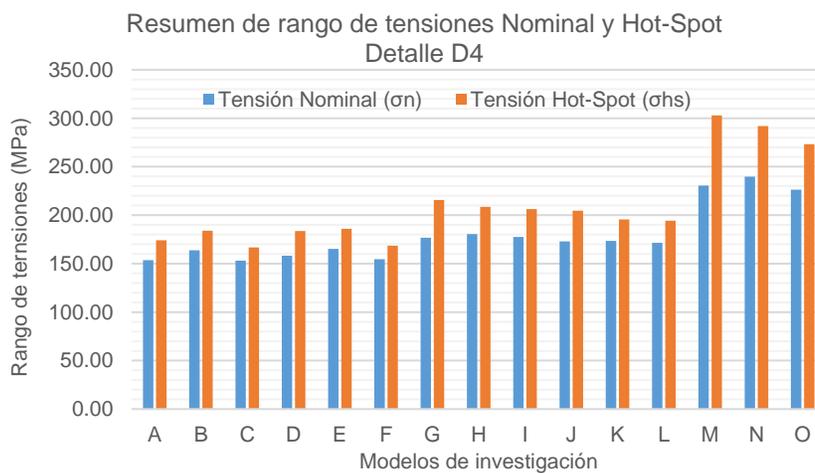


Figura III-72. Resumen de rangos de tensiones asociados al detalle D4.

La nomenclatura asignada a los modelos de investigación se indica en la tabla siguiente:

Tabla III-1. Nomenclatura asignada a los modelos de investigación.

A	Solid, filete de soldadura máximo - Mallado fino, elementos de 2do orden, extrapolación cuadrática
B	Solid, filete de soldadura máximo - Mallado fino, elementos de 1er orden, extrapolación lineal
C	Solid, filete de soldadura máximo - Mallado grueso, elementos de 2do orden, extrapolación lineal
D	Solid, filete de soldadura mínimo - Mallado fino, elementos de 2do orden, extrapolación cuadrática
E	Solid, filete de soldadura mínimo - Mallado fino, elementos de 1er orden, extrapolación lineal
F	Solid, filete de soldadura mínimo - Mallado grueso, elementos de 2do orden, extrapolación lineal
G	Shell oblicuo y perpendicular - Mallado fino, elementos de 2do orden, extrapolación cuadrática
H	Shell oblicuo y perpendicular - Mallado fino, elementos de 1er orden, extrapolación lineal
I	Shell oblicuo y perpendicular - Mallado grueso, elementos de 2do orden, extrapolación lineal
J	Shell perpendicular - Mallado fino, elementos de 2do orden, extrapolación cuadrática
K	Shell perpendicular - Mallado fino, elementos de 1er orden, extrapolación lineal
L	Shell perpendicular - Mallado grueso, elementos de 2do orden, extrapolación lineal
M	Shell perpendicular rígido - Mallado fino, elementos de 2do orden, extrapolación cuadrática
N	Shell perpendicular rígido - Mallado fino, elementos de 1er orden, extrapolación lineal
O	Shell perpendicular rígido - Mallado grueso, elementos de 2do orden, extrapolación lineal

III.3.1 Análisis de rangos de tensiones obtenidos, detalle D1

- Tensión Nominal: Considerando los resultados obtenidos, es posible establecer que los modelos de tipo *Solid* no presentan variaciones significativas entre las diferentes

configuraciones de análisis consideradas (menores al 7% entre sus casos extremos), adicionalmente, los valores más conservadores para este segmento son obtenidos por los modelos con mallado fino y elementos de 1er orden con extrapolación lineal (modelos B y E), mientras que los valores menos conservadores son obtenidos para modelos con mallado grueso, elementos de 2do orden y extrapolación lineal de tensiones (modelos C y F). No se establecen diferencias significativas (menores al 3%) entre los modelos de tipo *Solid* para las respectivas configuraciones de análisis de los casos de filete de soldadura máximo y mínimo.

Respecto de los modelos de tipo *Shell* oblicuo y perpendicular, estos presentan una diferencia menos relevante entre las configuraciones de análisis consideradas para este segmento (equivalente al 3.2% entre sus casos extremos). El valor más conservador para este segmento corresponde al modelo con mallado fino, elementos de 1er orden y extrapolación lineal (modelo H), mientras el valor menos conservador es obtenido para el modelo con mallado grueso, elementos de 2do orden y extrapolación lineal de tensiones (modelo I).

Para los modelos de tipo *Shell* perpendicular, se identifica una diferencia marginal equivalente al 1.7% entre sus casos extremos para las configuraciones de análisis consideradas. El valor más conservador corresponde al modelo con mallado grueso, elementos de 2do orden, y extrapolación lineal (modelo L), mientras el valor menos conservador es obtenido para el modelo con mallado fino, elementos de 2do orden y extrapolación cuadrática (modelo J), no obstante lo anterior, la uniformidad de los datos obtenidos para las configuraciones de análisis consideradas en este segmento no

permite identificar una tendencia de resultados extremos asociados a un modelo respectivo.

Finalmente, para los modelos constituidos por elementos de tipo *Shell* perpendicular rígido, se identifica una diferencia de 5.4% entre casos extremos. El valor más conservador corresponde al modelo con mallado fino de 1er orden y extrapolación lineal (modelo N), el valor menos conservador es obtenido para el modelo con mallado grueso, elementos de 2do orden y extrapolación lineal (modelo O).

- Tensión Hot-Spot: Respecto del rango de tensiones Hot-Spot, los modelos de tipo *Solid* presentan variaciones mayores al análisis de tensiones Nominal, sin embargo, estas variaciones son menores al 10% entre sus casos extremos. Al igual que en el método de tensiones Nominal, los valores más conservadores para este segmento son obtenidos por los modelos con mallado fino y elementos de 1er orden con extrapolación lineal (modelos B y E), mientras que los valores menos conservadores son obtenidos para modelos con mallado grueso, elementos de 2do orden y extrapolación lineal de tensiones (modelos C y F). No se establecen diferencias significativas (menores al 4%) entre los modelos de tipo *Solid* para las respectivas configuraciones de análisis de los casos de filete de soldadura máximo y mínimo.

Para los modelos de tipo *Shell* oblicuo y perpendicular, se establece una diferencia en torno al 4.4% entre sus casos extremos para las diferentes configuraciones de análisis consideradas. Su valor más conservador corresponde al modelo con mallado fino, elementos de 2do orden y extrapolación cuadrática (modelo G), mientras el valor

menos conservador es obtenido para el modelo con mallado grueso, elementos de 2do orden y extrapolación lineal de tensiones (modelo I).

Respecto de los modelos de tipo *Shell* perpendicular, al igual que en el caso de tensión Nominal, se identifica una diferencia marginal equivalente al 1.3% entre sus casos extremos. El valor más conservador corresponde al modelo con mallado grueso, elementos de 2do orden, y extrapolación lineal (modelo L), mientras el valor menos conservador es obtenido para el modelo con mallado fino, elementos de 1er orden, extrapolación lineal (modelo K), pese a lo anterior, la uniformidad de los datos para este segmento no permite identificar una tendencia de resultados extremos asociados a un modelo respectivo.

Para los modelos de tipo *Shell* perpendicular rígido, se identifica una diferencia de 7.3% entre sus casos extremos. El valor más conservador corresponde al modelo con mallado fino, elementos de 2do orden y extrapolación cuadrática (modelo M), por otra parte, el valor menos conservador es obtenido para el modelo con mallado grueso, elementos de 2do orden y extrapolación lineal (modelo O).

En términos globales, al considerar como referencia el modelo más conservador de tipo *Solid*, se tiene que el modelo de tipo *Shell* que comparativamente permite obtener resultados más cercanos a la referencia corresponde al tipo *Shell* perpendicular, con una desviación de 1.3% entre sus valores máximos de rangos de tensión Nominal y de 2.1% entre sus valores máximos de rangos de tensión Hot-Spot. Asimismo, el menos representativo de la referencia lo constituye el modelo *Shell* perpendicular rígido con una desviación de un 21.8% y 28.8% para sus rangos de tensión Nominal y de tensión

Hot-Spot, respectivamente. Es posible observar que para ambas metodologías (tensión Nominal y Hot-Spot), los valores de tensiones más conservadores se obtienen en modelos con mallado fino, elementos de 1er orden, y extrapolación lineal, mientras que los valores menos conservadores, en general se obtienen en modelos con mallado grueso, elementos de 2do orden y extrapolación lineal.

El resumen de rangos de tensiones para los modelos analizados correspondientes al detalle D1, se indican la tabla III-2.

Tabla III-2. Resumen de rangos de tensiones para los modelos analizados - D1.

	Rango de tensiones Nominales				
	Tensión Nominal Promedio (MPa)	Valor máximo/categoría modelo (MPa)		Valor mínimo/categoría modelo (MPa)	
Solid	150.69	155.71	E	145.08	C
Shell oblicuo y perp.	166.54	169.58	H	164.09	I
Shell perpendicular	156.70	157.68	L	154.98	J
Shell perp. rígido	192.91	199.10	N	188.36	O

	Rango de tensiones Hot-Spot				
	Tensión Hot - Spot Promedio (MPa)	Valor máximo/categoría modelo (MPa)		Valor mínimo/categoría modelo (MPa)	
Solid	165.10	170.98	E	154.97	C
Shell oblicuo y perp.	191.15	195.10	G	186.56	I
Shell perpendicular	173.63	174.65	L	172.31	K
Shell perp. rígido	232.87	240.10	M	222.56	O

III.3.2 Análisis de rangos de tensiones obtenidos, detalle D2

- Tensión Nominal: Para el detalle D2 es posible establecer que los modelos de tipo *Solid* no presentan variaciones significativas entre las diferentes configuraciones de análisis consideradas (menores al 6% entre sus casos extremos), los valores más conservadores para este segmento son obtenidos para modelos con mallado fino y

elementos de 1er orden con extrapolación lineal (modelos B y E), igualmente, los valores menos conservadores son obtenidos para modelos con mallado grueso, elementos de 2do orden y extrapolación lineal de tensiones (modelos C y F). No se establecen diferencias significativas (menores al 2%) entre los modelos de tipo *Solid* para las respectivas configuraciones de análisis de los casos de filete de soldadura máximo y mínimo.

Para los modelos de tipo *Shell* oblicuo y perpendicular, se observa una diferencia equivalente al 4.3% entre sus casos extremos. El valor más conservador para este segmento corresponde al modelo con mallado fino, elementos de 1er orden y extrapolación lineal (modelo H), mientras que el valor menos conservador es obtenido para el modelo con mallado grueso, elementos de 2do orden y extrapolación lineal de tensiones (modelo I).

Para los modelos de tipo *Shell* perpendicular, se identifica una diferencia equivalente al 9.0% entre sus casos extremos para las configuraciones de análisis consideradas. El valor más conservador corresponde al modelo con mallado fino, elementos de 1er orden y extrapolación lineal (modelo K), mientras el valor menos conservador es obtenido para el modelo con mallado grueso, elementos de 2do orden y extrapolación lineal (modelo L).

Finalmente, para los modelos de tipo *Shell* perpendicular rígido, se identifica una diferencia de 15.0% entre sus casos extremos. el valor más conservador corresponde al modelo con mallado fino, elementos de 1er orden y extrapolación lineal (modelo

N), mientras el valor menos conservador es obtenido para el modelo con mallado grueso, elementos de 2do orden y extrapolación lineal (modelo O).

- Tensión Hot-Spot: Respecto del rango de tensiones Hot-Spot, los modelos de tipo *Solid* presentan variaciones menores al 7% entre sus casos extremos. Al igual que en el método de tensiones Nominal, los valores más conservadores para este segmento son obtenidos por los modelos con mallado fino y elementos de 1er orden con extrapolación lineal (modelos B y E), mientras que los valores menos conservadores son obtenidos para modelos con mallado grueso, elementos de 2do orden y extrapolación lineal de tensiones (modelos C y F). No se establecen diferencias significativas (menores al 2%) entre los modelos de tipo *Solid* para las respectivas configuraciones de análisis de los casos de filete de soldadura máximo y mínimo.

Para los modelos de tipo *Shell* oblicuo y perpendicular se observa una diferencia en torno al 6.3% entre sus casos extremos para las diferentes configuraciones de análisis consideradas. Su valor más conservador corresponde al modelo con mallado fino, elementos de 2do orden y extrapolación cuadrática (modelo G), mientras el valor menos conservador es obtenido para el modelo con mallado grueso, elementos de 2do orden y extrapolación lineal de tensiones (modelo I).

Respecto de los modelos de tipo *Shell* perpendicular, se identifica una diferencia equivalente al 15.1% entre sus casos extremos para las diferentes configuraciones de análisis consideradas. El valor más conservador corresponde al modelo con mallado fino, elementos de 2do orden y extrapolación cuadrática (modelo J), mientras el valor

menos conservador es obtenido para el modelo con mallado grueso, elementos de 2do orden y extrapolación lineal (modelo L).

Para los modelos de tipo *Shell* perpendicular rígido, se identifica una diferencia de 22.4% entre sus casos extremos. El valor más conservador corresponde al modelo con mallado fino, elementos de 2do orden, extrapolación cuadrática (modelo M), mientras el valor menos conservador es obtenido para el modelo con mallado grueso, elementos de 2do orden y extrapolación lineal (modelo O).

Tabla III-3. Resumen de rangos de tensiones para los modelos analizados – D2.

	Rango de tensiones Nominales				
	Tensión Nominal Promedio (MPa)	Valor máximo/categoría modelo (MPa)		Valor mínimo/categoría modelo (MPa)	
Solid	158.61	164.30	B	155.05	F
Shell oblicuo y perp.	201.33	204.58	H	195.82	I
Shell perpendicular	191.76	198.27	K	180.50	L
Shell perp. rígido	261.81	277.22	N	235.59	O

	Rango de tensiones Hot-Spot				
	Tensión Hot - Spot Promedio (MPa)	Valor máximo/categoría modelo (MPa)		Valor mínimo/categoría modelo (MPa)	
Solid	177.58	183.19	B	170.73	F
Shell oblicuo y perp.	228.74	235.45	G	220.67	I
Shell perpendicular	223.00	238.85	J	202.77	L
Shell perp. rígido	323.28	357.38	M	277.35	O

El análisis global permite establecer que al considerar como referencia el modelo más conservador de tipo *Solid*, el modelo de tipo *Shell* que comparativamente permite obtener resultados más cercanos a la referencia corresponde, para el caso de tensión Nominal, al modelo de tipo *Shell* perpendicular, con una desviación de 17.1% entre sus valores extremos de tensión Nominal, y para el caso de tensión Hot-Spot, una desviación de 22.2% para el tipo *Shell* perpendicular y oblicuo (muy cercano al 23.3%

para el tipo *Shell* perpendicular). Asimismo, el modelo menos representativo de la referencia lo constituye el modelo *Shell* perpendicular rígido con una desviación de un 40.7% y 48.7% para sus rangos de tensión Nominal y de tensión Hot-Spot, respectivamente. Para la metodología de tensión Nominal, los valores de tensiones más conservadores se obtienen en modelos con mallado fino, elementos de 1er orden, y extrapolación lineal, mientras que para la metodología Hot-Spot predominan los valores conservadores en los modelos con mallado fino, elementos de 2do orden, y extrapolación cuadrática. En cualquier caso, los valores menos conservadores, en general se obtienen en modelos con mallado grueso, elementos de 2do orden y extrapolación lineal.

El resumen de rangos de tensiones para el detalle D2 se indica en la tabla III-3.

III.3.3 Análisis de rangos de tensiones obtenidos, detalle D3

- Tensión Nominal: Los modelos de tipo *Solid* presentan variaciones menores al 7% entre sus casos extremos entre las diferentes configuraciones de análisis consideradas, los valores más conservadores para este segmento son obtenidos para modelos con mallado fino y elementos de 1er orden con extrapolación lineal (modelos B y E), mientras que los valores menos conservadores son obtenidos para modelos con Mallado fino, elementos de 2do orden y extrapolación cuadrática (modelos A y D). No se establecen diferencias significativas (menores al 2%) entre los modelos de tipo *Solid* para las respectivas configuraciones de análisis de los casos de filete de soldadura máximo y mínimo.

Para los modelos de tipo *Shell* oblicuo y perpendicular se observa una diferencia del 9% entre los casos extremos de las diferentes configuraciones de análisis consideradas. El valor más conservador para este segmento corresponde al modelo con mallado fino y elementos de 1er orden con extrapolación lineal (modelo H), mientras el valor menos conservador es obtenido para el modelo con mallado grueso, elementos de 2do orden y extrapolación lineal de tensiones (modelo I).

Para los modelos de tipo *Shell* perpendicular, se identifica una diferencia equivalente al 2.1% entre sus casos extremos para las configuraciones de análisis consideradas. El valor más conservador corresponde al modelo con mallado fino, elementos de 1er orden y extrapolación lineal (modelo K), mientras el valor menos conservador es obtenido para el modelo con mallado grueso, elementos de 2do orden y extrapolación lineal (modelo L).

Finalmente, para los modelos de tipo *Shell* perpendicular rígido, se identifica una diferencia de 5.3% entre sus casos extremos. El valor más conservador corresponde al modelo con mallado fino, elementos de 1er orden y extrapolación lineal (modelo N), mientras el valor menos conservador es obtenido para el modelo con mallado grueso, elementos de 2do orden y extrapolación lineal (modelo O).

- Tensión Hot-Spot: Para el rango de tensiones Hot-Spot, los modelos de tipo *Solid* presentan variaciones menores al 6% entre sus casos extremos. Los valores más conservadores para este segmento son obtenidos por los modelos con mallado fino y elementos de 1er orden con extrapolación lineal (modelos B y E), mientras que los valores menos conservadores son obtenidos para el modelo con mallado grueso,

elementos de 2do orden y extrapolación lineal de tensiones (modelo C, para el caso de filete máximo de soldadura) y para el modelo con mallado fino, elementos de 2do orden y extrapolación cuadrática de tensiones (modelo D, para el caso de filete mínimo de soldadura), aunque en este último caso la diferencia entre valores extremos es menor al 1%. No se establecen diferencias significativas (menores al 3%) entre los modelos de tipo *Solid* para las respectivas configuraciones de análisis de los casos de filete de soldadura máximo y mínimo.

Respecto de los modelos de tipo *Shell* oblicuo y perpendicular se observa una diferencia del 13.3% entre sus casos extremos para las diferentes configuraciones de análisis consideradas. Su valor más conservador corresponde al modelo con mallado fino, elementos de 2do orden y extrapolación cuadrática (modelo G), mientras el valor menos conservador es obtenido para el modelo con mallado grueso, elementos de 2do orden y extrapolación lineal de tensiones (modelo I). Adicionalmente a lo anterior, los modelos de tipo *Shell* perpendicular presentan una diferencia equivalente al 5% entre sus casos extremos, cuyo valor más conservador corresponde al modelo con mallado fino, elementos de 2do orden y extrapolación cuadrática (modelo J), mientras el valor menos conservador es obtenido para el modelo con mallado grueso, elementos de 2do orden y extrapolación lineal (modelo L).

En el caso de los modelos de tipo *Shell* perpendicular rígido, se identifica una diferencia de 9.4% entre sus casos extremos. El valor más conservador corresponde al modelo con mallado fino, elementos de 2do orden, extrapolación cuadrática (modelo

M), mientras el valor menos conservador es obtenido para el modelo con mallado grueso, elementos de 2do orden y extrapolación lineal (modelo O).

Para el análisis global se tiene que al considerar en como referencia el modelo más conservador de tipo *Solid*, el modelo de tipo *Shell* que comparativamente permite obtener resultados más cercanos a la referencia corresponde al de tipo *Shell* perpendicular, con una desviación de 10.3% y 13.9% entre sus valores máximos de rangos de tensión Nominal y Hot-Spot, respectivamente. Asimismo, el modelo menos representativo de la referencia lo constituye el modelo *Shell* perpendicular rígido con una desviación de un 38.8% y 45.5% para sus rangos de tensión Nominal y de tensión Hot-Spot, respectivamente. Para la metodología de tensión Nominal, los valores de tensiones más conservadores se obtienen en modelos con mallado fino, elementos de 1er orden, y extrapolación lineal, mientras que para la metodología Hot-Spot predominan los valores conservadores en los modelos con mallado fino, elementos de 2do orden, y extrapolación cuadrática. En cualquier caso, los valores menos conservadores, en general se obtienen en modelos con mallado grueso, elementos de 2do orden y extrapolación lineal.

El resumen de rangos de tensiones para el detalle D3 se indica en la tabla III-4.

Tabla III-4. Resumen de rangos de tensiones para los modelos analizados – D3.

	Rango de tensiones Nominales				
	Tensión Nominal Promedio (MPa)	Valor máximo/categoría modelo (MPa)		Valor mínimo/categoría modelo (MPa)	
Solid	159.83	165.23	B	154.34	A
Shell oblicuo y perp.	183.24	190.59	H	173.38	I
Shell perpendicular	182.10	184.24	K	180.43	L
Shell perp. rígido	263.02	270.18	N	255.90	O

	Rango de tensiones Hot-Spot				
	Tensión Hot - Spot Promedio (MPa)	Valor máximo/categoría modelo (MPa)		Valor mínimo/categoría modelo (MPa)	
Solid	181.27	187.03	B	176.84	C
Shell oblicuo y perp.	215.58	227.85	G	197.47	I
Shell perpendicular	211.16	217.22	J	206.31	L
Shell perp. rígido	327.42	343.04	M	310.95	O

III.3.4 Análisis de rangos de tensiones obtenidos, detalle D4

- Tensión Nominal: Los modelos constituidos por elementos de tipo *Solid* presentan variaciones menores al 8% en sus casos extremos entre las diferentes configuraciones de análisis, los valores más conservadores para este segmento son obtenidos para modelos con mallado fino y elementos de 1er orden con extrapolación lineal (modelos B y E), mientras que los valores menos conservadores son obtenidos para modelos con mallado grueso, elementos de 2do orden y extrapolación lineal de tensiones (modelos C y F). No se establecen diferencias significativas (menores al 3%) entre los modelos de tipo *Solid* para las respectivas configuraciones de análisis de los casos de filete de soldadura máximo y mínimo.

Para los modelos de tipo *Shell* oblicuo y perpendicular, se observa una diferencia del 2% entre sus casos extremos. El valor más conservador para este segmento corresponde al modelo con mallado fino y elementos de 1er orden con extrapolación

lineal (modelo H), mientras el valor menos conservador es obtenido para el modelo con mallado fino, elementos de 2do orden y extrapolación cuadrática (modelo G).

Para los modelos de tipo *Shell* perpendicular, se identifica una diferencia equivalente al 1.1% entre sus casos extremos. El valor más conservador corresponde al modelo con mallado fino, elementos de 1er orden y extrapolación lineal (modelo K), mientras el valor menos conservador es obtenido para el modelo con mallado grueso, elementos de 2do orden y extrapolación lineal (modelo L).

Finalmente, para los modelos de tipo *Shell* perpendicular rígido, se identifica una diferencia de 5.6% entre sus casos extremos. El valor más conservador corresponde al modelo con mallado fino, elementos de 1er orden y extrapolación lineal (modelo N), mientras el valor menos conservador es obtenido para el modelo con mallado grueso, elementos de 2do orden y extrapolación lineal (modelo O).

- Tensión Hot-Spot: Para el rango de tensiones Hot-Spot, los modelos de tipo *Solid* presentan variaciones equivalentes a 10.3% entre sus casos extremos. Los valores más conservadores para este segmento son obtenidos por los modelos con mallado fino y elementos de 1er orden con extrapolación lineal (modelos B y E), mientras que los valores menos conservadores son obtenidos para los modelos con mallado grueso, elementos de 2do orden y extrapolación lineal de tensiones (modelos C y F). No se establecen diferencias significativas (menores al 5%) entre los modelos de tipo *Solid* para las respectivas configuraciones de análisis de los casos de filete de soldadura máximo y mínimo.

Respecto de los modelos de tipo *Shell* oblicuo y perpendicular se observa una diferencia del 4.3% entre sus casos extremos para las diferentes configuraciones de análisis. Su valor más conservador corresponde al modelo con mallado fino, elementos de 2do orden y extrapolación cuadrática (modelo G), mientras el valor menos conservador es obtenido para el modelo con mallado grueso, elementos de 2do orden y extrapolación lineal de tensiones (modelo I).

Adicionalmente a lo anterior, los modelos de tipo *Shell* perpendicular presentan una diferencia equivalente al 5% entre sus casos extremos. El valor más conservador corresponde al modelo con mallado fino, elementos de 2do orden y extrapolación cuadrática (modelo J), mientras el valor menos conservador es obtenido para el modelo con mallado grueso, elementos de 2do orden y extrapolación lineal (modelo L).

En el caso de los modelos de tipo *Shell* perpendicular rígido, se identifica una diferencia de 9.8% entre sus casos extremos. El valor más conservador corresponde al modelo con mallado fino, elementos de 2do orden, extrapolación cuadrática (modelo M), mientras el valor menos conservador es obtenido para el modelo con mallado grueso, elementos de 2do orden y extrapolación lineal (modelo O).

Para el análisis global se tiene que al considerar en forma referencial el modelo más conservador constituido por elementos de tipo *Solid*, el modelo de tipo *Shell* que comparativamente permite obtener resultados más cercanos a la referencia corresponde al tipo *Shell* perpendicular, con una desviación de 4.7% y 9.1% entre sus valores máximos de rangos de tensión Nominal y Hot-Spot, respectivamente. Asimismo, el modelo menos representativo de la referencia lo constituye el modelo

Shell perpendicular rígido con una desviación de un 31% y 38.6% para sus rangos de tensión Nominal y de tensión Hot-Spot, respectivamente. Para la metodología de tensión Nominal, los valores de tensiones más conservadores se obtienen en modelos con mallado fino, elementos de 1er orden, y extrapolación lineal, mientras que para la metodología Hot-Spot predominan los valores conservadores en los modelos con mallado fino, elementos de 2do orden, y extrapolación cuadrática. Los valores menos conservadores, en general se obtienen en modelos con mallado grueso, elementos de 2do orden y extrapolación lineal.

El resumen de rangos de tensiones para el detalle D4 se indica en la tabla III-5.

Tabla III-5. Resumen de rangos de tensiones para los modelos analizados – D4.

	Rango de tensiones Nominales				
	Tensión Nominal Promedio (MPa)	Valor máximo/categoría modelo (MPa)		Valor mínimo/categoría modelo (MPa)	
Solid	158.10	165.30	E	153.05	C
Shell oblicuo y perp.	178.30	180.50	H	176.81	G
Shell perpendicular	172.62	173.42	K	171.48	L
Shell perp. rígido	232.14	239.69	N	226.25	O

	Rango de tensiones Hot-Spot				
	Tensión Hot - Spot Promedio (MPa)	Valor máximo/categoría modelo (MPa)		Valor mínimo/categoría modelo (MPa)	
Solid	177.17	185.96	E	166.76	C
Shell oblicuo y perp.	210.13	215.54	G	206.33	I
Shell perpendicular	198.18	204.66	J	194.34	L
Shell perp. rígido	289.29	302.89	M	273.13	O

III.3.5 Análisis del coeficiente de concentración de tensiones

Con el objetivo de establecer un parámetro de comparación para los rangos de tensiones obtenidos en cada modelo de investigación, se define el coeficiente de concentración de tensiones, K, de la siguiente manera:

$$\sigma_{hs} = K \cdot \sigma_n \quad (3.1)$$

Donde:

σ_{hs} : Rango de tensión Hot-Spot

σ_n : Rango de tensión Nominal

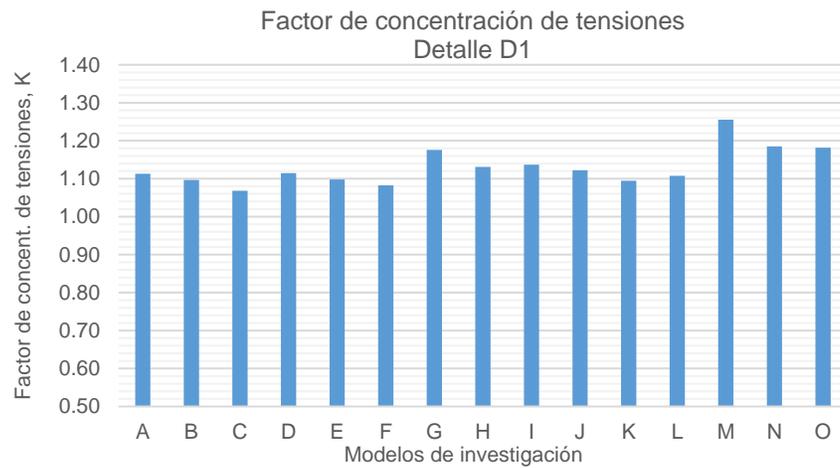


Figura III-73. Coeficientes de concentración de tensiones, detalle D1.

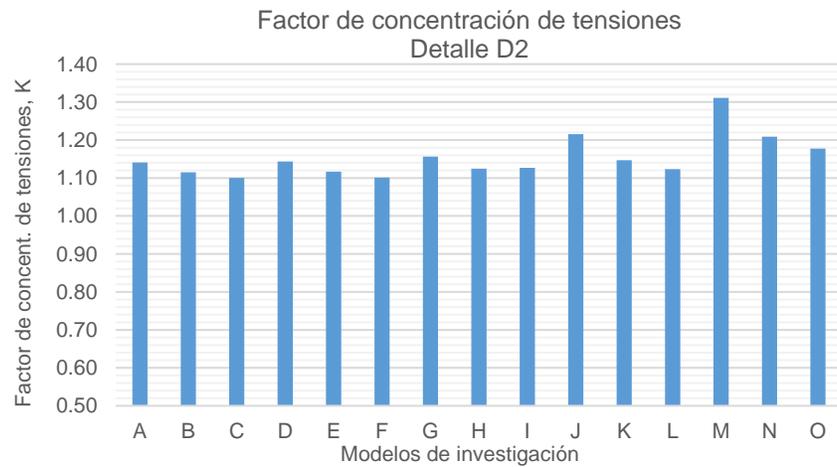


Figura III-74. Coeficientes de concentración de tensiones, detalle D2.

Los diferentes coeficientes de concentración de tensiones para los detalles D1, D2, D3 y D4 se indican en las figuras III-73, III-74, III-75 y III-76, respectivamente (la nomenclatura asignada a los modelos de investigación se indica en la tabla III-1).

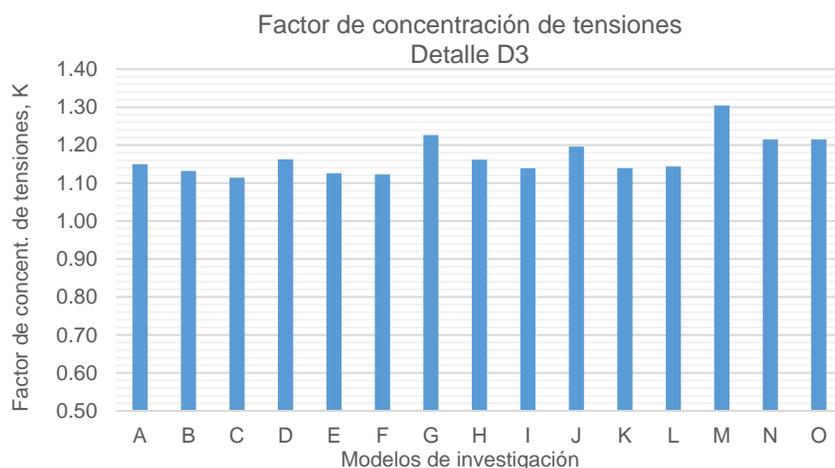


Figura III-75. Coeficientes de concentración de tensiones, detalle D3.

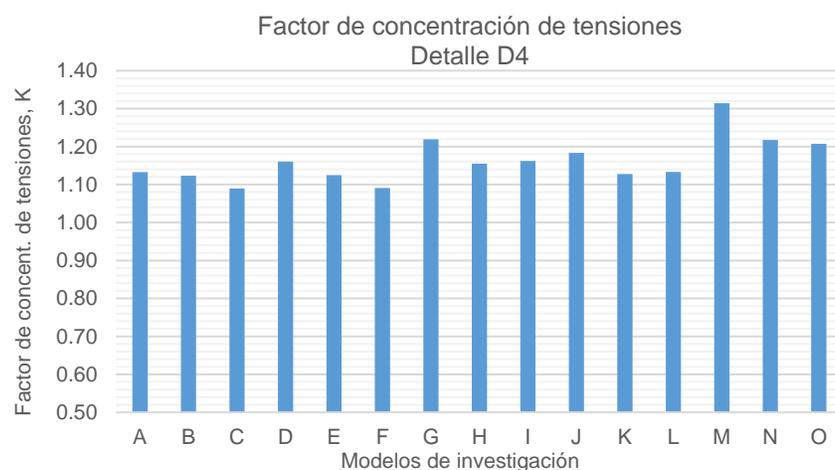


Figura III-76. Coeficientes de concentración de tensiones, detalle D4.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	PROM.
D1	1.11	1.10	1.07	1.11	1.10	1.08	1.18	1.13	1.14	1.12	1.09	1.11	1.26	1.19	1.18	1.13
D2	1.14	1.11	1.10	1.14	1.12	1.10	1.16	1.12	1.13	1.22	1.15	1.12	1.31	1.21	1.18	1.15
D3	1.15	1.13	1.11	1.16	1.13	1.12	1.23	1.16	1.14	1.20	1.14	1.14	1.30	1.21	1.22	1.17
D4	1.13	1.12	1.09	1.16	1.12	1.09	1.22	1.16	1.16	1.18	1.13	1.13	1.31	1.22	1.21	1.16
MÁX.	1.15	1.13	1.11	1.16	1.13	1.12	1.23	1.16	1.16	1.22	1.15	1.14	1.31	1.22	1.22	1.17
MÍN.	1.11	1.10	1.07	1.11	1.10	1.08	1.16	1.12	1.13	1.12	1.09	1.11	1.26	1.19	1.18	1.13
DIF. MÁX	3%	3%	4%	4%	2%	4%	6%	3%	3%	8%	5%	3%	4%	3%	3%	3%

Figura III-77. Resumen de coeficientes de concentración de tensiones.

El resumen de coeficientes señalado en la figura III-77 permite establecer que la máxima diferencia entre sus valores extremos, para cada modelo de investigación, es del 8% para el modelo de tipo *Shell* perpendicular con mallado fino, elementos de 2do orden y extrapolación cuadrática. Considerando el resumen de coeficientes, no se identifican diferencias relevantes entre los modelos *Solid* para los filetes de soldadura mínimos y máximos. Adicionalmente a lo anterior, en general el rango de tensión Hot-Spot es mayor al rango de tensión Nominal entre un 7% y un 31% (23% si no se considera al modelo de tipo *Shell* perpendicular rígido).

III.4 Evaluación de resultados de acuerdo al método de tensión Nominal

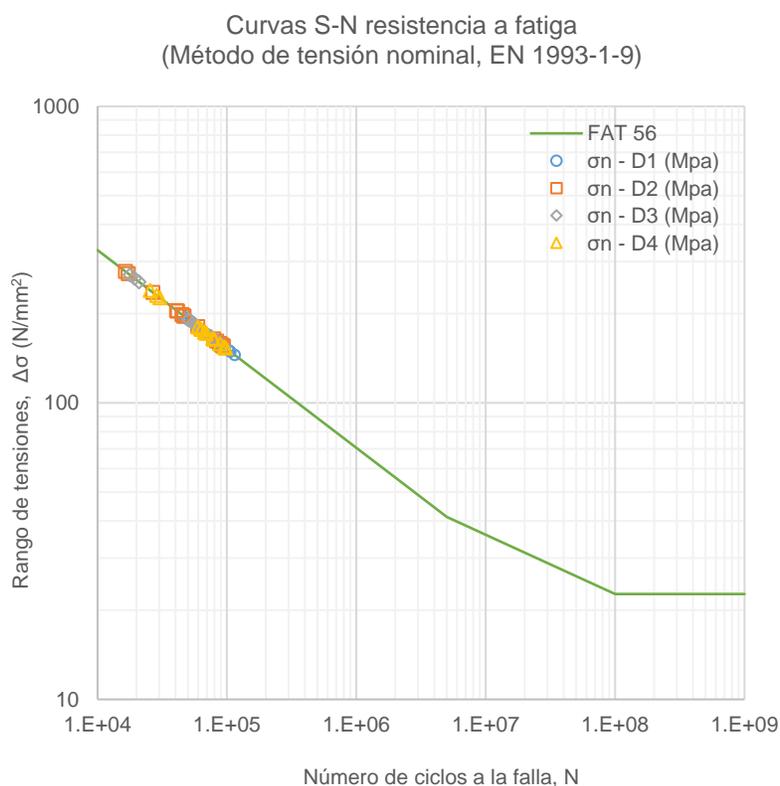


Figura III-78. Curvas S-N resistencia a fatiga, método de tensión Nominal.

De acuerdo a lo señalado previamente en la figura III-1, la categorización asociada a la curva S-N de los detalles estudiados depende de la relación entre el espesor de la placa de refuerzo y el ala del elemento tipo viga. Considerando que las relaciones de espesores están dadas por $t_c/t_m = 0.67$ para cada uno de los detalles D1, D2, D3 y D4 (ver figura III-5) la curva S-N asociada al método de tensión Nominal corresponde a la categoría FAT 56.

III.5 Evaluación de resultados de acuerdo al método de tensión Hot-Spot

Según lo señalado en la tabla de clasificación de detalles para el método de tensión Hot-Spot (figura A2-1, anexo A2), la categorización asociada a la curva S-N de los detalles estudiados corresponde a la categoría FAT 100.

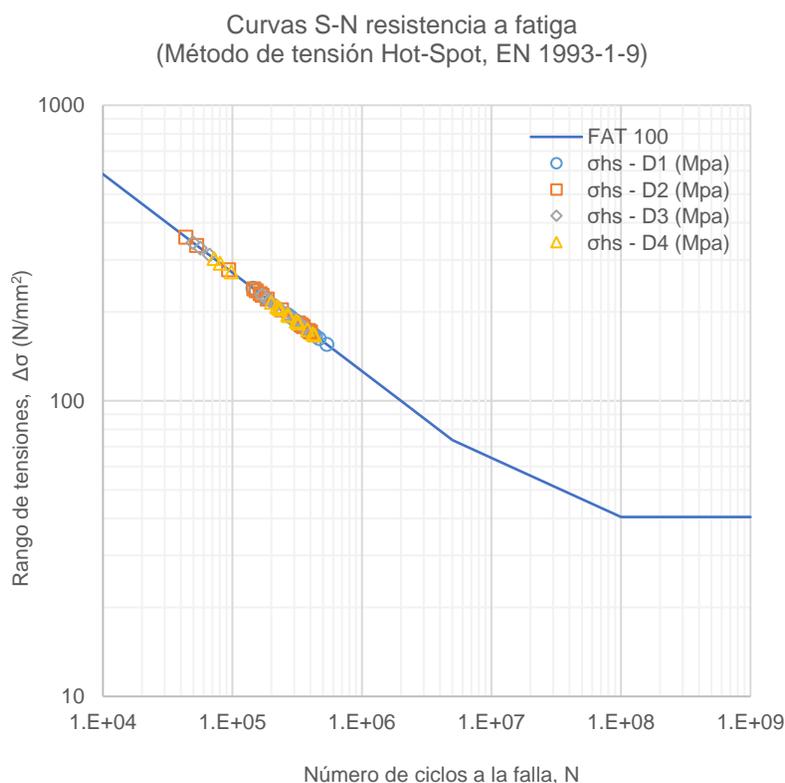


Figura III-79. Curvas S-N resistencia a fatiga, método de tensión Hot-Spot.

Tabla III-6. Tabla de datos curva S-N resistencia a fatiga detalle D1.

	σ_n - D1 (MPa)	N	σ_{hs} - D1 (MPa)	N	Dif. N Hot-Spot/Nominal
A	148.94	1.1.E+05	165.77	4.4.E+05	76%
B	153.99	9.6.E+04	168.87	4.2.E+05	77%
C	145.08	1.2.E+05	154.97	5.4.E+05	79%
D	150.52	1.0.E+05	167.80	4.2.E+05	76%
E	155.71	9.3.E+04	170.98	4.0.E+05	77%
F	149.89	1.0.E+05	162.23	4.7.E+05	78%
G	165.94	7.7.E+04	195.10	2.7.E+05	71%
H	169.58	7.2.E+04	191.79	2.8.E+05	75%
I	164.09	7.9.E+04	186.56	3.1.E+05	74%
J	154.98	9.4.E+04	173.91	3.8.E+05	75%
K	157.44	9.0.E+04	172.31	3.9.E+05	77%
L	157.68	9.0.E+04	174.65	3.8.E+05	76%
M	191.26	5.0.E+04	240.10	1.4.E+05	65%
N	199.10	4.5.E+04	235.95	1.5.E+05	71%
O	188.36	5.3.E+04	222.56	1.8.E+05	71%

Tabla III-7. Tabla de datos curva S-N resistencia a fatiga detalle D2.

	σ_n - D2 (MPa)	N	σ_{hs} - D2 (MPa)	N	Dif. N Hot-Spot/Nominal
A	158.44	8.8.E+04	180.75	3.4.E+05	74%
B	164.30	7.9.E+04	183.19	3.3.E+05	76%
C	156.82	9.1.E+04	172.58	3.9.E+05	77%
D	155.74	9.3.E+04	178.12	3.5.E+05	74%
E	161.33	8.4.E+04	180.12	3.4.E+05	76%
F	155.05	9.4.E+04	170.73	4.0.E+05	77%
G	203.59	4.2.E+04	235.45	1.5.E+05	73%
H	204.58	4.1.E+04	230.10	1.6.E+05	75%
I	195.82	4.7.E+04	220.67	1.9.E+05	75%
J	196.52	4.6.E+04	238.85	1.5.E+05	68%
K	198.27	4.5.E+04	227.38	1.7.E+05	74%
L	180.50	6.0.E+04	202.77	2.4.E+05	75%
M	272.63	1.7.E+04	357.38	4.4.E+04	60%
N	277.22	1.6.E+04	335.12	5.3.E+04	69%
O	235.59	2.7.E+04	277.35	9.4.E+04	71%

Tabla III-8. Tabla de datos curva S-N resistencia a fatiga detalle D3.

	σ_n - D3 (MPa)	N	σ_{hs} - D3 (MPa)	N	Dif. N Hot-Spot/Nominal
A	154.34	9.6.E+04	177.41	3.6.E+05	73%
B	165.23	7.8.E+04	187.03	3.1.E+05	75%
C	158.70	8.8.E+04	176.84	3.6.E+05	76%
D	156.15	9.2.E+04	181.52	3.3.E+05	72%
E	162.37	8.2.E+04	182.76	3.3.E+05	75%
F	162.20	8.2.E+04	182.08	3.3.E+05	75%
G	185.76	5.5.E+04	227.85	1.7.E+05	68%
H	190.59	5.1.E+04	221.42	1.8.E+05	72%
I	173.38	6.7.E+04	197.47	2.6.E+05	74%
J	181.64	5.9.E+04	217.22	2.0.E+05	70%
K	184.24	5.6.E+04	209.95	2.2.E+05	74%
L	180.43	6.0.E+04	206.31	2.3.E+05	74%
M	262.97	1.9.E+04	343.04	5.0.E+04	61%
N	270.18	1.8.E+04	328.26	5.7.E+04	69%
O	255.90	2.1.E+04	310.95	6.7.E+04	68%

Tabla III-9. Tabla de datos curva S-N resistencia a fatiga detalle D4.

	σ_n - D4 (MPa)	N	σ_{hs} - D4 (MPa)	N	Dif. N Hot-Spot/Nominal
A	153.67	9.7.E+04	174.07	3.8.E+05	74%
B	163.81	8.0.E+04	183.99	3.2.E+05	75%
C	153.05	9.8.E+04	166.76	4.3.E+05	77%
D	158.26	8.9.E+04	183.67	3.2.E+05	73%
E	165.30	7.8.E+04	185.96	3.1.E+05	75%
F	154.52	9.5.E+04	168.57	4.2.E+05	77%
G	176.81	6.4.E+04	215.54	2.0.E+05	68%
H	180.50	6.0.E+04	208.50	2.2.E+05	73%
I	177.58	6.3.E+04	206.33	2.3.E+05	72%
J	172.95	6.8.E+04	204.66	2.3.E+05	71%
K	173.42	6.7.E+04	195.55	2.7.E+05	75%
L	171.48	7.0.E+04	194.34	2.7.E+05	74%
M	230.49	2.9.E+04	302.89	7.2.E+04	60%
N	239.69	2.6.E+04	291.84	8.0.E+04	68%
O	226.25	3.0.E+04	273.13	9.8.E+04	69%

Las tablas de datos III-6, III-7, III-8 y III-9 corresponden a las curvas S-N de los métodos de tensión Nominal y Hot-Spot para los diferentes modelos de investigación. De acuerdo a lo anterior, se tiene que el porcentaje de diferencia en el número de ciclos a la falla entre los métodos Nominal y Hot-Spot para el detalle D1 tiene un valor máximo de 79% y un valor mínimo de 65%. Adicionalmente, para el detalle D2 se tiene un valor máximo de 77% y un valor mínimo de 60% de diferencia, finalmente, para los detalles D3 y D4 se tienen valores máximos de 76% y 77% valores mínimos de 61% y 60% de diferencia, respectivamente.

IV. CONCLUSIONES

IV.1 Conclusiones de la investigación

- Respecto de las dimensiones de filete de soldadura:

Es posible establecer que los modelos de tipo *Solid* no presentan variaciones significativas entre los rangos de tensiones obtenidos para filete de soldadura máximo de 10.7 mm y filete de soldadura mínimo de 5 mm (variaciones menores al 3% para el rango de tensiones Nominales, y menores al 5% para el rango de tensiones Hot-Spot) para los detalles típicos de terminación de placas de refuerzo estudiados sobre alas de vigas en voladizo solicitadas por la acción de un sistema motriz de correa transportadora (detalles D1, D2, D3 y D4).

- Respecto de los rangos de tensiones para cada modelo de estudio:

Como referencia de estudio, se establece a los modelos de tipo *Solid* con los resultados de rangos de tensiones más conservadores (correspondiente a los modelos con mallado fino, elementos de 1er orden y extrapolación lineal para cada uno de los detalles estudiados). Comparativamente es posible establecer que los modelos de tipo *Shell* perpendicular permiten obtener resultados más cercanos y siempre más conservadores que los modelos de referencia de tipo *Solid* en cada detalle estudiado (D1, D2, D3 y D4) para los rangos de tensión Nominal y tensión Hot-Spot, respectivamente (pese a que en el caso del detalle D2 el modelo de tipo *Shell* perpendicular y oblicuo es marginalmente más cercano a la referencia para el rango Hot-Spot, se considera representativo igualmente al modelo de tipo *Shell* perpendicular).

Adicionalmente a lo anterior, es posible establecer que para el detalle D1, el modelo de tipo *Shell* perpendicular más representativo considera un mallado grueso, elementos de 2do orden y extrapolación lineal, para los rangos de tensión Nominal y tensión Hot-Spot (no obstante, estos valores varían marginalmente respecto del modelo que considera un mallado fino, elementos de 1er orden y extrapolación lineal, para los rangos de tensión Nominal, y del modelo que considera un mallado fino, elementos de 2do orden y extrapolación cuadrática, para los rangos de tensión Hot-Spot). Por otra parte, para los detalles D2, D3 y D4, el modelo de tipo *Shell* perpendicular más representativo consideran un mallado fino, elementos de 1er orden y extrapolación lineal, para los rangos de tensión Nominal, y del modelo que considera un mallado fino, elementos de 2do orden y extrapolación cuadrática, para los rangos de tensión Hot-Spot.

Se establece que los modelos de tipo *Shell* perpendicular rígido son los menos representativos de los casos de estudio y permiten obtener los resultados con las mayores desviaciones, con valores de hasta un 41% y 49% superiores a los modelos de referencia de tipo *Solid* para los rangos de tensión Nominal y tensión Hot-Spot, respectivamente.

- Respecto del coeficiente de concentración de tensiones:

Es posible establecer que no se identifican diferencias relevantes para los coeficientes de concentración de tensiones entre los modelos *Solid* para los filetes de soldadura mínimos y máximos. Adicionalmente a lo anterior, es posible establecer que el rango de tensión Hot-Spot es mayor al rango de tensión Nominal entre un 7% y un 31% (23%

si no se considera al modelo de tipo *Shell* perpendicular rígido), por cuanto es posible establecer como aproximación para determinación del rango de tensiones Hot-Spot, un incremento del rango de tensión Nominal en un 23% para los detalles típicos de terminación de placas de refuerzo estudiados sobre alas de vigas en voladizo solicitadas por la acción de un sistema motriz de correa transportadora (detalles D1, D2, D3 y D4).

- Respecto del número de ciclos a la falla entre los métodos de tensión Nominal y Hot-Spot:

Es posible establecer que una vez obtenido el rango de tensiones para las metodologías Nominal y Hot-Spot, el porcentaje de diferencia en el número de ciclos a la falla entre éstas, para cada uno de los detalles investigados (D1, D2, D3 y D4), varía entre un 60% y 79%. De acuerdo a lo anterior, el rango de tensiones obtenido al aplicar la metodología Nominal es más conservador que al aplicar la metodología Hot-Spot bajo las hipótesis de análisis del presente estudio. De acuerdo a lo anterior, se verifica que el método de tensiones Nominal representa una alternativa de diseño válida desde la perspectiva de la seguridad en comparación con el método de tensiones Hot-Spot.

- Respecto de las recomendaciones de modelación y análisis:

Los modelos de tipo *Solid* se establecen en este estudio como base referencial para la obtención de resultados más precisos del rango de tensiones para las metodologías Nominal y Hot-Spot, considerando el alto costo computacional asociado a la generación este tipo de modelos, se propone como recomendación de modelación y

análisis los modelos de tipo *Shell* perpendicular, considerando un mallado fino, elementos de 1er orden y extrapolación lineal, para los rangos de tensión Nominal, y mallado fino, elementos de 2do orden y extrapolación cuadrática, para los rangos de tensión Hot-Spot. Esta recomendación, a la luz de los resultados obtenidos, permite obtener rangos de tensiones representativos y más conservadores que los modelos de referencia de tipo *Solid* en cada detalle estudiado (D1, D2, D3 y D4), siendo una alternativa factible de modelación con resultados satisfactorios y de menor costo computacional.

IV.2 Recomendaciones para futuras investigaciones

- Respecto del rango de tensiones:

La presente investigación (refuerzo de alas de viga en voladizo) estudia la resistencia por fatiga de acuerdo al rango de tensiones normales, no considerando la influencia del rango de tensiones de corte y ciclos hasta la falla respectivos, ni la influencia de factores de modificación de respuesta, queda como recomendación para futuras investigaciones la incorporación de estas consideraciones.

- Respecto de la configuración estructural y naturaleza de solicitaciones:

Las solicitaciones dinámicas cíclicas establecidas para la presente investigación son generadas por el desplazamiento inducido sobre la viga en voladizo estudiada, lo cual, ocurre por una excentricidad de giro en la sección del descanso del eje de la polea del conjunto en operación a una velocidad de giro de 125.3 RPM. Se establece como investigación de interés, la modificación en la configuración de la viga de soporte del

equipo motriz (modificando su disposición de viga en voladizo en otro sistema estructural aplicable), así como también, la consideración de equipos motrices alternativos, con características diferentes a las del caso de estudio (tales como frecuencia de operación, peso, dimensiones, etc.)

- Respecto de las curvas S-N utilizadas para la determinación del número de ciclos a la falla entre los métodos de tensión Nominal y Hot-Spot:

La determinación del número de ciclos a la falla para los métodos de tensión Nominal y Hot-Spot se realiza utilizando las curvas S-N de resistencia a fatiga según el código EN 1993-1-9, según lo cual para investigaciones posteriores, es de interés la consideración de curvas S-N propuestas por códigos de diseño alternativos, y más aún, la consideración de ensayos empíricos para la condición específica estudiada de manera de generar curvas S-N de diseño a fatiga para los detalles investigados (D1, D2, D3 y D4).

BIBLIOGRAFÍA

ANSI/AISC 360-10 (2010) Specification for Structural Steel Buildings.

ASTM, American Society for Testing and Materials (2013) Terminology relating to fatigue and fracture testing.

AYGÜL, M. (2013) *Fatigue evaluation of welded details – using the finite element method*. Ph.D. thesis, Department of Civil and Environmental Engineering, Chalmers University of Technology, Sweden.

EN 1993-1-9 (2005) Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-9: Fatigue.

Fisher J.W., Frank K.H., Manfred A.H., Bernard M.M. (1969) Effect of weldments on the fatigue strength of steel beams, *Fritz Laboratory Reports* No. 334.2, Lehigh University.

HESHMATI M. (2012) *Fatigue Life Assessment of Bridge Details Using Finite Element Method*. Master's thesis, Department of Civil and Environmental Engineering, Chalmers University of Technology, Sweden.

HESHMATI M., AL-EMRANI M., EDLUND B. (2012) Fatigue Assessment of Weld Terminations in Welded Cover-Plate Details; a Comparison of Local Approaches. *Nordic Steel Construction Conference*, Oslo, Norway.

IIW, A.F. Hobbacher (2016) Recommendations for Fatigue Design of Welded Joints and Components.

REEMSNYDER H. S., (1961) The fatigue behavior of structural steel weldments - a literature survey. *Fritz Laboratory Reports. Paper 1818*, Lehigh University.

RIBEIRO A.S., CORREIA J.A., SILVA A.L. y JESUS A.M. (2011) Evolution of fatigue history. *Proceedings of COBEM, Engineering*, 21st Brazilian Congress of Mechanical, Natal, RN, Brazil.

Slockbower R.E., Fisher J.W. (1978) Fatigue resistance of full scale cover - plated beams, *Fritz Laboratory Reports* No. 386-9, Lehigh University.

VAN ZYL G., AL-SAHLI A. (2013) Failure analysis of conveyor pulley shaft. *Case Studies in Engineering Failure Analysis*, Vol. 1, 144-155.

WILSON W. M. (1948) Flexural Fatigue Strength of Steel Beams - Engineering experiment station bulletin series No. 377, University of Illinois.

Wolf T. (2000) Effects of drive Assembly-overhung loads o belt conveyor and pulley design, Precision Inc., Pella, Iowa, EE.UU.

ANEXOS

ANEXO A1: CATEGORIZACIÓN DE DETALLES ESTRUCTURALES, MÉTODO DE TENSION NOMINAL

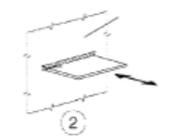
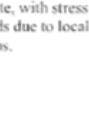
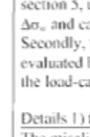
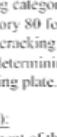
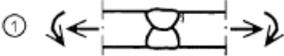
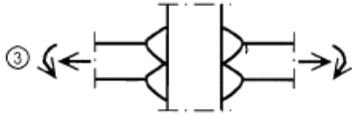
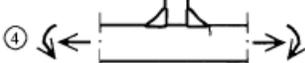
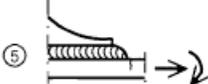
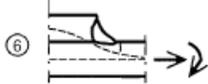
Detail category	Constructional detail		Description	Requirements
80	$t < 50$ mm	all t	Cruciform and Tee joints: 1) Toe failure in full penetration butt welds and all partial penetration joints.	1) Inspected and found free from discontinuities and misalignments outside the tolerances of EN 1090. 2) For computing $\Delta\sigma$, use modified nominal stress. 3) In partial penetration joints two fatigue assessments are required. Firstly, root cracking evaluated according to stresses defined in section 5, using category 36* for $\Delta\sigma_c$ and category 80 for $\Delta\sigma_t$. Secondly, toe cracking is evaluated by determining $\Delta\sigma$ in the load-carrying plate.
71	$50 < t \leq 80$	all t		
63	$80 < t \leq 100$	all t		
56	$100 < t \leq 120$	all t		
56	$t > 120$	$t \leq 20$		
50	$120 < t \leq 200$	$t > 20$		
45	$200 < t \leq 300$	$t > 30$		
40	$t > 300$	$30 < t \leq 50$		
As detail 1 in Table 8.5	flexible panel		2) Toe failure from edge of attachment to plate, with stress peaks at weld ends due to local plate deformations.	Details 1) to 3): The misalignment of the load-carrying plates should not exceed 15 % of the thickness of the intermediate plate.
36*			3) Root failure in partial penetration Tee-but joints or fillet welded joint and in Tee-but weld, according to Figure 4.6 in EN 1993-1-8:2005. (C5)	
As detail 1 in Table 8.5			4) Fillet welded lap joint.	4) $\Delta\sigma$ in the main plate to be calculated on the basis of area shown in the sketch. 5) $\Delta\sigma$ to be calculated in the overlapping plates.
45*			5) Fillet welded lap joint.	
56*	$t_c < t$	$t_c \geq t$	Cover plates in beams and plate girders: 6) End zones of single or multiple welded cover plates, with or without transverse end weld.	6) If the cover plate is wider than the flange, a transverse end weld is needed. This weld should be carefully ground to remove undercut. The minimum length of the cover plate is 300 mm. For shorter attachments size effect see detail 1).
50	$t \leq 20$	-		
45	$20 < t \leq 30$	$t \leq 20$		
40	$30 < t \leq 50$	$20 < t \leq 30$		
36	-	$t > 50$		
56	reinforced transverse end weld		7) Cover plates in beams and plate girders. $5t_c$ is the minimum length of the reinforcement weld.	7) Transverse end weld ground flush. In addition, if $t_c > 20$ mm, front of plate at the end ground with a slope < 1 in 4.
80			8) Continuous fillet welds transmitting a shear flow, such as web to flange welds in plate girders.	8) $\Delta\sigma$ to be calculated from the weld throat area. 9) $\Delta\sigma$ to be calculated from the weld throat area considering the total length of the weld. Weld terminations more than 10 mm from the plate edge, see also 4) and 5) above.
m=5			9) Fillet welded lap joint.	
see EN 1994-2 (90 m=8)			10) For composite application	10) $\Delta\sigma$ to be calculated from the nominal cross section of the stud.
71			11) Tube socket joint with 80% full penetration butt welds.	11) Weld toe ground. $\Delta\sigma$ computed in tube.
40			12) Tube socket joint with fillet welds.	12) $\Delta\sigma$ computed in tube.

Figura A1-1. Extracto de tablas de clasificación de detalles según configuración estructural y de solicitaciones (Tabla 8.5: Traspaso de carga en juntas soldadas, EN1993-1-9).

ANEXO A2: CATEGORIZACIÓN DE DETALLES ESTRUCTURALES, MÉTODO DE TENSION HOT-SPOT

Detail category	Constructional detail	Description	Requirements
112		1) Full penetration butt joint.	1) - All welds ground flush to plate surface parallel to direction of the arrow. - Weld run-on and run-off pieces to be used and subsequently removed, plate edges to be ground flush in direction of stress. - Welded from both sides, checked by NDT. - For misalignment see NOTE 1.
100		2) Full penetration butt joint.	2) - Weld not ground flush - Weld run-on and run-off pieces to be used and subsequently removed, plate edges to be ground flush in direction of stress. - Welded from both sides. - For misalignment see NOTE 1.
100		3) Cruciform joint with full penetration K-butt welds.	3) - Weld toe angle $\leq 60^\circ$. - For misalignment see NOTE 1.
100		4) Non load-carrying fillet welds.	4) - Weld toe angle $\leq 60^\circ$. - See also NOTE 2.
100		5) Bracket ends, ends of longitudinal stiffeners.	5) - Weld toe angle $\leq 60^\circ$. - See also NOTE 2.
100		6) Cover plate ends and similar joints.	6) - Weld toe angle $\leq 60^\circ$. - See also NOTE 2.
90		7) Cruciform joints with load-carrying fillet welds.	7) - Weld toe angle $\leq 60^\circ$. - For misalignment see NOTE 1. - See also NOTE 2.

NOTE 1 Table B.1 does not cover effects of misalignment. They have to be considered explicitly in determination of stress.

NOTE 2 Table B.1 does not cover fatigue initiation from the root followed by propagation through the throat.

Figura A2-1. Tablas de clasificación de detalles según configuración estructural y de solicitaciones, método de tensión Hot-Spot (Tabla B.1, EN1993-1-9).

ANEXO A3: MODELOS FEM REALIZADOS, MALLADO FINO

Algunos de los modelos FEM realizados en la presente investigación (correspondientes a elementos con mallado fino) se señalan a continuación:

A3.1 Modelo FEM detalle D1, elementos tipo *Solid*, filete de soldadura máximo

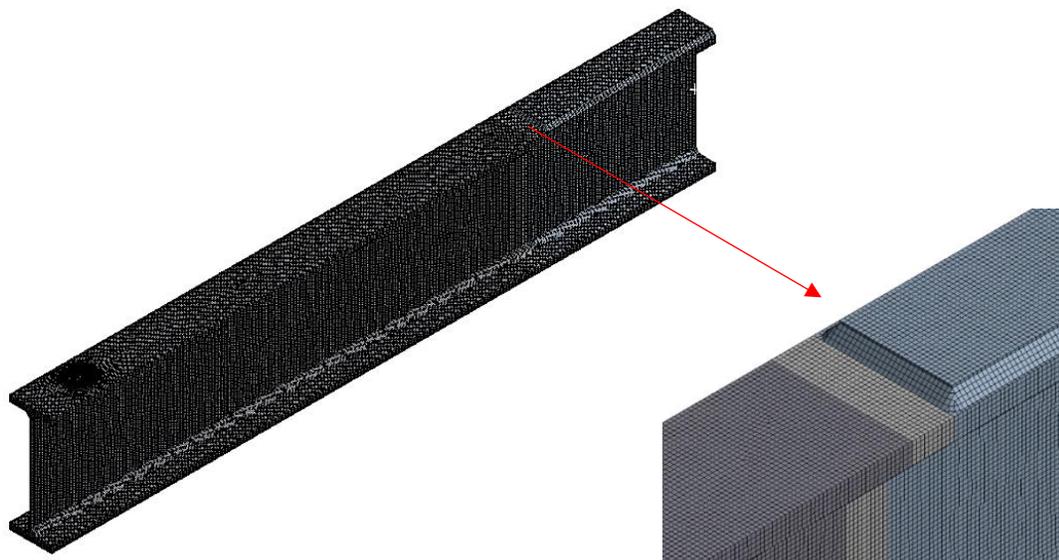


Figura A3-1. Modelo FEM detalle D1, elementos tipo *Solid*, filete de soldadura máximo.

A3.2 Modelo FEM detalle D1, elementos tipo *Solid*, filete de soldadura mínimo

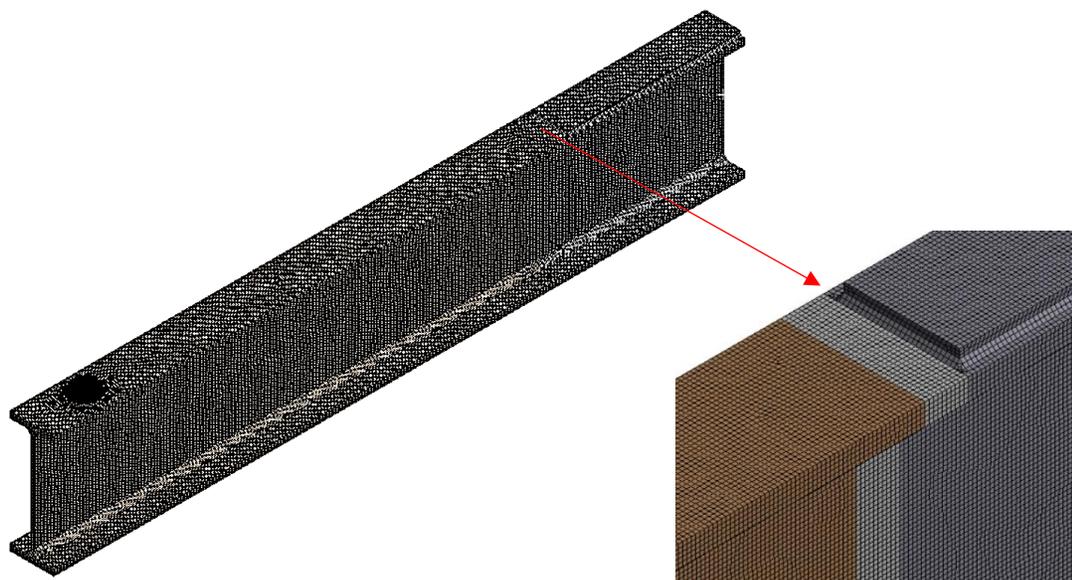


Figura A3-2. Modelo FEM detalle D1, elementos tipo *Solid*, filete de soldadura mínimo.

A3.3 Modelo FEM detalle D1, elementos tipo *Shell* oblicuo y perpendicular

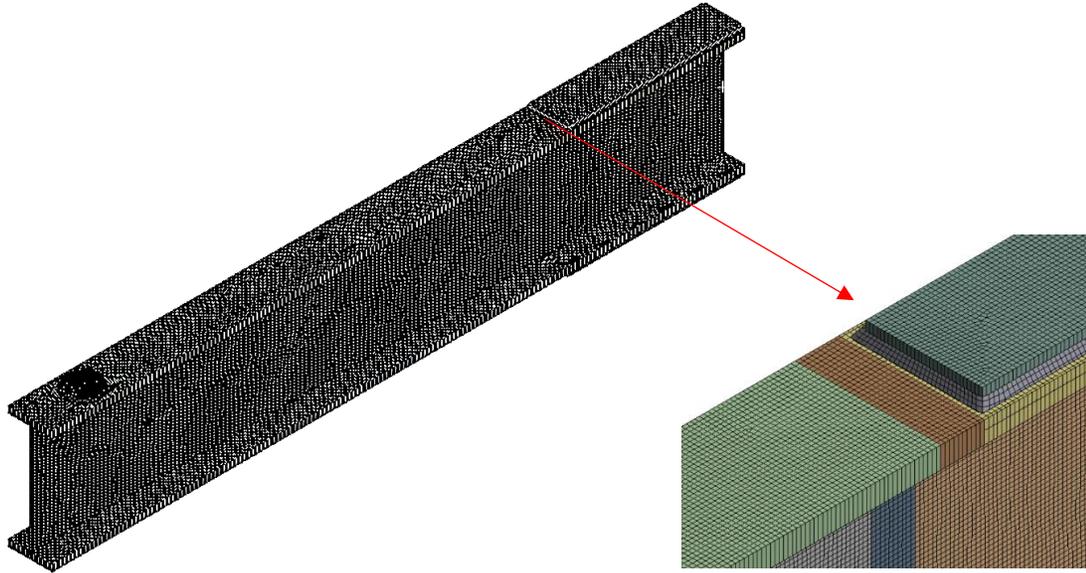


Figura A3-3. Modelo FEM detalle D1, elementos tipo *Shell* oblicuo y perpendicular.

A3.4 Modelo FEM detalle D1, elementos tipo *Shell* perpendicular

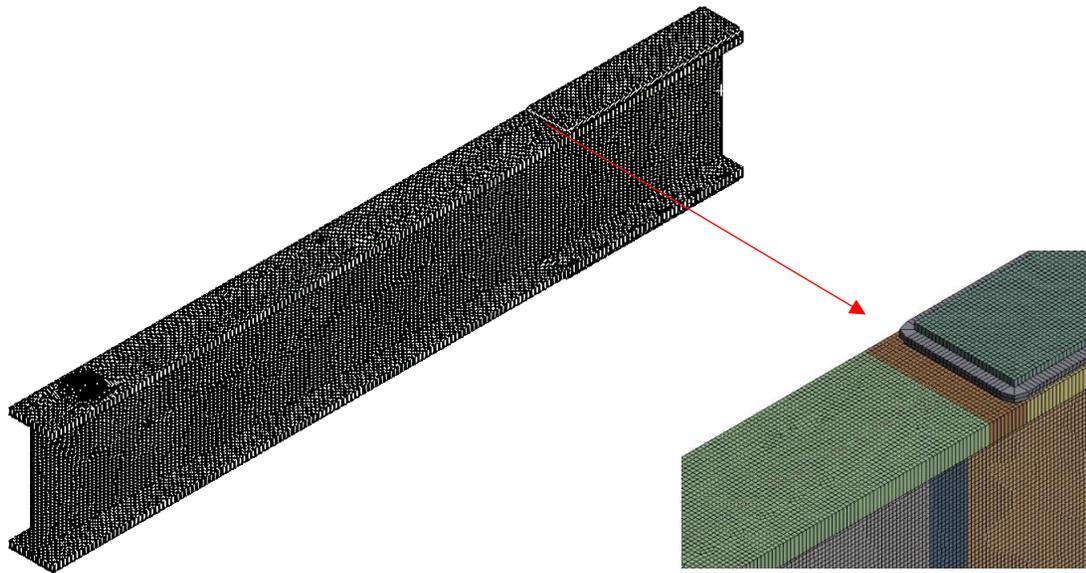


Figura A3-4. Modelo FEM detalle D1, elementos tipo *Shell* perpendicular.

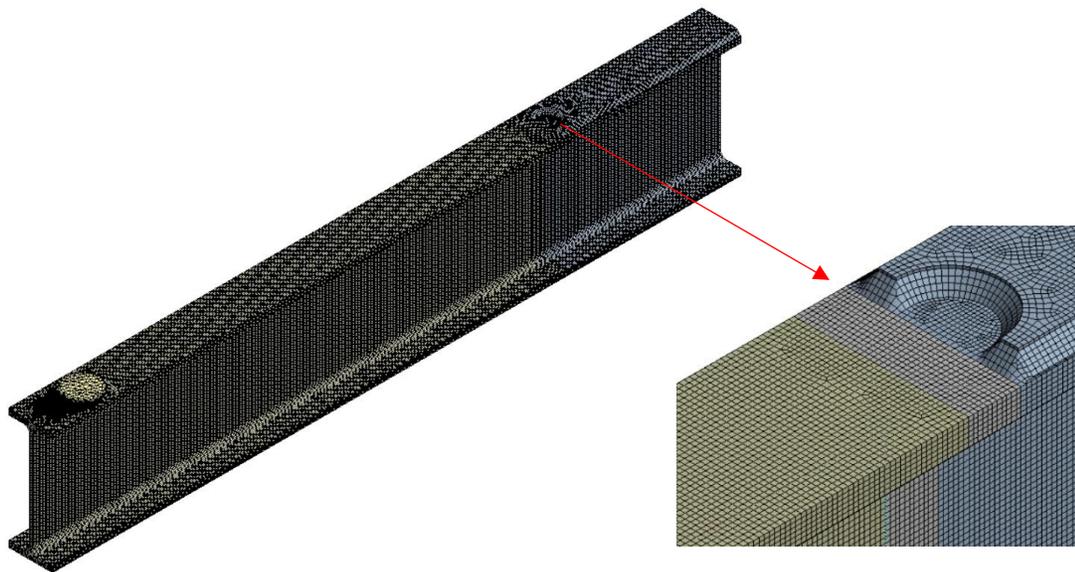
A3.5 Modelo FEM detalle D2, elementos tipo *Solid*, filete de soldadura máximo

Figura A3-5. Modelo FEM detalle D2, elementos tipo *Solid*, filete de soldadura máximo.

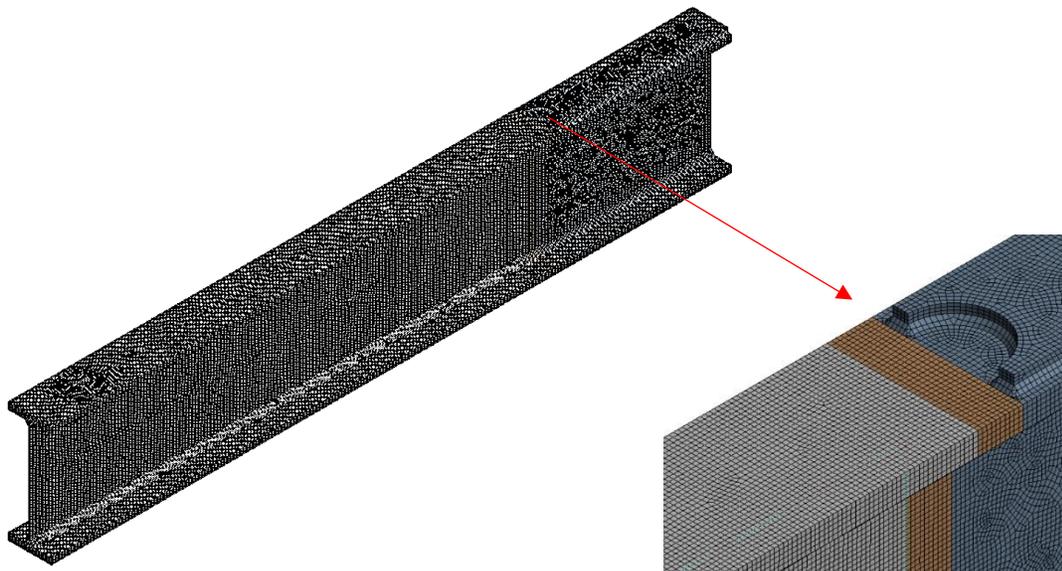
A3.6 Modelo FEM detalle D2, elementos tipo *Solid*, filete de soldadura mínimo

Figura A3-6. Modelo FEM detalle D2, elementos tipo *Solid*, filete de soldadura mínimo.

A3.7 Modelo FEM detalle D2, elementos tipo *Shell* oblicuo y perpendicular

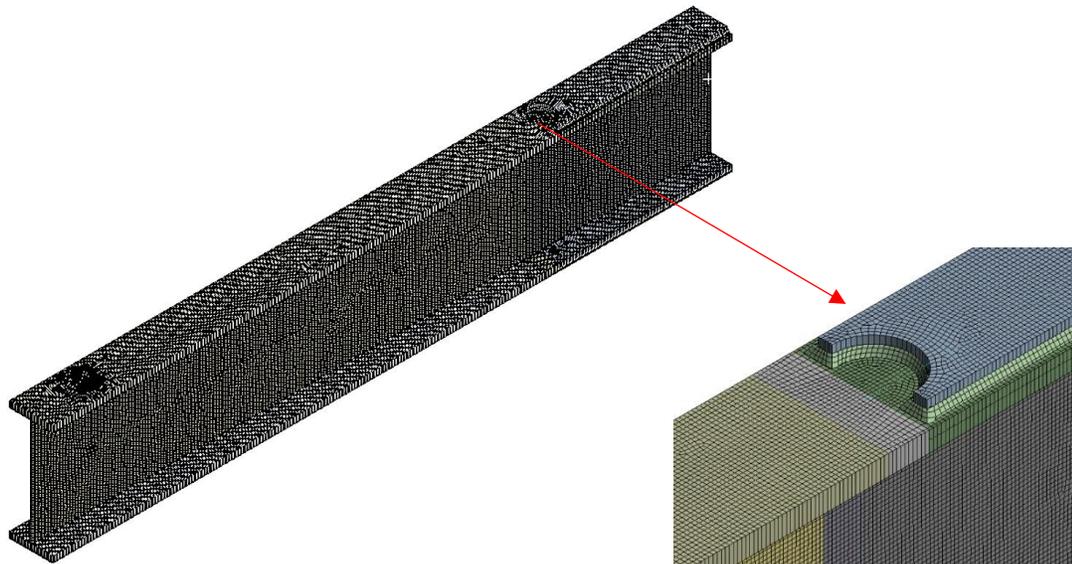


Figura A3-7. Modelo FEM detalle D2, elementos tipo *Shell* oblicuo y perpendicular.

A3.8 Modelo FEM detalle D2, elementos tipo *Shell* perpendicular

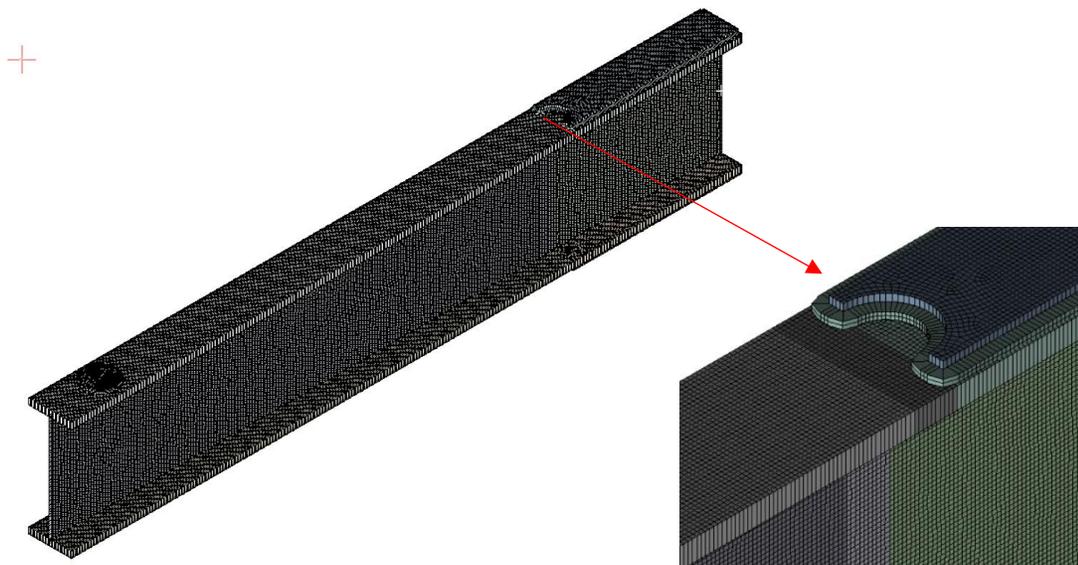
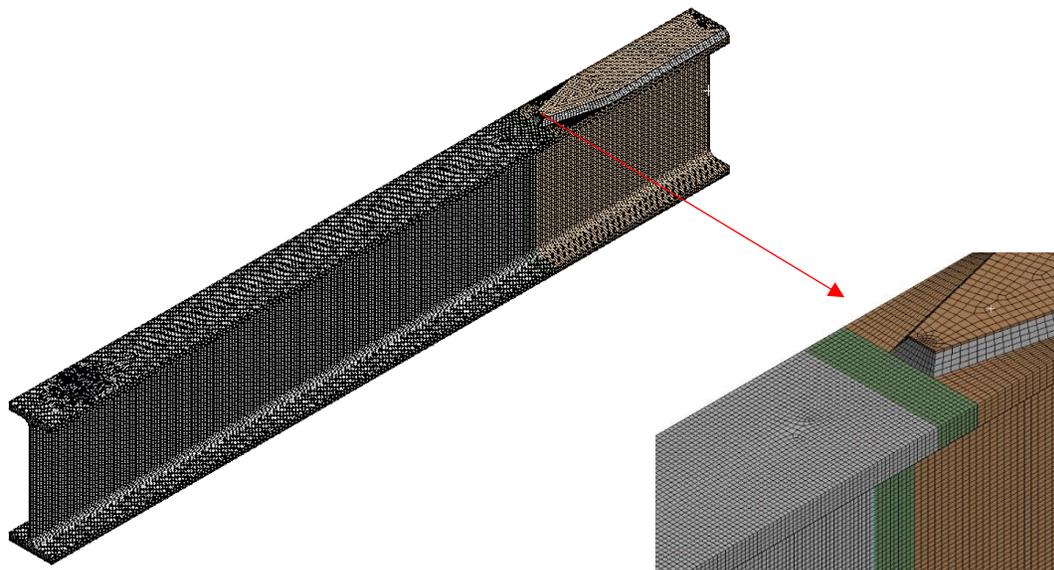
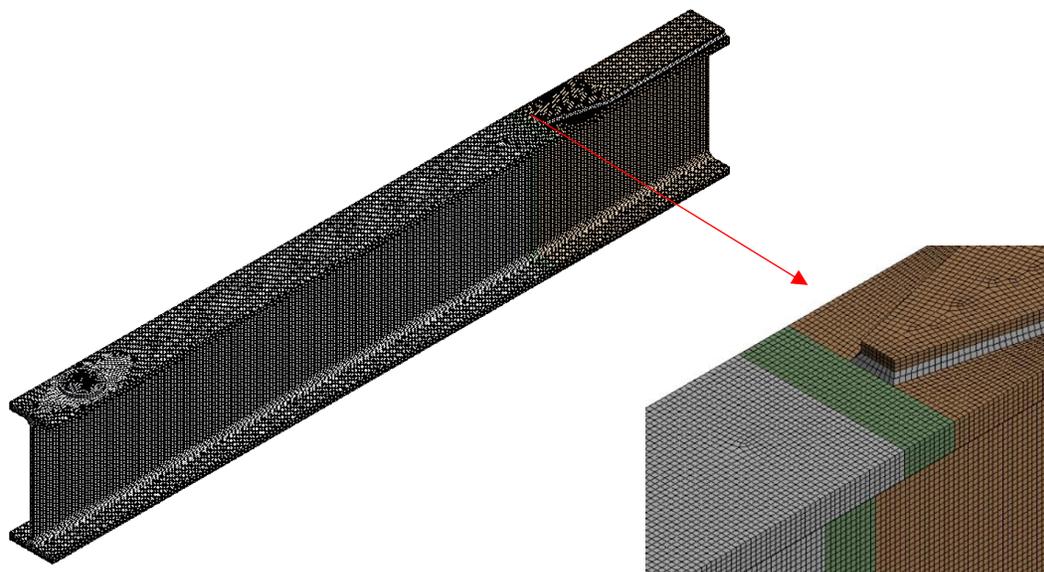


Figura A3-8. Modelo FEM detalle D2, elementos tipo *Shell* perpendicular.

A3.9 Modelo FEM detalle D3, elementos tipo *Solid*, filete de soldadura máximoFigura A3-9. Modelo FEM detalle D3, elementos tipo *Solid*, filete de soldadura máximo.**A3.10 Modelo FEM detalle D3, elementos tipo *Solid*, filete de soldadura mínimo**Figura A3-10. Modelo FEM detalle D3, elementos tipo *Solid*, filete de soldadura mínimo.

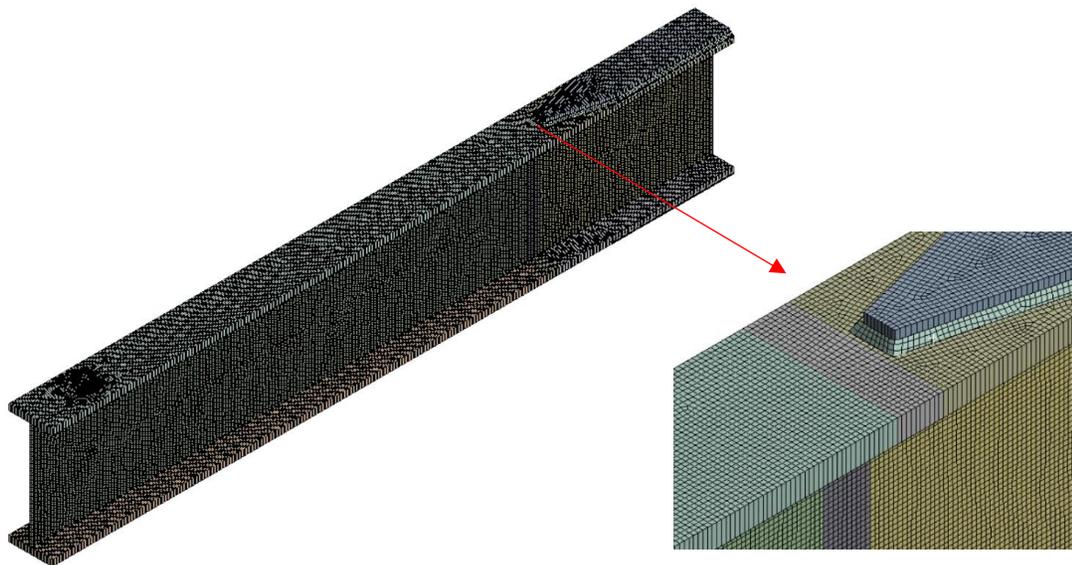
A3.11 Modelo FEM detalle D3, elementos tipo *Shell* oblicuo y perpendicular

Figura A3-11. Modelo FEM detalle D3, elementos tipo *Shell* oblicuo y perpendicular.

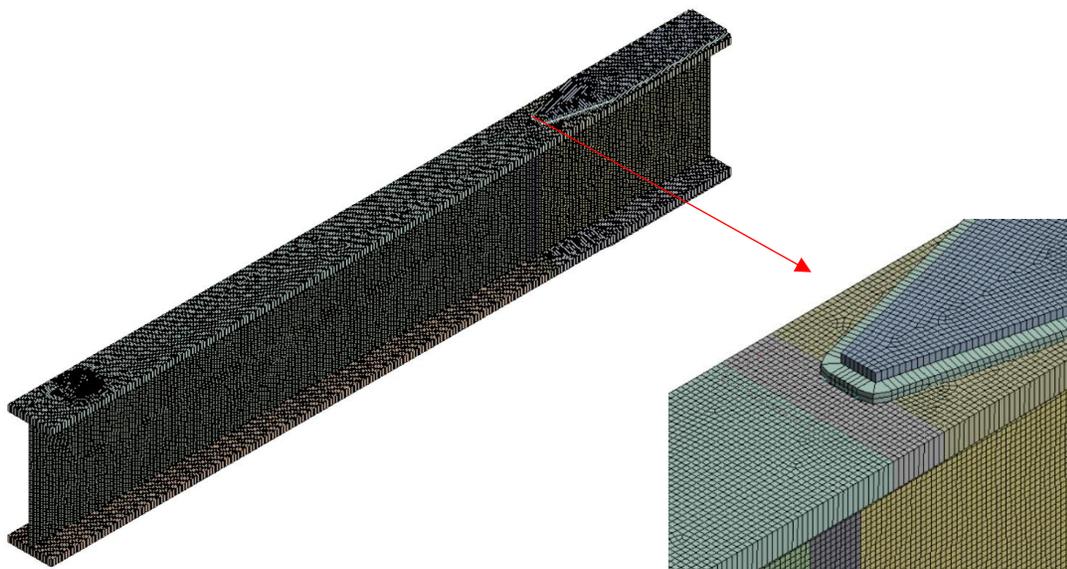
A3.12 Modelo FEM detalle D3, elementos tipo *Shell* perpendicular

Figura A3-12. Modelo FEM detalle D3, elementos tipo *Shell* perpendicular.

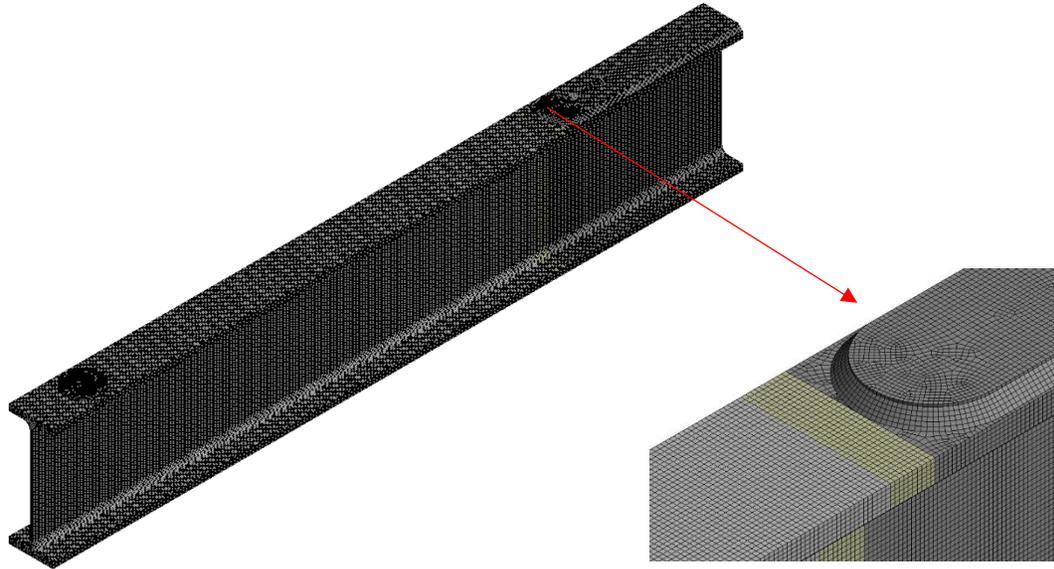
A3.13 Modelo FEM detalle D4, elementos tipo *Solid*, filete de soldadura máximo

Figura A3-13. Modelo FEM detalle D4, elementos tipo *Solid*, filete de soldadura máximo.

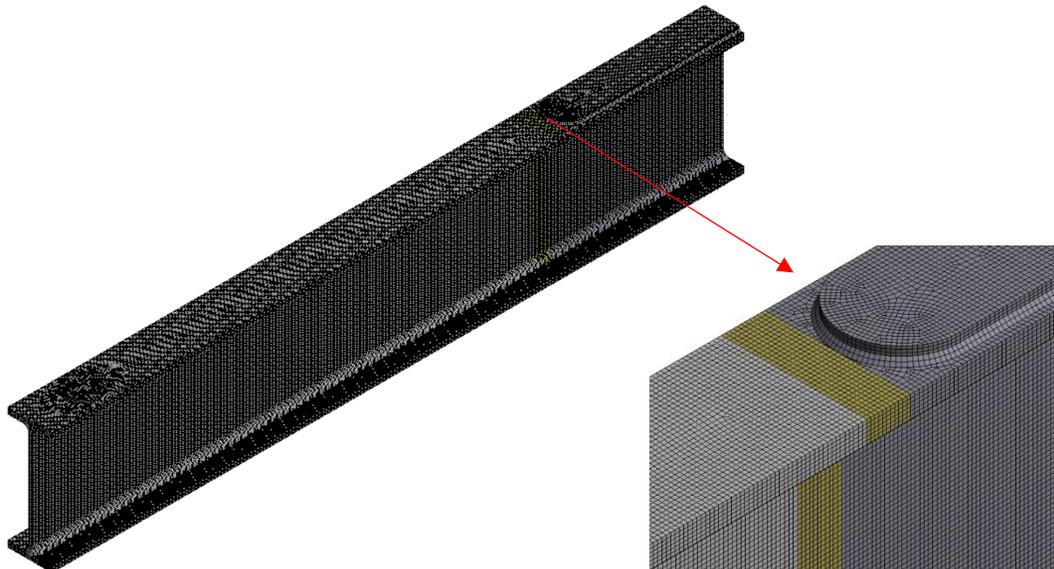
A3.14 Modelo FEM detalle D4, elementos tipo *Solid*, filete de soldadura mínimo

Figura A3-14. Modelo FEM detalle D4, elementos tipo *Solid*, filete de soldadura mínimo.

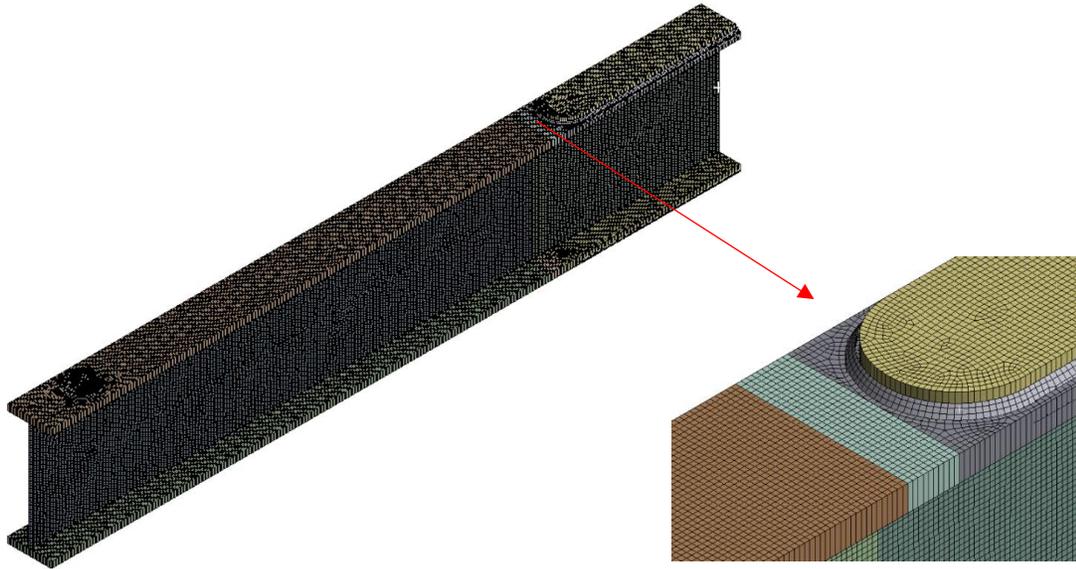
A3.15 Modelo FEM detalle D4, elementos tipo *Shell* oblicuo y perpendicular

Figura A3-15. Modelo FEM detalle D4, elementos tipo *Shell* oblicuo y perpendicular.

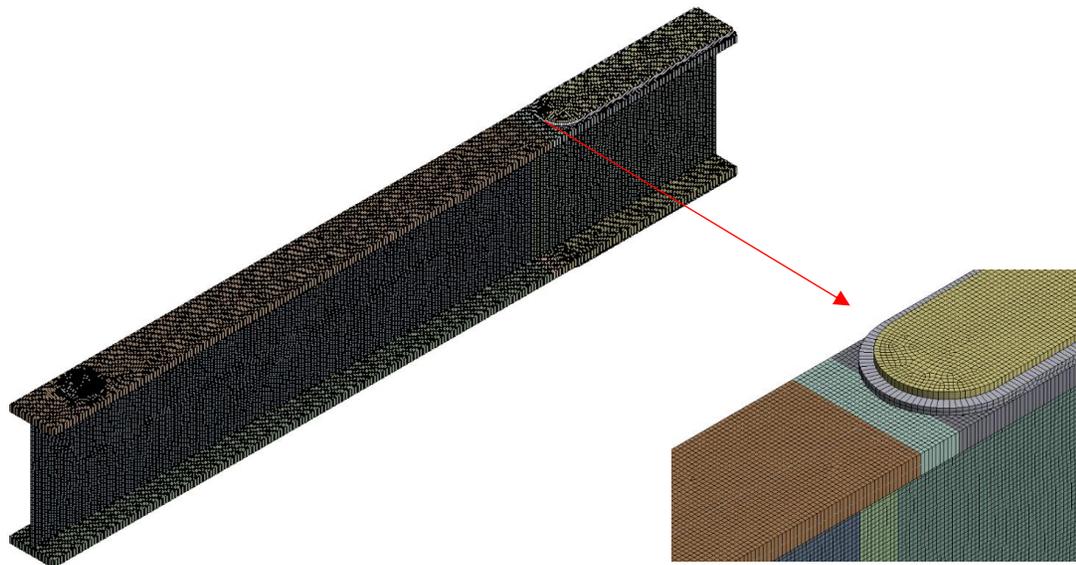
A3.16 Modelo FEM detalle D4, elementos tipo *Shell* perpendicular

Figura A3-16. Modelo FEM detalle D4, elementos tipo *Shell* perpendicular.