



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

Análisis de falla del agrietamiento repetitivo experimentado por los “Housing” de los camiones EH5000 de la casa fabricante Hitachi utilizados en la mina de carbón a cielo abierto de El Cerrejón (La Guajira - Colombia)

Germán Eduardo Sanabria Vega

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de ingeniería, Departamento de ingeniería mecánica y mecatrónica

Bogotá D.C., Colombia

2022

Análisis de falla del agrietamiento repetitivo experimentado por los “Housing” de los camiones EH5000 de la casa fabricante Hitachi utilizados en la mina de carbón a cielo abierto de El Cerrejón (La Guajira - Colombia)

Germán Eduardo Sanabria Vega

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de:
Magister en ingeniería mecánica

Director:

M. Ing. Edgar Espejo Mora

Profesor asociado

Departamento de ingeniería Mecánica y Mecatrónica

Línea de Investigación:

Análisis de falla e integridad mecánica

Grupo de Investigación:

Análisis de fallas, integridad y superficies - AFIS

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de ingeniería, Departamento de ingeniería mecánica y mecatrónica

Bogotá D.C., Colombia

2022

*A mis padres quienes siempre han sido
ejemplo en mi vida.*

*A Jenny Alejandra y mi hijo Juan Felipe, por
quienes aprendí que el equilibrio entre alcanzar una
meta sin desestabilizar una familia, es ardua tarea.
Los amo.*

A mis vivos y a mis muertos

Agradecimientos

Al profesor Edgar Espejo Mora asociado al departamento de ingeniería mecánica y mecatrónica de la Universidad Nacional de Colombia – sede Bogotá, quien posee profunda vocación académica, quien a pesar de las adversidades realiza grandes esfuerzos por salvaguardar los laboratorios y de quien aprendí la rigurosidad de la ingeniería; por su continuo apoyo y por quien siento profunda admiración y respeto.

Al ingeniero y amigo Julio Blanco, por su valiosa asesoría en el desarrollo del CAD.

A los señores Alvaro Parrado y Orlando Avendaño, gerentes de Bombas y montajes SAS, quienes reafirman el consejo de mi papá, “siempre dejar las puertas abiertas”, por su apoyo desinteresado en planta de mecanizados.

Al ingeniero Carlos López, gerente de ACER ingeniería Ltda. por el préstamo de sus instalaciones para la fabricación de probetas.

Al ingeniero Gerardo Vargas, jefe del grupo de inspecciones y tecnología (GI&T) y al grupo de ingenieros del departamento de mantenimiento – Flota 320, Carbones del Cerrejón Limited – Colombia, por su amabilidad, diligencia en las visitas y entrega oportuna de información.

.

Resumen

La división de mantenimiento -Flota 320- garantiza la disponibilidad de los camiones Hitachi EH5000 para el transporte continuo de material inerte en *La Mina* (Depto. La Guajira). Esta actividad se ha convertido en un verdadero desafío debido al *frecuente agrietamiento* de los elementos estructurales denominados "Housing", los cuales presentaron *siete fallas catastróficas* en el periodo 2009–2011.

Tras comprender la *filosofía de junta de barras tensoras* y al recrear mediante análisis FEM, el ciclo de operación de los camiones mineros: *Carga -Transporte -Ciclo de volcado -Retorno -Posicionamiento*, se logró determinar cómo la **fractura de barras tensoras** altera el nivel de esfuerzos en distintas zonas del "Housing"; y a su vez, cómo afecta la vida a fatiga utilizando los criterios del estándar *BS 7608*, dos espectros de carga (monitoreado y teórico) y la teoría del daño acumulado Palmgren-Miner.

Estos resultados fueron comparados con el **análisis de falla** para tres componentes fallados ("*Housing*", *Barras tensoras* y *Tornillo*); donde se logró determinar que experimentaron falla por fatiga. Finalmente, se logró probar que la contribución de **algunos parámetros adversos de diseño y fabricación, junto a políticas de operación y mantenimiento poco estrictas**; disminuyen gradualmente la vida a fatiga, fracturando los "Housing" a un ritmo cada vez más acelerado.

Palabras clave: Análisis de falla, Fallas por fatiga, Fallas en "Housing" de camiones, Fallas en barras tensoras, British standard BS 7608.

Abstract

Failure analysis of repetitive cracking experienced by "Housing" of EH5000 trucks made by Hitachi used in the open-pit coal mine of El Cerrejón (La Guajira - Colombia)

Maintenance division -Fleet 320- It guarantees the availability of Hitachi EH5000 mining dump trucks for continuous transport of inert material in *La Mina* (La Guajira). This activity has become in a true big challenge due to the frequent cracking of the structural element called "Housing", which presented seven catastrophic failures in the period 2009-2011.

After understanding the mechanical philosophy joint of the tie rods and recreating through FEM analysis the operating cycle of mining trucks: Loading – Transport – Dump cycle – Return – Positioning. It was possible to determine how the fracture of the tension tie rods alters the stress level in different areas of the "Housing"; thus, how it affects the fatigue life using the criteria of *BS 7608 standard*, two load spectra (monitored and theoretical) and the Palmgren-Miner accumulated damage theory.

These results were compared with the failure analysis from three failed components ("Housing", tension tie rod and bolt); where it was possible to determine that they experienced fatigue failure. Finally, it was possible to prove that the contribution of some adverse design and manufacture parameters, together with lax operation and maintenance policies; gradually decrease fatigue life and generate "Housing" fracture at an ever-accelerating rate.

Keywords: Failure analysis, Fatigue failure, Trucks "Housing" failure, Tension tie rod failures, British standard BS 7608.

Contenido

	Pág.
Resumen	V
Abstract.....	VI
Lista de figuras.....	XI
Lista de tablas	XV
Introducción	17
1. Marco teórico	21
1.1 Análisis de falla	21
1.1.1 Etapas del análisis de fallas	22
1.2 Metodología de elementos finitos (FEM)	23
1.2.1 Análisis por FEM	25
1.3 Fundamentos de fatiga	30
1.3.1 Metodologías para el análisis de fatiga	32
1.3.2 Metodología Esfuerzo-Vida (BS 7608:2014).....	33
1.3.3 Generalidades metodológicas para evaluación de soldaduras por fatiga.....	39
1.3.4 Metodología de esfuerzo nominal	40
1.3.5 Metodología de esfuerzo estructural (Hot-spot stress)	41
1.3.6 Conteo de ciclos.....	46
1.3.7 Teoría de daño acumulado	47
2. Antecedentes de falla	49
2.1 Información técnica y diseño del camión	50
2.1.1 Diseño del “Housing”	52
2.2 Descripción del sistema eléctrico	55
2.2.1 Suministro eléctrico	55
2.2.2 Tracción: Inversores DC/AC y Motores de tracción	57
2.2.3 Retardo: Chopper de frenado y resistencias de grillas	58
2.2.4 Control: TCU (Unidad Control de Tracción)	60
2.2.5 Sistema motor	61
2.3 Monitoreo en ciclo de operación	62
2.4 “Housing” utilizado como modelo	64
2.5 Historial de fallas	65
2.5.1 Análisis de falla - Fractura “Housing” Camión 22-759	65
2.5.2 Análisis de falla - fractura “Housing” camión 22-777	67
2.5.3 Análisis de falla - fractura “Housing” camión 22-778	69

2.5.4	Análisis de falla - fractura "Housing" camión 22-783	70
2.5.5	Análisis de falla - fractura "Housing" camión 22-748	72
2.5.6	Análisis de falla - fractura "Housing" camión 22-713	74
2.5.7	Análisis de falla - fractura "Housing" camión 22-807	76
2.6	Procedimiento de cambio y reparación ante detección de fallas.....	79
2.6.1	Cambio de barras tensoras y tornillos	80
2.6.2	Inspección y reparación por soldadura - "Housing"	81
3.	Concepto modo de falla	86
3.1	Fractografía - "Housing"	86
3.1.1	Fractografía unión Cilindro interno - Brida	88
3.1.2	Fractografía unión Cilindro interno - Cilindro externo	90
3.1.3	Fractografía unión "channel" - Brida	91
3.2	Fractografía – Barras tensoras	93
3.3	Fractografía – Tornillo	94
3.4	Caracterización de material	95
3.4.1	Caracterización de "Housing"	97
3.4.2	Caracterización de Barras tensoras.....	101
3.4.3	Caracterización de Tornillos	104
3.5	Análisis de inclusiones y tamaño de grano	107
3.5.1	Inclusiones en "Housing"	108
3.5.2	Inclusiones en barras tensoras	109
3.5.3	Inclusiones en tornillos.....	109
3.6	Concepto modo de falla.....	110
4.	Modelamiento por elementos finitos	113
4.1	Modelo tridimensional "Housing"	113
4.2	Dimensiones generales "Housing"	114
4.3	Condiciones de carga en un ciclo de operación	115
4.4	Configuración de material.....	125
4.5	Contactos	125
4.6	Restricciones de movimiento.....	127
4.6.1	Pin central.....	127
4.6.2	Soportes sistema de suspensión	127
4.6.3	Soporte barra antivuelco	128
4.7	Configuración de malla	128
4.8	Análisis estático y efecto de barras tensoras fracturadas (BTF)	133
4.8.1	Combinaciones posibles de barras tensoras fracturadas	135
4.8.2	Determinación de nodos de interés	136
4.9	Determinación de vida a fatiga	139
4.9.1	Determinación de distancias - Hot-spot stress	139
4.9.2	Determinación de distancias - Esfuerzo nominal.....	140
4.9.3	Vida a fatiga en zonas sensibles al agrietamiento	142
5.	Concepto mecanismo de falla	155
6.	Conclusiones	159
7.	Recomendaciones	163
	Bibliografía	166

Anexo A: Inspección de soldaduras en “Housing”, Camiones Hitachi®- EH5000 ..	169
Anexo B: Resumen de fallas catastróficas 2009 – 2011	170
Anexo C: Registro fotográfico Reparación de “Housing”	172
Anexo D: Fractografía unión soldada Cilindro interno – Brida	175
Anexo E: Fractografía unión soldada Cilindro interno – Cilindro externo	178
Anexo F: Fractografía en unión soldada “channel” – Brida	179
Anexo G: Ensayos de tracción	180
Anexo H: Análisis composición química.....	184
Anexo I: Ensayos de dureza	188
Anexo J: Probetas metalográficas	189
Anexo K: Detalle discontinuidades en unión soldada – “Housing”	190
Anexo L: Conteo de inclusiones-”Housing”	193
Anexo M: Dimensiones generales “Housing”	196
Anexo N: Registro fotográfico montaje de mandos finales	197
Anexo O: Total combinaciones - seis barras tensoras (64).....	199
Anexo P: Total combinaciones – seis barras tensoras disminuido (64 - 48)	200
Anexo Q: Total combinaciones analizadas - seis barras tensoras (38).....	201
Anexo R: Variación de esfuerzos en zonas sensibles al agrietamiento	202
Anexo S: Clasificación general de detalles BS 7608:2014	211
Anexo T: Distribución de esfuerzos en “Cordón horizontal” – Junta “channel”- Brida; Condiciones de carga LC1-LC7.....	215
Anexo U: Distribución de esfuerzos en “Cordón vertical” – Junta “channel”-Brida; Condiciones de carga LC1-LC7	222
Anexo V: Distribución de esfuerzos en “Cilindro interno”; Condiciones de carga LC1-LC7	226
Anexo W: Distribución de esfuerzos en “Amortiguador”; Condiciones de carga LC1-LC7	234
Anexo X: Distribución de esfuerzos en “Soporte barra antivuelco 1”; Condiciones de carga LC1-LC7.....	235
Anexo Y: Distribución de esfuerzos en “Soporte barra antivuelco 2”; Condiciones de carga LC1-LC7.....	236

Anexo Z: Distribución de esfuerzos en “Zona Cilindro externo”; Condiciones de carga LC1-LC7..... 237

Anexo AA: Formato control de reparación – 2010, División de mantenimiento..... 238

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1.1: Discretización de sólido tridimensional.	25
Figura 1.2: Detalle ubicación de nodos en elemento hexaédrico.	25
Figura 1.3: Representación en continuo de viga empotrada.	27
Figura 1.4: Representación en elementos finitos de viga empotrada.	27
Figura 1.5: Discretización de un sólido tridimensional según su aplicación.	29
Figura 1.6: Diferencia en densidad de malla para la discretización de un piñón.	29
Figura 1.7: Fractura por fatiga en eje ferroviario.	30
Figura 1.8: Morfología superficial de falla por fatiga en eje automotriz.	31
Figura 1.9: Curvas media (Sr-N) y Curvas de diseño básico estándar (Sr-N).	35
Figura 1.10: Subdivisión de esfuerzo no lineal en componentes.	39
Figura 1.11: Distribución de esfuerzo nominal en metal base.	40
Figura 1.12: Definición de esfuerzo Hot-spot en pie de soldadura.	42
Figura 1.13: Métodos aceptados en la aplicación del método SSE.	42
Figura 1.14: Elementos y mallas aceptados en la aplicación del método SSE.	43
Figura 1.15: Tamaños de malla y métodos de extrapolación recomendados.	44
Figura 1.16: Distribución de esfuerzo estructural - diferentes detalles de soldadura.	45
Figura 1.17: Esfuerzo estructural Hot-spot en pie de soldadura.	45
Figura 1.18: Historial de cargas de amplitud variable para un caso real.	46
Figura 1.19: Historial de cargas de amplitud variable - ciclos de histéresis.	47
Figura 1.20: Esfuerzos equivalentes organizados y cuantificados.	48
Figura 2-1: Camión Hitachi® - EH5000.	49
Figura 2-2: Dimensiones generales.	50
Figura 2-3: Carta de tracción y Carta de Retardo.	52
Figura 2-4: Diseño conceptual del "Housing".	53
Figura 2-5: Ubicación de Barras tensoras.	53
Figura 2-6: Agrupación y cantidades de pernos & barras tensoras.	54
Figura 2-7: Nivel de torque y tipo de tuerca requeridos por fabrica.	54
Figura 2-8: Planta generación Diesel - Alternador - Rectificador (Color azul).	56
Figura 2-9: "DC LINK"- Energiza los inversores DC - AC - (Color azul).	56
Figura 2-10: Ubicación alternador de tracción.	57
Figura 2-11: Inversores DC/AC y Motores de tracción (Color azul).	57
Figura 2-12: Detalle motor de tracción.	58
Figura 2-13: "Chopper" de frenado y resistencia de grillas (Color azul).	58
Figura 2-14: "Choppers" de frenado.	59
Figura 2-15: Detalle caja de grillas.	59

Figura 2-16:	Ubicación Unidad de control de tracción (TCU).....	60
Figura 2-17:	Ubicación de cabina de control y resistencias de grillas.....	61
Figura 2-18:	Monitoreo de Torque - Camión C764 - Flota 320.	62
Figura 2-19:	Ciclo típico analizado.	63
Figura 2-20:	Cromatografía en “Housing”	64
Figura 2-21:	“Housing” digitalizado - Camión C709.	65
Figura 2-22:	Estado del camión por el desprendimiento del mando final.	66
Figura 2-23:	Grietas de fatiga desde la parte interna - Junta anillo-metal base.....	67
Figura 2-24:	Estado del camión por el desprendimiento del mando final (Lado B).....	67
Figura 2-25:	Grietas de fatiga en parte interna - Junta anillo-metal base.	68
Figura 2-26:	Fractura & desprendimiento de anillo y mando final (Lado A).	69
Figura 2-27:	Grietas de fatiga en parte interna - Junta anillo-metal base-Nose cone..	70
Figura 2-28:	Fractura y desprendimiento de mando final de “Housing” (Lado B).	71
Figura 2-29:	Grietas de fatiga en parte interna - Junta Anillo-Metal base-Nose cone.	72
Figura 2-30:	Fractura y desprendimiento de anillo y mando final (Lado A).	73
Figura 2-31:	Grietas de fatiga avanzando desde parte interna del “Housing”.....	74
Figura 2-32:	Fractura del anillo (Lado A) – Camión 713.	75
Figura 2-33:	Reparación sin desmontar el mando final (lado A).	75
Figura 2-34:	Evidencias de marcas ratchet y grietas de fatiga – Camión 713.	76
Figura 2-35:	Estado del camión por fractura del anillo (Lado A).	77
Figura 2-36:	Detalle del desgarramiento del anillo - Lado A del “Housing”.....	78
Figura 2-37:	Evidencias de marcas de playa y ratchet en zona de fractura.	78
Figura 2-38:	Marcas de playa en perno ubicado en zona baja de “Housing”.	79
Figura 2-39:	Sitios de interés en inspección estructural.	80
Figura 2-40:	Unión de mandos finales al “Housing” y secuencia torque de apriete.....	81
Figura 2-41:	Detalle espaciador roscado en barra tensora.	81
Figura 2-42:	Agrietamiento frecuente al interior del “Housing”.....	82
Figura 2-43:	Agrietamiento frecuente en unión Anillo - “channels” de refuerzo.	82
Figura 2-44:	Ubicación de la grieta en cordón horizontal.....	83
Figura 2-45:	Zona de transición en cara interna del anillo.	83
Figura 2-46:	“channels” resoldados únicamente en el área superior.	84
Figura 2-47:	Instalación de un “channel” por vez para evitar distorsiones.	85
Figura 2-48:	Soldadura de “channel” nuevo.....	85
Figura 2-49:	Detalle aplicación de soldadura.	85
Figura 3.1:	Sección fracturada uno, unión “Nose cone”-Cilindro interno/externo.	86
Figura 3.2:	Detalles de construcción, unión “channel”-Anillo refuerzo interno.....	87
Figura 3.3:	Sección fracturada dos, “Housing” fracturado camión C769.	88
Figura 3.4:	Morfología de falla en unión <i>Cilindro interno - Brida</i>	89
Figura 3.5:	Fractografía unión <i>Cilindro interno - Brida</i>	89
Figura 3.6:	Morfología de falla en junta soldada: <i>Cilindro interno – Cilindro externo</i> .	90
Figura 3.7:	Fractografía unión <i>Cilindro interno – Cilindro externo</i>	91
Figura 3.8:	Morfología de falla en junta soldada: “Channel” - <i>Brida</i>	92
Figura 3.9:	Fractografía unión soldada “Channel” 1 - <i>Brida</i>	92
Figura 3.10:	Fractografía unión soldada “Channel” 2 - <i>Brida</i>	93

Figura 3.11:	Secciones fracturadas de barra tensora.	94
Figura 3.12:	Fractografía en dos secciones de barra tensora.	94
Figura 3.13:	Sección de tornillo fracturado.	95
Figura 3.14:	Fractografía en tornillo fracturado.	95
Figura 3.15:	Probetas para ensayos de tracción mecánica.	96
Figura 3.16:	Probetas para metalografía de “Housing”.	98
Figura 3.17:	Microestructura – Metal base “Housing”.	99
Figura 3.18:	Microestructura – Soldadura cilindro interno/cilindro externo.	99
Figura 3.19:	Discontinuidades en unión soldada cilindro interno/externo.	100
Figura 3.20:	Propagación de grietas por fatiga - <i>cilindro interno-material de aporte</i>	101
Figura 3.21:	Microestructura – Barra tensora (Sección transversal).	102
Figura 3.22:	Microestructura – Barra tensora (sección longitudinal).	103
Figura 3.23:	Microestructura – Barra tensora (sección transversal).	103
Figura 3.24:	Perfil de rosca – Barra tensora.	104
Figura 3.25:	Microestructura – Tornillo (sección longitudinal).	105
Figura 3.26:	Microestructura – Tornillo (sección longitudinal).	106
Figura 3.27:	Microestructura – Tornillo (sección transversal).	106
Figura 3.28:	Perfil de rosca – Tornillo.	107
Figura 4-1:	Modelo en sólidos de volumen – “Housing”.	113
Figura 4-2:	Modelo en sólidos de superficie – “Housing” camión EH5000.	114
Figura 4-3:	“Housing” - Vista en sección.	115
Figura 4-4:	Condiciones de carga representativas en un ciclo de operación.	115
Figura 4-5:	Fuerzas que intervienen en el movimiento de un camión minero.	116
Figura 4-6:	Ensamble esquemático “Housing” – <i>llantas</i> . Vista posterior.	116
Figura 4-7:	Subdivisión del Anillo o Brida - “Housing”.	117
Figura 4-8:	Configuración de material para los modelamientos.	125
Figura 4-9:	Contactos tipo “bonded” entre láminas estructurales de “Housing”.	126
Figura 4-10:	Restricciones de movimiento.	127
Figura 4-11:	Restricción de movimiento - Pin central.	127
Figura 4-12:	Restricción de movimiento – Sistema de suspensión.	128
Figura 4-13:	Restricción de movimiento – Soporte barra antivuelco.	128
Figura 4-14:	Análisis de convergencia – Unión Brida-“Channel 5”.	129
Figura 4-15:	Refinamiento de malla para “Hot-spot stress”.	130
Figura 4-16:	Refinamiento de malla para <i>esfuerzo nominal</i>	130
Figura 4-17:	Métrica espectral de oblicuidad y ortogonalidad de malla.	131
Figura 4-18:	Calidad de malla - oblicuidad y ortogonalidad.	131
Figura 4-19:	Malla global y zonas con refinamiento de malla.	132
Figura 4-20:	Refinamiento de malla - Soporte barra antivuelco.	132
Figura 4-21:	Refinamiento de malla – “channels” de refuerzo y Cilindro interno.	132
Figura 4-22:	Refinamiento de malla – Soporte sistema de suspensión.	133
Figura 4-23:	Refinamiento de malla – Cilindro externo.	133
Figura 4-24:	Zona 1 (06H11) – “channels” de refuerzo.	134
Figura 4-25:	Zona 2 (06H11) – Cilindro interno.	134
Figura 4-26:	Zona 3 (06H09) – Soporte Amortiguador.	134

Figura 4-27:	Zona 4 (06H01, 06H02, 06H03) – Soporte Barra antivuelco.	135
Figura 4-28:	Zona 5 (06H04) – Cilindro externo.	135
Figura 4-29:	Variación de esfuerzos en “Channel 1”.	137
Figura 4-30:	Diversos picos de esfuerzo en “channel” 1”.	138
Figura 4-31:	Trayectorias “paths” para análisis de esfuerzo nominal - Zona Barras.	140
Figura 4-32:	Distribución esfuerzos “Membrane” y “Bending” - Zona Barras.....	141
Figura 4-33:	Trayectorias para análisis de esfuerzo nominal - Zona Cilindro.....	141
Figura 4-34:	Distribución esfuerzos “Membrane” y “Bending” – Zona Cilindro.	142
Figura 4-35:	Cargas esperadas en un ciclo normal de operación (LC1-LC7).....	143
Figura 4-36:	Monitoreo de torque para dos ciclos de operación.	144
Figura 4-37:	Porcentaje de variación de torque para dos ciclos de operación.	144
Figura 4-38:	Ubicación juntas – “channels” horizontales & “channels” verticales”.....	147
Figura 4-39:	Ubicación de juntas analizadas – “Cilindro interno”.....	148
Figura 4-40:	Ubicación de juntas analizadas – “Amortiguador”.	148
Figura 4-41:	Ubicación de juntas analizadas – “Soporte barra antivuelco 1 & 2”.	149
Figura 4-42:	Ubicación de juntas analizadas – “Zona Cilindro externo.”.....	149
Figura 5-1:	Diagrama de flujo - Operación & Mantenimiento.....	157
Figura 5-2:	Diagrama causa – efecto.....	158

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1-1: Probabilidad nominal de falla y Desviación estándar.	36
Tabla 1-2: Detalle de curvas básicas S/N.	38
Tabla 2-1: Especificaciones técnicas.	51
Tabla 2-2: Datos representativos del ciclo típico analizado.	62
Tabla 2-3: Datos representativos del ciclo monitoreado.	64
Tabla 2-4: Historial de fallas catastróficas (Periodo 2009 – 2011).	65
Tabla 3-1: Medición de durezas - “Housing”.	97
Tabla 3-2: Ensayos de tracción - “Housing”.	97
Tabla 3-3: Composición química - “Housing”.	98
Tabla 3-4: Medición de durezas – Barras tensoras.	101
Tabla 3-5: Ensayos de tracción – Barras tensoras.	102
Tabla 3-6: Composición química – Barras tensoras.	102
Tabla 3-7: Medición de durezas – Tornillos.	104
Tabla 3-8: Ensayos de tracción – Tornillos.	105
Tabla 3-9: Composición química – Tornillos.	105
Tabla 3-10: Tamaños de grano para tres aceros distintos.	108
Tabla 3-11: Inclusiones – “Housing” (sección longitudinal).	108
Tabla 3-12: Inclusiones – Barra tensora (sección longitudinal).	109
Tabla 3-13: Inclusiones – Tornillos (sección longitudinal).	110
Tabla 4-1: Información utilizada en análisis estáticos, dinámicos y modelamientos. .	118
Tabla 4-2: Detalle condición de carga 1 (Cargado estacionado).	119
Tabla 4-3: Detalle condición de carga 2 (Transporte horizontal).	120
Tabla 4-4: Detalle condición de carga 3 (Transporte ascendiendo).	121
Tabla 4-5: Detalle condición de carga 4 (Descarga o Ciclo de volcado).	122
Tabla 4-6: Detalle condición de carga 5 (Retorno descenso).	123
Tabla 4-7: Detalle condición de carga 6 (Retorno horizontal).	124
Tabla 4-8: Detalle condición de carga 7 (Posicionamiento).	124
Tabla 4-9: Características de los elementos empleados las simulaciones FEM.	131
Tabla 4-10: Combinaciones posibles y casos más probables de BTF.	136
Tabla 4-11: Selección de nodos en “channel” 1.	138
Tabla 4-12: Variación del nivel de esfuerzos en nodos seleccionados.	139
Tabla 4-13: Distancias estimadas para hallar “hot-spot stress”.	140
Tabla 4-14: Repeticiones asociadas a condiciones de carga ideal (LC1 – LC7).	143
Tabla 4-15: Clasificación de juntas soldadas - BS 7608.	145
Tabla 4-16: Vida a fatiga (BS 7608) – Zona “channel” “horizontal & Vertical”.	146

Tabla 4-17:	Vida a fatiga (BS 7608) – Zona “Cilindro interno”.....	147
Tabla 4-18:	Vida a fatiga (BS 7608) – Zona “Amortiguador”.....	148
Tabla 4-19:	Vida a fatiga (BS 7608) – Zona “Soporte barra antivuelco 1 & 2”.....	149
Tabla 4-20:	Vida a fatiga (BS 7608) – Zona Cilindro externo.	149
Tabla 4-21:	Vida a fatiga - barras tensoras en óptimas condiciones.	150
Tabla 4-22:	Efecto barras tensoras fracturadas – “channel” (Cordón horizontal).	152
Tabla 4-23:	Efecto barras tensoras fracturadas – “channel” (Cordón vertical).	152
Tabla 4-24:	Efecto barras tensoras fracturadas – Zona soporte barra antivuelco....	153
Tabla 4-25:	Efecto de barras tensoras fracturadas – Zona cilindro interno.	153
Tabla 4-26:	Efecto de barras tensoras fracturadas – Zona amortiguador.	154
Tabla 4-27:	Efecto de barras tensoras fracturadas – Cilindro externo.....	154

Introducción

Con el objetivo de aumentar la exportación de carbón mineral, Carbones del Cerrejón inc. utiliza su flota de camiones Hitachi EH5000 en el proceso de desmantelamiento de los mantos de carbón; ya que, transportan una carga útil máxima de 315 toneladas de material inerte. Esta flota ha incrementado gradualmente sus unidades de camiones a partir del año 2004, hasta alcanzar las 121 unidades, según datos entregados por la compañía en la visita a sus instalaciones en *La Mina (depto. La Guajira)* en el año 2011.

En los inicios del presente estudio -año 2011, se evidenció que la división de mantenimiento enfrentaba serios inconvenientes debido al frecuente agrietamiento de los “Housing”, quienes habían experimentado siete eventos de falla catastrófica en el periodo 2009-2011. Dicho componente estructural es parte vital del camión, ya que aloja en su interior dos motores de tracción eléctricos que proporcionan la fuerza motriz.

Para evitar fracturas de “Housing”, la división de mantenimiento en conjunto con el grupo de inspección y tecnología GI&T, *inspeccionan las zonas más propensas al agrietamiento* de acuerdo con las recomendaciones del fabricante; a pesar de ello, existen algunas zonas sensibles ubicadas al interior de la zona baja del “Housing”, en donde la propagación de grietas ha sido causa de la mayoría de las fallas catastróficas; no obstante, inspeccionar dichas zonas requiere de una gran gestión logística; ya que, se deben desinstalar sus cuatro llantas traseras, dos mandos finales, sistemas hidráulicos/neumáticos/eléctricos, pines de sujeción y traslado a zona. Estas actividades inhabilitan el camión por largos periodos.

Tras evaluar los antecedentes de falla y los formatos de control de reparaciones, se evidenciaron grandes **diferencias entre las recomendaciones del fabricante y las condiciones reales de operación & mantenimiento**. Se pudo constatar, por ejemplo, que algunos camiones *operaron* con niveles de sobrecarga que excedieron el 10%, otros *operaron* con barras tensoras & tornillos fracturados, y otros *operaron* con agrietamiento

pendiente por reparación; por lo tanto, el presente estudio está basado en la hipótesis de que los principales factores que generan el agrietamiento prematuro en **“Housing”, barras tensoras y tornillos**, son:

- Falta de control estricto en la política de carga, se evidenció operación con sobrecarga
- El camión opera con barras tensoras y tornillos fracturados, por periodos indeterminados
- No se realiza la reparación inmediata en las juntas soldadas *Brida-“channel”-Cilindro interno*, ubicadas en la zona baja e interna del “Housing”

Aunque los agrietamientos evidenciados por NDT, son registrados y analizados por la *compañía* utilizando como criterio de priorización la *longitud crítica de grieta*, este criterio se basa en experiencia acumulada y no en metodologías predictivas de falla como la mecánica de fractura, métodos estandarizados o códigos relacionados; por tal motivo, la *comprensión* de la interacción entre diversos factores que causan el agrietamiento prematuro, *permitió* esclarecer cómo las **combinaciones de barras tensoras fracturadas y barras tensoras en óptimas condiciones** afectan la vida a fatiga en zonas sensibles, teniendo en cuenta su **posición, cantidad y combinaciones posibles**. Esto se logró evaluando los siguientes parámetros:

- Aplicación de la *metodología de análisis de falla*
- Evaluación de parámetros de *operación & mantenimiento*, recomendados por el fabricante
- Comprensión del diseño del “Housing”, mediante la *filosofía de junta* en barras tensoras y su actuación como fusibles mecánicos
- Aplicación del *método de elementos finitos (FEM)*, al simular el ciclo de operación minero: *-Carga -Transporte -Ciclo de volcado -Retorno -Posicionamiento*
- Estimación *de vida a fatiga* utilizando los criterios de estándar *BS 7608*, junto a dos espectros de carga (monitoreado & teórico) y aplicando la teoría del daño acumulado de Palmgren-Miner.

Adicionalmente, al examinar en condiciones de laboratorio tres componentes fallados - **“Housing”, Barras tensoras y Tornillo**, fue posible determinar que su fractura fue debida a

falla por fatiga. En el “*Housing*”, los agrietamientos iniciaron al interior de su zona baja avanzando hacia el exterior, bajo esfuerzos combinados tensión-flexión. En *barras tensoras*, la fractura fue precedida por agrietamiento y propagación bajo esfuerzos de tensión y en el *tornillo*, la fractura fue generada por esfuerzos combinados tensión-flexión.

El *concepto del mecanismo de falla*, tuvo en cuenta los *antecedentes de falla, análisis por FEM, estimaciones de vida a fatiga, resultados de laboratorio y los parámetros más significativos en cuanto a diseño, fabricación, mantenimiento y operación*; ayudando a establecer la secuencia más probable de eventos que disminuye la vida a fatiga y acelera la fractura en los “*Housing*”.

Finalmente, se logró concluir que el diseño original del “*Housing*” cuenta con una zona particularmente sensible al agrietamiento, ubicada al interior de su zona baja (unión soldada *Brida-“channel”-Cilindro interno*); en donde, la suma de parámetros adversos como: *Tipo de detalle de junta, zona de difícil acceso para inspecciones NDT, operación con barras tensoras fracturadas, frecuencia de inspección NDT no acorde a la nucleación de grieta, junto a políticas de operación y mantenimiento poco estrictas*; acortan significativamente su vida a fatiga, fracturando el “*Housing*” a un ritmo acelerado.

Es por ello que, el *objetivo general* del presente estudio es:

- Realizar el análisis de falla para los “*Housing*” de los camiones Hitachi EH5000 de 320 toneladas, utilizados para transportar material inerte en la mina de carbón a cielo abierto de El Cerrejón y relacionarlo con los resultados obtenidos en el análisis por elementos finitos.

Empleando herramientas analíticas, computacionales, ensayos de laboratorio y estándares para el análisis por fatiga, se cumplirán los cuatro siguientes *objetivos específicos*:

- Realizar una **revisión del historial de fallas y eventos catastróficos** relacionados con los “*Housing*”s de los camiones Hitachi EH5000.
- **Modelar el estado de esfuerzos** que experimentan los “*Housing*” de los camiones Marca Hitachi de referencia EH5000 utilizados para el transporte de material inerte.

- Realizar un **análisis de falla a elementos mecánicos fallados** los cuales hacían parte del “Housing”.
- Buscar **relación y coherencia** entre los resultados obtenidos en el **análisis de falla**, el **análisis por elementos finitos** y la **información recolectada** para detectar las causas raíces de falla y elaborar las recomendaciones respectivas.

Es por ello que, el lector encontrará en el **capítulo uno** una breve descripción de la metodología empleada en un análisis de falla, fundamentos del método de elementos finitos para análisis estructural y una descripción de teorías de fatiga, incluyendo la metodología básica del BS 7608.

En el **capítulo dos**, se presenta información técnica y de diseño del camión, la filosofía de junta de barras tensoras y su efecto en el “Housing”; así como, una descripción de los eventos de falla catastrófica ocurridos en el periodo 2009 – 2011 y el procedimiento de cambio y/o reparación ante fallas.

El **capítulo tres**, describe los resultados de los ensayos de laboratorio para tres elementos fallados *Tramo de “Housing”, Barra tensora y Tornillo*, en los cuales se realizó análisis fractográfico, pruebas de dureza, ensayos de tensión, análisis químico, examen metalográfico, ensayos de dureza, análisis de inclusiones y estimación de tamaño de grano; para finalizar con el concepto de modo de falla para cada elemento.

El **capítulo cuatro**, muestra cómo fue aplicado el análisis por elementos finitos (FEA) y su configuración en el software de elementos finitos. Para la estimación de vida a fatiga, se utilizaron distintos escenarios de carga al recrear el ciclo de operación minero (*Carga - Transporte -Ciclo de volcado -Retorno -Posicionamiento*), junto a *38 combinaciones posibles de barras tensoras fracturadas* y la aplicación de los criterios del estándar BS 7608, centrado en juntas soldadas críticas determinadas por el fabricante.

En el **capítulo cinco**, se realiza una descripción de la secuencia más probable de eventos que causa la falla prematura de los “Housing”.

Debido a que los camiones de la flota 320 han estado sometidos a condiciones de operación y rutinas de mantenimiento no recomendados; al final del documento, en los **capítulos seis y siete** se presenta una serie de conclusiones y recomendaciones orientadas a modificar dichas actividades, permitiendo a la compañía evitar fallas catastróficas del “Housing” a medida que envejece la flota.

1. Marco teórico

A continuación, se describen las metodologías numéricas, analíticas y experimentales implementadas en el análisis del “Housing”. Conceptos básicos de Análisis de Falla, Análisis por Elementos finitos y estimación de falla por fatiga serán presentados.

1.1 Análisis de falla

La falla de un sistema o componente mecánico se puede definir como la **pérdida de capacidad (parcial o total)** de cumplir las funciones para las cuales fue diseñado. La ASM International, define el Análisis de Falla como un “proceso complejo que integra diversas disciplinas técnicas y usa una gran variedad de métodos de observación, inspección y pruebas de laboratorio” (Becker and Shipley, 2002). Tornándose en un proceso iterativo de descubrimiento y reexaminación, requiriendo en algunos casos la consulta de expertos en otras disciplinas; es por ello que, es la única disciplina probada para identificar y determinar las raíces físicas de las fallas.

Técnicas como el **Análisis de Causa Raíz (RCA)** son efectivas en la exploración de otros contribuidores a la falla, tales como el factor humano. Desarrolladas apropiadamente, un análisis de falla y un RCA son pasos críticos en el proceso de resolución de problemas en general, siendo fundamentales en la corrección & prevención de fallas al permitir alcanzar los más altos niveles de calidad, confiabilidad y satisfacción del cliente” (Becker and Shipley, 2002). Es por esto que, un análisis de falla se puede definir como una serie de acciones que permiten “encontrar las causas, establecer responsabilidades y tomar medidas correctivas para prevenir la recurrencia en un futuro” (Hernández and Espejo, 2002).

El análisis sistemático de fallas en equipos revela que el origen de las causas físicas se encuentra en una de las siguientes **categorías fundamentales**:

- Deficiencias de diseño

- Imperfecciones en materiales
- Defectos o deficiencias en fabricación
- Errores de montaje
- Condiciones inapropiadas de servicio

1.1.1 Etapas del análisis de fallas

Como regla general las etapas en un análisis de falla obedecen a una secuencia, sin embargo, esta puede variar dependiendo de la naturaleza de la falla, disponibilidad de evidencia física e información. La secuencia de las etapas no es necesariamente crítica, y no todas las etapas se utilizarán o podrán ser usadas en los análisis de falla. Sin embargo, existen etapas que son comunes en todos análisis de falla exitosos (Becker and Shipley, 2002):

- Recopilación de información
 - i. Recolección de datos base y selección de muestras.
 - ii. Evaluación preliminar de la parte fallada (Inspección visual y conservación de registros).
 - iii. Ensayos no destructivos (líquidos penetrantes, partículas magnéticas, ultrasonido, radiografía, etc.).

- Evaluación del daño y condiciones de falla

Estas etapas difieren dependiendo de la condición de falla evaluada, por ejemplo **-fractura, corrosión o desgaste**. Para el caso de fractura se sugieren los siguientes pasos¹:

- i. Selección, identificación, preservación y limpieza de especímenes críticos. En casos donde se involucren lesiones personales o donde se implique la búsqueda legal de una compensación por parte de otra empresa, se debe tener cuidado en preservar la escena y la evidencia física. La destrucción accidental o deliberada de evidencia puede resultar en el desvío de la responsabilidad legal de una falla a la

¹ Nota: Las condiciones de Corrosión y Desgaste son detalladas en (Becker and Shipley, 2002), p.1571 y p.1916.

- persona o compañía que destruye la evidencia, a pesar de no haber causado la falla original.
- ii. Examen macroscópico y análisis (superficies de fractura, grietas secundarias, y otros fenómenos superficiales).
 - iii. Examen microscópico y análisis de superficies de fractura.
 - iv. Análisis de esfuerzos para determinar el estado actual de esfuerzos del componente fallado.
 - v. Evaluación mediante Mecánica de fractura.
 - vi. Determinación del modo de fractura.
- Condición del material

En investigaciones de fallas se utilizan varias técnicas para caracterizar la condición del material, entre ellas tenemos:

- i. Metalografía o análisis microestructural.
 - ii. Ensayos mecánicos.
 - iii. Análisis químico (Abultamiento, local, productos de corrosión superficial, y depósitos o recubrimientos).
 - iv. Ensayos bajo condiciones simuladas de servicio.
- Informe final

Consiste en sintetizar toda la evidencia, interpretar resultados, formular conclusiones y recomendaciones de seguimiento para prevenir fallas futuras, mediante la presentación de un informe escrito. Este debe hacer énfasis en la determinación de los mecanismos de falla más probables señalando su posible causa raíz, la cual generalmente está asociada con -el uso inapropiado, prácticas de mantenimiento incorrectas, propiedades inadecuadas del material, errores de diseño y manufactura del producto.

1.2 Metodología de elementos finitos (FEM)

Generalmente el comportamiento de elementos mecánicos y estructurales en aplicaciones ingenieriles y ciencias aplicadas, puede ser descrito mediante un conjunto de ecuaciones diferenciales parciales e integrales matemáticas, válidas para un cierto dominio (continuo o elemento evaluado) de naturaleza infinitesimal y caracterizado por "tener una infinidad

de grados de libertad" (Hurtado, 2002, p. 2). Los métodos analíticos empleados para buscar una solución exacta son aplicados satisfactoriamente en geometrías y condiciones sencillas; sin embargo, en aplicaciones complejas puede ser una ardua tarea, tornándose impráctica e incluso imposible de resolver.

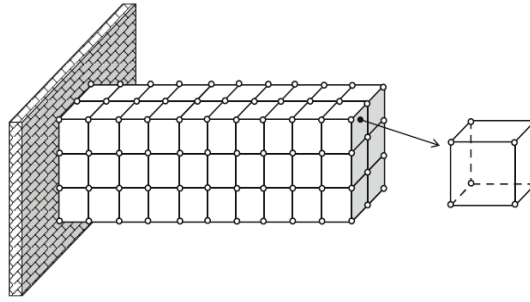
Como alternativa de solución exitosa se optó por visualizar al dominio como el ensamble de un número finito de partículas más pequeñas (elementos) que poseen un número finito de grados de libertad y no como un dominio de naturaleza infinitesimal. Esta discretización espacial del dominio requiere de métodos numéricos como alternativas de solución a los sistemas de ecuaciones diferenciales parciales. Su alcance depende del fenómeno físico evaluado y presenta limitaciones de orden teórico-conceptual y eficiencia computacional, los cuales actualmente son tema de desarrollo a nivel académico e industrial. Entre las técnicas de discretización espacial más conocidos se encuentran:

- i. Método de las Diferencias finitas (FDM): Orientado al análisis de fluidos
- ii. Método de Volúmenes de control finitos (FVM): Orientado al análisis de fluidos
- iii. Método de Elementos de borde (BEM): Orientado al análisis de sólidos
- iv. Método de Elementos finitos (FEM): Orientado al análisis de sólidos

En el análisis de sistemas estructurales y elementos mecánicos, el FEM es la metodología dominante, ya que, para este tipo de aplicación los demás métodos son poco prácticos o están orientados al análisis de fluidos. Respecto a la discretización espacial, autores como (Neto et al., 2015, p. 44), afirman que "El método de los elementos finitos es el ejemplo típico de aplicación exitosa dando lugar a un conjunto de ecuaciones algebraicas de buen comportamiento si el dominio ha sido dividido adecuadamente".

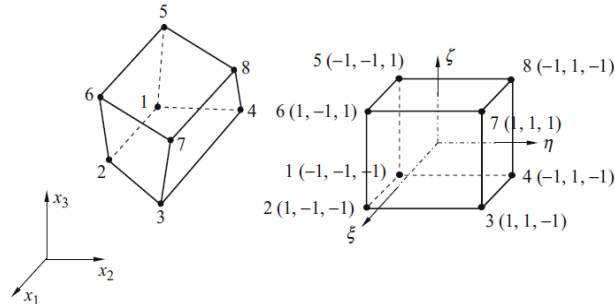
En FEM los elementos se conectan mediante puntos específicos (nodos), y es allí donde las propiedades y el comportamiento del fenómeno físico son determinados mediante técnicas de aproximación numérica (Figura 1.1 y Figura 1.2); ya que, "en los modelos sólidos, los desplazamientos en cada elemento están directamente relacionados con los desplazamientos nodales, y los desplazamientos nodales se relacionan a su vez con las deformaciones y los esfuerzos en los elementos" (Roa & Garzón, 2002, cap. 1, p. 2). Por este motivo, al calcular todos los desplazamientos se logra calcular el valor de todos los elementos por interpolación.

Figura 1.1: Discretización de sólido tridimensional.



Nota. Estructura tridimensional dividida en elementos hexaédricos de ocho nodos; Adaptado de “*Engineering computation of structures: The finite element method*” (p. 241); por Neto et al., 2015, Springer International Publishing.

Figura 1.2: Detalle ubicación de nodos en elemento hexaédrico.



Nota. Elemento hexaédrico de ocho nodos y sistema coordenado; Recuperado de “*Engineering computation of structures: The finite element method*” (p. 242); por Neto et al., 2015, Springer International Publishing.

1.2.1 Análisis por FEM

Inicialmente se debe tener claro el alcance del usuario respecto al uso de la metodología de elementos finitos; ya que, si su objetivo es el **desarrollo de código** entonces debe desarrollar un conocimiento profundo de su trasfondo matemático. Sin embargo, si el objetivo es su **aplicación** en un caso particular, entonces debe tener una comprensión básica de los conceptos teóricos fundamentales, capacidades y limitaciones del software de elementos finitos.

De forma general, la metodología estándar del FEM consta de tres partes principales: “**Discretización del dominio, aproximación del desplazamiento y ecuaciones de elemento finito**” (Neto et al., 2015,p. 46). La formulación de las ecuaciones para elementos finitos, están basadas en la aplicación del **principio variacional de Hamilton** para cada elemento finito, el cual tiene en cuenta “la energía cinética total, la energía potencial de la estructura flexible y el potencial de fuerzas aplicadas que actúan en el

cuerpo" (Neto et al., 2015, p. 44). Como regla básica, la ecuación general de **un elemento finito** debe estar escrita en términos del sistema de coordenadas globales, donde los vectores y matrices son dependientes de las **funciones de forma**, usadas para estimar los desplazamientos del elemento (Ver Ecuación (1.1)).

$$m\ddot{u} + ku = f \quad (1.1)$$

Donde:

m = matriz de masa

k = matriz de rigidez

\ddot{u} = vector de aceleración elástico

u = vector de desplazamiento

f = vector de fuerza total (actuante en los nodos del elemento finito)

Recordando que, el **dominio total** es la suma de la discretización en elementos y definiendo **ensamble** como el proceso de sumar las contribuciones de todos los elementos conectados en un nodo, el **sistema de ecuaciones globales** se construye mediante el ensamble de todas las ecuaciones de cada elemento finito (Ver Ecuación (1.2)).

$$M\ddot{U} + KU = F \quad (1.2)$$

Donde:

M = matriz de masa global

K = matriz de rigidez global

\ddot{U} = vector de aceleraciones elásticas globales

U = vector de desplazamientos globales

F = vector que agrupa todas las fuerzas nodales equivalentes

Por definición, un análisis estático está gobernado por fuerzas externas invariables en el tiempo; por lo tanto, el vector de aceleraciones elásticas es nulo y el **sistema de ecuaciones globales** toma su forma más conocida (Ver Ecuación (1.3)).

$$KU = F \quad (1.3)$$

Donde:

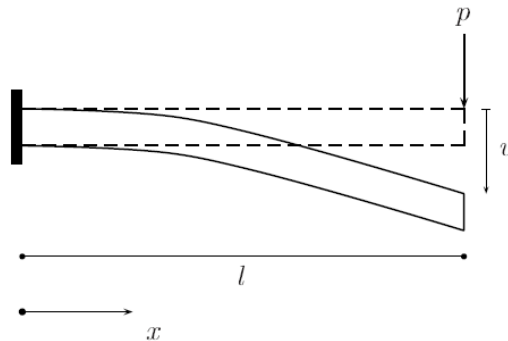
K = matriz de rigidez global

$U =$ vector de desplazamientos globales

$F =$ vector que agrupa todas las fuerzas nodales equivalentes

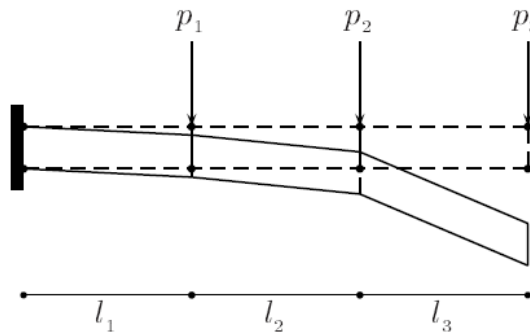
Esta ecuación muestra la relación entre los desplazamientos y las fuerzas en un modelo discreto. Por ejemplo, para el caso de una viga en voladizo con carga en un extremo (Figura 1.3), el sistema puede ser discretizado mediante la unión de tres sólidos 2D y generación de ocho nodos (**Figura 1.4**). En este ejemplo, los vectores de fuerzas y desplazamientos están representados mediante la siguiente expresión (ver Ecuación (1.4)). Esta discretización es el primer paso del FEM, en el cual se busca establecer una matriz de rigidez global (K) adecuada para cada caso.

Figura 1.3: Representación en **continuo** de viga empotrada.



Nota. Representación habitual de viga compuesta por elementos infinitesimales (continuo). Adaptado de *Introducción al análisis estructural por elementos finitos, 1ra. ed.* (p. 1, cap. 1), por Hurtado J., 2002, Universidad Nacional de Colombia.

Figura 1.4: Representación en **elementos finitos** de viga empotrada.



Nota. La discretización muestra tres elementos 2D empotrados mediante la restricción de movimiento de los dos nodos de la izquierda, nótese la generación de cargas equivalentes que producen deflexión en la viga. Adaptado de *Introducción al análisis estructural por elementos finitos, 1ra. ed.* (p. 3, cap. 1), por Hurtado J., 2002, Universidad Nacional de Colombia.

$$KU = F \rightarrow F = \begin{pmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \end{pmatrix}; \quad U = \begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{pmatrix}; \quad K = \begin{pmatrix} K_1 & 0 & 0 \\ 0 & K_2 & 0 \\ 0 & 0 & K_3 \end{pmatrix} \quad (1.4)$$

Donde:

K = matriz de rigidez global

K_1, K_2, K_3 = matrices de rigidez local

F = vector que agrupa todas las fuerzas nodales equivalentes

p_1, p_2, p_3 = cargas equivalentes

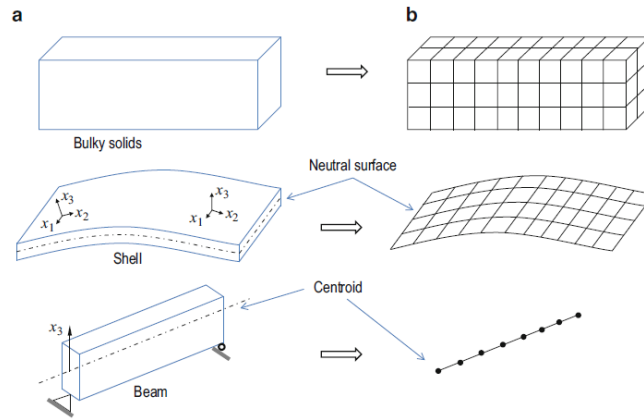
U = vector de desplazamientos globales

u_1, u_2, u_3 = desplazamientos verticales

La solución de este tipo de ecuaciones puede ser obtenida mediante numerosos métodos y algoritmos. Sin embargo, existen básicamente dos tipos: **Técnicas de solución directa e iterativas** con sus respectivas ventajas y desventajas. A continuación se listan los pasos básicos para el desarrollo de un análisis mediante FEM (Roa & Garzón, 2002, cap. 1, p. 2), junto a comentarios de aplicación respecto al análisis del "Housing":

- i. **Desarrollo de la geometría:** Se crea mediante software de modelamiento CAD con *sólidos tridimensionales*, posteriormente se importa, corrige y simplifica en el software de elementos finitos mediante *sólidos de superficie*.
- ii. **Definición del tipo de elemento y propiedades del material:** Los sólidos tridimensionales pueden ser discretizados mediante **elementos 3D** cuando se utiliza todo el volumen del sólido, **elementos 2D** cuando se utiliza su *superficie neutral* y **elementos 1D** cuando se utiliza su *eje neutral* (Ver **Figura 1.5**). En nuestro caso el "Housing" se modeló mediante *sólidos superficiales* y sus propiedades mecánicas fueron extraídas mediante ensayos de laboratorio.
- iii. **Generación de malla:** El modelo se discretizó mediante elementos tipo Shell.
- iv. **Condiciones de frontera:** Se aplican restricciones de movimiento a ciertos nodos, superficies o sólidos; junto a la aplicación de cargas externas.
- v. **Generar una solución:** La matriz de rigidez es ensamblada y solucionada computacionalmente mediante el software de elementos finitos.
- vi. **Post-procesamiento:** Los resultados obtenidos se visualizan a través de gráficas o dibujos; por ejemplo, se puede realizar una superposición de gráficas para analizar el efecto que diversas condiciones de servicio generan en una misma zona.

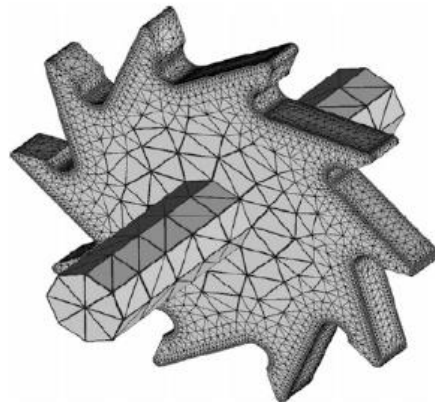
Figura 1.5: Discretización de un sólido tridimensional según su aplicación.



Nota. Los elementos finitos 3D, 2D y 1D se seleccionan de acuerdo a su aplicación; Recuperado de “*Engineering computation of structures: The finite element method*” (p. 266); por Neto et al., 2015, Springer International Publishing.

- vii. **Refinar la malla:** Debido a que el FEM es un método aproximado, generalmente la precisión de la solución aumenta a medida que se incrementa la cantidad de elementos (**Figura 1.6**). Por lo tanto, es recomendable siempre incrementar el número de elementos en zonas de interés y observar la variación en los resultados.
- viii. **Interpretación de resultados:** Este paso es crítico para lograr la aplicación de los resultados en la solución de los problemas reales, o para identificar posibles errores. Usualmente, los resultados son exportados y gestionados por hojas de cálculo o software de terceros, permitiendo afinar las estimaciones según la normatividad o código rigente.

Figura 1.6: Diferencia en densidad de malla para la discretización de un piñón.



Nota. Este tipo de malla muestra que existe un interés particular en los dientes del piñón (mayor densidad) a diferencia de los resultados en el eje (menor densidad); Recuperado de “*Engineering computation of structures: The finite element method*” (p. 267); por Neto et al., 2015, Springer International Publishing.

1.3 Fundamentos de fatiga

El fenómeno que conocemos actualmente como fatiga fue "objeto de estudio por parte de investigadores europeos a principios del siglo XIX, quienes notaron que componentes de puentes y rieles ferroviarios se agrietaban cuando eran sometidos a cargas repetidas" (Lampman, 1996, p. 10). A mediados de aquel siglo al ingeniero alemán August Wöhler (1819-1914) especializado en el sector ferroviario, se le encomendó investigar las causas de la fractura en ejes ferroviarios (**Figura 1.7**), tarea que le tomó alrededor de dos décadas en desarrollar. Como resultado de sus investigaciones "propuso un método en el cual la falla en componentes que experimentan cargas repetidas podría ser mitigada, y en algunos casos eliminada. Su trabajo permitió obtener el modelo de prueba de componentes para diseño a fatiga y el diagrama esfuerzo-vida" (Lampman, 1996, p. 10).

Figura 1.7: Fractura por fatiga en eje ferroviario.



Nota. Descarrilamiento de un vagón-tanque de transporte de ácido, debido a la fractura por fatiga de uno de sus ejes evidenciando la importancia de la detección temprana de grietas. Recuperado de *Acid train wagon derails after axle failure due to undetected fatigue cracking* [Fotografía], por Australian Transport Safety Bureau (ATSB), 2019, ASTB (<https://www.atsb.gov.au/>).

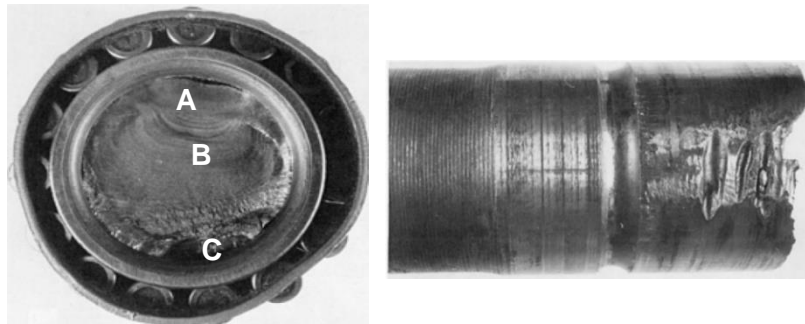
Teniendo en cuenta que el fenómeno de fatiga está relacionado con esfuerzos fluctuantes, repetitivos o variables en el tiempo, generalmente se evidencia que los esfuerzos máximos se encuentran a un nivel mucho más bajo que el esfuerzo último del material, y con bastante frecuencia incluso por debajo de su esfuerzo de fluencia. Respecto a su participación en el total de fallas en la industria, varios autores afirman que: "El 80% de las roturas de piezas de máquina son debidas a fatiga" (Faires, 1970, p. 129). "La falla por fatiga es probablemente el caso más común de falla en los elementos de máquinas" (Aaron D. et al., 1987, p. 321). "La mayoría de las fallas en máquinas son debidas a cargas variables en el tiempo en lugar de cargas estáticas; por lo tanto, un diseño es considerado

inseguro si se basa únicamente en teorías de falla estática ya que las cargas actuantes pueden ser dinámicas” (Norton, 2006, p. 299).

En las rutinas de mantenimiento es común encontrar reportes de inspección NDT que revelan la presencia de **anomalías** en elementos mecánicos y estructurales, generalmente las compañías son conscientes de este hecho y permiten su presencia en operación; sin embargo, a medida que avanzan los ciclos de operación algunas anomalías crecen gradualmente hasta desarrollar *dimensiones inaceptables -defectos-* de acuerdo al criterio técnico de la compañía (generalmente regidos por normas internacionales), los cuales deben ser reparados según su nivel de criticidad. Es por ello que, el desconocimiento del periodo de nucleación y crecimiento de grietas junto a un esquema desincronizado de inspecciones NDT posibilitan las fallas catastróficas.

Su gran impacto negativo en términos de fallas y un desarrollo teórico-práctico de más de ciento cincuenta años a la fecha, hacen del análisis de fatiga un pilar fundamental en el diseño de máquinas. Por lo tanto, el analista debe tener claridad conceptual sobre “la **nucleación de grieta, inicio de propagación, propagación sub-crítica (bajo cargas sostenidas y cíclicas)**, y una comprensión de parámetros de inestabilidad en los materiales como la **tenacidad de fractura (K_{Ic})**” (Lampman, 1996, p.11-12) (**Figura 1.8**). Adicionalmente, las estimaciones del proceso de propagación de grieta dependerán de su modelo teórico: Mecánica de fractura lineal elástica (LEFM), elasto-plástica o completamente plástica, hasta alcanzar la fractura final.

Figura 1.8: Morfología superficial de falla por fatiga en eje automotriz.



Nota. Fractura por fatiga causada por la extracción inapropiada de un rodamiento. El inicio de grieta fue favorecido por un corte con antorcha (zona A), las marcas de playa evidencian propagación de grieta por fatiga (zona B), el área de fractura relativamente pequeña revela cargas normales en servicio (Zona C). Adaptado y modificado de *Fracture surface of axle shaft*. [Fotografía], por ASM Handbook Volume 12 – Fractography, 1992, p. 480, fig. 191.

1.3.1 Metodologías para el análisis de fatiga

A principios del siglo XX, a medida que se incrementó la demanda de bienes y servicios, se incrementó la complejidad de las máquinas y las metodologías de diseño fueron evolucionando (principalmente por ensayo y error), mejorando su comprensión en ingeniería de materiales e incorporándolas gradualmente al diseño de máquinas. Actualmente existen cuatro metodologías generalmente aceptadas en el diseño de elementos de máquinas por fatiga (Lampman, 1996, p. 10)²:

- **Metodología Esfuerzo-Vida:** Aplicación en fatiga de alto ciclaje (HFC).
- **Metodología Deformación-Vida:** Aplicación en fatiga de bajo ciclaje (LFC).
- **Metodología Tolerancia-Daño:** Aplicación en fatiga de bajo ciclaje (LFC).
- **Modelo de pruebas del componente:** El más preciso; sin embargo, es el más costoso en términos de tiempo y dinero.

Las metodologías de **Esfuerzo-Vida** y **Deformación-Vida** permiten estimar el periodo de nucleación de una grieta, estableciendo la vida finita o infinita del componente³, allí se asume un material ideal libre de defectos y una deformación elástica o plástica respectivamente. La metodología de **Tolerancia al daño** asume la pre-existencia de una discontinuidad (o múltiples) tipo grieta, la cual posee un tamaño indetectable de acuerdo al control de calidad en fabrica y técnicas de inspección NDT en campo, permitiendo estimar el tiempo que tarda una grieta en evolucionar hasta alcanzar un tamaño crítico a partir de su tamaño inicial de nucleación. Se seleccionó la metodología **Esfuerzo-Vida** implementada por el estándar británico BS 7608:2014 (*Guide to fatigue design and assessment of Steel products*) para la estimación de vida a fatiga en soldaduras, estándar ampliamente utilizado en la mayoría de ámbitos industriales. A continuación, se presentan definiciones básicas y generalidades.

² Existen discrepancias respecto a la clasificación de *fatiga de bajo ciclaje* (LFC) y *fatiga de alto ciclaje* (HFC); por ejemplo, *ASM* denomina (LFC) para $10^2 \leq N < 10^6$ y (HFC) para $N > 10^6$; mientras que, autores como *Norton y Shigley* denominan (LFC) para $10^0 \leq N < 10^3$ y (HFC) para $N \geq 10^3$, siendo esta clasificación la utilizada en este documento.

³ Se asume Vida finita para $N < 10^6$ y Vida infinita para $N \geq 10^6$, según (Budynas-Nisbett, 2006, p. 269).

1.3.2 Metodología Esfuerzo-Vida (BS 7608:2014)

Este estándar provee métodos que permiten la evaluación de vida a fatiga en componentes fabricados a partir de acero para todas las áreas de aplicación industrial. Abarca los *metales forjados, soldaduras en áreas completamente maquinadas de fundición de acero, aleaciones ferríticas, aceros de baja aleación, aceros resistentes a la intemperie sin protección*, entre otros; siempre que posean *resistencias de fluencia en el rango 200-960MPa y resistencia última en el rango 360-1200MPa* para materiales con espesores mayores o iguales a 3mm, operando a temperaturas inferiores al rango de “creep”. Las generalidades de la metodología son:

- i. Establecer la **vida requerida** del producto por diseño
- ii. Establecer un estimado conservador de la **carga esperada** en la vida del producto
- iii. Estimar el **historial de esfuerzos** resultante en el detalle considerado
- iv. Reducir el historial de esfuerzos a un número equivalente de ciclos con distintos rangos de esfuerzo utilizando una técnica de **conteo de ciclos**.
- v. **Clasificar el detalle** conforme al estándar.
- vi. Definir la **curva de diseño básica S_r-N**, de acuerdo a su clasificación anterior (e).
- vii. **Calcular la vida a fatiga** resultante, basado en la comparación del rango de esfuerzo máximo aplicado y el **límite de fatiga de amplitud constante (CAFL)**, o un cálculo de daño acumulado.
- viii. Si todos los rangos de esfuerzos son menores a CAFL, se puede asumir que el detalle posee una vida a fatiga que excede la vida de diseño especificada inicialmente (a).
- ix. Si alguno de los rangos de esfuerzo aplicados excede el CAFL relevante, y la vida calculada mediante el espectro completo de esfuerzos por diseño y el método de daño acumulado, excede la vida de diseño especificada (a), **el requerimiento para vida segura** es conocido; y
- x. Si el procedimiento en (i) resulta en una vida calculada menor que la especificada por diseño en (a), el requerimiento para vida segura por diseño no es conocida. Por lo que, las siguientes medidas deben ser tomadas:
 - a. **Ajustar el detalle** del diseño hasta que una curva S_r-N más grande pueda ser utilizada.
 - b. Si (1) no es adecuado, **incremente la sección transversal** de la zona sensible a la iniciación de grietas para reducir el rango de esfuerzos.

- c. Si las medidas (1) y (2) resultan en consecuencias económicas severas, se debe utilizar una aproximación de **tolerancia al daño** incluyendo NDT periódicos para la detección de agrietamiento por fatiga en servicio, la cual puede ser empleada para **asegurar que la probabilidad general de falla sin advertencia durante la vida de diseño, no es menor que la vida segura por diseño.**

Las **fuentes importantes de carga cíclica** que deben ser tenidas en cuenta incluyen:

- i. Cargas fluctuantes
- ii. Fuerzas de aceleración en estructuras móviles
- iii. Cambios de presión
- iv. Fluctuaciones de temperatura
- v. Vibraciones mecánicas
- vi. Cargas medioambientales (viento, corrientes y ondas, especialmente cuando son inducidas por desprendimientos de vórtice)

Si bien las cargas asumidas en diseño por fatiga se hallan en estándares, handbooks o por medios analíticos; cuando no se dispone de tal información el estándar recomienda realizar un monitoreo continuo de cargas y/o deformaciones, o en su defecto asumir *cargas esperadas en servicio*. Adicionalmente se debe considerar que, en placas con bordes cortados o detalles soldados, el agrietamiento por fatiga puede iniciar en las siguientes zonas:

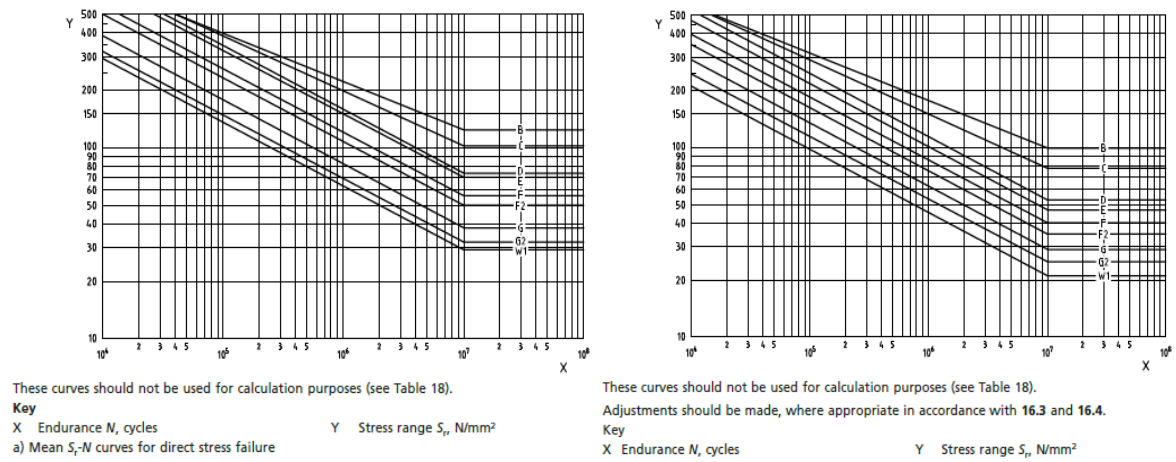
- i. Cualquier punto de la esquina o superficie de la placa
- ii. En **metal base** de ambas partes unidas, **adyacentes** a:
 - a. El final de la soldadura
 - b. El pie de soldadura
 - c. Un cambio de dirección de la soldadura
- iii. En **metal soldado** iniciando desde
 - d. La raíz de soldadura
 - e. La superficie de soldadura
 - f. Un defecto interno

Por otro lado, la **confiabilidad** de los productos diseñados por fatiga depende de los siguientes factores:

- i. Selección de un nivel seguro de carga por fatiga
- ii. Un correcto cálculo del rango de esfuerzo
- iii. Una clasificación correcta del detalle
- iv. Aplicación de controles apropiados durante su construcción
- v. Ensayos de fatiga

Los datos de diseño por fatiga se presentan en forma de ecuaciones o curvas, cada una está relacionada con dos parámetros principales, **Probabilidad de falla Nominal** y **Desviación estándar**, seleccionados por el analista; así por ejemplo, las líneas de **curvas media S-N** representan el comportamiento a falla de un determinado detalle de junta y clasificación con probabilidad de falla 50% y cero desviación estándar, o, las **curvas de diseño básico estándar S-N** que representan un 2.3% de probabilidad de falla (o 97.7% de probabilidad de supervivencia) y dos desviaciones estándar bajo la línea *media*, para datos experimentales relevantes (**Figura 1.9**). De esta forma, el código permite adoptar distintas probabilidades de falla según a criterio del analista (**Tabla 1-1**).

Figura 1.9: Curvas media (Sr-N) y Curvas de diseño básico estándar (Sr-N).



Nota. Detalles de Curvas medias y Curvas básicas de diseño para diversas clasificaciones de junta (B, C, D, E, F, F2, G, G2, W1); Recuperado de *“BS 7608:2014”* (p. 54 y 56); por The British Standards Institution, 2014, BSI Standards Limited.

Tabla 1-1: Probabilidad nominal de falla y Desviación estándar.

Nominal probability of failure %	<i>d</i>
50	0 ^{A)}
31	0.5
16	1.0
2.3	2.0 ^{B)}
0.14	3.0

^{A)} Mean-line curve.
^{B)} The standard design curve.

Nota. Factores de probabilidad nominal; Recuperado de "BS 7608:2014" (p. 60); por The British Standards Institution, 2014, BSI Standards Limited.

La evaluación de diseño por fatiga consiste en catalogar la unión de interés respecto a la *clasificación de detalles de uniones permanentes y no permanentes* que suministra el estándar. La cual debe satisfacer los siguientes criterios:

- i. **Tipo de esfuerzo** aplicado en el detalle (esfuerzo Nominal o Hot-Spot)
- ii. Arreglo **geométrico** y proporciones del detalle
- iii. **Dirección del esfuerzo** fluctuante relativo al detalle
- iv. **Ubicación** de la posible iniciación de grieta por fatiga en el detalle
- v. Método de **fabricación e inspección**

Aunque el estándar determina inicialmente la máxima resistencia de la unión seleccionada, asignando una curva S-N en formato alfanumérico *B, C, D, E, F, F2, G, G2, W1, X, S₁, S₂*, dicho juicio variará a criterio del evaluador (**Tabla 1-2**). Para cada clasificación, la relación entre el **rango de esfuerzos aplicado (S_r)** y el **número de ciclos a falla (N)** en condición de carga de amplitud constante, es representada por las siguientes expresiones (ver Ecuaciones (1.5) a (1.7)).

$$\log N = \log C_o - d SD - m \log S_r \quad (1.5)$$

Donde:

N = Número de ciclos a falla bajo carga de amplitud constante

C_o = Parámetro que define las relaciones de línea media *S_r - N*

d = Número de desviaciones estándar de **log N** respecto a la curva media

SD = Desviación estándar de **log N**

m = Pendiente inversa de la curva *S_r - N*

$S_r =$ Rango de esfuerzo en un ciclo (MPa)

Sin embargo, al tener en cuenta diversas desviaciones estándar (ver Ecuación (1.6)).

$$\log C_d = \log C_o - d SD \quad (1.6)$$

Donde:

$C_d =$ Parámetro que define las relaciones S_r
 – N para "d" desviaciones estándar de $\log N$ desde la línea media

Podemos reescribir la relación de la siguiente forma (ver Ecuación (1.7)):

$$S_r^m N = C_d \quad (1.7)$$

Cuando se realizan estimaciones de vida a fatiga con **ciclos de niveles de esfuerzo bajos y carga de amplitud variable**, dos correcciones deben ser tenidas en cuenta:

- i. Para rangos de esfuerzo menores al **rango de esfuerzo en el punto transición de pendiente** (S_{ov}) ubicado a 5×10^7 ciclos, usualmente se realiza un cambio de pendiente a: $m = (m + 2)$, y se utiliza la siguiente expresión (ver Ecuación (1.8)).

$$\frac{n}{N} = \frac{n}{(5 \times 10^7)} \left(\frac{S_r}{S_{ov}} \right)^{m+2} \quad (1.8)$$

- ii. Para rangos de esfuerzo mayores o iguales a (S_{ov}) se utiliza la siguiente expresión (ver Ecuación (1.9)).

$$\frac{n}{N} = \frac{n}{(5 \times 10^7)} \left(\frac{S_r}{S_{ov}} \right)^m \quad (1.9)$$

La magnitud y naturaleza de los esfuerzos que pueden causar nucleación y propagación de grietas se ven seriamente afectados por la presencia de **esfuerzos residuales, defectos en soldaduras & metal base adyacente, defectos superficiales, y cualquier otro intensificador de esfuerzos** que interfiera con el flujo de esfuerzo, por lo que deberán ser incluidos en la estimación de esfuerzos y clasificación del detalle.

Tabla 1-2: Detalle de curvas básicas S/N.

Class	C_o	$\log_{10} C_o$	m	Standard deviation of $\log_{10} N$, SD	C_2	S_{oc} (N=10 ⁷ cycles) N/mm ²	S_{ov} (N=5x10 ⁷ cycles) N/mm ²
B	2.343 × 10 ¹⁵	15.3697	4.0	0.1821	1.01 × 10 ¹⁵	100	67
C	1.082 × 10 ¹⁴	14.0342	3.5	0.2041	4.23 × 10 ¹³	78	50
D	3.988 × 10 ¹²	12.6007	3.0	0.2095	1.52 × 10 ¹²	53	31
E	3.289 × 10 ¹²	12.5169	3.0	0.2509	1.04 × 10 ¹²	47	28
F	1.726 × 10 ¹²	12.2370	3.0	0.2183	6.33 × 10 ¹¹	40	23
F2	1.231 × 10 ¹²	12.0900	3.0	0.2279	4.32 × 10 ¹¹	35	21
G	5.656 × 10 ¹¹	11.7525	3.0	0.1793	2.50 × 10 ¹¹	29	17
G2	3.907 × 10 ¹¹	11.5918	3.0	0.1952	1.48 × 10 ¹¹	25	14
W1	2.500 × 10 ¹¹	11.3979	3.0	0.2140	9.33 × 10 ¹⁰	21	12
X	9.298 × 10 ¹¹	11.9684	3.0	0.2134	3.51 × 10 ¹¹	33	19
S ₁	5.902 × 10 ¹⁶	16.7710	5.0	0.2350	2.00 × 10 ¹⁶	46 (at 10 ⁸ cycles) ^{B)}	46 (at 10 ⁸ cycles) ^{B)}
S ₂	3.949 × 10 ¹⁶	16.5965	5.0	0.3900	6.55 × 10 ¹⁵	37 (at 10 ⁸ cycles) ^{B)}	37 (at 10 ⁸ cycles) ^{B)}
TJ	8.750 × 10 ¹²	12.942	3.0	0.2330	3.02 × 10 ¹²	67 ^{A)}	39 ^{A)}

For example the TJ curve is $\log N = 12.942 - 0.233d - 3\log S$,

^{A)} Idealized hot-spot stress.

^{B)} Curve extrapolated to N=10⁸ cycles without slope change.

NOTE The bold figures are to be taken as exact and definitive; figures that are not bold are calculated exactly from the exact definitive figures and then rounded to the displayed number of significant figures.

Nota. Detalle de curvas básicas S-N para todas las clasificaciones de junta (B, C, D, E, F, F2, G, G2, W1, X, S1, S2, TJ); Recuperado de "BS 7608:2014" (p. 59); por The British Standards Institution, 2014, BSI Standards Limited.

Como se mencionó, las estimaciones de vida a fatiga representadas por curvas S_r-N cuentan con el efecto implícito del concentrador de esfuerzos en pie de soldadura para los dos tipos de esfuerzo –“**Hot spot stress & Nominal stress**”; sin embargo, existen factores adicionales que disminuyen sustancialmente la vida a fatiga, como el efecto del **desalineamiento en juntas soldadas** (k_m) y el efecto del **espesor & flexión del material** (k_{tb}). El primer factor se encuentra tabulado en BS 7608 (tabla 14; p. 41) y depende de la clasificación de la junta, el segundo describe la relación entre **espesor & flexión del material**, dado que *la resistencia disminuye con el incremento del espesor, y aumenta respecto al nivel de flexión a través del espesor*, este efecto potencialmente perjudicial por incremento del espesor, pero benéfico desde el punto de vista de la flexión aplicada, es representado por la siguiente expresión (ver Ecuación (1.10)).

$$S = k_{tb} S_B \quad (1.10)$$

Donde, para $4 \leq t \leq 25\text{mm}$:

$$k_{tb} = \left[1 + \Omega^{1,4} \left\{ \left(\frac{t_B}{t} \right)^b - 1 \right\} \right] \times [1 + 0,18\Omega^{1,4}]$$

$S_B =$ Resistencia a fatiga obtenida mediante las curvas $S_r - N$ básicas (MPa)

$$\Omega = \text{Grado de flexión} = \left(\frac{\Delta\sigma_b}{\Delta\sigma_m + \Delta\sigma_b} \right)$$

$\Delta\sigma_b =$ Rango de esfuerzo de flexión aplicados

$\Delta\sigma_m =$ Rango de esfuerzo de membrana aplicados

$t_B =$ Espesor relevante a las curvas $S_r - N$ básicas (mm)

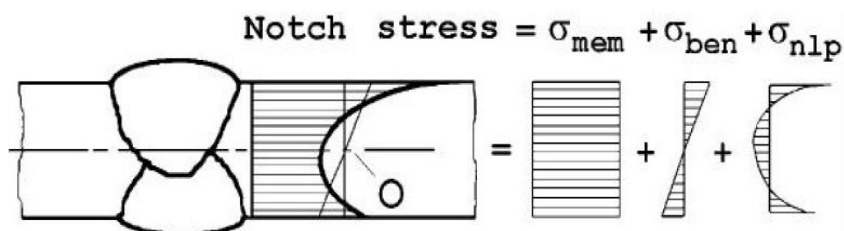
$t =$ Espesor de lámina (mm)

$b =$ Exponente de corrección por espesor y flexión (0,25 o 0,2)

1.3.3 Generalidades metodológicas para evaluación de soldaduras por fatiga

La resistencia a fatiga en uniones soldadas, detalles y discontinuidades estructurales se basa en distintos parámetros, definiciones de esfuerzo y metodologías. Partiendo desde el esfuerzo lineal elástico de campo amplio (esfuerzo nominal), pasando por los esfuerzos localizados que excluyen las no-linealidades en pie de soldadura (esfuerzo “Hot-spot”), Hasta llegar al esfuerzo local que incluye las no-linealidades (esfuerzo efectivo de entalla), entre los más utilizados. De acuerdo a *IW*, la distribución de esfuerzos a través del espesor de una placa cercana al pie de soldadura puede ser dividido en tres componentes básicos, el primero es el **esfuerzo de membrana**, el cual es un esfuerzo promedio constante a través del espesor de la placa. el segundo es el **esfuerzo de flexión**, el cual varía linealmente a través del espesor de la placa y el tercero es el **pico de esfuerzo no lineal**, quien es generado por intensificadores de esfuerzo (tipo entallas) como el generado en pie de soldadura (**Figura 1.10**).

Figura 1.10: Subdivisión de esfuerzo no lineal en componentes.



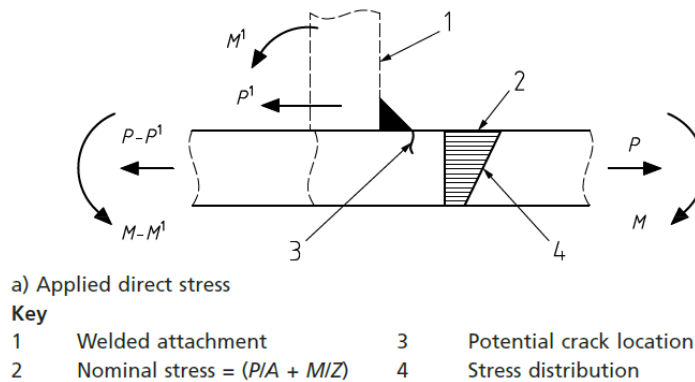
Nota. Componentes en una distribución no lineal de esfuerzos en zona cercana a unión soldada (esfuerzo de membrana, flexión, no-lineal); Recuperado de “*Recommendations for Fatigue Design of Welded Joints and Components*” (fig. 2.3, p. 14); por A.F. Hobbacher, Springer.

En la mayoría de casos *no se realiza un ajuste por esfuerzo medio*, basado en la asunción de la existencia de grandes tensiones residuales cercanas al esfuerzo de fluencia en zonas cercanas al cordón de soldadura, el cual disminuye gradualmente con respecto a la aplicación de carga cíclica debido al flujo plástico (Dowling, 1999:460).

1.3.4 Metodología de esfuerzo nominal

La mayoría de las evaluaciones de resistencia a fatiga en estructuras soldadas están basadas en esfuerzo nominal, definido como un esfuerzo que no tiene en cuenta el incremento local de esfuerzos debido a discontinuidades estructurales ni al perfil local de soldadura (**Figura 1.11**). Generalmente, el esfuerzo nominal en cualquier ubicación se define como la suma del esfuerzo de membrana y el esfuerzo flector (ver Ecuación (1.11)).

Figura 1.11: Distribución de esfuerzo nominal en metal base.



Nota. Componentes de esfuerzo nominal en metal base cercana a unión soldada, compuesto por esfuerzo de membrana y esfuerzo por flexión; Recuperado de "BS 7608:2014" (fig. 2a, p. 43); por The British Standards Institution, 2014, BSI Standards Limited.

Esfuerzo nominal = Esfuerzo membrana + Esfuerzo flexión

$$\text{Esfuerzo nominal} = \frac{F}{A} + \frac{Mc}{I} \quad (1.11)$$

Donde:

F = Fuerza de tracción (N)

A = Área transversal (m^2)

M = Momento flector (Nm)

c = Distancia desde el eje neutro (m)

I = Momento de inercia (m^4)

Generalmente, la metodología del esfuerzo nominal es la más fácil de aplicar, requiriendo solo la determinación de un esfuerzo simplificado a través del espesor del material en geometrías simples; ya que, la **clasificación de los detalles** y las **curvas S-N** incluidas en el estándar han tenido en cuenta los concentradores de esfuerzo inherentes al detalle geométrico como la forma de la soldadura y esfuerzos residuales ya que son extraídos de ensayos de fatiga reales; no obstante, factores de influencia severos tales como el desalineamiento, tolerancias de fabricación, flexión en garganta de soldadura, etc. han sido tomados en cuenta implícitamente hasta cierto punto (Fricke, 2013); por lo que, la metodología debe ser aplicada solo a los casos especificados y dentro de los límites definidos en el estándar. Por lo tanto, los factores que no se encuentren especificados, deben ser estimados mediante un análisis específico o haciendo uso de factores de concentración de esfuerzo predefinidos (Fricke, 2013). Para estimar el esfuerzo nominal en juntas típicas y geometrías simples, se han realizado análisis paramétricos donde se recomienda utilizar determinadas ecuaciones para cada caso; sin embargo, en geometrías complejas el esfuerzo nominal usualmente es determinado mediante extrapolación de resultados a ciertas distancias de la unión soldada utilizando el **método de los elementos finitos**.

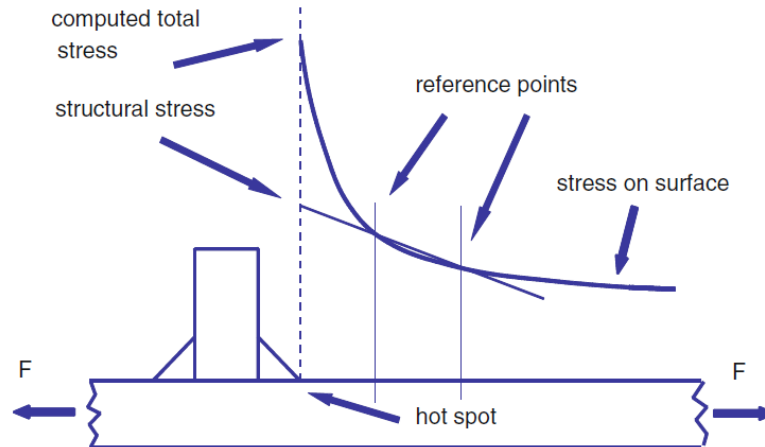
1.3.5 Metodología de esfuerzo estructural (“Hot-spot stress”)

En contraste al esfuerzo nominal, el esfuerzo “Hot-spot” (también llamado esfuerzo geométrico o estructural) incluye todos los efectos que intensifican el esfuerzo en el detalle estructural, a excepción del efecto generado por el perfil de soldadura en sí mismo; por lo tanto, el pico de esfuerzos no-lineal debido a la entalla local (i.e. el pie de soldadura) es eliminado por linealización del esfuerzo a través del espesor de la placa (**TTL “Through Thickness Linealization”**), o por extrapolación de esfuerzos superficiales (**SSE “Surface Stress Extrapolation”**) (Figura 1.12).

La metodología de esfuerzo “Hot-spot”, radica en la asunción de una distribución lineal de esfuerzos a través del espesor de la placa en zonas alejadas al cordón de soldadura, de manera que el esfuerzo superficial es igual al esfuerzo estructural; por lo tanto, esta técnica conocida como **extrapolación superficial de esfuerzos (SSE)**, se puede realizar a partir de dos o tres puntos de referencia en zonas cercanas al pie de soldadura (Figura 1.13 y

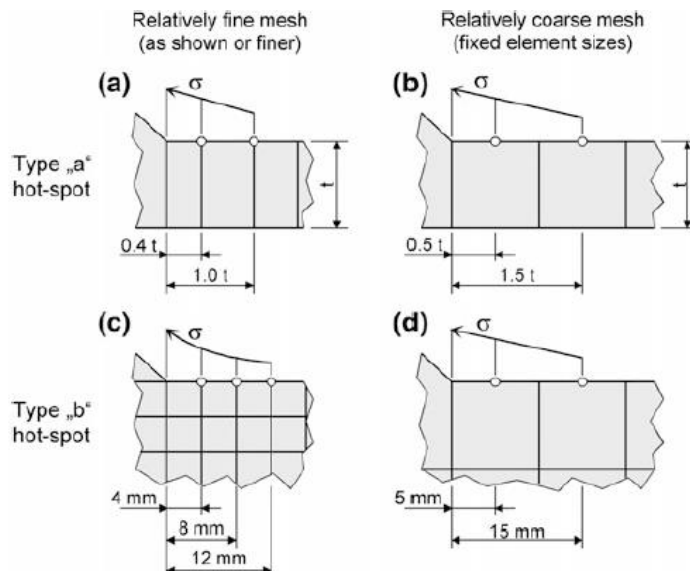
Figura 1.14). Al aplicar la metodología, dos tipos de "Hot spot" han de ser identificados, de acuerdo a su ubicación en la placa y orientación con respecto al pie de soldadura. Cuando la **distribución de esfuerzos** depende del espesor de la placa -Tipo "a", y cuando no depende del espesor -Tipo "b" (**Figura 1.15**).

Figura 1.12: Definición de esfuerzo Hot-spot en pie de soldadura.



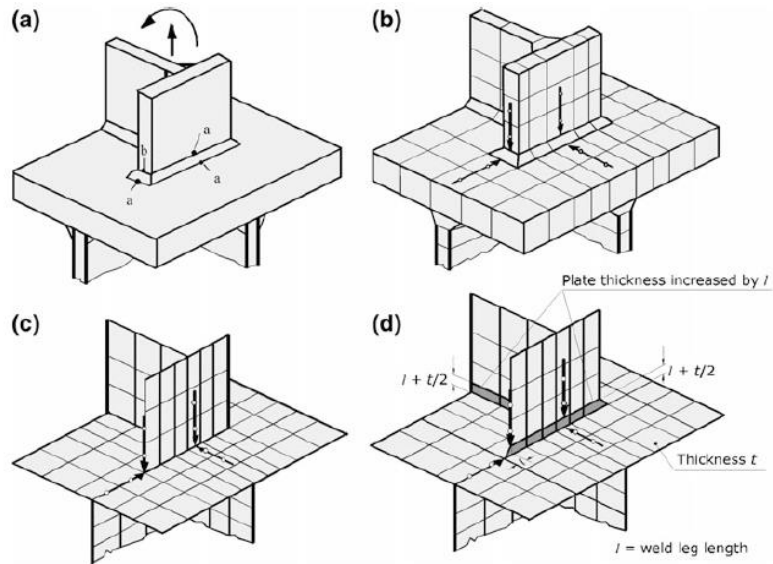
Nota. Definición de esfuerzo Hot-spot en pie de soldadura mediante extrapolación de esfuerzos superficiales (SSE); Recuperado de "Recommendations for Fatigue Design of Welded Joints and Components" (fig. 2.9, p. 19); por A.F. Hobbacher, Springer.

Figura 1.13: Métodos aceptados en la aplicación del método SSE.



Nota. Configuraciones recomendadas en la aplicación del método SSE respecto al tamaño de malla (fino/grueso) y tipo de Hot-spot (a/b); Recuperado de "Structural Hot-Spot Stress Approach to Fatigue Analysis of Welded Components" (fig. 4.3, p. 23); por A.F. Maddox, IIW publications.

Figura 1.14: Elementos y mallas aceptados en la aplicación del método SSE.



Nota. Representaciones recomendadas de uniones soldadas, nótese que el cordón de soldadura puede o no ser representado en elementos sólidos y elementos tipo Shell, incluye puntos de evaluación de esfuerzos y rutas de extrapolación; Recuperado de “*Structural Hot-Spot Stress Approach to Fatigue Analysis of Welded Components*” (fig. 4.4, p. 24); por A.F. Maddox, IIW publications.

El método de extrapolación superficial más comúnmente utilizado en la determinación del esfuerzo “Hot spot”, requiere la extracción de esfuerzos nodales en las distancias 0.4t y 1.0t a partir del pie de soldadura (ver Ecuación (1.12)).

$$S_H = 1.67\sigma_{0.4t} - 0.67\sigma_{1.0t} \tag{1.12}$$

Donde:

S_H = Esfuerzo "Hot spot" (MPa)

t = Espesor de placa (m)

$\sigma_{0.4t}$ = Esfuerzo principal ubicado a 0.4t del pie de soldadura (MPa)

$\sigma_{1.0t}$ = Esfuerzo principal ubicado a 1.0t del pie de soldadura (MPa)

Usualmente, los métodos analíticos y ecuaciones paramétricas son inviables o raramente coinciden con el detalle de junta analizado; por lo que, los resultados extraídos mediante técnicas numéricas como el análisis por elementos finitos son recomendados.

Figura 1.15: Tamaños de malla y métodos de extrapolación recomendados.

Type of model and weld toe		Relatively coarse models		Relatively fine models	
		Type a	Type b	Type a	Type b
Element size	Shells	t x t max t x w/2 ^a	10 × 10 mm	≤0.4 t x t or ≤0.4 t x w/2	≤4 × 4 mm
	Solids	t x t max t x w	10 × 10 mm	≤0.4 t x t or ≤0.4 t x w/2	≤4 × 4 mm
Extra-polation points	Shells	0.5 t and 1.5 t mid-side points ^b	5 and 15 mm mid-side points	0.4 t and 1.0 t nodal points	4, 8 and 12 mm nodal points
	Solids	0.5 and 1.5 t surface centre	5 and 15 mm surface centre	0.4 t and 1.0 t nodal points	4, 8 and 12 mm nodal points

^aw = longitudinal attachment thickness +2 weld leg lengths

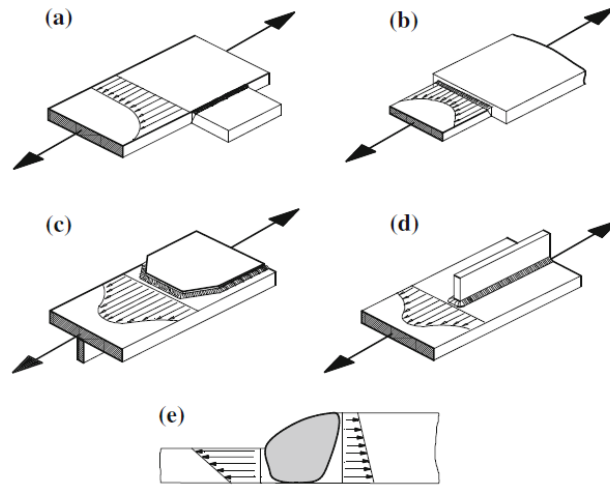
^bsurface centre at transverse welds, if the weld below the plate is not modelled (see left part of Fig. 2.13)

Nota. Configuraciones recomendadas para tamaño de elementos y ubicación de puntos de extrapolación; Recuperado de "Recommendations for Fatigue Design of Welded Joints and Components" (fig. 2.3, p. 24); por A.F. Hobbacher, Springer.

El esfuerzo "Hot spot" depende de las dimensiones globales y parámetros de carga en la vecindad de la junta, siendo generalmente definido en placas, "shells" y estructuras tubulares. Habitualmente se utiliza cuando no existe un esfuerzo nominal claramente definido, debido a efectos geométricos complejos o donde la discontinuidad estructural no es comparable a un detalle estructural clasificado (**Figura 1.16**). De esta manera, se puede definir al esfuerzo Hot-spot como el mayor de los esfuerzos estructurales distribuidos en un detalle de soldadura (**Figura 1.17**).

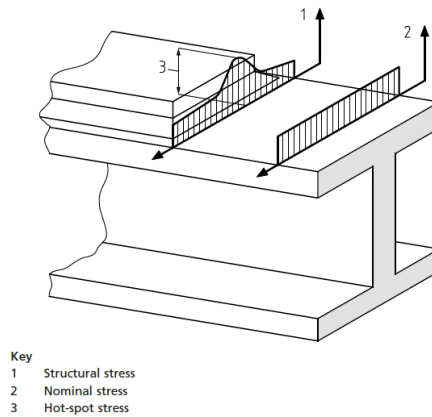
El esfuerzo estructural es útil en la evaluación de un potencial agrietamiento por fatiga en pie de soldadura o al final de un cordón longitudinal corto o discontinuo. En tales casos, la evaluación se basa en el **rango de esfuerzo estructural máximo**, también conocido como **rango de esfuerzo "Hot spot"**, definido en la práctica, como la diferencia algebraica entre el máximo y el mínimo esfuerzo en un ciclo de carga; ya sea, el esfuerzo principal o la componente de esfuerzo que actúa normal al cordón de soldadura (ver Ecuación (1.13)).

Figura 1.16: Distribución de esfuerzo estructural - diferentes detalles de soldadura.



Nota. Detalles estructurales y esfuerzo estructural, e.g. al final de una junta lateral longitudinal (a), en junta de placas de distinto ancho (b), al final de una placa de cubierta (c), al final de una unión longitudinal (d), en junta de placas de distinto espesor (e); Recuperado de “Recommendations for Fatigue Design of Welded Joints and Components” (fig. 2.8, p. 18); por A.F. Hobbacher, Springer.

Figura 1.17: Esfuerzo estructural Hot-spot en pie de soldadura.



Nota. Viga en “I” con placa de cubierta mostrando la distribución de esfuerzo estructural y el esfuerzo Hot-spot; Recuperado de “BS 7608:2014” (fig. C.1, p. 84); por The British Standards Institution, 2014, BSI Standards Limited.

$$S_r = S_{Máx} - S_{mín} \tag{1.13}$$

Donde:

S_r = Rango de esfuerzo (MPa)

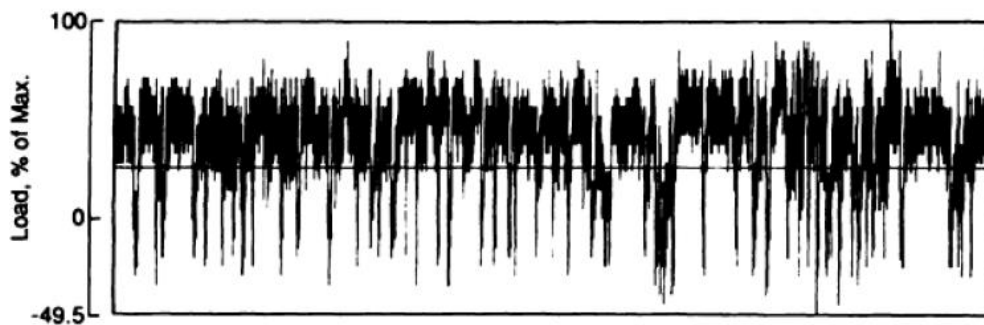
$S_{Máx}$ = Esfuerzo máximo (MPa)

$S_{mín}$ = Esfuerzo mínimo (MPa)

1.3.6 Conteo de ciclos

Los elementos de máquinas suelen experimentar ciclos de esfuerzo de amplitud variable de naturaleza aleatoria, impidiendo realizar un conteo de ciclos con relativa facilidad como los generados en los ensayos de fatiga a flexión giratoria. Al comparar un historial ya sea de **carga, esfuerzo o deformación** de amplitud constante y un historial aleatorio de amplitud variable (caso real), es evidente que el proceso de cuantificar ciclos es más complejo en el segundo caso (**Figura 1.18**).

Figura 1.18: Historial de cargas de amplitud variable para un caso real.



Nota. Diversos algoritmos se han desarrollado para realizar el conteo de ciclos en este tipo espectros, algunos de ellos están incluidos en ASTM E1049-85 (Standard Practice for Cycle Counting in Fatigue Analysis). Adaptado de ASM Handbook Volume 19 – Fatigue and fracture, 1996, p. 630, fig. 110.

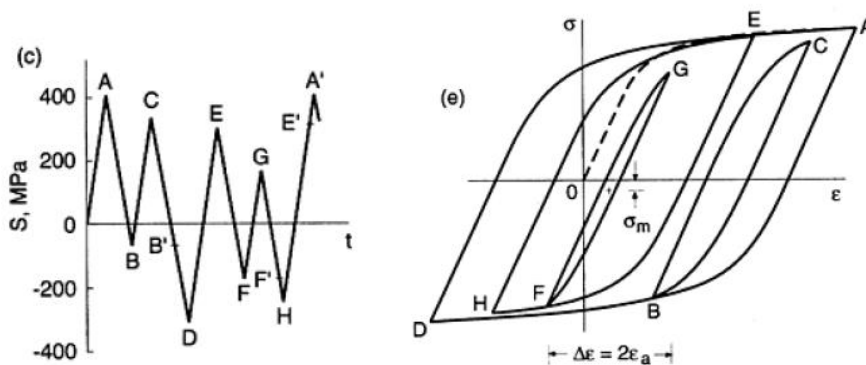
Uno de los algoritmos más populares y probablemente el mejor método para contar ciclos fue propuesto originalmente por el ingeniero Japonés Tatsuo Endo en su publicación de 1967 (Socie, 1992), conocido como método de conteo de ciclos "Rainflow". Su algoritmo, basado en la estimación de vida a fatiga por el método deformación-vida, permite **determinar y cuantificar ciclos equivalentes de amplitud constante** a partir de un historial de carga de amplitud variable (**Figura 1.19**). Una vez los ciclos han sido cuantificados, se realiza el conteo de forma eficaz mediante software, y posteriormente, se estima la vida residual del componente mediante la teoría del daño acumulado lineal de Palmgren-Miner (**Ver numeral 1.3.7**).

Para utilizar la metodología "Rainflow" en el conteo de ciclos, inicialmente, se realiza la reducción del espectro a **picos (máximos)** y **valles (mínimos)**, eliminando sus datos intermedios. Posteriormente, se identifican y cuantifican los ciclos de histéresis

equivalentes en la curva esfuerzo-deformación, asociados al efecto de plasticidad del material, siguiendo las siguientes reglas:

- Ordenar el espectro de datos de forma que la mayor magnitud sea el primer pico y el último valle (A-D, **Figura 1.19**).
- Iniciar con el primer pico o valle, permitiendo que la lluvia gotee hasta que un ciclo se **detenga** por lluvia que cae desde tejados anteriores; o se **cierre**.
- Al iniciar en un pico, un ciclo equivalente se **cierra** (*cuantifica*) si el valor del siguiente pico es mayor o igual (E-H, **Figura 1.19**).
- Al iniciar en un valle, un ciclo equivalente se **cierra** (*cuantifica*) si el valor del siguiente valle es menor o igual (F-G, B-C, **Figura 1.19**).
- Para el primer punto analizado, tras ser **cerrada** o **detenida** la lluvia. Se procede a dejar caer nuevamente la lluvia desde el segundo punto. Repitiendo este proceso hasta que cada *pico* o *valle* del espectro haya sido evaluado.

Figura 1.19: Historial de cargas de amplitud variable - ciclos de histéresis.



Nota. El Historial de carga (c) puede ser representado en un diagrama *esfuerzo real-deformación real*, siguiendo el ciclo de histéresis (e), nótese que existen pequeños ciclos (E-H, G-F, C-B) embebidos en el ciclo más grande (A-D). Adaptado de *Analysis of a notched member subjected to an irregular load versus time history*. [Fotografía], por ASM Handbook Volume 19 – Fatigue and Fracture, 1996, p. 643, fig. 21 (c y e).

1.3.7 Teoría de daño acumulado

En aplicaciones reales “un gran porcentaje de partes mecánicas y estructurales experimentan ciclos variables de esfuerzos aleatorios (i.e. suspensión automotriz y componentes estructurales de aeronaves), siendo su predicción de vida a fatiga una tarea mucho más compleja” (Juvinal & Marshek, 2012, p. 317). Para solventar este

inconveniente, el ingeniero sueco **Arvid Palmgren** quien trabajó principalmente en la determinación de la vida útil en rodamientos, publicó en 1924 su hipótesis de **Daño lineal acumulado** para el análisis de elementos de máquinas sometidos a cargas de fatiga de amplitud variable, hipótesis popularizada por M. A. Miner en 1945.

La teoría del daño lineal acumulado de **Palmgren-Miner**, asume que, tras haber construido el diagrama (S/N) y al definir **fracción de daño** como la relación entre **cantidad de ciclos aplicados** (n_i) y **cantidad de ciclos a falla o vida del componente** (N_i) para un mismo rango de esfuerzo alternante; se puede afirmar que, si un espectro aleatorio de esfuerzos variables es organizado en pequeños grupos de esfuerzos alternantes equivalentes de amplitud constante (**ver numeral 1.3.6 y Figura 1.20**), el daño total en el componente será la suma de todas las fracciones de daño y se podrá estimar la vida residual del componente. Por lo tanto, se asume que el elemento fallará cuando la suma de todas las fracciones sea equivalente a uno o al ciento por ciento (ver Ecuación (1.14)).

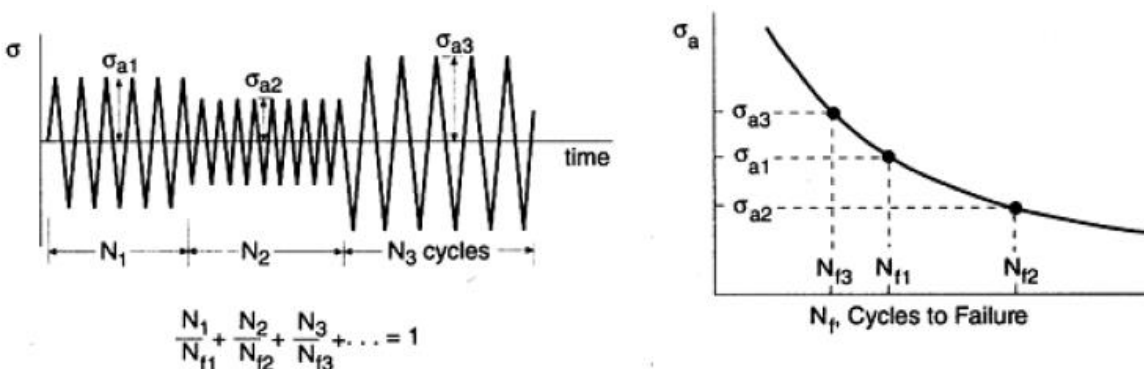
$$\sum_{j=1}^{j=k} \frac{n_j}{N_j} = 1 \quad (1.14)$$

Donde:

n_j = Número de ciclos aplicado

N_j = Número de ciclos a falla o Vida a fatiga

Figura 1.20: Esfuerzos equivalentes organizados y cuantificados.



Nota. Historial de esfuerzos de amplitud variable representado mediante conjuntos de bloques de esfuerzos de amplitud constante tras haber utilizado el método del daño lineal acumulado. Adaptado de Use of the Palmgren-Miner rule for life prediction for variable amplitude loading that is completely reversed. [Fotografía], por ASM Handbook Volume 19 – Fatigue and Fracture, 1996, p. 627, fig. 7.

2. Antecedentes de falla

Los camiones de la serie EH5000 marca EUCLID® – Ahora Hitachi®, con una capacidad nominal de 315 Toneladas (**Figura 2-1**), son utilizados por la compañía “Carbones del Cerrejón Limited, Cerrejón” para el transporte de material inerte (mezcla de tierra, grava y arena). El *carbón y el material inerte* coexisten en forma de capas en una proporción aproximada de 7:1; por lo tanto, se requiere del transporte y disposición adecuada de dicho material, logrando así liberar los mantos de carbón para su posterior extracción.

Figura 2-1: Camión Hitachi® - EH5000.



Nota. Imagen representativa del camión EH5000; Adaptado de “*Fit-Up, Weld and Installation of the EH4500 Body Assembly - Book 2*” (p. 1). EUCLID-HITACHI Heavy Equipment, Inc. Cleveland, Ohio.

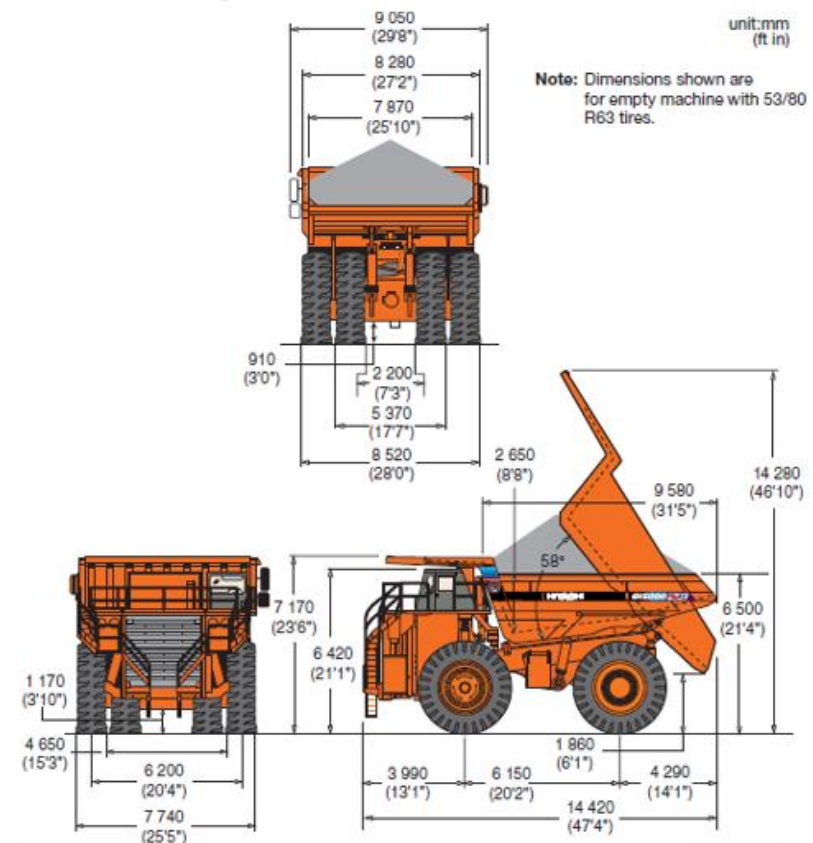
Actualmente la “Flota 320” de la división de mantenimiento de Carbones del Cerrejón, garantiza la disponibilidad de dichos camiones en operación continua 24hr / 7días al año. Experimentando dificultades debido al frecuente agrietamiento del elemento estructural denominado “Housing”, presentando en su historial siete fallas catastróficas para el periodo (año 2009–2011), en donde cada cambio de “Housing” requiere aproximadamente tres meses. El plan de mantenimiento incluye inspecciones mediante ensayos no destructivos

(END – inspección visual, ultrasonido, partículas magnéticas y tintas penetrantes) centrado en zonas del "Housing" sensibles al agrietamiento según recomendaciones del fabricante (Anexo A). La priorización de intervenciones está basada en longitud de grieta del "Housing", y nivel de apriete o condición mecánica para barras tensoras & tornillos, realizando actividades de reparación con soldadura o cambio de piezas según el criterio técnico de la compañía.

2.1 Información técnica y diseño del camión

La información técnica del camión EH5000, es extraída de manuales, boletines y especificaciones oficiales de HITACHI (Hitachi Construction Machinery, 2014) (**Figura 2-2** y **Tabla 2-1**).

Figura 2-2: Dimensiones generales.



Nota. Información empleada en el desarrollo CAD y análisis FEM; Adaptado de "EH5000 SPECIFICATIONS"; HITACHI, Hitachi Construction Machinery Co., Ltd., (P. 6).

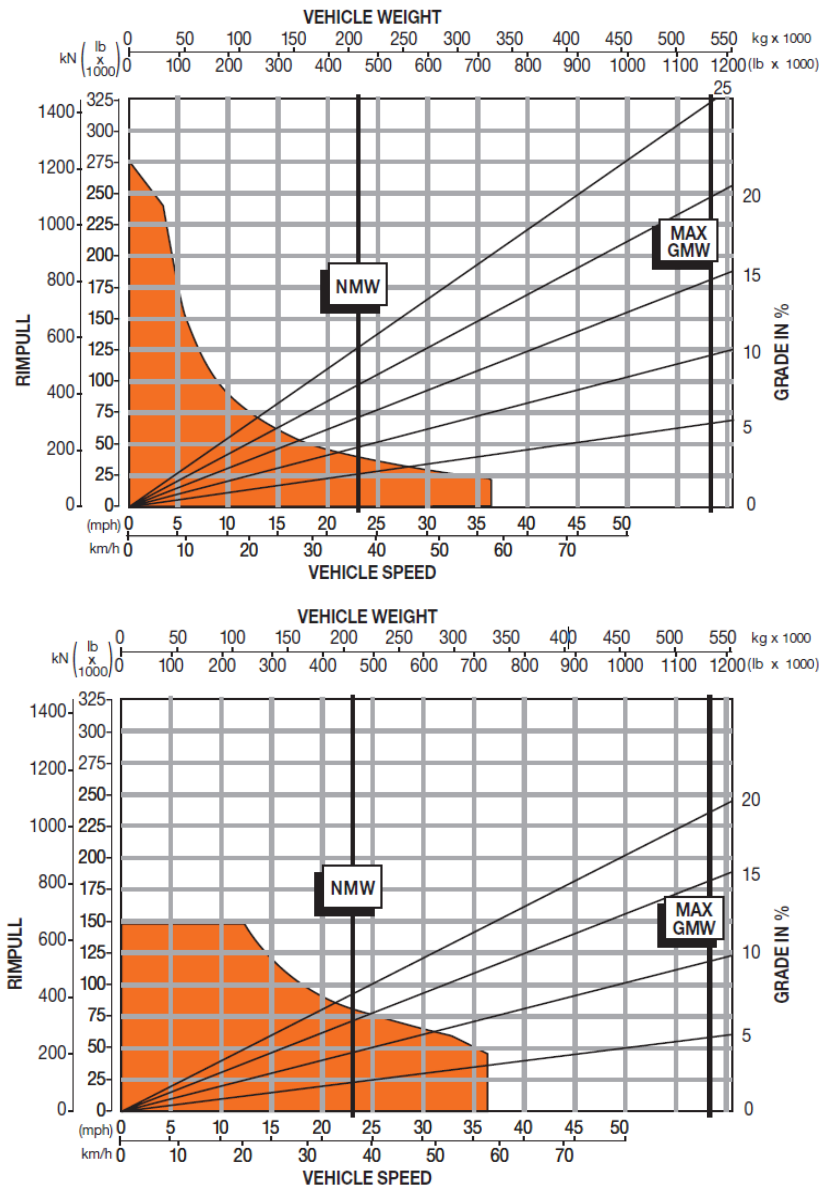
Tabla 2-1: Especificaciones técnicas.

MOTOR	
Modelo	Detroit Diesel w/DDEC IV 16v-4000
Tipo	4 cycle
Potencia neta @ 1900 rpm	1939 KW (2600 HP)
Certificación de emisión	U.S. EPA Tier 1
Torque máximo @ 1500 rpm	10930 Nm
Número de Cilindros	16
Diámetro y carrera	165 mm x 190 mm
Desplazamiento	65 L
MANEJO ELÉCTRICO	
Relación planetaria	35.816:1 estándar
Velocidad Máxima	66.9 Km/h
LLANTAS	
Tipo	Estándar E4 - Radial 53/80R63
Radio externo	1600 mm
Ancho de rin	965 mm
Altura del borde de brida	127 mm
DESCRIPCIÓN DE CARGAS	
Peso neto máquina (NMW)	213185 Kg
Carga útil nominal	286384 Kg
Carga útil (sobrecarga de 10%)	315023 Kg
Peso neto máquina + Carga útil	528208 Kg
Distribución de carga - camión sin carga	
Parte frontal (49% - 51%)	104475 Kg
Parte trasera (49% - 51%)	108710 Kg
Distribución de carga - camión con carga útil	
Parte frontal (32%)	170781 Kg
Parte trasera (68%)	357427 Kg

En el ejercicio minero, a fin de estimar el tiempo empleado por los camiones en los recorridos, se emplean dos cartas de desempeño (**carta de Tracción y Retardo**) (Hitachi Construction Machinery Co., 2014, p. 10) propias de cada fabricante, permitiendo estimar la fuerza de tracción requerida para superar la resistencia a la rodadura e inclinación del terreno, así como su velocidad máxima respecto al nivel de carga (**Figura 2-3**).

La *carta de tracción* es utilizada para pendientes del terreno positivas y la *carta de retardo* para pendientes de terreno negativas. Cuando se circula por pendientes negativas, el camión utiliza el sistema de retardo que permiten frenar el camión por medio de la interacción de campos electromagnéticos, lo cual disminuye significativamente el uso del sistema de frenado convencional y ayuda en la recarga del banco de baterías.

Figura 2-3: Carta de tracción y Carta de Retardo.

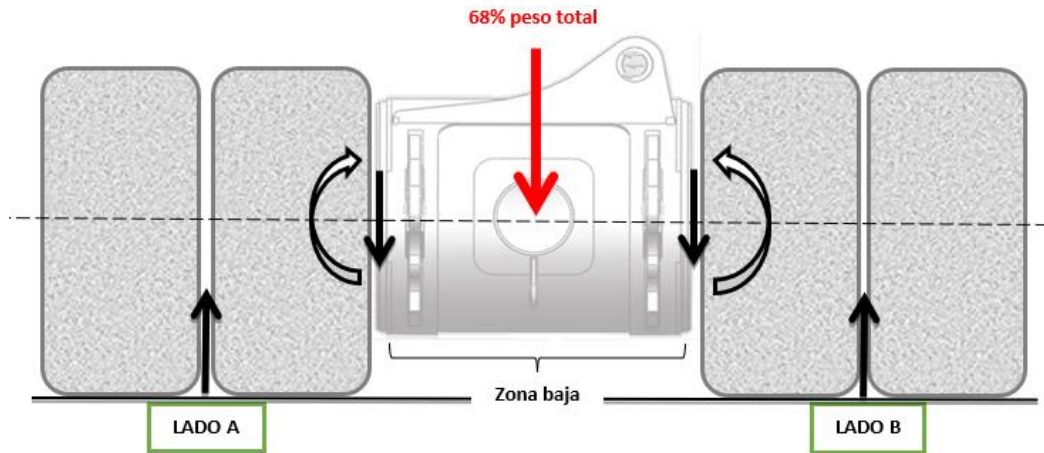


Nota. Usualmente las cartas de desempeño se emplean para estimar tiempos de operación en materia de optimización, carta de tracción para pendientes del terreno positivas y la carta de retardo para pendientes de terreno negativas.; Recuperado de "EH5000 SPECIFICATIONS"; HITACHI, Hitachi Construction Machinery Co., Ltd., P. 10.

2.1.1 Diseño del "Housing"

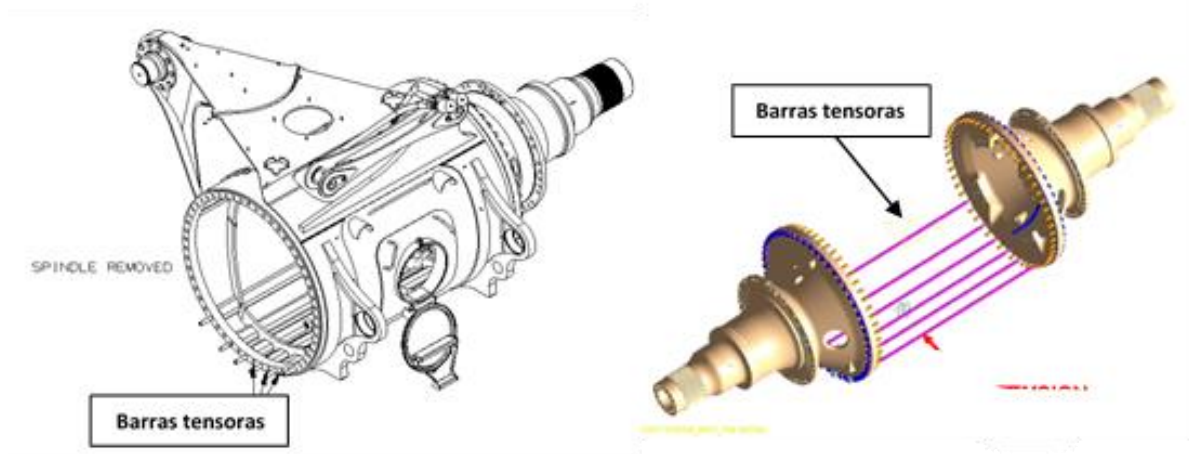
Conceptualmente el "Housing" está diseñado para experimentar principalmente fuerzas cortantes y momentos flectores, los cuales tienden a ser más elevados en su zona baja, similar al comportamiento de una viga doblemente empotrada en sus extremos con carga central (Figura 2-4).

Figura 2-4: Diseño conceptual del “Housing”.



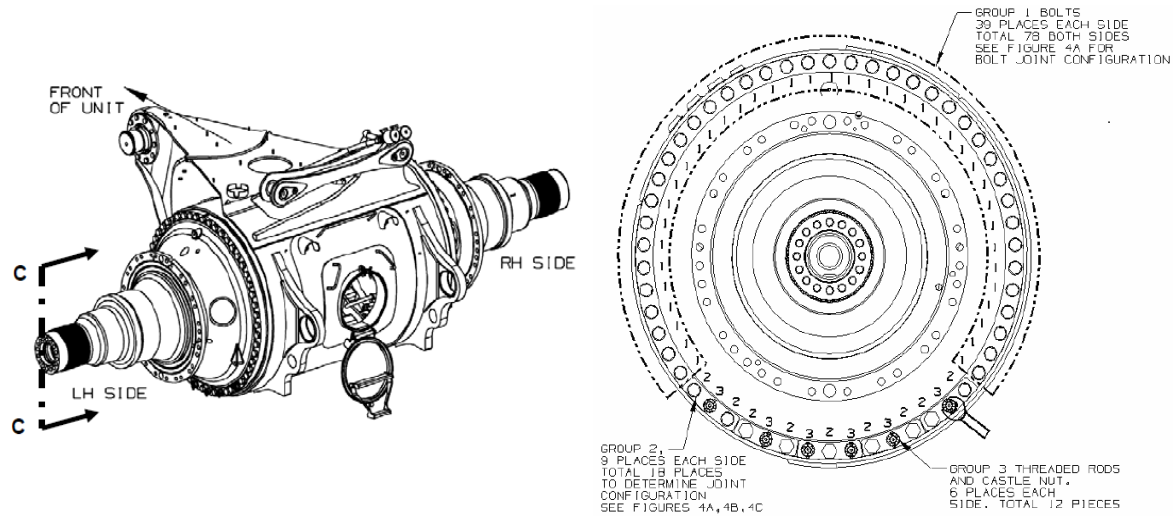
Para evitar que los esfuerzos de tensión en la zona baja del “Housing” sobrepasen el nivel que facilita la nucleación de grietas, se utilizan **seis (6) barras tensoras pre-tensionadas** (Figura 2-5 y Figura 2-6), las cuales contrarrestan el esfuerzo de tensión mediante esfuerzos de compresión al aplicar el nivel de apriete requerido (Figura 2-7).

Figura 2-5: Ubicación de Barras tensoras.



Nota. Recuperado de “Rear Spindle Mounting Update”; HITACHI SERVICE BULLETIN, Hitachi Construction Truck Manufacturing Ltd, P. 4.

Figura 2-6: Agrupación y cantidades de pernos & barras tensoras.



Nota. Recuperado de "Rear Spindle Threaded Rod & Spindle Bolt Information"; HITACHI SERVICE BULLETIN, Hitachi Construction Truck Manufacturing Ltd, P. 4 y 5.

Figura 2-7: Nivel de torque y tipo de tuerca requeridos por fabrica.

	Torque Value	Remarks
Recommended	2094 N*M 1544 Ft*Lbs	With Machine Oil Coating
Not Recommended	1536 N*M 1133 Ft*Lbs	With Loctite ® Moly Paste Anti-Seize Lubricant applied to the internal threads only

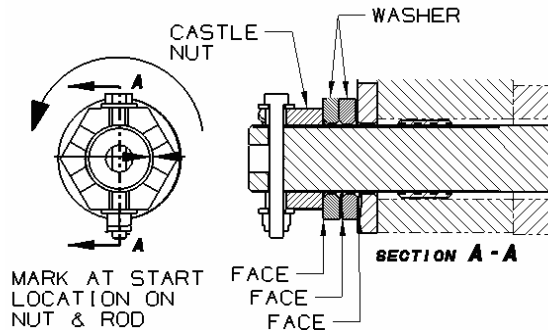


Figure 7 - Castle Nut Installation

Nota. Recuperado de "Rear Spindle Threaded Rod & Spindle Bolt Information"; HITACHI SERVICE BULLETIN, Hitachi Construction Truck Manufacturing Ltd, P. 8 y 9.

2.2 Descripción del sistema eléctrico

Los motores de tracción AC usados en locomoción de cargas son más poderosos que los más grandes motores DC de hoy en día (Cerrejón - Sistema eléctrico, p. 22). Su tecnología posee las siguientes ventajas:

- i. Alta eficiencia AC, reducen los costos por combustibles.
- ii. Los motores inductivos AC son virtualmente libres de mantenimiento.
- iii. Potencia suficiente (Aproximadamente 5600 HP) para mover camiones de 360 t.
- iv. Gran capacidad de retardo y “baja” velocidad cero (por debajo de 0.8 km/hr).
- v. Su eficiencia es un 3% más alta que los motores DC.
- vi. Gran reducción en la aplicación del freno de servicio y como consecuencia menos desgaste de sus partes mecánicas.

De acuerdo a su función, los subsistemas y componentes se clasifican en:

- i. **Suministro Eléctrico:** Planta de generación Diesel, Alternador principal, Rectificador Principal, Regulador de Campo, Transformador auxiliar.
- ii. **Tracción:** Inversores DC/AC, Motores de Tracción.
- iii. **Retardo:** Choppers, Grillas de retardo.
- iv. **Control:** TCU (Unidad Control de Tracción).
- v. **Enfriamiento:** Inversor Auxiliar, “Main Blower”, Ventilador de las Grillas, Intercambiador de calor del gabinete de control.

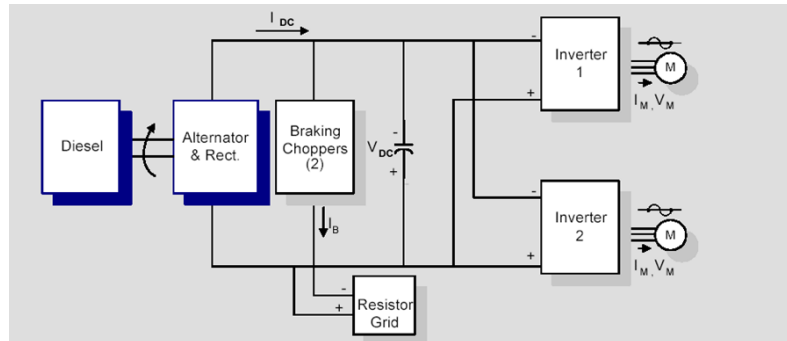
A continuación, se presenta una breve descripción de los subsistemas más significativos desde el punto de vista estructural.

2.2.1 Suministro eléctrico

Compuesto por el conjunto -Planta de generación (Diesel) -Alternador -Rectificador principal (**Figura 2-8**) (Cerrejón - Sistema eléctrico, n.d., p. 22-24), se encargan de suministrar potencial DC rectificado al banco de condensadores (Conjunto denominado “DC link”) los cuales estabilizan el voltaje DC y lo suministra a cada inversor GTO (Gate Turn-OFF Tiristor) (**Figura 2-9**). Cuando el vehículo avanza o retrocede, cada inversor GTO convierte el voltaje del DC-link en 3 fases de voltaje AC para generar el torque necesario (Torque positivo “Avance” y negativo “Reversa”). A continuación, se presentan

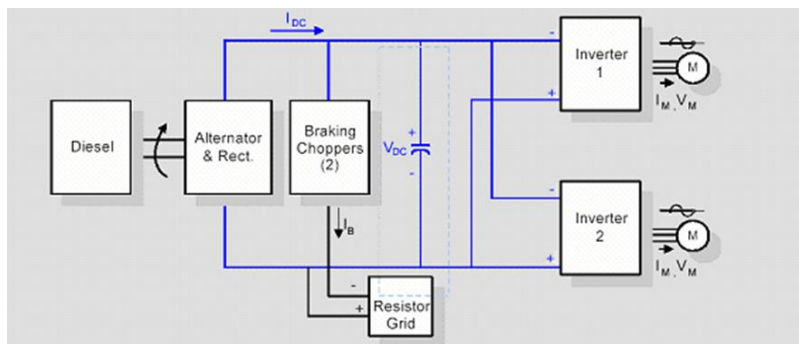
los aspectos más relevantes del suministro eléctrico del camión, según información suministrada por la compañía (Cerrejón - Sistema eléctrico, n.d., p 23-33).

Figura 2-8: Planta generación Diesel - Alternador - Rectificador (Color azul).



Nota. Recuperado de "Sistema eléctrico de potencia"; Manual del estudiante; Camiones EH5000, Carbones del Cerrejón, P. 23.

Figura 2-9: "DC LINK"- Energiza los inversores DC - AC - (Color azul).



Nota. Recuperado de "Sistema eléctrico de potencia"; Manual del estudiante; Camiones EH5000, Carbones del Cerrejón, P. 23.

- Alternador

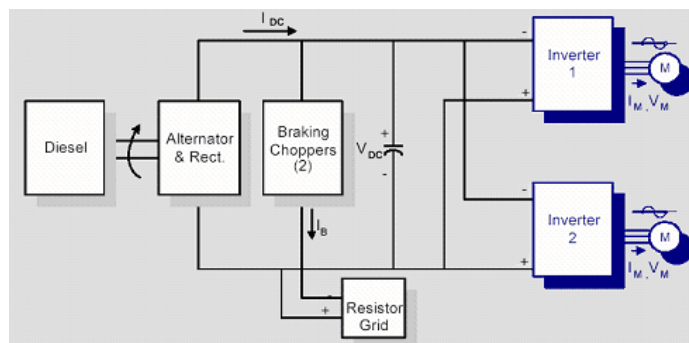
Está directamente conectado al motor a través de un acople de plato flexible y es enfriado mediante aire forzado proveniente del Main Blower. El alternador es excitado usando un grupo de diodos rotatorios (sin escobillas) y un campo estacionario de corriente inducida DC proveniente de la tarjeta reguladora de campo comandada por la TCU (**Figura 2-10**).

Figura 2-10: Ubicación alternador de tracción.

Nota. Recuperado de “Sistema eléctrico de potencia”; Manual del estudiante; Camiones EH5000, Carbones del Cerrejón, P.29.

2.2.2 Tracción: Inversores DC/AC y Motores de tracción

Los inversores DC/AC convierten el voltaje entregado por DC LINK en voltaje AC, energizando las tres fases de los motores de tracción (**Figura 2-11**). Un **inversor GTO** consiste en un set de cuatro módulos – tres para cada una de las fases de propulsión y uno para el “chopper” de retardo. Consiste en un **Módulo de fase** y una “**Gate Unit**” montada en el frente del gabinete de control. El **Módulo de fase** contiene todos los dispositivos utilizados para convertir el voltaje DC-“link” en voltaje AC (tiristores, diodos capacitores, etc.), mientras que, las “**Gate Units**” son los circuitos controladores que hacen funcionar la fase modular en los comandos de la TCU.

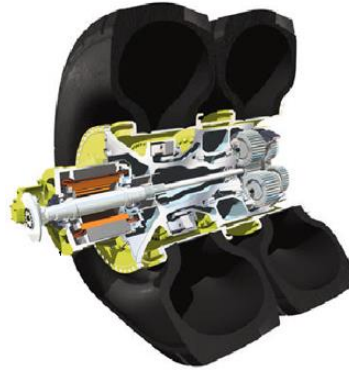
Figura 2-11: Inversores DC/AC y Motores de tracción (Color azul).

Nota. Recuperado de “Sistema eléctrico de potencia”; Manual del estudiante; Camiones EH5000, Carbones del Cerrejón, P. 24.

Los motores de tracción constan de un motor AC trifásico jaula de ardilla refrigerado mediante aire forzado, instalado dentro de un eje de acople y montado directamente a la

caja del eje trasero, acoplado en un set de doble reducción planetaria. La velocidad y la dirección son constantemente monitoreados por la TCU mediante sensores de velocidad (**Figura 2-12**).

Figura 2-12: Detalle motor de tracción.

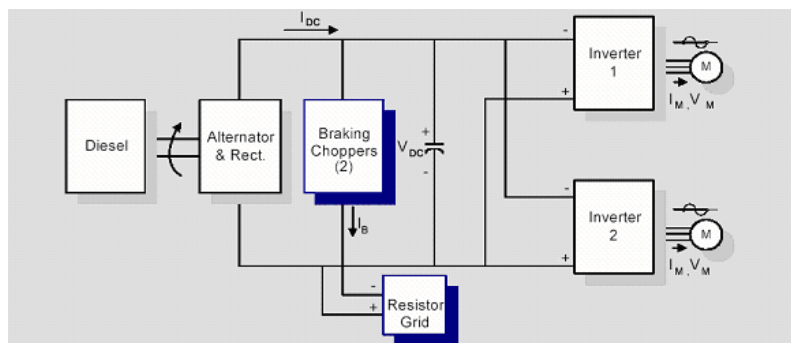


Nota. Cada motor de tracción lleva dos llantas referencia 53/80R63; Recuperado de “Sistema eléctrico de potencia”; Manual del estudiante; Camiones EH5000, Carbones del Cerrejón, P. 31.

2.2.3 Retardo: “Chopper” de frenado y resistencias de grillas

Los “chopper” de frenado limitan el voltaje del “DC link” conectando las grillas mediante modulaciones. Durante el retardo (frenado electromagnético) los módulos “chopper” requieren un voltaje menor a 2800V, para conseguirlo, disipa energía eléctrica en forma de calor mediante resistencias de grillas. De esta manera genera gran fuerza de retardo y alcanza velocidades cercanas a cero (**Figura 2-13**).

Figura 2-13: “Chopper” de frenado y resistencia de grillas (Color azul).



Nota. Recuperado de “Sistema eléctrico de potencia”; Manual del estudiante; Camiones EH5000, Carbones del Cerrejón, P. 24.

Los “Choppers” de frenado, son los elementos centrales del circuito de retardo dinámico (uno por cada motor), contienen todos los dispositivos requeridos para controlar los voltajes DC-link requeridos para las resistencias de grillas (**Figura 2-14**).

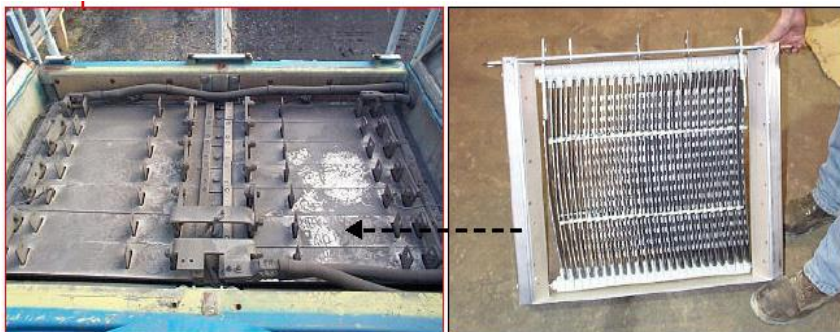
Figura 2-14: “Choppers” de frenado.



Nota. Recuperado de “Sistema eléctrico de potencia”; Manual del estudiante; Camiones EH5000, Carbones del Cerrejón, P. 30.

Las cajas de Grillas actúan durante el retardo dinámico, la energía generada por los motores es direccionada hacia el DC link haciendo que el voltaje de este se eleve por encima del voltaje de operación, para evitar esta elevación de voltaje son conectadas las grillas por medio de los módulos “chopper” regulando el voltaje a 2800VDC para permitir el flujo de corriente. Los dos bancos de rejillas (grillas), banco A y B, están instalados dentro de una caja de grillas enfriadas por un “Blower” con motor DC de gran eficiencia (**Figura 2-15**).

Figura 2-15: Detalle caja de grillas.



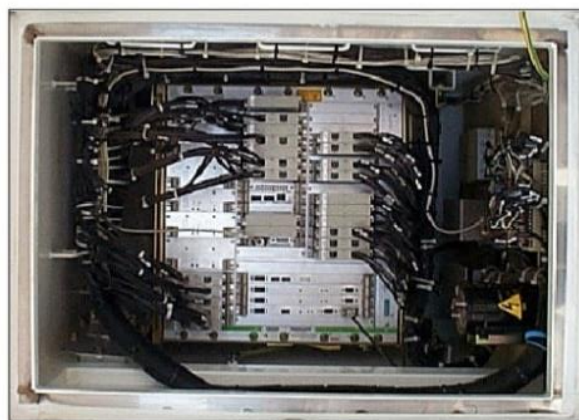
Nota. Recuperado de “Sistema eléctrico de potencia”; Manual del estudiante; Camiones EH5000, Carbones del Cerrejón, P. 24.

2.2.4 Control: TCU (Unidad Control de Tracción)

La TCU monitorea y controla el sistema de tracción, incluyendo control de las RPM, salida de voltaje del alternador, torque del motor, disparadores de corriente, conectores de voltaje DC, control del “slip-slide” y el “Main Blower”. Mediante un software de rutinas depositadas en la memoria del módulo, la TCU genera señales que son enviadas al control del camión (equipo de tracción, contactores, relés, actuadores, etc.). La TCU también realiza el monitoreo de varias funciones como la protección, limitando el valor de ciertos valores que están especificados en los programas (por ejemplo; la corriente del motor o el voltaje DC). Si estos valores son excedidos en cualquier dirección, la TCU realiza automáticamente ciertos paros de trabajo, muestra las fallas de operación y es usada para procesar, evaluar, cargar, y transferir datos y señales (**Figura 2-16**). La TCU contiene tres procesadores, los cuales son responsables por el control del sistema tracción: **CPU, DSP1 (inversor A) y DSP2 (inversor B)**. Las tareas del software de la TCU incluyen las siguientes funciones:

- Velocidad o torque en acorde con los valores de referencias del operador.
- Propulsión/ lógica de retardo dinámico.
- Monitoreo (corriente, voltaje, temperatura, etc.).
- Control de los contactores.
- Control auxiliar de equipamiento.
- Diagnósis.
- Programas test.

Figura 2-16: Ubicación Unidad de control de tracción (TCU).



Nota. Recuperado de “Sistema eléctrico de potencia”; Manual del estudiante; Camiones EH5000, Carbones del Cerrejón, P. 32.

2.2.5 Sistema motor

El camión EH5000 utiliza un *sistema de tracción diesel-eléctrico AC* “Siemens AC”, compuesto por:

- i. Unidad Control de Tracción (TCU).
- ii. Tres (3) fases de tracción AC.
- iii. Alternador sin escobillas excitadoras.
- iv. Campo regulador.
- v. Diodos rectificadores.
- vi. Capacitores DC.
- vii. Inversores GTO.
- viii. Grilla de retardo dinámico.
- ix. Motores de tracción.
- x. Inversor auxiliar.

Los componentes de menor tamaño se encuentran instalados en el “gabinete de control”, mientras que las grillas de retardo y los motores eléctricos del sistema de enfriamiento (“Blower”) están instalados en el exterior del gabinete de control (Ver **Figura 2-17**).

Figura 2-17: Ubicación de cabina de control y resistencias de grillas.



Nota. Modificado de “Sistema eléctrico de potencia”; Manual del estudiante; Camiones EH5000, Carbones del Cerrejón, P. 28.

2.3 Monitoreo en ciclo de operación

Con el fin de obtener un registro de datos del camión en tiempo real y en condiciones habituales de operación, se utilizó el sistema SIBAS 32 Monitor - Siemens®, el cual es un conjunto Hardware-Software que permite obtener información de hasta 63 tipos de señales distintas. Mediante la configuración del software "Monitor V2.4" para la adquisición y almacenamiento de datos en una laptop, se realizó el registro simultáneo de ocho (8) señales para dos (2) ciclos de operación *carga-descarga* en el Mando final A del Camión C764 (Ver **Tabla 2-2**). El registro se almacenó en un archivo de texto plano, siendo posteriormente aislada la señal del torque para su posterior análisis (Ver **Figura 2-18**).

Tabla 2-2: Datos representativos del ciclo típico analizado.

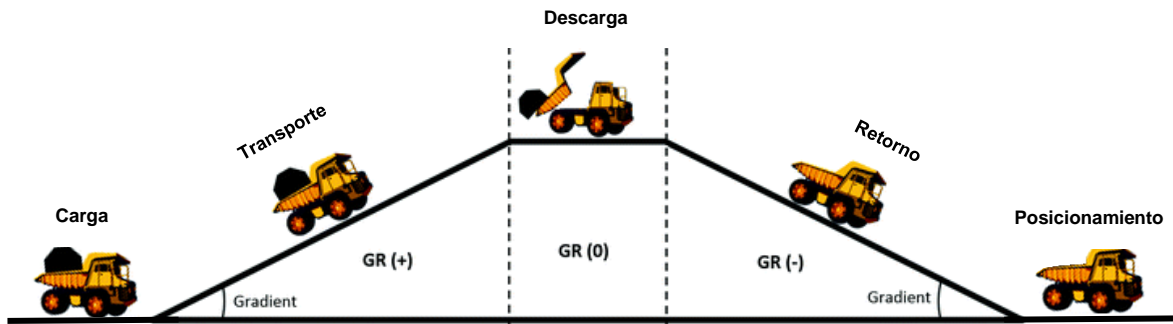
Señal	Conector	Descripción
1	\$IL1PWRA	Corriente Motor L1 U101
2	\$IL2PWRA	Corriente Motor L2 U102
3	\$IL3PWRA	Corriente Motor L3 U103
4	\$MSOLLSA	Referencia de torque del Motor A
5	\$NIST1ZA	Sensor de velocidad del Motor A
6	\$IBPWRA	Corriente Chopper A U104
7	\$UDI_IO	Voltaje Actual del Bus DC U105
8	\$IDIGHW	Corriente del Bus DC U107

Nota. Recuperado de "SIBAS Monitor V2.4"; Curso CE0011; Camión EH5000, Carbones del Cerrejón, P. 44.

Figura 2-18: Monitoreo de Torque - Camión C764 - Flota 320.



Nota. El registro en tiempo real del torque (Nm) en el Mando final A para dos ciclos de operación carga-descarga, fue adquirido mediante el Sistema SIBAS Monitor V2.4 - Siemens®.

Figura 2-19: Ciclo típico analizado.

Nota. Adaptado y Modificado de “Energy-Efficient Loading and Hauling Operations”; Energy Efficiency in the Minerals Industry, P. 121-146.

Del monitoreo en sitio se resalta lo siguiente:

- i. Se logró constatar que cada ciclo del camión consta de: *Carga – Transporte – Descarga – Retorno – Posicionamiento* (**Figura 2-19**) (Soofastaei et al., 2018). En este caso, se resaltan algunas particularidades del terreno no monitoreados por el sistema SIBAS 32 Monitor - Siemens® (**Tabla 2-3**).
- ii. La vía es del tipo “grava compactada”, la cual es humedecida periódicamente mediante camión-tanque.
- iii. Cuando la condición estructural del camión es óptima, se opera entre 100 – 110% (286 – 315 t) de su carga nominal; sin embargo, cuando la condición es sub-standard (presenta grietas, pernos o barras tensoras fracturadas), se opera al 90% (257 ton) de su carga nominal y se monitorea continuamente.
- iv. La termografía realizada después de una jornada diurna en condiciones normales de operación, muestra que el “Housing” alcanza temperaturas entre los 38 – 73°C, tal condición generalmente no provoca daño por termofluencia; ya que se encuentra muy por debajo del 40% de su temperatura de fusión (**Figura 2-20**).

Tabla 2-3: Datos representativos del ciclo monitoreado.

Actividad	Nivel de carga (%)	Inclinación longitudinal (%)	Inclinación lateral (%)	Velocidad Máxima (Km/hr)	Observación
Inicio	110	7.8	8.1	14	-
Transporte	110	9 / 10	8 / 9	14	El camión se inclina la mayor parte del trayecto hacia el lado A del “Housing”, debido al diseño del trazado el cual es más elevado en el centro.
Ciclo volcado	110 @ 0	0	4-5	0	El camión es cargado con 315t tras 5 cargas de material por parte de la pala eléctrica de cables P&H®, por lo tanto, cada carga de material equivale a 63t.
Retorno	0	-9 / -10	8 / 9	40	El camión se inclina la mayor parte del trayecto hacia el lado A del “Housing”, debido al diseño del trazado el cual es más elevado en el centro.
Posicionamiento	0	7.8	8.1	40	-

Figura 2-20: Cromatografía en “Housing”.

Nota. La inspección termográfica (16:00hr) evidencia que las más altas temperaturas actúan directamente a las zonas de mayor frecuencia de agrietamiento; Carbones del Cerrejón.

2.4 “Housing” utilizado como modelo

El modelo tridimensional del “Housing” se realiza con ayuda de esquemas proporcionados por el Grupo de inspección y tecnología del Cerrejón (GI&T), levantamiento de planos esquemáticos a mano alzada y digitalización mediante CAD; dimensionando el “Housing” del camión C709 quien se encontraba en el hangar de mantenimiento, en “La mina” municipio de Albania (Depto. La Guajira) (**Figura 2-21**). El modelo tridimensional del “Housing” se presenta en detalle en el **capítulo cuatro (Modelamiento por FEM)**.

Figura 2-21: “Housing” digitalizado - Camión C709.



Nota. Posicionamiento del “Housing”, para actividades de cambio de “channels” de refuerzo en su zona alta.

2.5 Historial de fallas

La división de mantenimiento ha registrado siete fallas catastróficas originadas en “Housing” para el periodo 2009–2011 (**Tabla 2-4**). A continuación, se presentan las generalidades de cada informe.

Tabla 2-4: Historial de fallas catastróficas (Periodo 2009 – 2011).

Item	Análisis de falla	Fecha del suceso	Horas de trabajo
1	Fractura “Housing” - Camión 22-759	Octubre 15 - 2009	17178
2	Fractura “Housing” - Camión 22-777	Junio 12 - 2010	17572
3	Fractura “Housing” - Camión 22-778	Septiembre 06 - 2010	18795
4	Fractura “Housing” - Camión 22-783	Septiembre 29 - 2010	18336
5	Fractura “Housing” - Camión 22-748	Octubre 06 - 2010	26337
6	Fractura “Housing” - Camión 22-713	Noviembre 12 – 2010	35667
7	Fractura “Housing” - Camión 22-807	Junio 26 – 2011	17454

2.5.1 Análisis de falla - Fractura “Housing” Camión 22-759

Descripción: El “Housing” del camión 22-759 presentó fractura de la lámina del metal base, causando desprendimiento del mando final (lado A) del “Housing” (**Figura 2-2**) y (Espejo, 2009). Los registros muestran que su instalación fue el 09-Abr-2007 y el suceso de fractura el 15-Oct-2009, para una vida total de 17178 hr (Anexo B).

Figura 2-22: Estado del camión por el desprendimiento del mando final.



Nota. Recuperado de “Análisis de falla - Fractura Túnel camión 759”; Universidad Nacional de Colombia - Grupo AFIS; 2009, Presentación.

Antecedentes: Las inspecciones revelan los siguientes acontecimientos.

- i. Agrietamiento de 200mm en la base de la oreja de la barra antivuelco (ubicación 06H01, 06H03).
- ii. Agrietamiento en una barra tensora.
- iii. No se evidencia agrietamiento externo en las demás juntas soldadas.
- iv. No hay registros de cambio de tornillos ni barras roscadas a lo largo de la vida operada.

Hallazgos relevantes: Las marcas radiales avanzan desde el interior del metal base hacia el exterior del “Housing”, ubicado en la junta soldada “Housing”/Anillo (**Figura 2-23**). Los registros muestran que entre la I.E. del 21-Sep-09 hasta la fecha de falla 15-Oct-09, transcurrieron 490 hr. Sin embargo, las rutinas de inspección estructural no incluyen las juntas soldadas Metal base/”Nose Cone”, y Metal base/Anillo.

Conclusión y concepto de falla: El “Housing” del camión 22-759 se fractura debido a las grietas formadas en la parte interna de la soldadura que une al “Housing” con el anillo de fijación del mando final. La superficie de fractura muestra una serie de marcas radiales que indican el avance de grietas por el mecanismo de fatiga, las grietas se localizaron en la zona de acción de barras tensoras (zona baja del “Housing”) y avanzaron hasta fracturar el metal base generando el desprendimiento del mando final.

Figura 2-23: Grietas de fatiga desde la parte interna - Junta anillo-metal base.

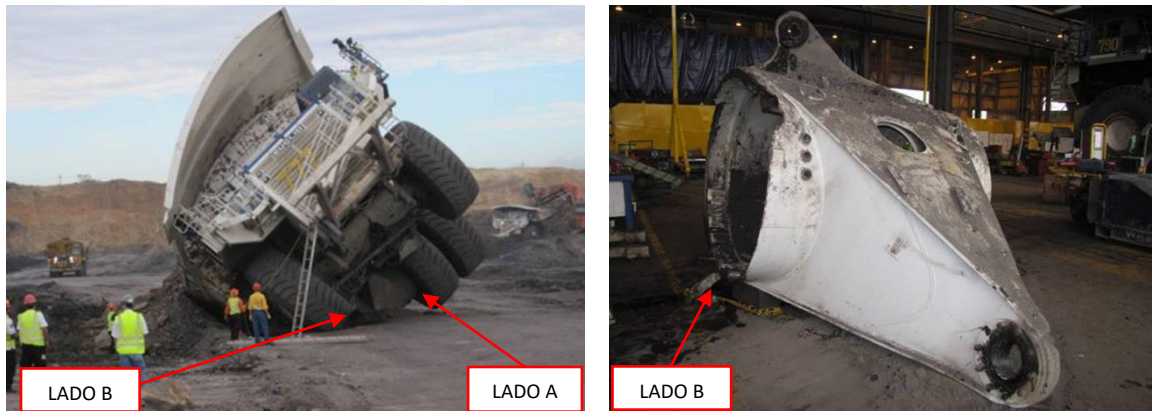


Nota. Recuperado de “Análisis de falla - Fractura Túnel camión 759”; Universidad Nacional de Colombia - Grupo AFIS; 2009, Presentación.

2.5.2 Análisis de falla - fractura “Housing” camión 22-777

Descripción: El “Housing” del camión 22-777 presentó fractura en el metal base causando el desprendimiento del mando final y el anillo del Lado B del “Housing” (**Figura 2-24**) y (Espejo, 2010c). Los registros muestran que su instalación fue el 20-Dic-2007 y el suceso de fractura el 12-Jun-2010, para una vida total del componente de 17572 hr.

Figura 2-24: Estado del camión por el desprendimiento del mando final (Lado B).



Nota. Recuperado de “Análisis de falla - Fractura Túnel camión 777”; Universidad Nacional de Colombia - Grupo AFIS; 2010, Presentación.

Antecedentes: Las inspecciones por ultrasonido (UT) en el periodo 2009-2010, registran los siguientes acontecimientos:

- i. Fractura de una (1) barra tensora: Cuatro (4) sucesos.

- ii. Fractura de dos (2) barras tensoras.
- iii. Fractura de un (1) perno.
- iv. Las Inspecciones estructurales (I.E.) en el periodo 2009-2010, registran agrietamiento frecuente en la ubicación 06H03 -Base barra antivuelco- (Anexo B), con longitud variable de 480mm, 300mm, 380mm. Sin embargo, no se evidenció ningún tipo de grietas externas en las demás juntas soldadas.
- v. El camión trabajó sobrecargado 14,7% entre 1D Jul/09 - 5D Abr/10 y 10,7% entre 5N Abr/2010 - 11N Jun/2010. Según registro de carga del camión.

Hallazgos relevantes: La inspección por ultrasonido (UT), muestra que el camión operó 2732 hr. con indicación de 1 o 2 barras tensoras defectuosas y una grieta de 380 mm en la ubicación 06H03; además, las marcas radiales en las secciones fracturadas del “Housing”, indican que la fractura se propagó desde el interior hacia el exterior de la junta soldada anillo-metal base (**Figura 2-25**).

Figura 2-25: Grietas de fatiga en parte interna - Junta anillo-metal base.



Nota. Recuperado de “Análisis de falla - Fractura Túnel camión 777”; Universidad Nacional de Colombia - Grupo AFIS; 2010, Presentación.

Conclusión y concepto de falla: El “Housing” del camión 22-777 se fracturó debido a las grietas formadas en la junta soldada anillo-metal base del “Housing”. Las grietas se originaron al perder rigidez la junta apernada, donde las barras de tensión actúan por diseño como un fusible mecánico al dar aviso (con su fractura) que una falla potencial está por ocurrir en la junta soldada del “Housing”. El concepto técnico de HTM relacionado con la filosofía de la junta apernada, indica que el camión debe operar con las seis barras en condición de pretensado y es inaceptable la operación del camión con una sola de las barras tensoras con indicación de defecto o fractura; es demostrable que el camión 22-777

operó por espacio de 2732 horas con 2 barras fracturadas constituyéndose esto como la principal causa de falla.

2.5.3 Análisis de falla - fractura “Housing” camión 22-778

Descripción: El “Housing” del camión 22-778 presentó desprendimiento súbito del mando final del “Housing” - Lado A (**Figura 2-26**) y (Espejo, 2010d). Los registros muestran que su instalación fue el 27-Dic-2007 y el suceso de fractura el 06-Sept-2010, para una vida total de 18795 hr.

Antecedentes: Inspecciones por ultrasonido (UT) del año 2010, registran los siguientes acontecimientos:

- Fractura de una (1) barra tensora.
- Fractura de (2) barras tensoras y 1 perno).
- Agrietamiento en metal base, zonas 06H04 y 06H05 (250mm lado A y 160mm lado B) respectivamente (Anexo B).

Figura 2-26: Fractura & desprendimiento de anillo y mando final (Lado A).



Nota. Recuperado de “Análisis de falla - Fractura Túnel camión 778”; Universidad Nacional de Colombia - Grupo AFIS; 2010, Presentación.

Hallazgos Relevantes: El camión 22-778 no registra eventos de accidentes operacionales desde que inició su operación. En la sección fracturada del metal base se encuentran marcas de ratchet y de playa que indican la formación de grietas de fatiga (**Figura 2-27**).

El equipo operó con barras fracturadas por espacio de 2650 hr entre las inspecciones UT del 14-Abr-2010 y el evento de fractura 6-Sept-2010, a pesar de haberse notificado.

El 11-Ago-2010 se reparan las grietas de los lados A y B del cuerpo piramidal (Grietas de 160 y 250 mm respectivamente). Condición reportada desde la I.E. del 14-Abr-2010.

Conclusión y concepto de falla: El “Housing” del camión 22-778 se fracturó debido a las grietas de fatiga formadas en la junta soldada anillo-metal base. Las grietas se explican por la pérdida de rigidez del conjunto “Housing”-Mando Final, y tienen su origen porque el equipo operó con barras de tensión defectuosas por espacio de 2560 hr.

La soldadura externa aplicada al cuerpo piramidal del “Housing” el 11-Ago-2010, sirvió para frenar la grieta externa detectada en esa sección, pero no eliminó las grietas internas.

Figura 2-27: Grietas de fatiga en parte interna - Junta anillo-metal base-Nose cone.



Nota. Recuperado de “Análisis de falla - Fractura Túnel camión 778”; Universidad Nacional de Colombia - Grupo AFIS; 2010, Presentación.

2.5.4 Análisis de falla - fractura “Housing” camión 22-783

Descripción: El “Housing” del camión 22-783 presentó fractura de la lámina del metal base causando el desprendimiento del mando final del “Housing” - Lado B (**Figura 2-28**) y (Espejo, 2010e). Los registros muestran que su instalación fue el 15-Nov-2006 y el suceso de fractura el 29-Sept-2010, para una vida total del componente de 18336 hr.

Antecedentes: Inspecciones por ultrasonido (UT) en el periodo 2008 - 2010, registran los siguientes acontecimientos:

- Fractura de una (1) barra tensora: Seis (6) sucesos.
- Fractura de dos (2) barras tensoras: dos (2) sucesos.
- Fractura de pernos distintas cantidades 1, 2 y 3: Catorce (14) sucesos.
- Grieta de 330mm en la ubicación 06H01 (Anexo B).

Hallazgos Relevantes: Las inspecciones U.T, indica que entre noviembre del 2008 hasta agosto-octubre del 2009 se detectaron barras tensoras defectuosas. El camión estuvo trabajando con una barra fracturada por espacio de 5300 hr (Nov-2008- Ago-2009), y solo se procedió con el primer cambio de barras a las 10660 horas de operación.

Las marcas de playa y “ratchet” localizados en el metal base del “Housing” indican que las grietas tuvieron su origen desde el interior del metal base (**Figura 2-29**). El desgarramiento de material indica que la fractura avanzó desde la junta soldada entre el metal base y el anillo de montaje de llantas.

Figura 2-28: Fractura y desprendimiento de mando final de “Housing” (Lado B).



Nota. Recuperado de “Análisis de falla - Fractura Túnel camión 783”; Universidad Nacional de Colombia - Grupo AFIS; 2010, Presentación.

Figura 2-29: Grietas de fatiga en parte interna - Junta Anillo-Metal base-Nose cone.



Nota. Recuperado de "Análisis de falla - Fractura Túnel camión 783"; Universidad Nacional de Colombia - Grupo AFIS; 2010, Presentación.

Conclusión y concepto de falla: El "Housing" del camión 22-783 se fracturó debido a las grietas de fatiga formadas en la junta soldada anillo-metal base, grietas que avanzaron y crecieron desde el interior hacia el exterior de la estructura. La formación de las grietas debe estar relacionada con operar el equipo con barras tensoras con indicación de grietas, esto ocurrió por un periodo de 5300 hr (Nov-2008 hasta Ago-2009), comprobado por inspecciones U.T.

2.5.5 Análisis de falla - fractura "Housing" camión 22-748

Descripción: El "Housing" del camión 22-748 presentó fractura y desgarramiento de la lámina del metal base causando el desprendimiento del mando final - lado A del "Housing" (**Figura 2-30**) y (Espejo, 2010b). El anillo se fracturó a través de la soldadura entre este y el metal base. Los registros muestran que su instalación fue el 15-Nov-2006 y el suceso de fractura el 06-Oct-2010, para una vida total del componente de 26337 hr.

Figura 2-30: Fractura y desprendimiento de anillo y mando final (Lado A).



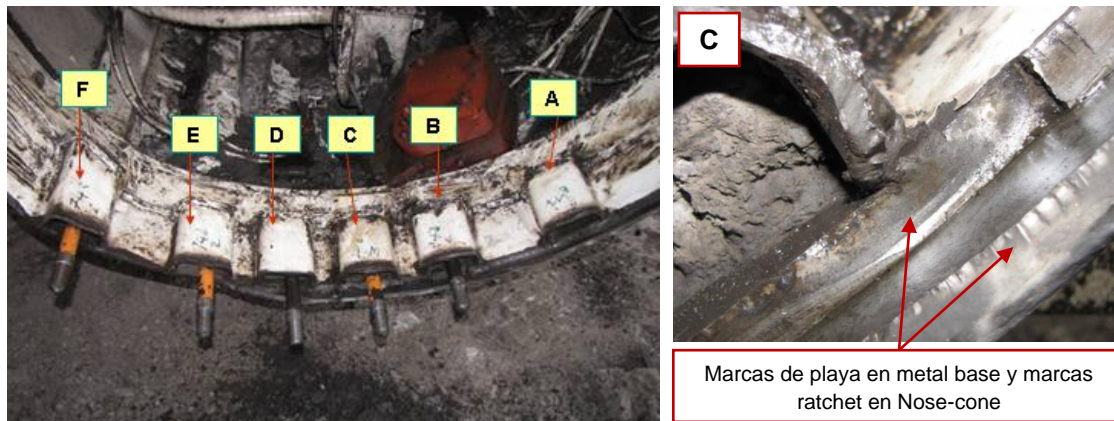
Nota. Recuperado de “Análisis de falla - Fractura Túnel camión 748”; Universidad Nacional de Colombia - Grupo AFIS; 2010, Presentación.

Antecedentes: Inspecciones por ultrasonido (UT) en los últimos seis (6) meses antes de la fractura, registran los siguientes acontecimientos:

- Agrietamiento de una (1) barra tensora.
- Agrietamiento de un (1) perno.
- Las Inspecciones estructurales (I.E.), no evidenciaron grietas en el metal base ni en el cuerpo piramidal.

Hallazgos Relevantes: Al cambiar el mando el 3/Sep/2008, se reemplazaron 2 de las 6 barras tensoras. En ese tiempo solo se tenía existencia de barras importadas y no se había iniciado la compra de barras de fabricación nacional.

El metal base de la sección inferior del “Housing” muestra la existencia de marcas ratchet y de playa. Esas marcas indican la formación de grietas de fatiga, su orientación y avance reflejan que fueron creciendo desde el interior hacia el exterior de la estructura (**Figura 2-31**). La UT muestra que el equipo operó desde el 14-Mar-2010 con una barra tensora defectuosa, y se continuó comprobando el mismo defecto en las inspecciones posteriores.

Figura 2-31: Grietas de fatiga avanzando desde parte interna del “Housing”.

Nota. Detalle de la junta soldada anillo-metal base y junta metal base-Nose cone. Recuperado de “Análisis de falla - Fractura Túnel camión 748”; Universidad Nacional de Colombia - Grupo AFIS; 2010, Presentación.

Conclusión y concepto de falla: El “Housing” del camión 22-748 se fracturó debido a las grietas de fatiga formadas en la junta soldada anillo-metal base del “Housing”. Las marcas de ratchet y de playa que se presentan en la sección fracturada, muestran que las grietas avanzaron y crecieron desde el interior hacia el exterior de la estructura. Es de notar que en el “Housing” no se evidenciaron grietas externas, tampoco existen reparaciones sobre los cordones de soldadura en el metal base. En las esquinas donde intersecan los cordones de soldadura se aprecian marcas de playa, es probable que al aplicar la soldadura de reparación se hayan generado concentradores de esfuerzo en la zona afectada por el calor.

2.5.6 Análisis de falla - fractura “Housing” camión 22-713

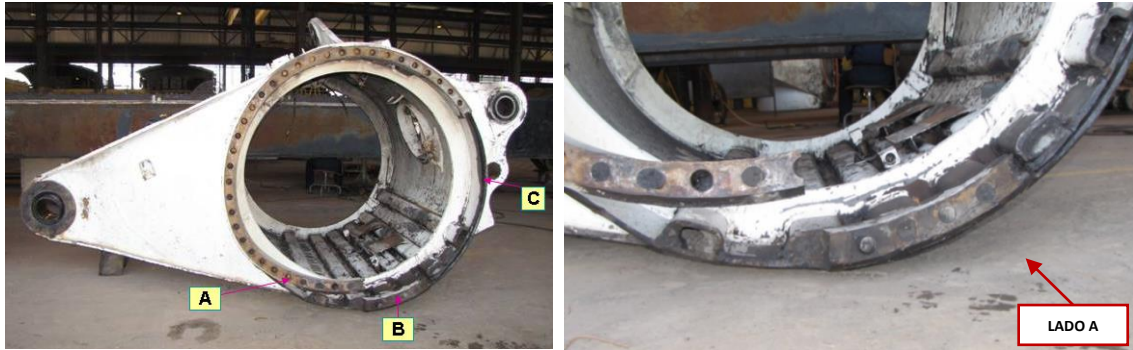
Descripción: El “Housing” del camión 22-713 presentó fractura a través de la soldadura entre este y el metal base - lado A del “Housing” (**Figura 2-32**) y (Espejo, 2010a). Los registros muestran que la fecha de instalación fue el 03-Jun-2005 y la fecha del suceso de fractura el 12-Nov-2010, para una vida total del componente de 35667 hr.

Antecedentes: Inspecciones por ultrasonido (UT) en el periodo 2010, registran los siguientes acontecimientos:

- Fractura de dos (2) barras tensoras.
- Fractura de pernos varias cantidades (1, 3 y 4) x 5 sucesos.

- Las Inspecciones estructurales (I.E.) del periodo 2010, evidencian agrietamientos en la zona 06H05 (670mm y 270mm) (Ver **Figura 2-32**).

Figura 2-32: Fractura del anillo (Lado A) – Camión 713.



Nota. Una sección del anillo permaneció en su sitio debido a que estuvo trabajando sin tornillos ni barras tensoras Recuperado de “Análisis de falla - Fractura Túnel camión 713”; Universidad Nacional de Colombia - Grupo AFIS; 2010, Presentación.

Hallazgos relevantes: Las inspecciones UT realizadas y las transacciones de consumo de repuestos, indican que el C713 trabajó con 2 barras y 2 tornillos fracturados por un espacio de 45 días entre el 28-Sep-2010 hasta el momento de fracturarse; además, las cargas experimentadas por el C713 estuvieron dentro del promedio manejado por la flota, y la grieta externa detectada fue corregida sin desmontar el mando final (ver **Figura 2-33**).

Figura 2-33: Reparación sin desmontar el mando final (lado A).

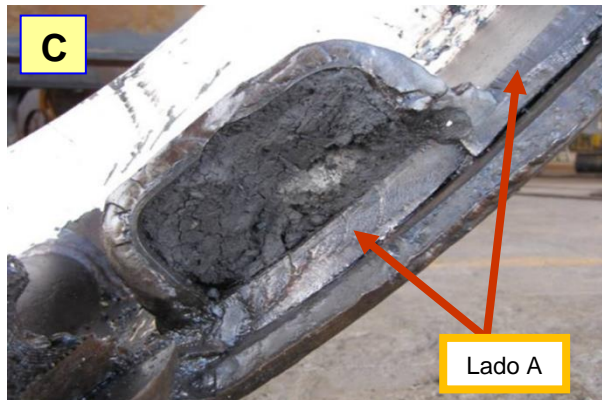


Nota. Reparación de grieta externa (270mm). Recuperado de “Análisis de falla - Fractura Túnel camión 713”; Universidad Nacional de Colombia - Grupo AFIS; 2010, Presentación.

Las marcas de playa y ratchet localizados en la junta soldada metal base/el anillo, indican la existencia de grietas que tuvieron su origen desde el interior del metal base (**Figura**

2-34). La “soltura” del anillo debido a las grietas formadas en la junta de soldadura interna, explica la formación de la grieta externa.

Figura 2-34: Evidencias de marcas ratchet y grietas de fatiga – Camión 713.



Nota. Evidencia de que existía una fractura en la junta soldada anillo-metal base. Recuperado de “Análisis de falla - Fractura Túnel camión 713”; Universidad Nacional de Colombia - Grupo AFIS; 2010, Presentación.

Conclusión y concepto de falla: El “Housing” del camión 22-713 falló por una combinación de defectos localizados en la zona de fractura:

- **Grietas de fatiga** formadas en la parte interna de la junta de soldadura entre el anillo y el metal base. Las grietas fueron creciendo y avanzaron desde el interior hacia el exterior de la estructura.
- **Grietas externas** sobre el metal base, las cuales no están sobre la junta de soldadura, su origen es debido al desplazamiento (soltura) del anillo al perderse la rigidez de la junta por la falla de las barras tensoras.
- **Reparaciones** con soldadura para corregir las grietas externas sobre metal base, como tal, las reparaciones se llevaron a cabo **sin desmontar** el mando final lo que no permitió corregir de manera adecuada las grietas originadas desde el interior del “Housing”.

2.5.7 Análisis de falla - fractura “Housing” camión 22-807

Descripción: El “Housing” del camión 807 presentó fractura del anillo del “Housing” - Lado A (Figura 2-35). El anillo se fracturó a través de la soldadura entre este y el metal base. Los registros muestran que su instalación fue el 03-Dic-2008 y el suceso de fractura el 26-Jun-2011, para una vida total del componente de 17454 hr.

Figura 2-35: Estado del camión por fractura del anillo (Lado A).



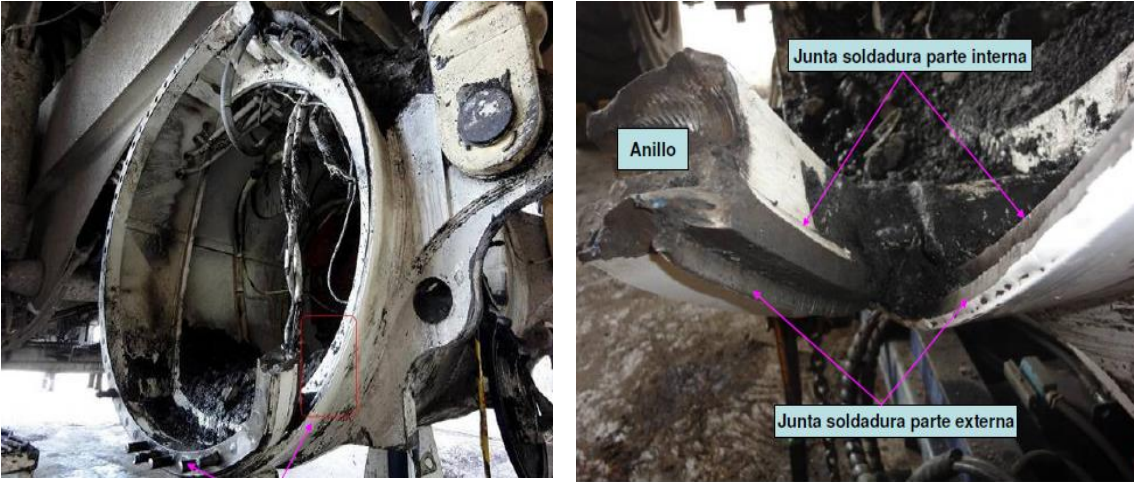
Nota. Recuperado de “Análisis de falla - Fractura del “Housing” del camión 22-807”; Carbones del Cerrejón – Cerrejón Mina Mantenimiento GI&T; 2011, Presentación.

Antecedentes: Inspecciones por ultrasonido (UT) en el periodo 2011, registran los siguientes acontecimientos:

- El camión operó 2720 hr con una (1) barra tensora y un (1) tornillo del mando final (Lado A) fracturados. La última inspección determinó que había dos (2) barras tensoras y tres (3) pernos del lado A fracturados.
- Las Inspecciones estructurales no registran grietas externas en el “Housing”.

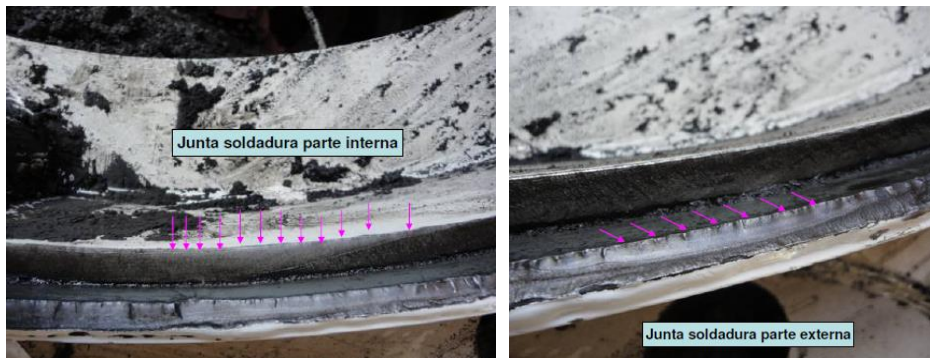
Hallazgos relevantes: Entre el 22-Ene-2011 al 11-Jun-2011, el camión 807 operó 2720hr con indicación de una barra tensora y un perno fracturados. El equipo salió a operar luego de la última U.T, 280 horas después presentó el desprendimiento del mando final - Lado A (**Figura 2-36**). En la superficie de fractura del metal base del “Housing” y en la junta de soldadura, posición cercana a las 5 horas, se detectan marcas de playa con avance de grietas avanzando desde el interior hacia el exterior “Housing” (**Figura 2-37**).

Figura 2-36: Detalle del desgarramiento del anillo - Lado A del "Housing".



Nota. Recuperado de "Análisis de falla - Fractura del "Housing" del camión 22-807"; Carbones del Cerrejón – Cerrejón Mina Mantenimiento GI&T; 2011, Presentación.

Figura 2-37: Evidencias de marcas de playa y ratchet en zona de fractura.



Nota. Recuperado de "Análisis de falla - Fractura del "Housing" del camión 22-807"; Carbones del Cerrejón – Cerrejón Mina Mantenimiento GI&T; 2011, Presentación.

Las marcas de playa encontradas en la sección de los tornillos fracturados, indica que el avance de grieta se produjo durante muchos ciclos de carga (**Figura 2-38**).

Figura 2-38: Marcas de playa en perno ubicado en zona baja de “Housing”.



Nota. Recuperado de “Análisis de falla - Fractura del “Housing” del camión 22-807”; Carbones del Cerrejón – Cerrejón Mina Mantenimiento GI&T; 2011, Presentación.

Conclusión y concepto de falla: El “Housing” del camión 22-807 se fracturó debido a las grietas de fatiga formadas en la junta soldada interna anillo-metal base. La superficie de fractura muestra grietas de fatiga que avanzaron desde el interior hacia el exterior del “Housing”. Éstas son explicadas por la pérdida de rigidez del conjunto “Housing”-Mando Final, y tienen su origen porque el equipo operó con barras tensoras y pernos fracturados por aprox. 3000 hr después de encontrar evidencia de daño.

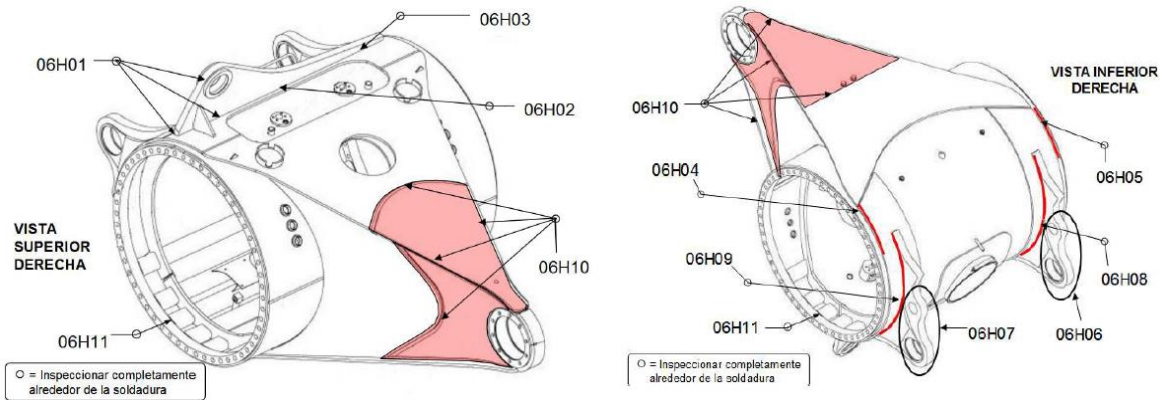
Basado en las evidencias de marcas de playa localizadas en el metal base y en la junta de soldadura, el mecanismo de falla de la fractura fue la fatiga del material. La formación de las grietas está relacionada con los ciclos de cargas de tensión aplicadas directamente en las juntas de soldadura y metal base.

2.6 Procedimiento de cambio y reparación ante detección de fallas

El plan de mantenimiento de la *Flota 320* ha establecido periodos de inspección estructural por END -inspección visual, ultrasonido, tintas penetrantes y partículas magnéticas, donde se examinan zonas sensibles al agrietamiento según el formato de inspección estructural basado en recomendaciones de fábrica (**Figura 2-39**), manteniendo un especial interés en discontinuidades tipo grieta y fractura o pérdida de torque en barras tensoras y tornillos (Hitachi Construction Machinery, p. 5). Las recomendaciones del fabricante son claras al advertir que, en caso de encontrar una barra tensora fracturada o con pérdida de torque

de apriete, se debe reemplazar la totalidad de las seis barras tensoras. En cuanto a los tornillos se debe evaluar su condición mecánica y cambiarlos según corresponda.

Figura 2-39: Sitios de interés en inspección estructural.

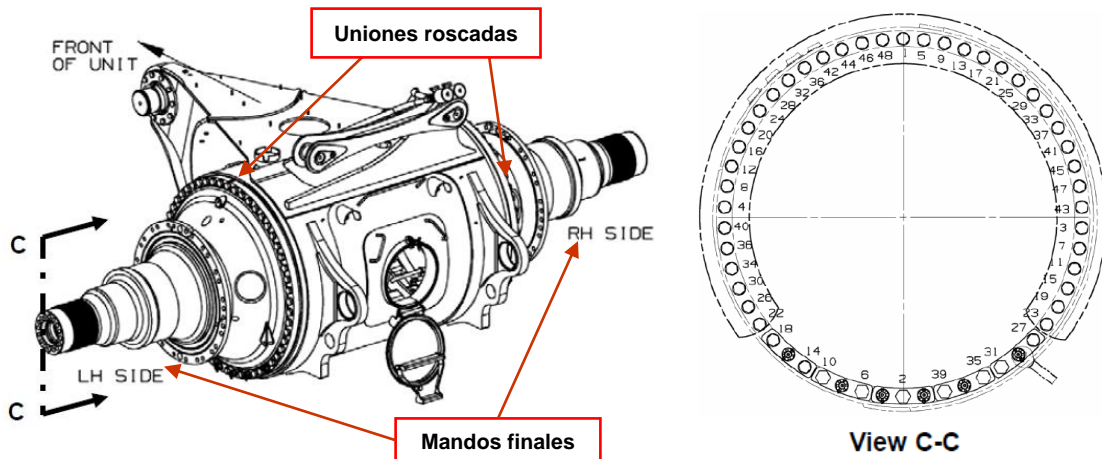


Nota. Recuperado de "Form SM672R1"; Inspection rear axle – Group 1400; Camiones EH5000, Carbones del Cerrejón, P. 20.

2.6.1 Cambio de barras tensoras y tornillos

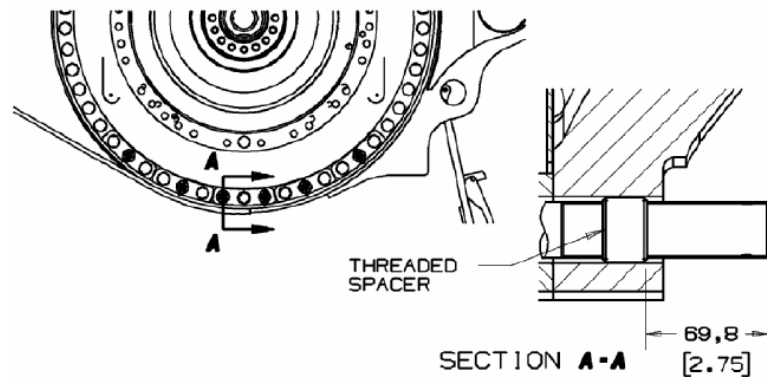
Reportes de mantenimiento han indicado que en general barras tensoras y tornillos de la zona baja experimentan pérdida de torque y agrietamiento frecuente en *condiciones normales de operación*. El cambio de dichos elementos y aplicación del torque de apriete recomendado por el fabricante 2100Nm (1550Lb-ft), requiere del desmontaje de las cuatro llantas traseras para dejar visible únicamente los mandos finales, una vez realizado el cambio se realiza el apriete de los tornillos según la secuencia mostrada (**Figura 2-40**). En el caso de las barras tensoras, como medida de seguridad, se instalan "espaciadores roscados" los cuales evitan que la barra tensora "salga disparada" violentamente cuando se fractura (**Figura 2-41**).

Figura 2-40: Unión de mandos finales al “Housing” y secuencia torque de apriete.



Nota. Recuperado de “Rear Spindle Threaded Rod & Spindle Bolt Information”; HITACHI SERVICE BULLETIN, Hitachi Construction Truck Manufacturing Ltd, P. 4 y 5.

Figura 2-41: Detalle espaciador roscado en barra tensora.



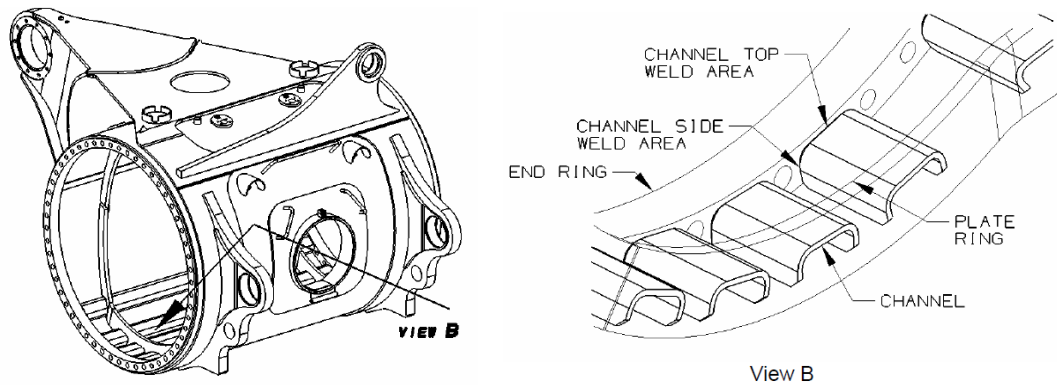
Nota. Recuperado de “Rear Spindle Threaded Rod & Spindle Bolt Information”; HITACHI SERVICE BULLETIN, Hitachi Construction Truck Manufacturing Ltd, P. 6.

2.6.2 Inspección y reparación por soldadura - “Housing”

En el “Housing” existen zonas sensibles al agrietamiento que son de fácil y difícil acceso desde el punto de vista de las inspecciones END. Los agrietamientos ubicados en las soldaduras internas del “Housing”, en particular en las uniones Anillo – “channels” de refuerzo se caracterizan por ser los más críticos en cuanto a consecuencia y dificultad de detección mediante técnicas convencionales END; adicionalmente, las actividades de desmontaje, desinstalación y extracción de sistemas hidráulicos, neumáticos y eléctricos internos hacen que, las inspecciones al interior del “Housing” requieran de una gran gestión

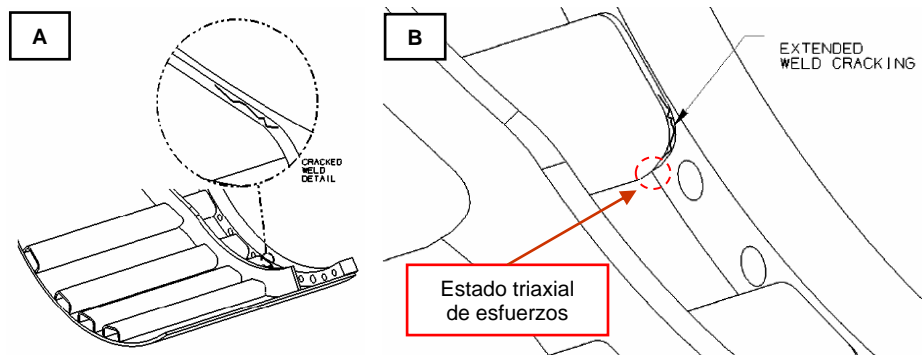
logística deshabilitando los camiones por largos periodos (**Figura 2-42**, **Figura 2-43** y Anexo C).

Figura 2-42: Agrietamiento frecuente al interior del "Housing".



Nota. Las uniones soldadas entre Anillo y "channels" de refuerzo al interior del "Housing" (*TOP weld* y *SIDE weld*) son de difícil acceso, dificultando la detección temprana de grietas mediante técnicas END convencionales. Recuperado de "Rear Axle "channel" Gusset Inspection and Repair Procedure"; HITACHI SERVICE BULLETIN, Hitachi Construction Truck Manufacturing Ltd, P. 6.

Figura 2-43: Agrietamiento frecuente en unión Anillo - "channels" de refuerzo.



Nota. Detalle de agrietamiento frecuente en soldadura horizontal (A) y soldadura vertical (B). Recuperado y modificado de "Rear Axle "channel" Gusset Inspection and Repair Procedure"; HITACHI SERVICE BULLETIN, Hitachi Construction Truck Manufacturing Ltd, P. 5. y 9.

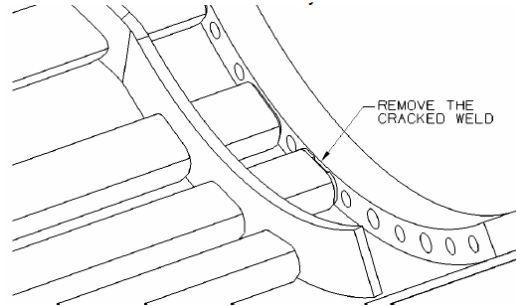
La reparación de estas uniones soldadas requiere de dos métodos diferentes según la ubicación de grieta. El agrietamiento en soldadura horizontal sigue la metodología de **Reparación en sitio (Caso 1)** y el agrietamiento en soldadura vertical sigue la metodología de **Remoción y Reemplazo requerido (Caso 2)**, como se explica a continuación:

- **Caso 1 – Reparación en sitio**

Si la grieta no se extiende más allá de la soldadura superior (Cordón horizontal), la soldadura debe ser excavada y reemplazada para el mismo “channel” usando la siguiente técnica:

- Remover completamente la soldadura del área agrietada (**Figura 2-44**).

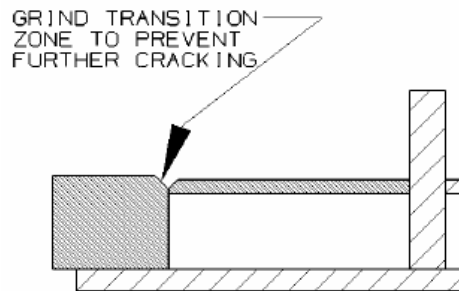
Figura 2-44: Ubicación de la grieta en cordón horizontal.



Nota. Recuperado de “Rear Axle “channel” Gusset Inspection and Repair Procedure”; HITACHI SERVICE BULLETIN, Hitachi Construction Truck Manufacturing Ltd, P. 7.

- Crear un área de transición de mezcla para evitar que un agrietamiento mayor se produzca (**Figura 2-45**).

Figura 2-45: Zona de transición en cara interna del anillo.

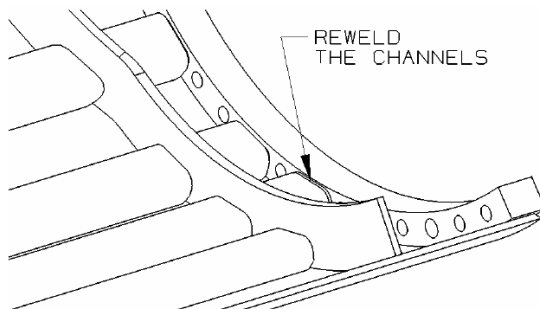


Nota. Recuperado de “Rear Axle “channel” Gusset Inspection and Repair Procedure”; HITACHI SERVICE BULLETIN, Hitachi Construction Truck Manufacturing Ltd, P. 7.

- Inspeccionar el área agrietada realizando inspecciones por partículas magnéticas y líquidos penetrantes, para garantizar que la grieta ha sido eliminada.

- Re-soldar la parte superior del “channel” utilizando filetes de 10mm. Precalear el área a soldar con 160°C (320°F) y controlar la rata de enfriamiento por medio de mantas de soldadura (**Figura 2-46**).

Figura 2-46: “channels” resoldados únicamente en el área superior.



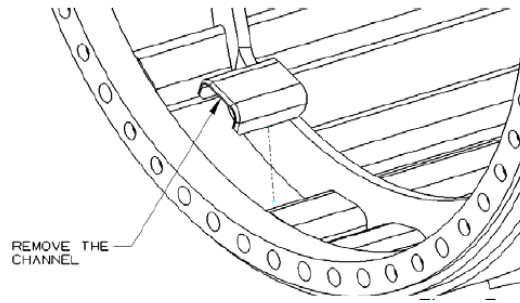
Nota. Recuperado de “Rear Axle “channel” Gusset Inspection and Repair Procedure”; HITACHI SERVICE BULLETIN, Hitachi Construction Truck Manufacturing Ltd, P. 8.

- Re-inspeccionar la zona agrietada mediante partículas magnéticas y líquidos penetrantes, y reparar cualquier grieta subsecuente en la junta hasta que ésta pase la prueba de inspección.
- **Caso 2 – Remoción y reemplazo requerido.**

Si la grieta se ha extendido más allá del cordón horizontal y pasa al cordón vertical (**Figura 2-43 (B)**). El “channel” será removido completamente; cualquier grieta debe ser eliminada y un nuevo “channel” debe ser puesto en su lugar usando la siguiente técnica:

- Remover completamente los “channels” afectados y pulir completamente hasta que la zona quede suave. Se debe cambiar solo un “channel” a la vez, para evitar distorsiones en la soldadura (**Figura 2-47**).
- Inspeccionar el área agrietada y la geometría adyacente mediante partículas magnéticas y líquidos penetrantes, para garantizar que las grietas han sido eliminadas completamente.
- Preparar la zona de deposición de soldadura utilizando filetes de 10mm a 45°.
- Re-inspeccionar la zona agrietada mediante partículas magnéticas (MPI) y líquidos penetrantes (LPD), y reparar cualquier grieta subsecuente en la junta hasta que ésta pase la prueba de inspección.

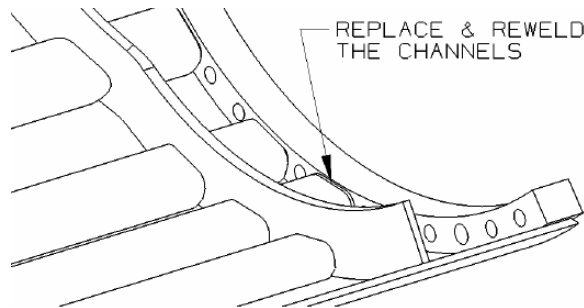
Figura 2-47: Instalación de un “channel” por vez para evitar distorsiones.



Nota. Recuperado de “Rear Axle “channel” Gusset Inspection and Repair Procedure”; HITACHI SERVICE BULLETIN, Hitachi Construction Truck Manufacturing Ltd, P. 10.

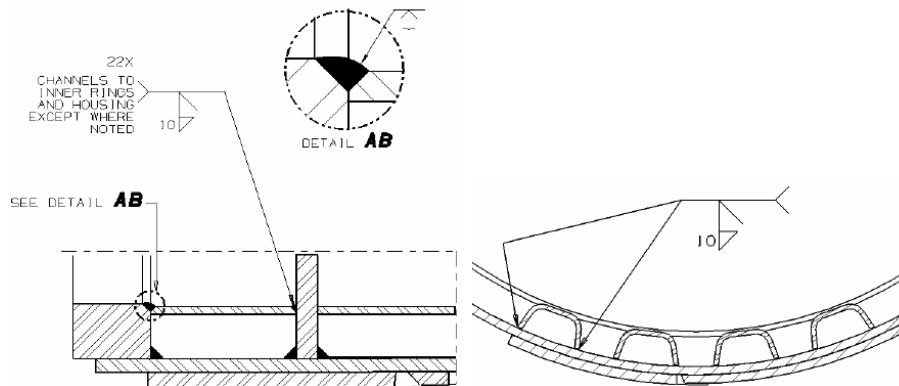
Precalear el área a soldar con 160°C (320°F), soldar el “channel” nuevo y controlar la rata de enfriamiento por medio de mantas de soldadura (**Figura 2-48** y **Figura 2-49**).

Figura 2-48: Soldadura de “channel” nuevo.



Nota. Recuperado de “Rear Axle “channel” Gusset Inspection and Repair Procedure”; HITACHI SERVICE BULLETIN, Hitachi Construction Truck Manufacturing Ltd, P. 11.

Figura 2-49: Detalle aplicación de soldadura.



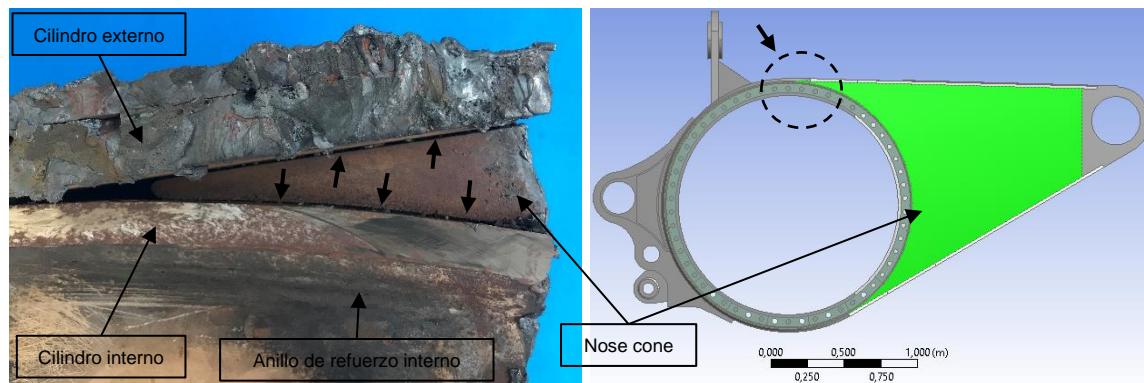
Nota. Recuperado de “Rear Axle “channel” Gusset Inspection and Repair Procedure”; HITACHI SERVICE BULLETIN, Hitachi Construction Truck Manufacturing Ltd, P. 12.

3. Concepto modo de falla

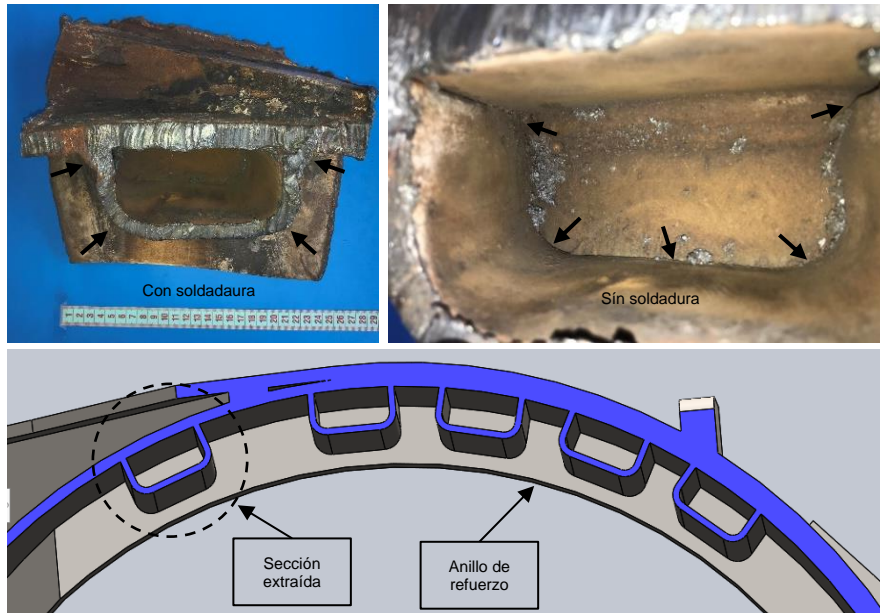
3.1 Fractografía - “Housing”

Mediante el análisis de dos secciones de “Housing” falladas, se logró evaluar su configuración geométrica y algunos detalles de construcción. Se observó que la unión soldada **Nose cone - Cilindro interno - Cilindro externo** (Figura 3.1) y la unión “**Channel**” – **Anillo refuerzo interno** (Figura 3.2) corresponden a juntas tipo *té simple* entre láminas rectas y láminas dobladas sin el uso de “*backing strip*”, impidiendo realizar cordones de soldadura en ambos lados de la unión, debido a posibles limitaciones de acceso o configuraciones geométricas que generan espacios cerrados.

Figura 3.1: Sección fracturada uno, unión “Nose cone”-Cilindro interno/externo.



Nota. La unión soldada es del tipo “te simple”, con aplicación de soldadura únicamente en la parte externa del “Housing”, seccionamientos de “Housing” realizados con oxiacetileno.

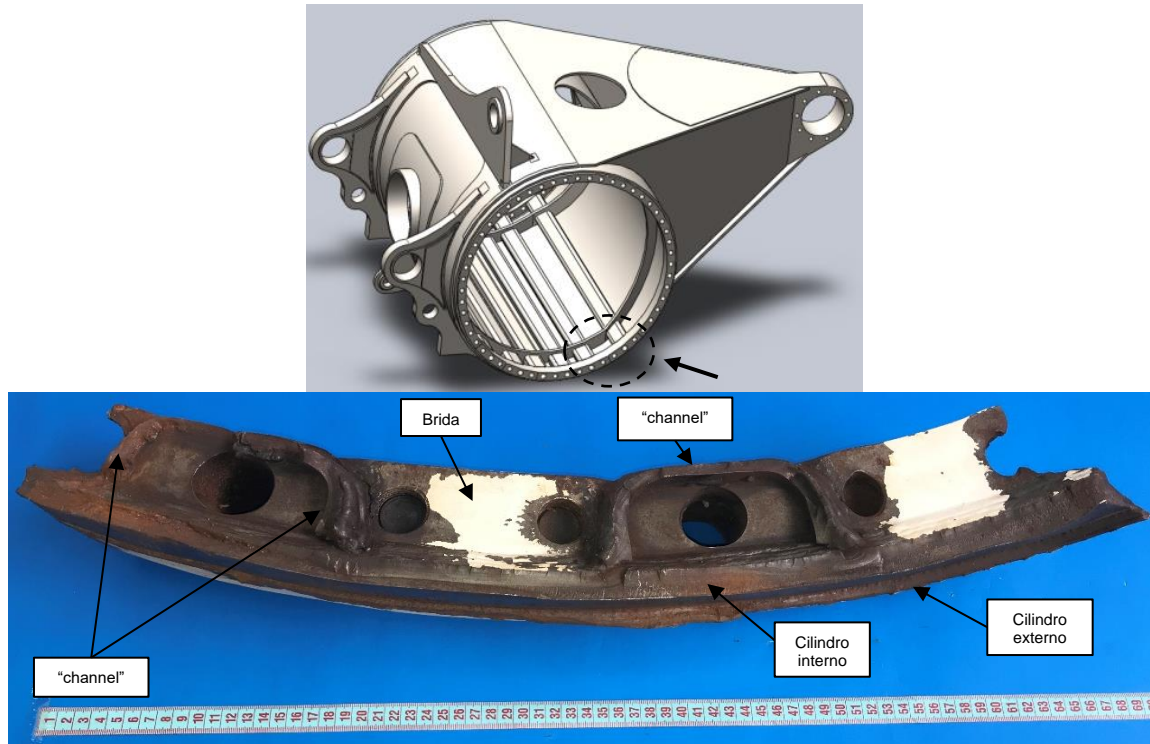
Figura 3.2: Detalles de construcción, unión “channel”-Anillo refuerzo interno.

Nota. La unión de tipo “Te simple” se realiza sin el uso de “backing-strip”, el cordón de soldadura es aplicado únicamente en la cara externa de la junta “channel”-anillo de refuerzo. Cortes de “Housing” realizados con oxiacetileno.

Adicionalmente, Carbones del Cerrejón proporcionó una segunda sección de “Housing” fracturado perteneciente al camión C769, sección compuesta por cuatro elementos: **Brida**, **“channel”**, **cilindro interno** y **cilindro externo**. La sección fue sometida a un proceso manual de limpieza química (Pintóxido - Pintuco®) convirtiendo el óxido de hierro en fosfatos, facilitando su eliminación y permitiendo evaluar detalles superficiales enmascarados por el óxido (**Figura 3.3**).

Para efectos de análisis, la sección se dividió en tres tipos de uniones soldadas: **Unión Cilindro interno–Brida**, **unión Cilindro interno–Cilindro externo** y **unión “channel”-Brida**. En general, estas juntas presentaron morfologías superficiales propias de fractura por fatiga, como son las *marcas de inicio de grieta*, *marcas radiales* y *marcas de playa*, como se verá más adelante.

Figura 3.3: Sección fracturada dos, "Housing" fracturado camión C769.

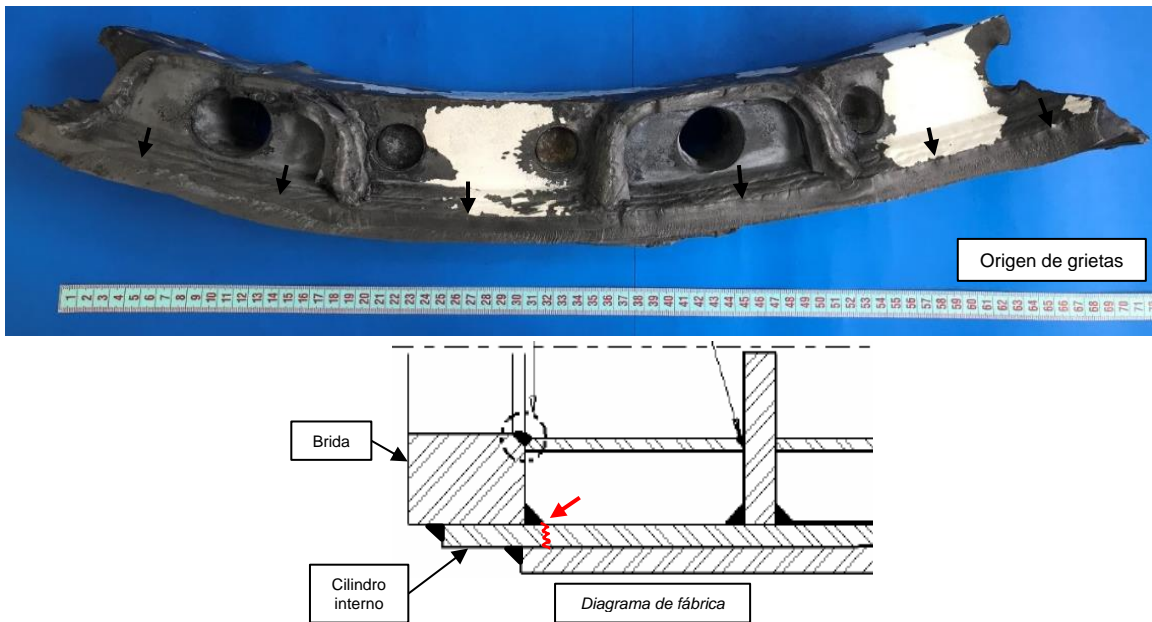


Nota. Sección extraída de la zona baja del "Housing" (camión C769), el cual contiene evidencia de falla.

3.1.1 Fractografía unión Cilindro interno - Brida

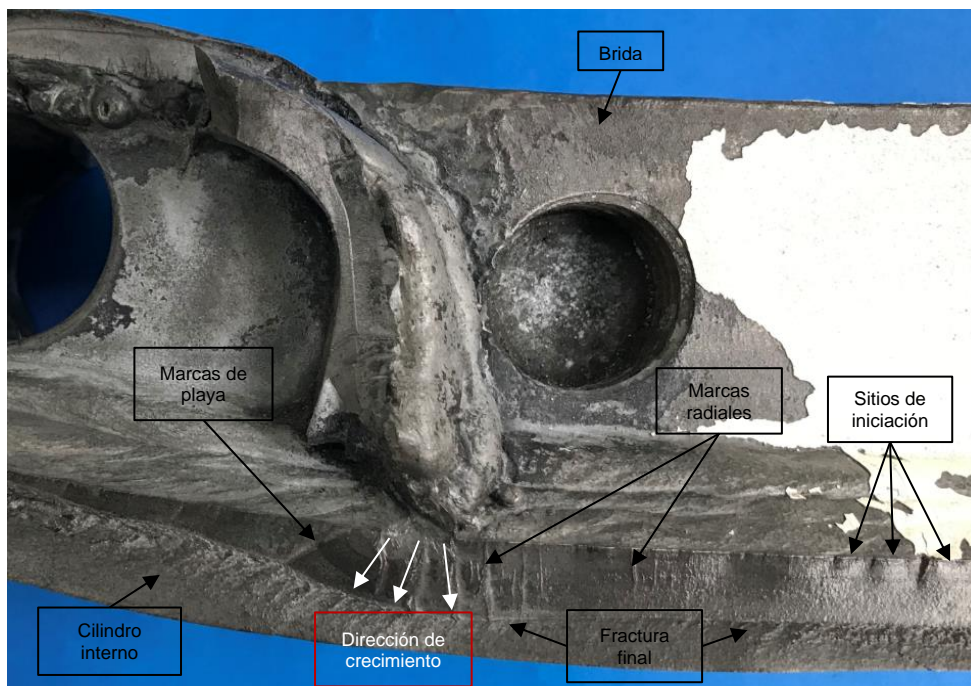
Esta unión soldada consta de dos geometrías concéntricas donde el *cilindro interno* rodea la *brida*, unidos mediante dos cordones de soldadura continuos donde se evidenciaron múltiples sitios de iniciación de grietas a lo largo del pie de soldadura interno, indiferente a la existencia de "channels" (**Figura 3.4**); sin embargo, se observó que las marcas de playa emanan únicamente de las intersecciones con los "channels" creciendo a través del cilindro interno en dirección radial (**Figura 3.5** y Anexo D).

Figura 3.4: Morfología de falla en unión *Cilindro interno - Brida*.



Nota. El origen de las grietas se distribuye uniformemente a lo largo del pie de soldadura interno, nótese la propagación de grieta resaltada en color rojo.

Figura 3.5: Fractografía unión *Cilindro interno - Brida*.

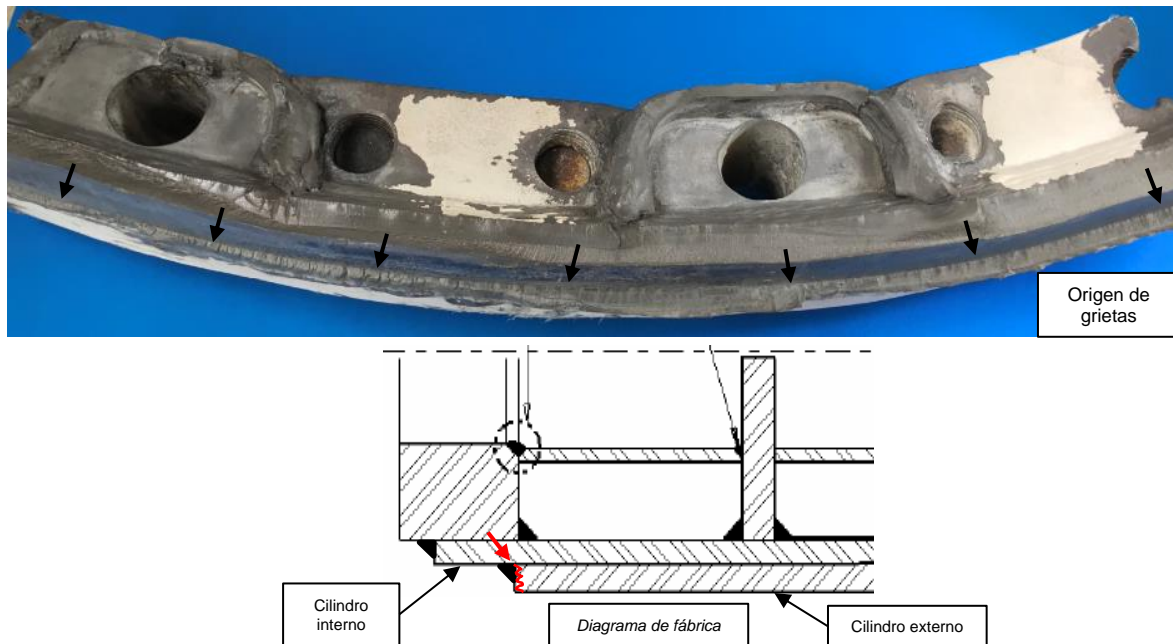


Nota: La concetricidad de las marcas de playa indican que las grietas se inician y avanzan desde el interior hacia el exterior del "Housing".

3.1.2 Fractografía unión Cilindro interno - Cilindro externo

Esta unión consta de dos cilindros concéntricos donde, el *cilindro interno* y el *cilindro externo* se unen mediante cordón de soldadura continuo y de fácil acceso ubicados al exterior del "Housing". La junta presenta múltiples sitios de iniciación de grieta con origen en la raíz del cordón (**Figura 3.6**).

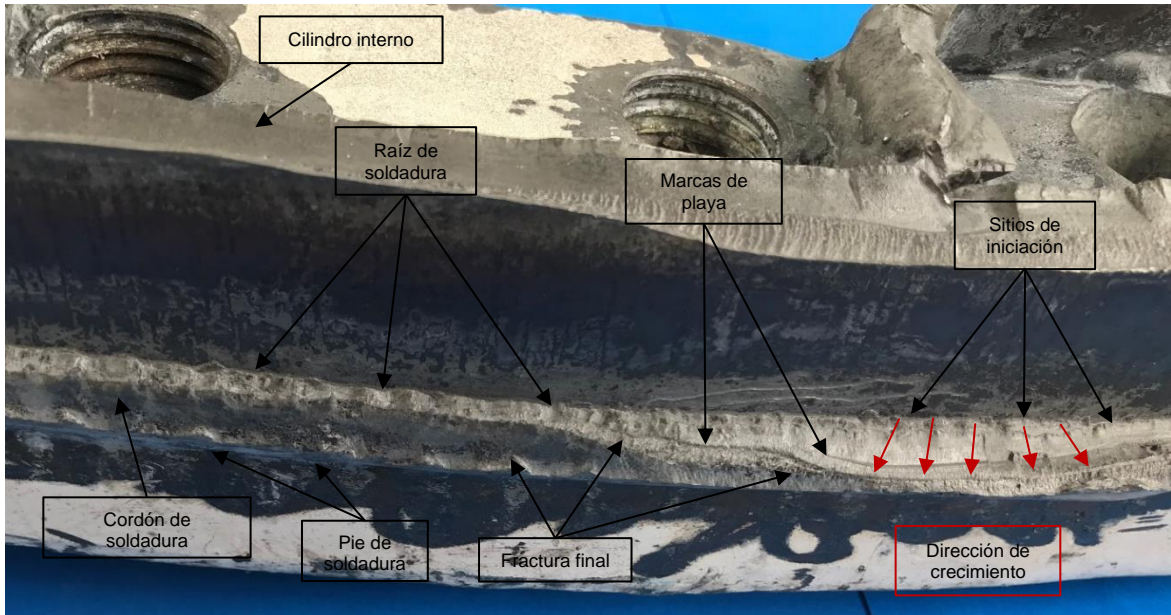
Figura 3.6: Morfología de falla en junta soldada: *Cilindro interno – Cilindro externo*



Nota. El origen de las grietas se distribuye uniformemente a lo largo de la raíz de la junta, nótese la propagación de grieta resaltada en color rojo.

Esta sección presenta vestigios del cilindro externo quedando como evidencia el cordón de soldadura fracturado (**Figura 3.7** y Anexo E).

Figura 3.7: Fractografía unión *Cilindro interno – Cilindro externo*.

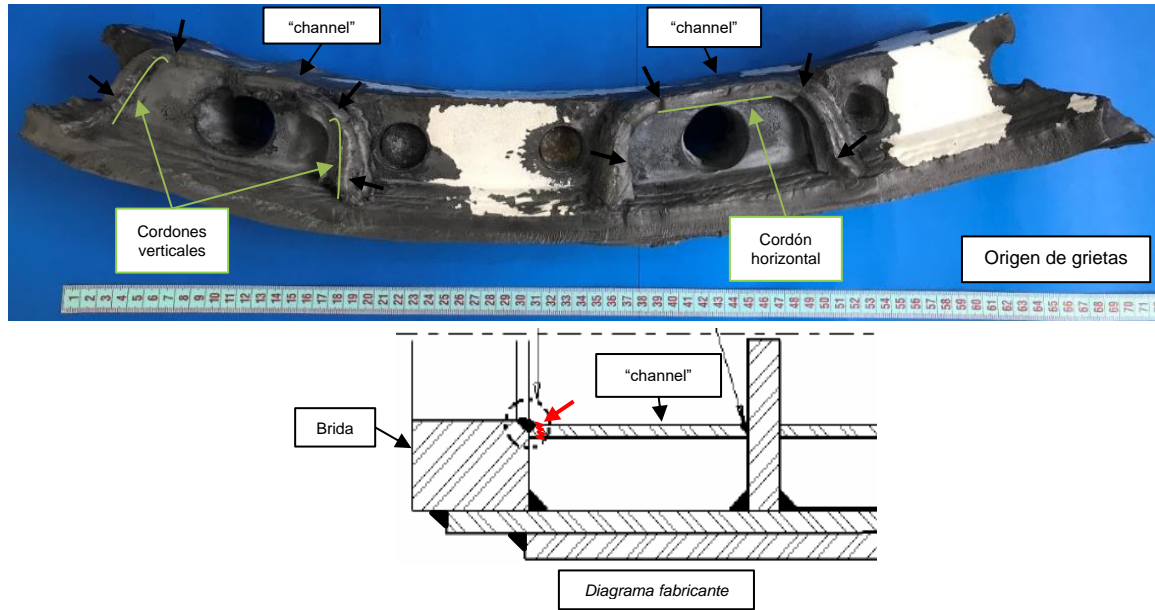


Nota: El cilindro externo no está presente, queda como evidencia únicamente el cordón de soldadura.

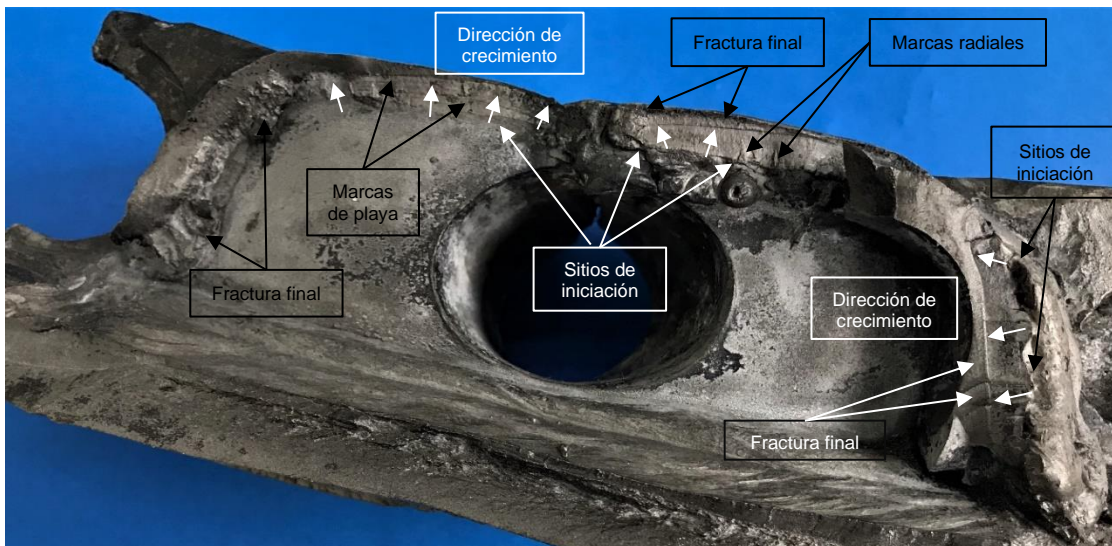
3.1.3 Fractografía unión “Channel” - Brida

Originalmente, esta unión consta de seis “channels” de refuerzo unidos a la brida mediante cordones de soldadura continuos como se describe en el procedimiento de reparación por soldadura, la sección analizada en laboratorio consta de dos secciones de “channel” con evidencia de múltiples sitios de nucleación de grieta. El manual especifica que cada junta de “channel” consta de un cordón horizontal y dos verticales; los cuales, son de difícil acceso en operación; ya que, se encuentran ubicados al interior del “Housing” (**Figura 3.8**).

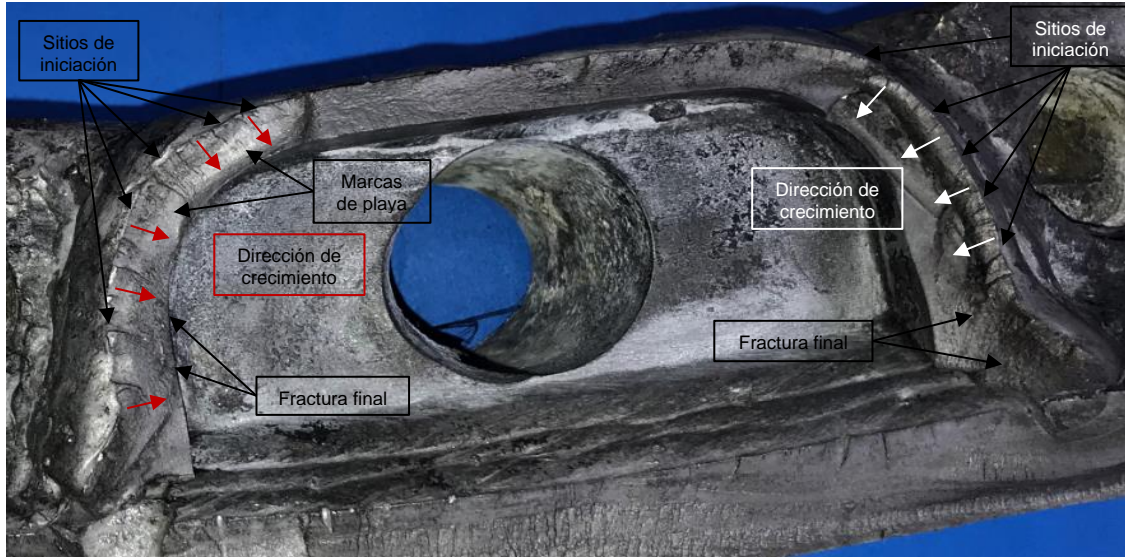
Las superficies de falla muestran que las grietas se originan preferencialmente en pie de soldadura para los cordones verticales creciendo hacia el interior de cada “channel”, y en raíz de soldadura para los cordones horizontales, creciendo hacia el exterior de cada “channel” (**Figura 3.9**, **Figura 3.10** y Anexo F).

Figura 3.8: Morfología de falla en junta soldada: "Channel" - Brida.

Nota: Múltiples sitios de origen de grietas se generan en la periferia de cada "channel", nótese la propagación de grieta en la intersección cordón vertical/cordón horizontal resaltada en color rojo.

Figura 3.9: Fractografía unión soldada "Channel" 1 - Brida.

Nota. Las marcas de origen de grietas y marcas de playa, muestran que la nucleación se genera en raíz de junta horizontal creciendo hacia el exterior (Dirección de crecimiento 1), y en pie de soldadura para las juntas verticales creciendo hacia el interior del "Housing" (Dirección de crecimiento 2).

Figura 3.10: Fractografía unión soldada “Channel” 2 - Brida.

Nota. Las marcas de origen de grietas y marcas de playa, evidencian que la nucleación se genera en pie de soldadura para las juntas verticales, creciendo hacia el interior del “Housing”.

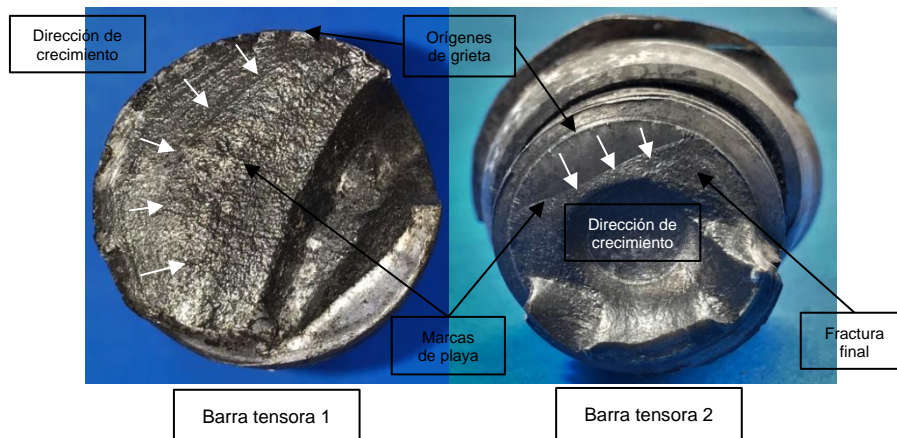
Finalmente, se puede afirmar que las fracturas en las tres uniones soldadas: **Unión Cilindro interno–Brida**, **unión Cilindro interno–Cilindro externo** y **unión “channel”-Brida**, se originaron por el fenómeno de fatiga.

3.2 Fractografía – Barras tensoras

El análisis de dos segmentos de barras tensoras fracturadas correspondientes a extremo roscado y zona intermedia con ubicación desconocida en el “Housing” (**Figura 3.11**), presentan morfología de propagación de grietas por fatiga con apariencia dúctil/frágil, evidenciando *marcas de origen de grieta*, *marcas de playa* y *desgarre final*, donde la propagación estable de grieta fue más corta en el extremo roscado. El paralelismo entre planos de grieta y sección transversal, indica que la barra tensora experimentó cargas predominantes de tracción (**Figura 3.12**).

Figura 3.11: Secciones fracturadas de barra tensora.

Nota. Morfología de falla por fatiga en el lado indicado, ubicación en el "Housing" desconocida.

Figura 3.12: Fractografía en dos secciones de barra tensora.

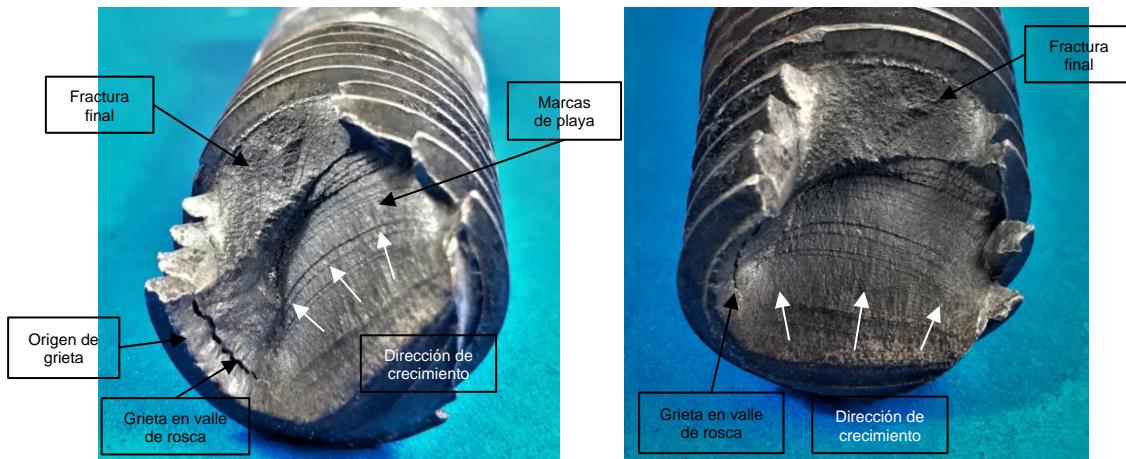
Nota. Las dos superficies muestran morfología típica de fractura por fatiga.

3.3 Fractografía – Tornillo

Uno de los tornillos con ubicación desconocida en la unión bridada *Mando final-"Housing"*, presenta fractura en su zona roscada (**Figura 3.13**), el análisis fractográfico presentó morfología de *fractura por fatiga*, debido a la presencia de *marcas de origen de grieta* en valle de rosca, seguido por *marcas de playa* avanzando por su núcleo en un ángulo aproximado de 45° respecto a su eje longitudinal, hasta alcanzar la fractura final por desgarramiento (**Figura 3.14**). La inclinación en trayectoria de grieta evidencia que el tornillo experimentó cargas combinadas de tracción y flexión durante su vida útil.

Figura 3.13: Sección de tornillo fracturado.

Nota. Marcación en cabeza de tornillo, con evidencia de fractura en su zona roscada.

Figura 3.14: Fractografía en tornillo fracturado.

Nota. La superficie presenta morfología de avance de grietas por fatiga.

3.4 Caracterización de material

En el proceso de identificación de materiales se implementaron los siguientes ensayos: **Pruebas de dureza, ensayos de tensión, análisis químico y examen metalográfico**, desarrollados en los laboratorios de ensayos mecánicos de la Universidad Nacional de Colombia. Se determinaron propiedades mecánicas y químicas para los tres tipos de componentes (*“Housing”, Barras tensoras y Tornillos*), con el fin de clasificarlos dentro de familias estándar de materiales e identificar diferencias significativas que puedan ser fuentes de falla. Ciertos valores de dureza y resistencia mecánica fueron comparados con información técnica proporcionada por HITACHI en el *análisis de falla* del camión C759 en el año 2010, para Carbones del Cerrejón (EUCLID-HITACHI Heavy Equipment Inc., 2010).

La **dureza superficial** fue determinada mediante el método de cinco huellas, para seis probetas de "Housing", cuatro de barras tensoras y cuatro de tornillos (Anexo I). Los ensayos se realizaron con el durómetro marca Wolpert de acuerdo al estándar ASTM E18-20 (*Standard Test Methods for Rockwell Hardness of Metallic Materials*).

Los ensayos de tracción mecánica se llevaron a cabo mediante la fabricación de seis probetas de acuerdo al estándar ASTM E8-E8M (*Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials*). A partir de un "Housing" fallado se fabricaron dos probetas de sección transversal plana extraídas de "channel" y cuatro probetas de sección transversal redonda, dos correspondientes a barras tensoras y dos a tornillos (**Figura 3.15** y Anexo C).

Figura 3.15: Probetas para ensayos de tracción mecánica.



Nota. Probetas utilizadas en ensayos de tracción mecánica. "Housing" (H), Tornillo (T), Barra tensora (B); Universidad Nacional de Colombia, Laboratorios de materiales.

La **composición química** de los tres tipos de acero, fue determinada mediante el equipo de espectrometría de emisión por chispa, quien cumple los criterios del estándar ASTM E415: *Standard Test Method for Analysis of Carbon and Low-Alloy Steel by Spark Atomic Emission Spectrometry* (Anexo H). Los **análisis metalográficos** fueron guiados por los criterios del estándar ASTM E3: *Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens*. Se examinó su microestructura y revelaron algunos cambios microestructurales, se evaluó la influencia de la calidad del material en términos de

inclusiones, tamaño de grano, capa superficial y tratamientos térmicos (Anexo J, Anexo K y Anexo L).

3.4.1 Caracterización de “Housing”

Los ensayos de dureza fueron realizados en sección longitudinal y transversal para cada probeta (**Tabla 3-1**), los ensayos de tracción en probetas de sección rectangular (**Tabla 3-2** y Anexo G); así como, los ensayos de composición química, (**Tabla 3-3** y Anexo H).

Tabla 3-1: Medición de durezas - “Housing”.

Item	Probeta	Sección	Dureza #1 (HRB)	Dureza #2 (HRB)	Dureza #3 (HRB)	Dureza #4 (HRB)	Dureza #5 (HRB)	Dureza promedio (HRB)	Desviación estándar
1	H1	Longitudinal	83,5	90	82	80,5	83	83,8	3,65
2	H2	Longitudinal	79,8	85	82,9	80	78,8	81,3	2,57
3	HN2	Longitudinal	92,5	95,3	93,5	94	95,5	94,2	1,26
4	H1	Transversal	78	83	84	84	83,5	82,5	2,55
5	H2	Transversal	85	86	85,5	84	83	84,7	1,20
6	HN2	Transversal	94,1	99	95,9	95,9	96,9	96,4	1,78
	<i>Dureza Longitudinal Promedio total</i>	-						86,4	
	<i>Dureza Transversal Promedio total</i>	-						87,9	
7	“Cylinder wall”	Hitachi F.A. C759						87	
8	ASTM A570 Gr 45 Type 2	-						87-89	
9	ASTM A572 Gr 65	-						83	

Nota. Items del 1 al 6 corresponde a ensayos realizados en la Universidad Nacional de Colombia, ítem 7 proporcionado por HITACHI, ítem 8 y 9 según tabla de equivalencias ASTM A370 [Tabla 3].

Tabla 3-2: Ensayos de tracción - “Housing”.

Item	Probeta	Procedencia	Sy (Mpa)	Sut (Mpa)	E (Gpa)
1	H1	UN Lab	591,6	612,9	183,3
2	H2	UN Lab	575,8	585,4	197,1
3	“Cylinder wall”	Hitachi F.A. C759	476,4	581,2	-
4	-	ASTM A570 Gr 45 Type 2 (“channel”)	310 mín.	415 mín.	160
5	-	ASTM A572 Gr 65 (cilindro)	450 mín.	550 mín.	-

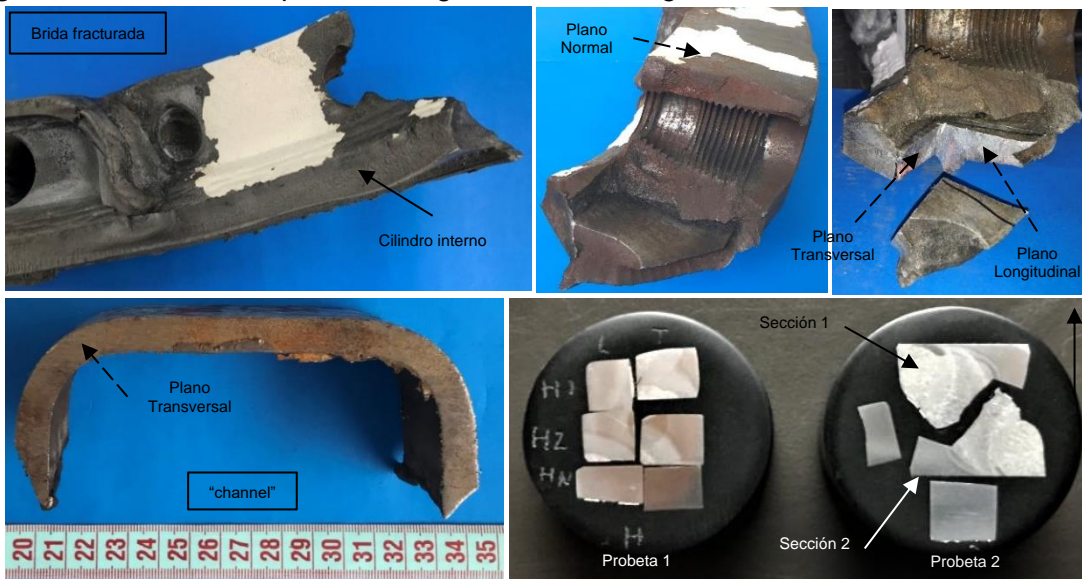
Nota. Items 1 y 2 corresponde a ensayos realizados en la Universidad Nacional de Colombia, ítem 3 proporcionado por HITACHI, ítem 4 y 5 según estándares ASTM A570 y ASTM A572.

Tabla 3-3: Composición química - "Housing".

Item	Probeta	Fe (%)	C (%)	Mn (%)	P (%)	S (%)	Si (%)
1	H1 ("channel")	98,062	0,240	1,135	0,031	0,018	0,327
2	H2 ("channel")	98,078	0,214	1,139	0,033	0,018	0,32
3	HN2 (Cilindro interno)	97,702	0,197	1,511	0,019	0,011	0,402
4	ASTM A570 Gr 45 Type 2	-	0,25 máx.	1,35 máx.	0,035 max	0,04 max	-
5	ASTM A572 Gr 65	-	0,23/0,26 máx	1,65 máx	0,04 max	0,05 max	-

Nota. Ítems 1, 2 y 3 corresponden a ensayos realizados en la Universidad Nacional de Colombia, con valores promedio de tres datos, ítem 4 y 5 estándares ASTM A570 y ASTM A572.

Las probetas fueron extraídas de una sección de "**channel**" y de la **sección fracturada** dos (Figura 3.3). La evaluación metalográfica fue realizada sobre tres secciones - *longitudinal*, *transversal* y *normal*, según orientación y aproximación a uniones soldadas (Figura 3.16).

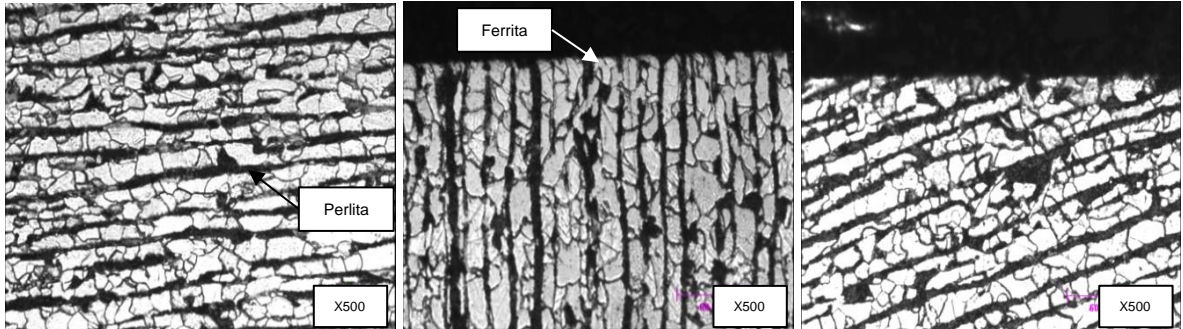
Figura 3.16: Probetas para metalografía de "Housing".

Nota. La "brida fracturada" y el "channel" pertenecen a distintos camiones. Las secciones Longitudinal y Transversal de H1 y H2 fueron extraídas de "channel" (probeta 1), las secciones de HN y Probeta 2 fueron extraídas de la sección de brida fracturada.

El examen metalográfico permitió revelar que el acero empleado en la fabricación de "channels" y cilindro interno del "Housing", están compuestos de granos alargados de ferrita y bandas de perlita con presencia de algunas inclusiones, característico de aceros de bajo carbono con aplicaciones estructurales como el ASTM A572 Grado 65 (Figura 3.17); así mismo, permitió identificar en la ZAC la transformación de austenita en

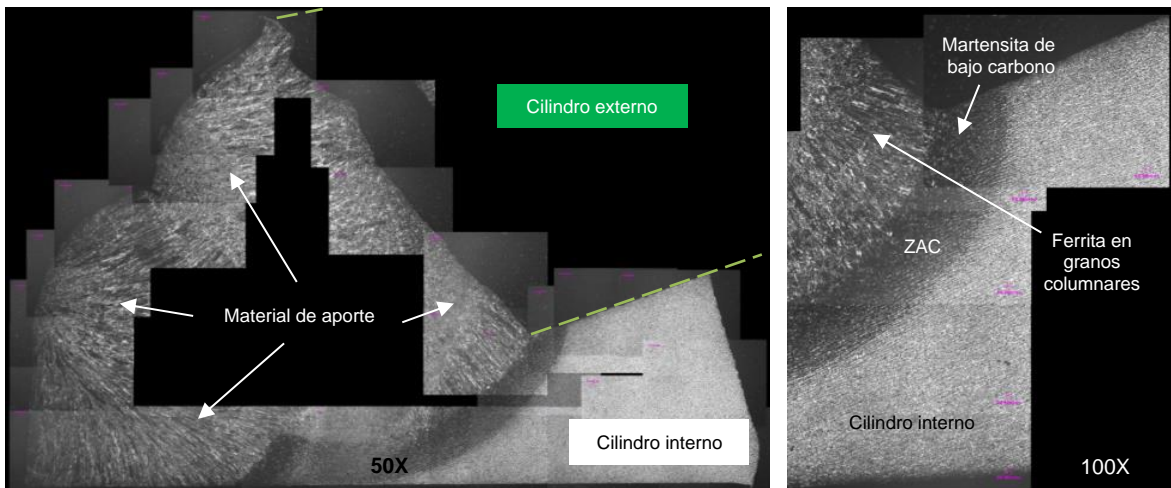
martensita de bajo carbono y la formación de granos columnares de ferrita en el metal de aporte (**Figura 3.18**).

Figura 3.17: Microestructura – Metal base “Housing”.



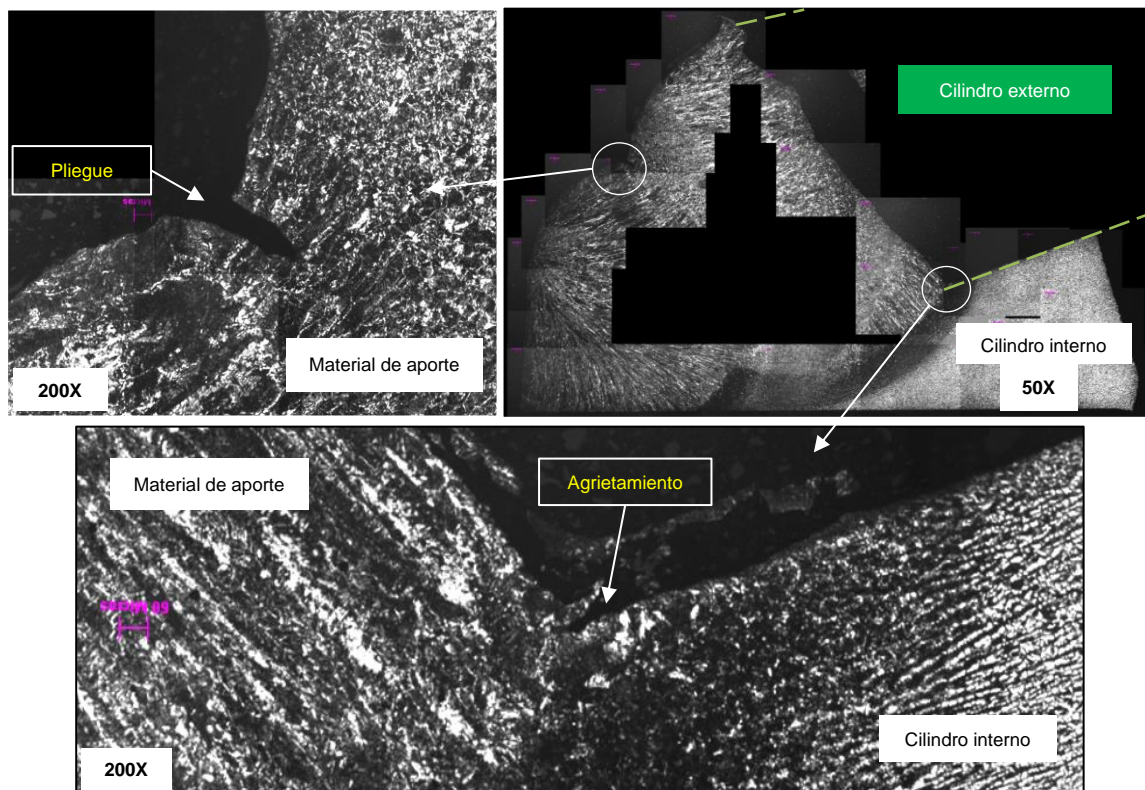
Nota. Microestructuras en “channel” (transversal/longitudinal) y *cilindro interno* (longitudinal). x500. Nital 2%.

Figura 3.18: Microestructura – Soldadura cilindro interno/cilindro externo.



Nota. Detalle de unión soldada *cilindro interno/cilindro externo*, corte transversal al cordón de soldadura. La lámina del cilindro externo no está presente. 50X y 100X. Nital 2%.

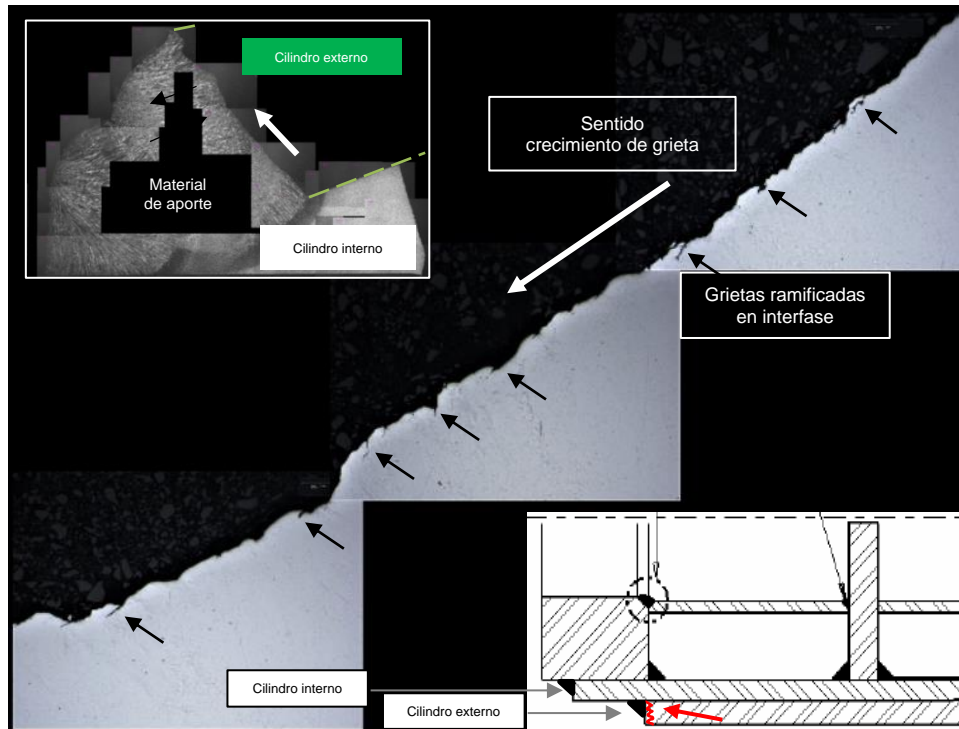
Un análisis detallado reveló varios tipos de discontinuidades, en el lado del cordón de presentación *entre pliegues de soldadura (interfase cilindro externo/material de aporte)* y en el lado del *concentrador de esfuerzos de la ZAC (interfase material de aporte/cilindro interno)* (**Figura 3.19**). El corte transversal de la unión muestra que el agrietamiento avanzó desde el pie de soldadura a través de la interfase entre *cilindro interno-material de aporte* con un patrón ramificado (**Figura 3.20**), este patrón de agrietamiento es similar en las dos secciones (Anexo H).

Figura 3.19: Discontinuidades en unión soldada cilindro interno/externo.

Nota. Detalle de dos zonas agrietadas en la unión soldada. 50X y 200X. Nital 2%.

Finalmente, los resultados prueban que los aceros empleados en la construcción de "channel" y *cilindro interno* son diferentes, sus análisis de propiedades mecánicas, composición química y apariencia metalográfica; indican que corresponden respectivamente a un acero de bajo carbono **ASTM A570 Grado 45 Tipo 2** y **ASTM A572 Gr 65**. Adicionalmente, se evidenció que las uniones soldadas presentan agrietamiento múltiple generados en pliegues externos y en pie de soldadura, en este último el plano de grieta fue determinado por la interfase - *material de aporte/cilindro interno*.

Figura 3.20: Propagación de grietas por fatiga - interfase *cilindro interno-material de aporte*.



Nota. Avance de grieta a través de la interfase *cilindro externo-material de aporte* con origen en pie de soldadura, nótese las ramificaciones generadas a su paso. La vista en corte muestra la ubicación del agrietamiento resaltado en color rojo. 50X (Nital 2%) y 500X (Pulida sin ataque).

3.4.2 Caracterización de Barras tensoras

Los ensayos de dureza fueron realizados sobre sección transversal en zona cercana a la superficie de falla, sus valores se encontraron en el límite de las dos escalas; por lo tanto, se realizaron las mediciones en escalas HRB y HRC (Tabla 3-4).

Tabla 3-4: Medición de durezas – Barras tensoras.

Item	Probeta	Sección	Dureza #1 (HRC)	Dureza #2 (HRC)	Dureza #3 (HRC)	Dureza #4 (HRC)	Dureza #5 (HRC)	Dureza promedio (HRC)	Desviación estándar
1	B1	Transversal	29,2	29	31,9	31,9	28,9	30,1	2,79
2	B2	Transversal	31	32,5	31	32	31	31,5	0,70
	<i>Dureza Transversal Promedio</i>	-						30,8	
3	AISI 4140	-						28-32	
	AISI 5140	-						28-34	

Nota. Items 1 y 2 corresponden a ensayos realizados en la Universidad Nacional de Colombia. Item 3 por ASM HandBook Volume 01 [Tabla 4] p.1124.

Los ensayos de tracción se realizaron en probetas de sección circular (**Tabla 3-5**); así como, el análisis de composición química (**Tabla 3-6**).

Tabla 3-5: Ensayos de tracción – Barras tensoras.

Item	Probeta	Procedencia	Sy (Mpa)	Sut (Mpa)	E (Gpa)	ALARGAMIENTO (%)
1	B1	UN Lab	989,1	1092,3	210	17,3
2	B2	UN Lab	884,9	1002,4	201	11,7
3	-	HITACHI tensile test	1051,4	1143,1	-	-
4	-	AISI 4140	910	1020	205	16,5
5	-	AISI 5140	689	883	205	19,7

Nota. Items 1 y 2 corresponden a ensayos realizados en la Universidad Nacional de Colombia. Item 3 proporcionado por HITACHI. item 4 según ASTM A370 [Tabla 3]. Item 5 proporcionado por ASM Handbook Volume 01 [Tabla 4].

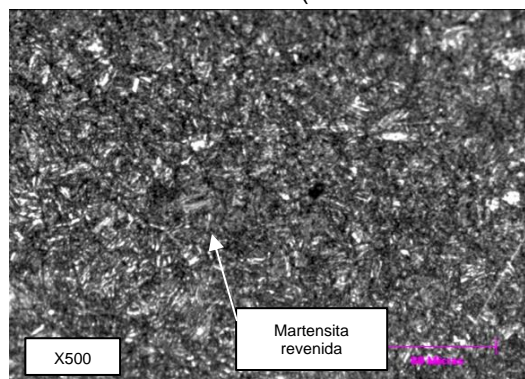
Tabla 3-6: Composición química – Barras tensoras.

Item	Probeta	Fe (%)	C (%)	Mn (%)	P (%)	S (%)	Si (%)	Cr (%)	Mo (%)
1	B1	97,164	0,422	0,714	0,004	0,004	0,237	1,035	0,16
2	B2	97,566	0,408	0,773	0,013	0,024	0,208	0,814	0,013
3	AISI 4140	96,785 - 97,77	0,38 - 0,43	0,75 - 1,0	<= 0,035	<= 0,040	0,20 - 0,35	0,80 - 1,1	0,15-0,25
4	AISI 5140	97.395 - 98.07	0,38 - 0,43	0.70 - 0.90	<= 0,035	<= 0,040	0.15 - 0.35	0.7 - 0.9	-

Nota. Items 1 y 2 corresponden a ensayos realizados en la Universidad Nacional de Colombia, valores promedio de tres datos. Item 3 proporcionado por ASM Handbook Volume 09 [Tabla 2].

El examen metalográfico fue realizado en dos secciones -longitudinal y transversal, revelando una microestructura de *martensita revenida* (**Figura 3.21**).

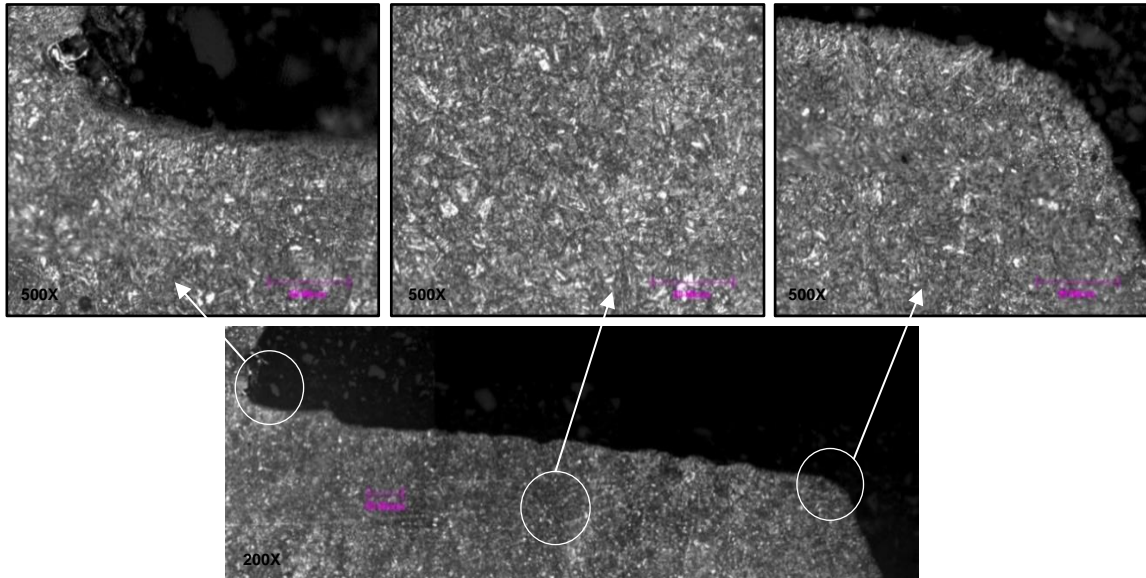
Figura 3.21: Microestructura – Barra tensora (Sección transversal).



Nota. Microestructura hacia superficie de barra tensora - Sección transversal. x500. Nital 2%.

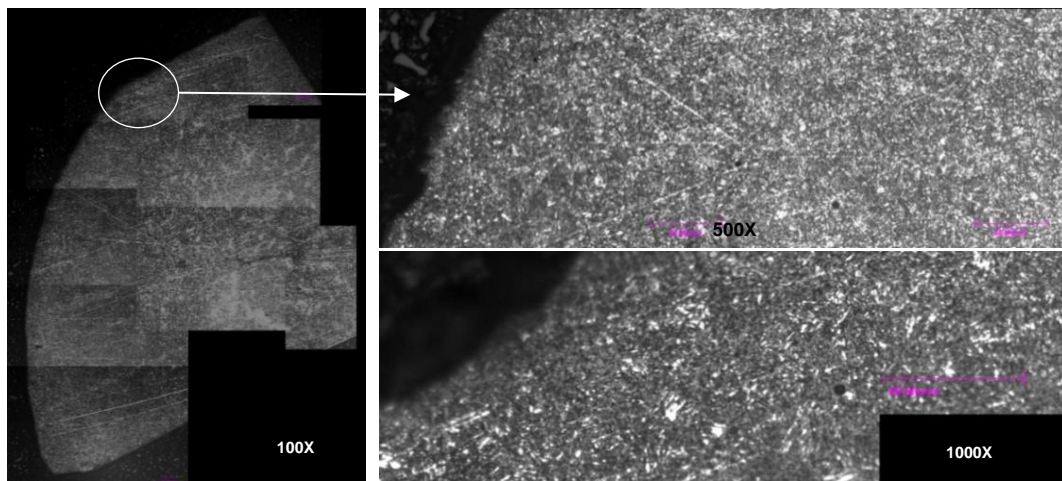
Se observó que no existen variaciones de tamaño significativas entre superficie y núcleo de rosca; indicando la ausencia de capa endurecida (**Figura 3.22** y **Figura 3.23**).

Figura 3.22: Microestructura – Barra tensora (sección longitudinal).



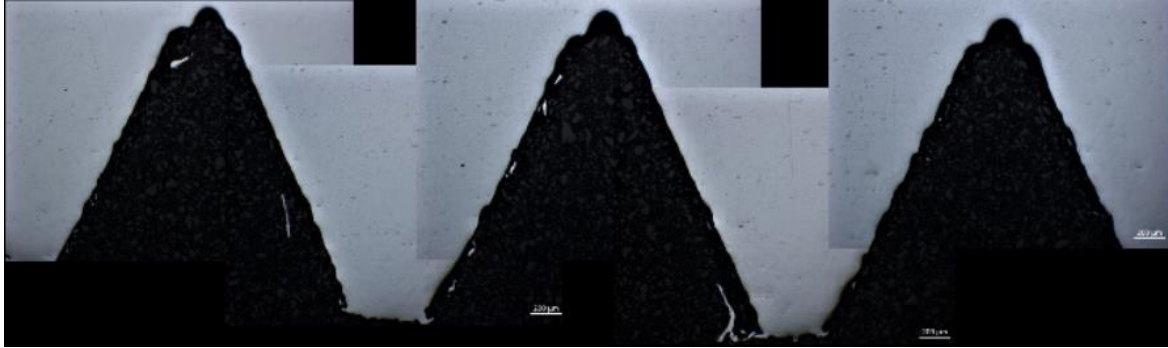
Nota. Detalle en sección longitudinal de barra tensora en extremo roscado. Detalle de raíz, zona intermedia y cresta. 200X y 500X. Nital 2%.

Figura 3.23: Microestructura – Barra tensora (sección transversal).



Nota. Detalle en sección transversal de barra tensora en extremo roscado. 100X, 500X y 1000X. Nital 2%.

Una inspección detallada permitió identificar que el perfil de rosca no presenta agrietamiento; sin embargo, el valle presenta geometrías agudas, donde se esperaba una geometría plana para roscas estándar de uso general unificada o métrica (**Figura 3.24**).

Figura 3.24: Perfil de rosca – Barra tensora.

Nota. Perfil geométrico distinto entre valle (Agudo) y cresta (Plano). 50X. Sin atacar.

Finalmente, los resultados indican que el acero empleado en la fabricación de barras tensoras proviene de dos tipos diferentes, acero de medio carbono y acero de baja aleación, como el **AISI/SAE 4140** y **AISI/SAE 5140**, debido a su similitud de propiedades mecánicas, composición química y apariencia metalográfica. Adicionalmente, su perfil de rosca corresponde a fabricación mediante mecanizado.

3.4.3 Caracterización de Tornillos

Los ensayos de dureza fueron realizados sobre sección transversal en zona cercana a superficie de falla. La resistencia a la tracción, así como el análisis de composición química, fueron determinados experimentalmente sobre probetas de sección circular (**Tabla 3-7**, **Tabla 3-8**, **Tabla 3-9** y Anexo G). Sus resultados fueron comparados con el estándar ASTM A354 teniendo en cuenta la marcación en su cabeza y su aplicación.

Tabla 3-7: Medición de durezas – Tornillos.

Item	Probeta	Sección	Dureza #1 (HRC)	Dureza #2 (HRC)	Dureza #3 (HRC)	Dureza #4 (HRC)	Dureza #5 (HRC)	Dureza promedio (HRC)	Desviación estándar
1	T1	Transversal	35,2	36,8	33	33,3	32	34,06	1,92
2	T2	Transversal	36,9	34	36	35,8	37,8	36,1	1,41
	<i>Dureza transversal Promedio</i>	-						35,1	
3	ASTM A354	-						26-36	

Nota. Ítems 1 y 2 corresponden a ensayos realizados en la Universidad Nacional de Colombia, ítem 3 a un acero ASTM A354/SAE Grado 8 de medio carbono, aleado tratado térmicamente [Tabla 2].

Tabla 3-8: Ensayos de tracción – Tornillos.

Item	Probeta	Procedencia	Sy (Mpa)	Sut (Mpa)
1	T1	UN Lab	1108,7	1199,8
2	T2	UN Lab	1084,9	1179,8
3	-	ASTM A370	-	1080
4	-	ASTM A354	896	1034

Nota. Ítems 1 y 2 corresponden a ensayos realizados en la Universidad Nacional de Colombia, ítem 3 a equivalencia de durezas según ASTM A370 [Tabla 3], ítem 4 a un acero ASTM A354/SAE Grado BD de medio carbono, aleado tratado térmicamente [Tabla 5].

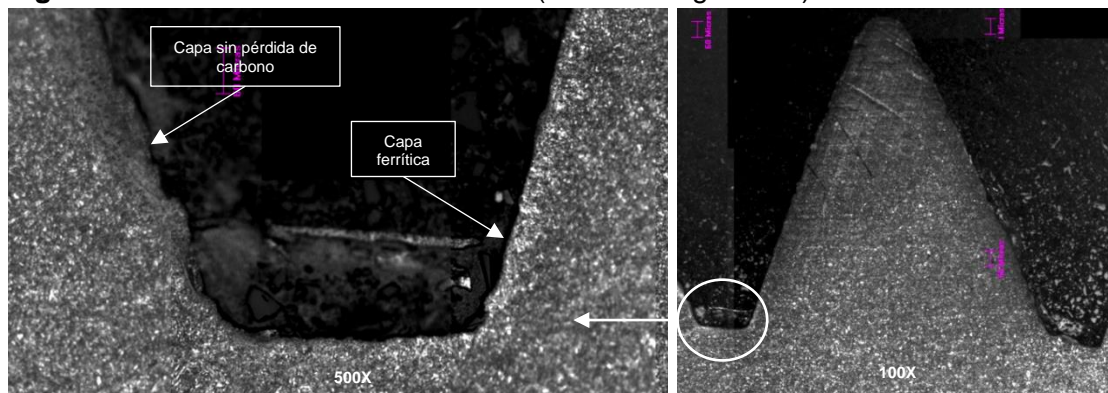
Tabla 3-9: Composición química – Tornillos.

Item	Probeta	Fe (%)	C (%)	Mn (%)	P (%)	S (%)
1	T1	95,046	0,415	0,75	0,025	0,011
2	T2	95,064	0,428	0,764	0,031	0,013
3	ASTM A354	-	0,33-0,55	-	0,040 Máx	0,045 Máx

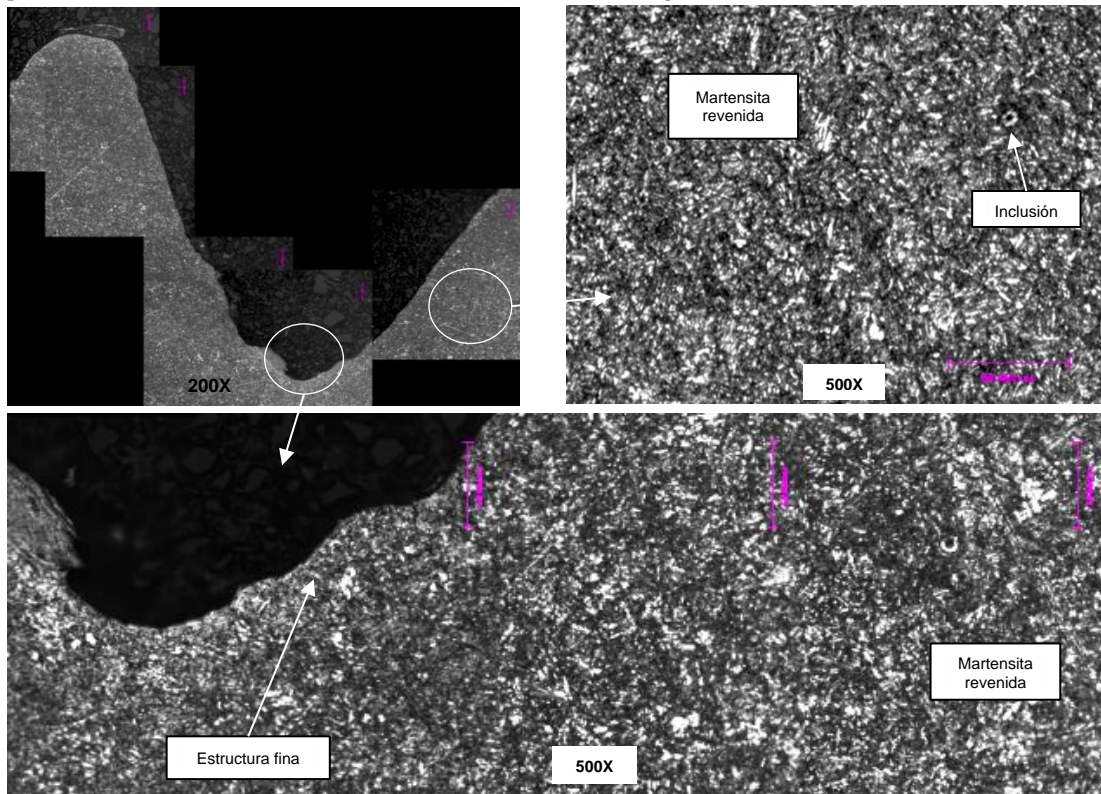
Nota. Items 1 y 2 corresponden a ensayos realizados en la Universidad Nacional de Colombia, valores promedio de tres datos. Item 3 a un acero ASTM A354/SAE Grado 8 de medio carbono, aleado tratado térmicamente [Tabla 1].

La metalografía reveló que el núcleo de los tornillos está compuesto principalmente por agujas de martensita revenida, composición típica generada en procesos de temple y revenido, debido a la transformación rápida de austenita en martensita para aceros de medio carbono. Adicionalmente, se evidencian capas intermitentes de ferrita, como resultado de un proceso de decarburación parcial (**Figura 3.25, Figura 3.26, Figura 3.27**).

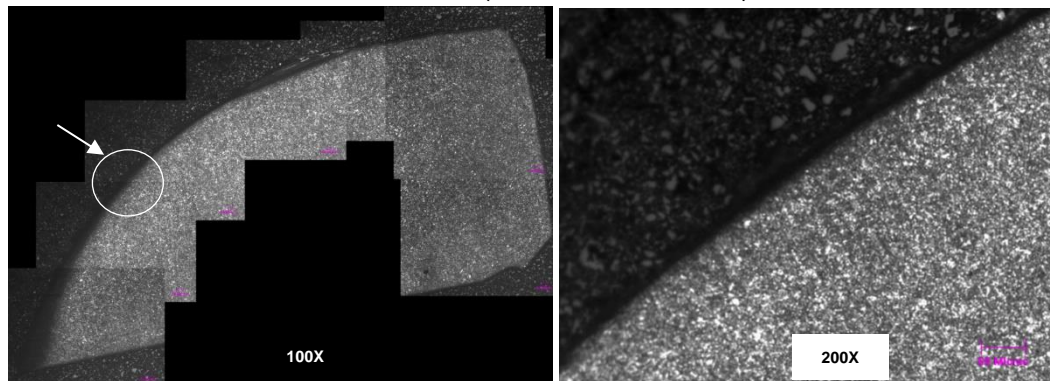
Figura 3.25: Microestructura – Tornillo (sección longitudinal)



Nota. Detalle raíz de rosca, evidenciando pérdida de carbono alternante en cara de rosca. 100X y 500X. Nital 2%.

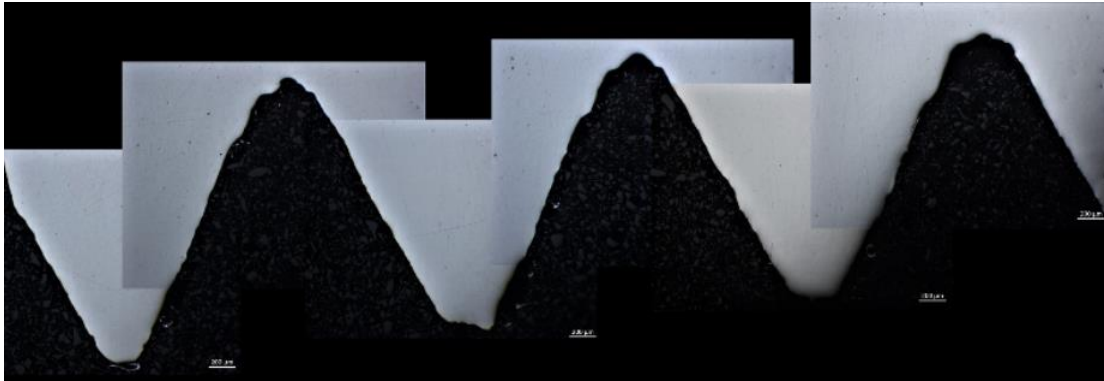
Figura 3.26: Microestructura – Tornillo (sección longitudinal).

Nota. Microestructura sección longitudinal tornillo, detalle raíz de rosca. 200X, 500X. Nital 2%.

Figura 3.27: Microestructura – Tornillo (sección transversal).

Nota. Microestructura sección transversal tornillo, detalle capa superficial. 100X y 200X. Nital 2%.

Una inspección detallada permitió identificar que el perfil de rosca no presenta agrietamiento; sin embargo, el valle y cresta de las roscas presentan geometrías agudas, donde se esperaba una geometría plana para roscas estándar de uso general unificada o métrica (**Figura 3.28**).

Figura 3.28: Perfil de rosca – Tornillo.

Nota. Perfil geométrico distinto entre valle (Agudo) y cresta (Plano). 50X. Sin atacar.

Finalmente, fue posible comprobar que el acero empleado en la fabricación de tornillos corresponde a un acero de medio carbono **ASTM A354 Grado 8**, debido a su uso como sujetador roscado y conjunto de propiedades mecánicas, composición química y apariencia metalográfica. Adicionalmente, su perfil de rosca corresponde a fabricación mediante mecanizado.

3.5 Análisis de inclusiones y tamaño de grano

Como parámetro del nivel de calidad en metales, se utiliza el *método D* del estándar ASTM E-45: *Métodos de prueba estándar para la determinación de inclusiones en aceros*. Inicialmente para el “Housing” se realizó un análisis de forma, distribución y longitud de las inclusiones en tres secciones ortogonales (longitudinal, transversal y normal); y, el análisis en la sección longitudinal para el caso de barras tensoras y tornillos. Posteriormente, el conteo se centró en la sección que contiene las inclusiones de mayor longitud, determinando visualmente si corresponden a silicatos, aluminatos, sulfuros u óxidos globulares; así como, sus dimensiones (ancho y longitud) mediante software de análisis de imágenes.

Paralelamente, se utilizó el método de comparación de cuadrícula ASTM E112, para determinar el tamaño de grano al contrastar la imagen impresa en el ocular y los granos revelados en la probeta (**Tabla 3-10**).

Tabla 3-10: Tamaños de grano para tres aceros distintos.

Item	Sección	Tamaño de grano ASTM
1	"Housing"	5
2	Barra tensora	9
3	Tornillo	9

Nota. Observaciones realizadas con patrón de comparación en microscopio óptico. 100x. Nital 2%.

3.5.1 Inclusiones en "Housing"

Las observaciones revelaron inclusiones alargadas de silicatos (tipo C) de la serie delgada, con un nivel de severidad de 0,5. Los óxidos globulares (tipo D) sobrepasaron los niveles de severidad aceptables (2 - 2,5) con un nivel de 3 y predominio de la serie delgada (**Tabla 3-11** y **Anexo L**).

Tabla 3-11: Inclusiones – "Housing" (sección longitudinal).

Conteo de inclusiones ASTM E45, método D, magnificación 100x							
Inclusiones	Serie	Nivel de severidad					
		0,5	1	1,5	2	2,5	3
Alargadas Tipos A, B, C	Delgada	730	-	-	-	-	-
	Gruesa	-	-	-	-	-	-
Óxidos globulares	Delgada	-	-	-	-	-	30
	Gruesa	-	-	-	-	-	-



Nota. Inclusiones alargadas en "micrómetros" y óxidos globulares en "cantidad". 100x. Sin ataque.

3.5.2 Inclusiones en barras tensoras

Se observaron inclusiones alargadas de sulfuros (tipo C) de la serie delgada, con un nivel de severidad de 0,5. Los óxidos globulares (tipo D) sobrepasaron los niveles de severidad aceptables (2 - 2,5) con un nivel de 3,5 con predominio de la serie delgada. (**Tabla 3-12** y **Anexo L**).

Tabla 3-12: Inclusiones – Barra tensora (sección longitudinal).

Conteo de inclusiones ASTM E45, método D, magnificación 100x							
Inclusiones	Serie	Nivel de severidad					
		0,5	1	1,5	2	2,5	3,5
Alargadas Tipos A, B, C	Delgada	325	-	-	-	-	-
	Gruesa	-	-	-	-	-	-
Óxidos globulares	Delgada	-	-	-	-	-	48
	Gruesa	-	-	-	-	-	-



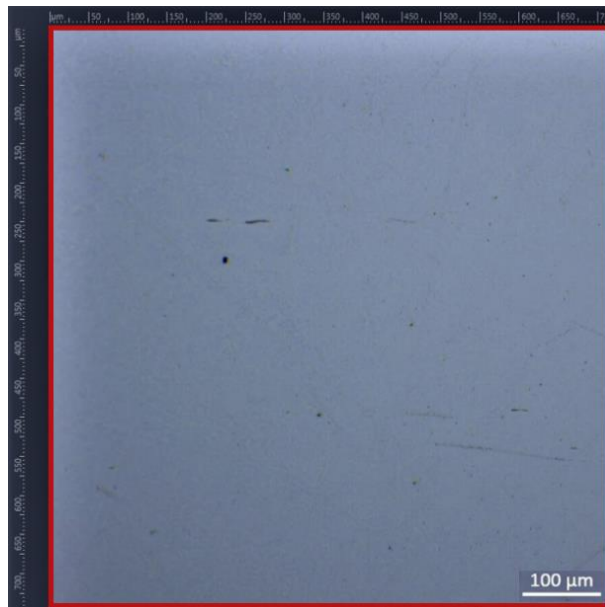
Nota. Inclusiones alargadas en “micrómetros” y óxidos globulares en “cantidad”. 100x. Sin ataque.

3.5.3 Inclusiones en tornillos

Se observaron inclusiones alargadas de silicatos (tipo A) de la serie gruesa, con un nivel de severidad de 0,5. Los óxidos globulares (tipo D) cumplen con niveles de severidad aceptable de 2,5 con predominio de la serie delgada, y se hallaron posibles óxidos globulares sobredimensionados de $19 \times 12\mu m$ (**Tabla 3-13** y **Anexo L**).

Tabla 3-13: Inclusiones – Tornillos (sección longitudinal).

Conteo de inclusiones ASTM E45, método D, magnificación 100x							
Inclusiones	Serie	Nivel de severidad					
		0,5	1	1,5	2	2,5	3
Alargadas Tipos A, B, C	Delgada	-	-	-	-	-	-
	Gruesa	124	-	-	-	-	-
Óxidos globulares	Delgada	-	-	-	-	20	-
	Gruesa	-	-	-	-	-	-



Nota. Inclusiones alargadas en "micrómetros" y óxidos globulares en "cantidad". 100x. Sin ataque.

Mediante el método D del estándar ASTM E-45 se determinó que los aceros de "Housing", barras tensoras y tornillos cuentan con un grado bajo de saturación de *inclusiones alargadas* donde predominan silicatos y sulfuros, con un nivel de severidad máximo de 0,5 entre serie gruesa y delgada. Respecto a los *óxidos globulares*, se pudo concluir que el nivel de severidad en tornillos se encuentra en el rango de aceptabilidad (inferiores a 2,5); caso contrario, ocurre con en "Housing" y barras tensoras, donde el grado de saturación de inclusiones lo sobrepasan con niveles de 3 y 3,5 respectivamente.

3.6 Concepto modo de falla

Fractografía "Housing": El "Housing" está compuesto por uniones soldadas en Te, con biseles simples y dobles. Tres juntas críticas en la zona baja del "Housing" fueron

analizadas: **Unión Cilindro interno–Brida**, **Unión Cilindro interno–Cilindro externo**, **Unión “channel”–Brida**. Cada una de ellas cuenta con morfología de fractura por fatiga, con iniciación de grietas en concentradores de esfuerzo como raíz/pie de soldadura y propagación a través del material base o por la interfase *material base – material de aporte*. Las grietas ramificadas con origen en pliegues de soldadura externa se encontraron en su fase inicial de propagación y por lo tanto no se consideran críticas. En general el agrietamiento avanza hacia el exterior del “Housing”, a excepción de la unión “channel”-*Brida* quien avanza en dos direcciones distintas, hacia el interior de “channel” a partir de cordón vertical y hacia el exterior de “channel” a partir de cordón horizontal. Los planos de avance de grieta indican que los esfuerzos experimentados en la zona baja del “Housing”, son predominantemente tensión-flexión.

Fractografía barras tensoras: Morfología de fractura por fatiga, con nucleación de grietas en perímetro para sección de barra lisa y en valle de rosca para sección de barra roscada. El plano de grieta es paralelo a su sección transversal indicando el accionar preferencial de esfuerzos de tensión.

Fractografía tornillo: Morfología de fractura por fatiga, con nucleación de grietas en valle de rosca y propagación en ángulo aproximado a 45° respecto a su eje longitudinal, indicando que el tornillo estuvo sometido a condiciones de carga combinada tensión-flexión.

Identificación de material: De acuerdo con los resultados de ensayos de laboratorio se pudo comprobar que los materiales corresponden al siguiente listado:

- **“Housing”:** La unión soldada *Cilindro interno-“channel”-Brida* la conforman distintos tipos de acero. Se probó que los aceros de “channel” y cilindro interno son **ASTM A570 Grado 45 Tipo 2** y **ASTM A572 Gr 65** respectivamente.
- **Barras tensoras:** Los dos tramos analizados fueron fabricados con dos tipos de aceros de medio carbono y baja aleación: **AISI/SAE 4140** y **AISI/SAE 5140**. Cuenta con evidencia de descarburación parcial en zona roscada.
- **Tornillos:** El acero empleado en su fabricación corresponde a un acero de medio carbono **ASTM A354**. Cuenta con evidencia de descarburación parcial en zona roscada.

Análisis de inclusiones y tamaño de grano: Los tres tipos de aceros presentan el nivel de severidad más bajo (0,5) para inclusiones alargadas; sin embargo, el grado de saturación de inclusiones para óxidos globulares en "Housing" y barras tensoras sobrepasan el criterio generalmente aceptado de 2 – 2,5. Respecto al tamaño de grano, se probó que las barras tensoras y tornillos cuentan con un tamaño de grano fino (Tamaño = 9); a diferencia del "Housing" quien cuenta con un tamaño medio (Tamaño = 5).

Teniendo en cuenta los resultados anteriores, se concluye que:

- **El modo de falla en el "Housing"** es fractura por fatiga con textura tersa, la dirección y avance estable de los agrietamientos indican que la zona baja del "Housing" experimentó esfuerzos combinados tensión–flexión. Aunque existen algunas discontinuidades en los cordones de soldadura del tipo *pliegues*, estas fueron generadas en el proceso de fabricación; sin embargo, los agrietamientos se iniciaron preferencialmente en concentradores de esfuerzo como raíz y pie de soldadura para todos los casos y avanzan en general hacia el exterior del "Housing", a excepción de los cordones de soldadura en la unión *"channel"-Brida*, los cuales tienden a avanzar hacia el interior del "Housing".
- **El modo de falla en Barras tensoras** es fractura por fatiga con textura tersa, los agrietamientos se originaron en valle de rosca en uno de sus extremos mecanizados y en superficie perimetral para sección de barra lisa, la dirección del plano de grieta indica que la barra tensora estuvo sometida principalmente a esfuerzos de tensión.
- **El modo de falla en el Tornillo** es fractura por fatiga de textura tersa, el agrietamiento se originó en valle de rosca avanzando por su núcleo en un ángulo aproximado de 45° hasta alcanzar su fractura final, indicando que el tornillo experimentó condiciones de carga combinada tensión–flexión, con una posible ubicación en la zona baja del "Housing".

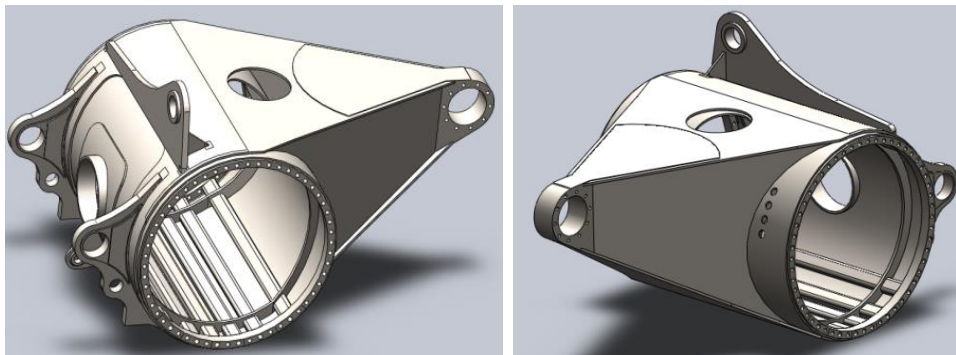
4. Modelamiento por elementos finitos

El esfuerzo conjunto *academia-investigación-industria* y sus casos de éxito, han logrado consolidar la confianza en el poder predictivo de los análisis por elementos finitos (FEA o FEM), como determinador de potenciales *zonas de iniciación de grieta* para elementos estructurales en diversos tipos de industria, por ejemplo: -"Housing" del eje trasero de vehículos comerciales (Topaç, Günal and Kuralay, 2009), -"Housing" del eje trasero de vehículos mineros (Shao, Liu and Mechefske, 2011), -Chasis de buses urbanos (Savaidis and Vormwald, 2000), -Elementos de puentes con armadura de acero (Cho, Lim and Choi, 2001), -Rieles (Beretta *et al.*, 2005), entre otros. A continuación, se muestra cómo al recrear diversas condiciones de carga en un análisis por elementos finitos, es posible estimar la vida a fatiga en diversas zonas del "Housing" teniendo en cuenta la *aleatoriedad de falla en barras tensoras*, utilizando metodologías de *evaluación por fatiga* como el BS 7608.

4.1 Modelo tridimensional "Housing"

El modelo se desarrolla con elementos sólidos mediante software CAD, manteniendo un alto nivel de detalle, excluyendo la representación de cordones de soldadura (**Figura 4-1**).

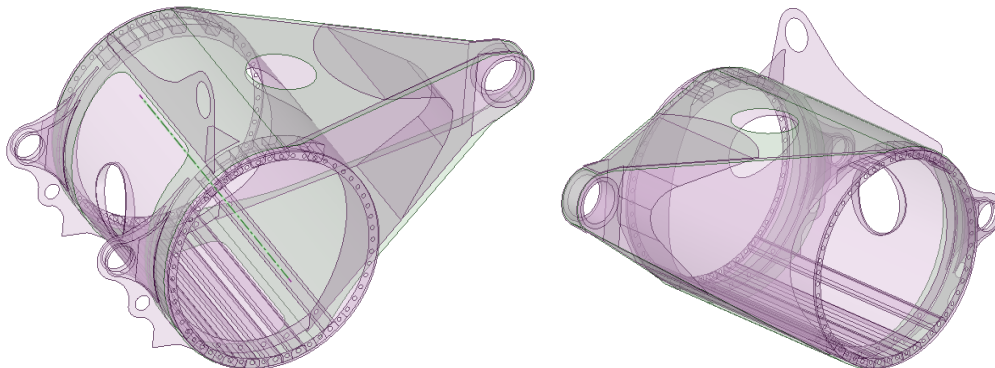
Figura 4-1: Modelo en sólidos de volumen – "Housing".



Debido a que el “Housing” está compuesto principalmente por láminas y placas de acero soldadas y teniendo en cuenta la solicitud de cargas en servicio, fue posible representar el modelo 3D mediante sólidos de superficie, “ya que, su espesor es muy pequeño comparado con sus otras dimensiones, y su configuración permite soportar cargas en todas las direcciones, siendo sometidas a flexión, torsión y deformación en su plano” (Neto, Amaro, Luis, Cirne & Leal, 2015, p.233).

Adicionalmente, los sólidos de superficie consumen menos recursos computacionales discretizando el modelo con una menor cantidad de elementos; por lo que, “si una estructura 3D puede ser simplificada por una estructura 1D (“truss”, “beam”, “frames”) o 2D (“solids 2D”, “plates”), debe hacerse, y únicamente utilizar elementos sólidos 3D cuando no existe otra opción” (Neto *et al.*, 2015, p.234). Por lo tanto, mediante CAD el modelo fue simplificado mediante elementos tipo “Shell” utilizando superficies intermedias (**Figura 4-2**).

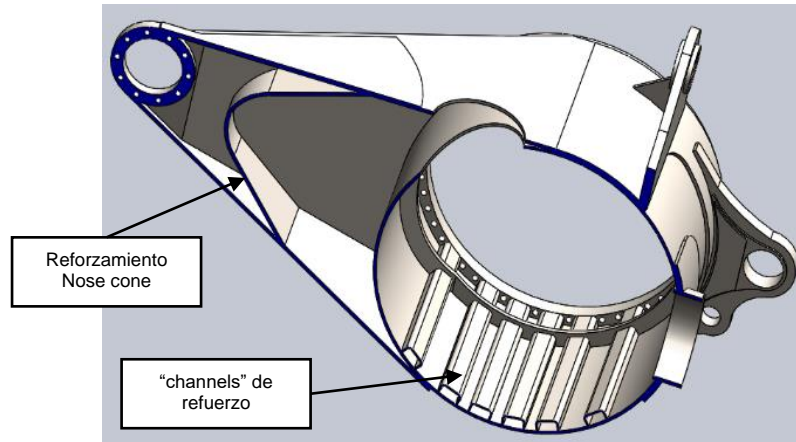
Figura 4-2: Modelo en sólidos de superficie – “Housing” camión EH5000.



4.2 Dimensiones generales “Housing”

El “Housing” es un componente que cumple dos funciones fundamentales, aloja internamente los dos motores de tracción eléctricos (*mandos finales*) transmitiendo al suelo el 68% del peso total del camión (357 ton) y, resiste la fuerza de tracción requerida para moverlo (avance y retroceso). A continuación, se presenta su vista en sección (**Figura 4-3**) y sus dimensiones globales (Anexo M).

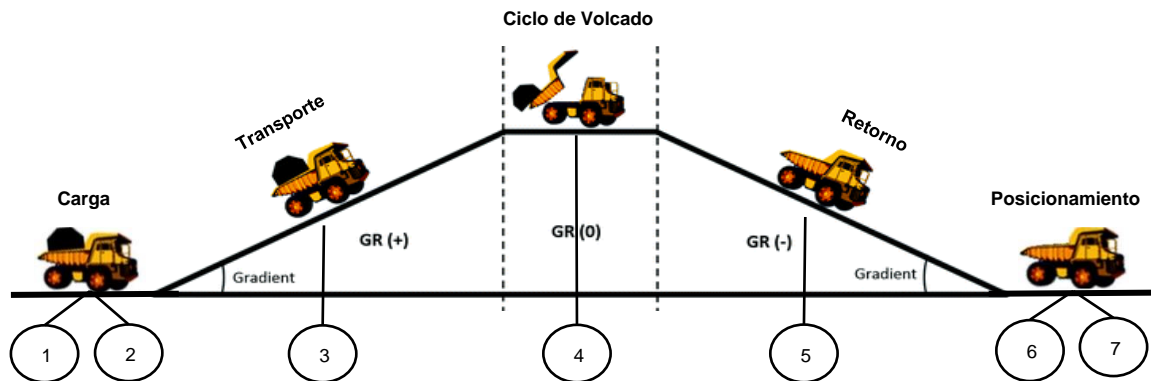
Figura 4-3: "Housing" - Vista en sección.



4.3 Condiciones de carga en un ciclo de operación

De acuerdo con la visita de campo e información relacionada con transporte en camiones mineros, "el **desempeño** del camión está condicionado por la longitud del trayecto dividido en segmentos de acuerdo a la variación de la *pendiente del terreno y resistencia a la rodadura*" (Soofastaei *et al.*, 2016); por lo tanto, las condiciones de carga representativas para un ciclo operación son: **-Carga -Transporte -Ciclo de volcado -Retorno -Posicionamiento** (Figura 4-4).

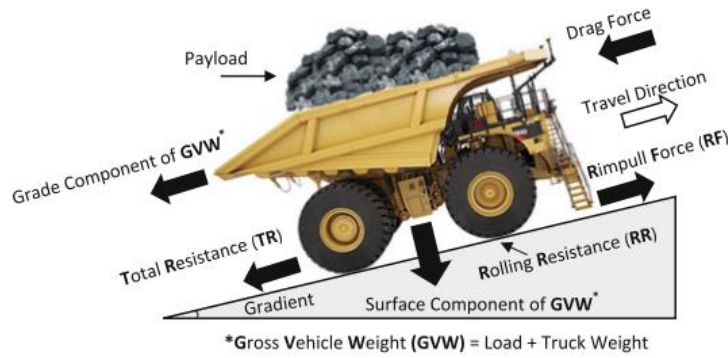
Figura 4-4: Condiciones de carga representativas en un ciclo de operación.



El análisis estático utilizó información técnica del camión (Hitachi Construction Machinery Co., 2014), junto con expresiones y coeficientes para estimar la *resistencia a la rodadura* (Coffey, 2016, p.83), *resistencia aerodinámica* (Stollery, 1997, p.160), *el efecto de barras*

tensoras en el "Housing" y demás factores que afectan el consumo de combustible en vehículos de carga minera (Figura 4-5, Figura 4-6, Figura 4-7).

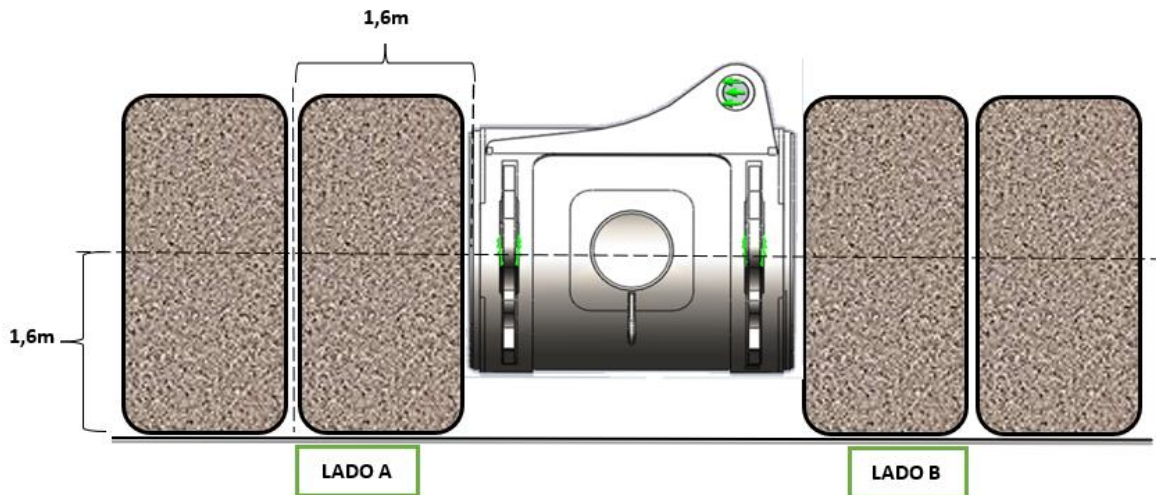
Figura 4-5: Fuerzas que intervienen en el movimiento de un camión minero.



Nota. Adaptado de "Energy-efficient loading and hauling operations", de Soofastaei, A., 2018, (p.128), Brisbane, Australia: Springer International Publishing AG.

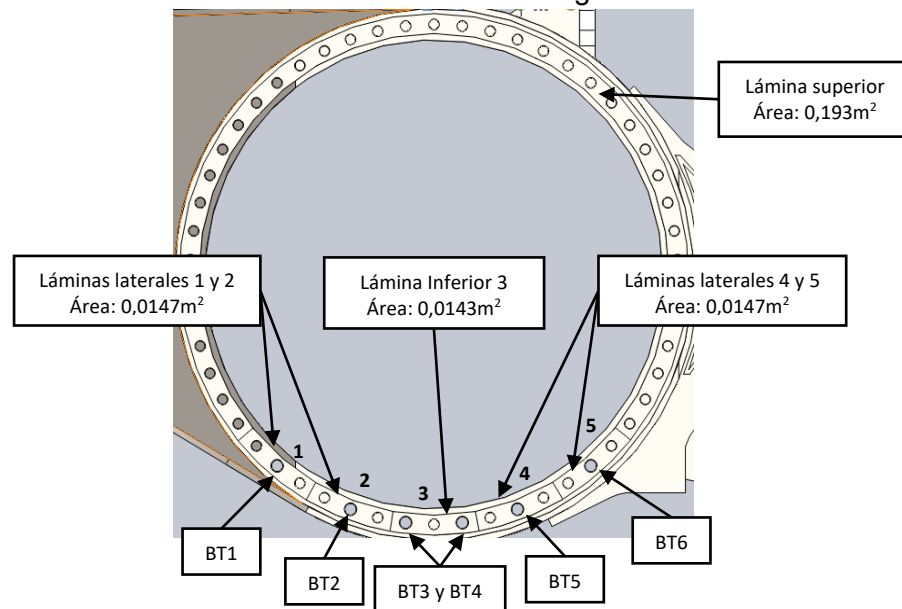
En la **Tabla 4-1**, se presenta información general proporcionada por el fabricante; así como, estimaciones analíticas para ser implementadas en *análisis estáticos, dinámicos y modelamientos*. Adicionalmente, para dar al lector una idea del ensamble y dimensiones reales del "Housing", se presentan una serie de fotos tomadas en el hangar de mantenimiento (Anexo N).

Figura 4-6: Ensamble esquemático "Housing" – llantas. Vista posterior.



Nota. Dimensiones correspondientes al tipo de llanta 53/80R63, Recuperado de "DATA BOOK OFF-THE-ROAD TIRES", de Bridgestone Corp, 2006, p.27, Tokyo, Japón.

Figura 4-7: Subdivisión del Anillo o Brida - "Housing".



Nota. Las láminas laterales (1, 2, 4 y 5) son atravesadas por una barra tensora y dos tornillos, la lámina inferior (3) por dos barras tensoras y un tornillo. *BT = Barra tensora.*

Tabla 4-1: Información utilizada en análisis estáticos, dinámicos y modelamientos.

DIMENSIONES ENSAMBLE "HOUSING"-LLANTAS	
Radio de la llanta	1.6 m
Distancia entre Centro de llantas-Anillo "Housing"	1.6 m
DESCRIPCIÓN DE CARGAS	
Peso neto máquina (NMW)	213,185 Kg
Carga útil nominal	286,384 Kg
Carga útil (sobrecarga de 10%)	315,023 Kg
Peso neto máquina + Carga útil	528,208 Kg
Distribución de carga - Camión sin carga	
Parte frontal (49% - 51%)	104,475 Kg
Parte trasera (49% - 51%)	108,710 Kg
Distribución de carga - Camión con carga útil	
Parte frontal (32%)	170,781 Kg
Parte trasera (68%)	357,427 Kg
MATERIAL DEL "HOUSING"	
Metal base	No especificado, se realizan ensayos de tracción. (ASTM Standard E8/E8M-13a, 2013)
Barras tensoras	
INCLINACIÓN DE LA VÍA	
Inclinación longitudinal	11°, 0°, -11° / (20%, 0%, -20%)
Inclinación lateral	0° / (0%)
RESISTENCIA A LA RODADURA	
$R_{ROD} = C_{RR}F_N$ (4.1)	
Donde:	
C_{RR} = Coeficiente de resistencia a la rodadura = 3%; (El sustrato de la vía es grava compactada)	
F_N = Fuerza normal al terreno.	
RESISTENCIA AERODINÁMICA	
$R_{AERO} = \frac{1}{2} \rho C_L A v^2$ (4.2)	
Donde:	
ρ = Densidad del aire = $1.23 \frac{kg}{m^3}$	
C_L = Coeficiente de arrastre = 0.91	
A = Area de arrastre = $53.5m^2$	
v = Velocidad máxima (relativa camión/aire) ⁴ = $58 \frac{km}{hr} \equiv 16 \frac{m}{s}$	
CARGAS GENERADAS POR BARRAS TENSORAS Y PERNOS	
El efecto de los pernos que en conjunto unen cada anillo al mando final, se encuentra incluido en la asunción de una unión rígida entre las partes, ya que su objetivo es evitar su movimiento relativo; a diferencia de las	

⁴ Valor extraído de: EH5000 SPECIFICATIONS; HITACHI; Hitachi Construction Machinery Co., Ltd., Pag. 6.

barras tensoras, quienes generan esfuerzos de compresión en la zona baja del "Housing", siendo incluidas en el modelo mediante una fuerza en dirección longitudinal (Budynas-Nisbett, 2006):

$$T = kF_i d \quad \therefore \quad F_i = \frac{T}{kd} = 183KN \quad (4.3)$$

Donde:

k = Coeficiente de tuerca según material = 0.3

T = Torque de apriete según mantenimiento = 1,550Lb – ft \approx 2,100Nm

d = Diámetro nominal de la barra tensora 1 – 1/2 " = 38.1mm

F_i = Fuerza de pre – tensión de la barra tensora

Asumiendo que cada una de las barras tensoras distribuye su carga uniformemente a través de su respectiva lámina de contacto, la carga de compresión alrededor de cada una de las láminas es:

Compresión en láminas 1, 2, 4 y 5 (x1 barra tensora); $\sigma_i = \frac{F_i}{A_{Lat}} = 12.5MPa$

Compresión en lámina 3 (x2 barras tensoras); $\sigma_i = \frac{F_i \times 2}{A_{Inf}} = 25.6MPa$

Las cargas, reacciones y aceleraciones del camión son estimadas con respecto a las **cartas de desempeño** proporcionadas por el fabricante y su condición de carga específica (Tabla 4-2, Tabla 4-3, Tabla 4-4, Tabla 4-5, Tabla 4-6, Tabla 4-7 y Tabla 4-8).

Tabla 4-2: Detalle condición de carga 1 (Cargado estacionado).

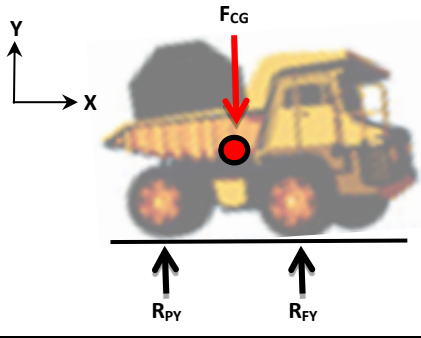
Condición de carga	Descripción
1	Vía horizontal, camión estacionado, carga 110%.
	<p>*Datos utilizados en FEA:</p> <p>Peso neto máquina + sobrecarga 10%, ubicado en el centro de gravedad: $F_{CG} = -5,181,721 N$</p> <p>Reacciones eje "y": $R_{PY} = 3,523,570 N$ $R_{FY} = 1,658,151 N$</p>
<p>*Detalle: La distribución de carga para un camión cargado es 32% (frontal) y 68% (posterior): $R_{FY} = F_{CG} \times 32\%$ $R_{PY} = F_{CG} \times 68\%$</p>	

Tabla 4-3: Detalle condición de carga 2 (Transporte horizontal).

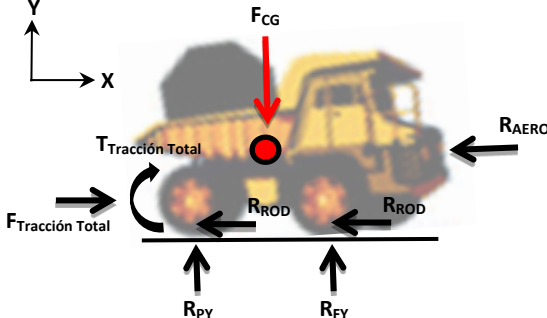
Condición de carga	Descripción
2	Vía horizontal, aceleración máxima según carta de tracción, carga 110%.
	<p>Peso neto máquina + sobrecarga 10%: $F_{CG} = -5,181,721 \text{ N}$</p> <p>Reacciones eje "y": $R_{PY} = 3,523,570 \text{ N}$ $R_{FY} = 1,658,151 \text{ N}$</p> <p>Resistencia a la rodadura: $R_{ROD} = -155,452 \text{ N}$</p> <p>Resistencia aerodinámica: $R_{AERO} = -8,120 \text{ N}$</p> <p>Fuerza de tracción Total: $F_{Tracción Total} = 1,223,261 \text{ N}$</p> <p>Torque de tracción Total – a cada lado "Housing": $T_{Tracción Total} = 978,609 \text{ Nm}$</p> <p>Aceleración máxima: $a = 2.01 \frac{m}{s^2}$</p>
<p>*Detalle: La distribución de carga para un camión completamente cargado es 32% (frontal) / 68% (posterior): $R_{FY} = F_{CG} \times 32\%$ $R_{PY} = F_{CG} \times 68\%$</p> <p>El camión acelera a su máxima capacidad (Carta de tracción), por lo tanto: $F_{Tracción Total} = 1,223,261 \text{ N}$</p> <p>El torque aplicado a cada lado del "Housing" es: $T_{Tracción Total} = \left(\frac{F_{Tracción Total}}{2} \right) r = 978,609 \text{ Nm}$</p> <p>Por lo tanto, su aceleración máxima es: $\rightarrow \sum F_x = ma \quad \therefore F_{Tracción Total} - R_{ROD} - R_{AERO} = ma \quad \therefore a = 2.01 \frac{m}{s^2}$</p>	

Tabla 4-4: Detalle condición de carga 3 (Transporte ascendiendo).

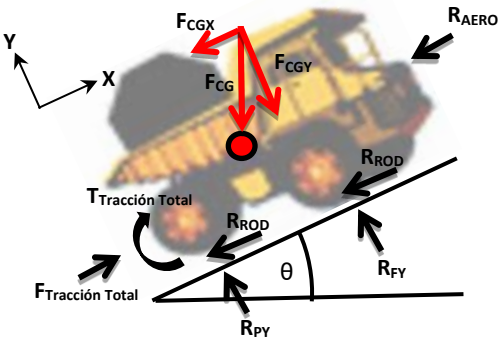
Condición de carga	Descripción
3	Camión ascendiendo, aceleración máxima hasta alcanzar velocidad constante, carga 110%.
 <p>Diagrama de un camión en una pendiente con las siguientes fuerzas y reacciones etiquetadas: F_{CG} (peso total), F_{CGX} y F_{CGY} (componentes del peso), R_{PY} y R_{FY} (reacciones en la rueda posterior), R_{ROD} (resistencia a la rodadura), R_{AERO} (resistencia aerodinámica), $F_{Tracción Total}$ (fuerza de tracción) y $T_{Tracción Total}$ (torque de tracción). El ángulo de inclinación es θ.</p>	<p>Inclinación del terreno $\theta = 11^\circ$ (19.5%)</p> <p>Peso neto máquina + Carga útil: $F_{CG} = -5,181,721 \text{ N}$</p> <p>Componentes x, y: $F_{CGX} = -988,719 \text{ N}$ $F_{CGY} = -5,086,518 \text{ N} = F_{normal}$</p> <p>Reacciones (Distribución de carga): $R_{PY} = 3,458,832 \text{ N}$ $R_{FY} = 1,627,686 \text{ N}$</p> <p>Fuerza de tracción Total: $F_{Tracción Total} = 1,223,261 \text{ N}$</p> <p>Torque de tracción Total – a cada lado “Housing”: $T_{Tracción Total} = 978,609 \text{ Nm}$</p> <p>Resistencia a la rodadura: $R_{ROD} = -152,596 \text{ N}$</p> <p>Resistencia aerodinámica: $R_{AERO} = -9.7 \text{ N}$</p> <p>Aceleración máxima: $a = 0.16 \frac{m}{s^2}$</p>
<p>*Detalle: Las reacciones tienen en cuenta las componentes (x, y) del peso total de camión en una vía con una inclinación en contra de 11° (19.5%) y una distribución de carga 32% (frontal) / 68% (posterior) para un camión completamente cargado; por lo tanto, la fuerza normal que actúa en el “Housing” es: $R_{PY} = F_{CGY} = F_{CG} \cos \theta \times 68\%$</p> <p>En ascenso el camión acelera a su máxima capacidad (Carta de tracción), para alcanzar una velocidad máxima de $14 \frac{km}{h}$; tras contrarrestar la resistencia aerodinámica, el efecto gravitacional (pendiente terreno = 19.5%) y la resistencia a la rodadura (coeficiente de rodadura 3%) equivalente a una resistencia total de 22.5%, por lo tanto:</p> $\rightarrow \sum_{+} Fx = ma \quad \therefore \quad F_{Tracción Total} - R_{ROD} - R_{AERO} - F_{CGX} = ma$ <p>De acuerdo a la carta de desempeño en avance (Rimpull chart): $F_{Tracción Total} = 1,223,261 \text{ N}$</p> <p>El torque aplicado a cada lado del “Housing” es: $T_{Tracción Total} = \left(\frac{F_{Tracción Total}}{2} \right) r = 978,609 \text{ N}$</p> <p>Por lo tanto, su aceleración máxima en ascenso es: $\rightarrow \sum_{+} Fx = ma \quad \therefore \quad a = 0.16 \frac{m}{s^2}$</p>	

Tabla 4-5: Detalle condición de carga 4 (Descarga o Ciclo de volcado).

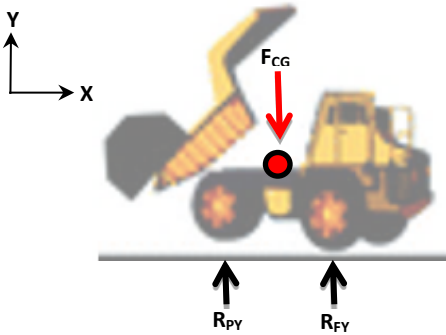
Condición de carga	Descripción
4	(Descarga o Ciclo de volcado): Vía horizontal, camión estacionado. <ul style="list-style-type: none"> • Inicio elevación de tolva cargada al 110%, mediante cilindros de elevación. • A medida que la tolva se eleva la carga va disminuyendo. • Tolva completamente elevada y vacía. • Aceleración máxima desde el banco con la tolva elevada y vacía.
	Peso neto máquina + Carga útil, al inicio del ciclo de volcado: $F_{CG} = -5,181,721 \text{ N}$ Reacciones: $R_{PY} = 3,523,570 \text{ N}$ $R_{FY} = 1,658,151 \text{ N}$ Peso neto máquina + Carga útil, al final del ciclo de volcado: $F_{CG} = -2,741,807 \text{ N}$ Reacciones: $R_{PY} = 1,370,903 \text{ N}$ $R_{FY} = 1,370,903 \text{ N}$
<p>*Detalle: De acuerdo a su descripción, se asume que el ciclo de volcado está representado por los ciclos 1, 6 y 7.</p>	

Tabla 4-6: Detalle condición de carga 5 (Retorno descenso).

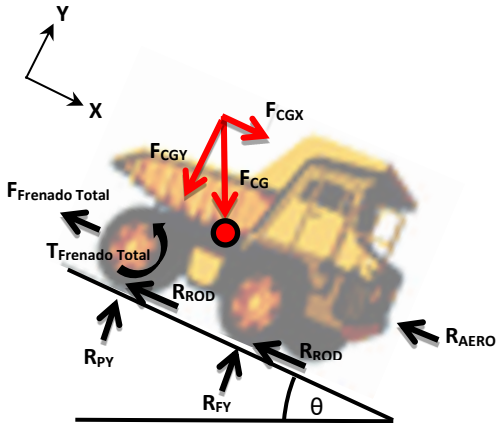
Condición de carga	Descripción
5	Camión descendiendo, aceleración gravitacional hasta alcanzar velocidad máxima, carga útil 0%.
	<p>Inclinación del terreno: $\theta = 11^\circ$ (19.5%)</p> <p>Peso neto máquina + Carga útil: $F_{CG} = 2,091,344 N$</p> <p>Componentes x, y: $F_{CGX} = 399,047 N$ $F_{CGY} = 2,052,920 N = F_{normal}$</p> <p>Reacciones: $R_{PFY} = 1,026,460 N$ $R_{PY} = 1,026,460 N$</p> <p>Fuerza de frenado – a cada lado “Housing”: $F_{Frenado\ cada\ lado} = -164,669 N$</p> <p>Torque de frenado – a cada lado “Housing”: $T_{Frenado\ cada\ lado} = -263,471 Nm$</p> <p>Resistencia a la rodadura: $R_{ROD} = -61,587 N$</p> <p>Resistencia aerodinámica: $R_{AERO} = -8,120 N$</p> <p>Aceleración máxima: $a = 1.54 \frac{m}{s^2}$</p>
<p>*Detalle: Las reacciones tienen en cuenta las componentes (x, y) del peso total de camión en una vía con una inclinación a favor de 11° y una distribución de carga 50% (frontal) / 50% (posterior) para un camión vacío; por lo tanto, la fuerza normal que actúa en el “Housing” es: $R_{PY} = F_N = F_{CG} \cos \theta \times 50\%$</p> <p>En descenso el camión es acelerado principalmente por efecto gravitacional, por lo tanto, para retornar a velocidad constante el camión debe contrarrestar dicho efecto activando su sistema de retardo; para una resistencia total de 16.5% (pendiente (-19.5%) + coeficiente de rodadura 3%) y una velocidad máxima de $58 \frac{km}{h}$, por lo tanto: $\rightarrow \sum_{+} F_X = 0 \quad \therefore -F_{Frenado\ Total} + F_{CGX} - R_{ROD} - R_{AERO} = 0$ $\therefore F_{Frenado\ Total} = -F_{CG} \text{ sen } \theta + R_{ROD} + R_{AERO} = -329,339 N$</p> <p>El torque aplicado a cada lado del “Housing” es: $T_{Frenado\ Total} = \left(\frac{F_{Frenado\ Total}}{2} \right) r = -263,471 Nm$</p> <p>Por lo tanto, su aceleración en descenso es: $\rightarrow \sum_{+} F_X = ma \quad \therefore -F_{Frenado\ Total} - R_{ROD} - R_{AERO} + F_{CGX} = ma \quad \therefore a = 1.54 \frac{m}{s^2}$</p>	

Tabla 4-7: Detalle condición de carga 6 (Retorno horizontal).

Condición de carga	Descripción
6	Aceleración máxima según carta de tracción, horizontal, carga útil 0%.
	Peso neto máquina + Carga útil: $F_{CG} = 2,091,344 \text{ N}$
	Reacciones: $R_{FY} = 1,026,460 \text{ N}$ $R_{PY} = 1,026,460 \text{ N}$
	Fuerza de tracción – a cada lado "Housing": $F_{\text{Tracción a cada lado}} = 611,630 \text{ N}$
	Torque de tracción Total – a cada lado "Housing": $T_{\text{Tracción a cada lado}} = 978,609 \text{ N}$
	Resistencia a la rodadura: $R_{ROD} = 82,254 \text{ N}$
	Resistencia aerodinámica: $R_{AERO} = 8,120 \text{ N}$
	Aceleración: $a = 5.3 \frac{m}{s^2}$
<p>*Detalle: La distribución de carga para un camión vacío es 50% (frontal) / 50% (posterior): $R_{FY} = F_{CG} \times 50\%$ $R_{PY} = F_N = F_{CG} \times 50\%$</p> <p>El camión acelera a su máxima capacidad (Carta de tracción), por lo tanto: $F_{\text{Tracción Total}} = 1,223,261 \text{ N}$</p> <p>El torque aplicado a cada lado del "Housing" es: $T_{\text{Tracción Total}} = \left(\frac{F_{\text{Tracción Total}}}{2} \right) r = 978,609 \text{ Nm}$</p> <p>Por lo tanto, su aceleración máxima es: $\rightarrow \sum Fx = ma \quad \therefore F_{\text{Tracción Total}} - R_{ROD} - R_{AERO} = ma \quad \therefore a = 5.31 \frac{m}{s^2}$</p>	

Tabla 4-8: Detalle condición de carga 7 (Posicionamiento).

Condición de carga	Descripción
7	Vía horizontal, camión estacionado, carga útil 0%.
	Peso neto máquina + Carga útil: $F_{CG} = 2,091,345 \text{ N}$
	Reacciones: $R_{FY} = 1,045,672 \text{ N}$ $R_{PY} = 1,045,672 \text{ N}$
	<p>*Detalle: La distribución de carga para un camión vacío es 50% (frontal) / 50% (posterior): $R_{FY} = F_{CG} \times 50\%$ $R_{PY} = F_{CG} \times 50\%$</p>

4.4 Configuración de material

El material empleado en los modelamientos fue configurado como un acero al carbono isotrópico de comportamiento lineal, el cual cuenta con un *esfuerzo de fluencia de 584MPa*, *esfuerzo último de 599MPa*, *módulo de elasticidad de 186GPa* y *módulo de Poisson de 0.3*, de acuerdo a la caracterización de materiales realizada en laboratorio⁵. A continuación, se presenta su configuración en la biblioteca de materiales (**Figura 4-8**).

Figura 4-8: Configuración de material para los modelamientos.

Properties of Outline Row 3: Structural Steel_Housing Carrejon				
	A	B	C	D E
1	Property	Value	Unit	
2	Material Field Variables	Table		
3	Density	7850	kg m ⁻³	
4	Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion			
5	Coefficient of Thermal Expansion	1,2E-05	C ⁻¹	
6	Isotropic Elasticity			
7	Derive from	Young's Modulus and...		
8	Young's Modulus	1,86E+05	MPa	
9	Poisson's Ratio	0,3		
10	Bulk Modulus	1,55E+11	Pa	
11	Shear Modulus	7,1538E+10	Pa	
12	Strain-Life Parameters			
20	S-N Curve	Tabular		
24	Tensile Yield Strength	584	MPa	
25	Tensile Ultimate Strength	599	MPa	
26	Isotropic Thermal Conductivity	60,5	W m ⁻¹ C ⁻¹	
27	Specific Heat, C _p	434	J kg ⁻¹ C ⁻¹	
28	Isotropic Relative Permeability	10000		
29	Isotropic Resistivity	1,7E-07	ohm m	

Nota. Información extraída del panel de configuración de material.

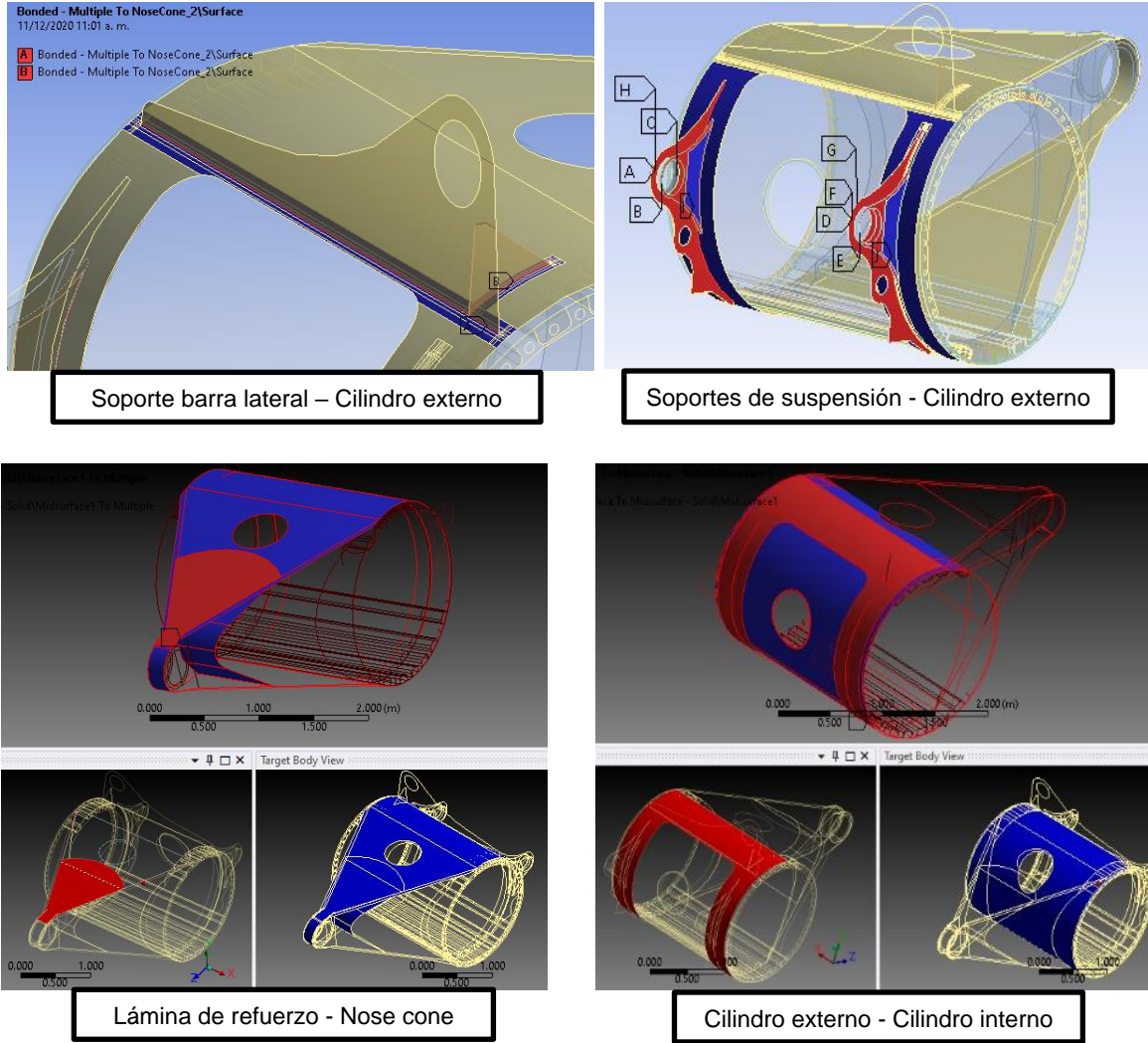
4.5 Contactos

Al asumir que no existe movimiento relativo entre las láminas de acero en contacto durante la aplicación de la carga, para efectos del presente estudio todas las uniones soldadas y superficies en contacto en el “Housing” están representadas por *contactos tipo “bonded”*,

⁵ Ver capítulo 3: Concepto modo de falla.

los cuales no permiten el deslizamiento ni la separación entre nodos que componen la unión generando soluciones de tipo lineal (**Figura 4-9**).

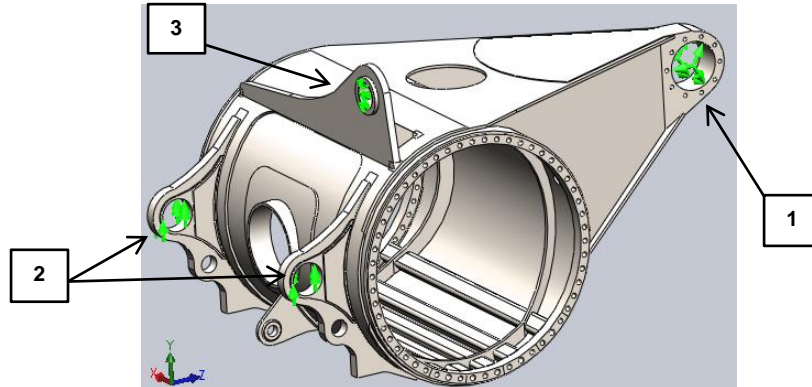
Figura 4-9: Contactos tipo "bonded" entre láminas estructurales de "Housing".



4.6 Restricciones de movimiento

El modelo contiene cuatro zonas que restringen el movimiento del “Housing” en sus tres ejes coordenados (**Figura 4-10**). A continuación, se detalla cada uno.

Figura 4-10: Restricciones de movimiento.

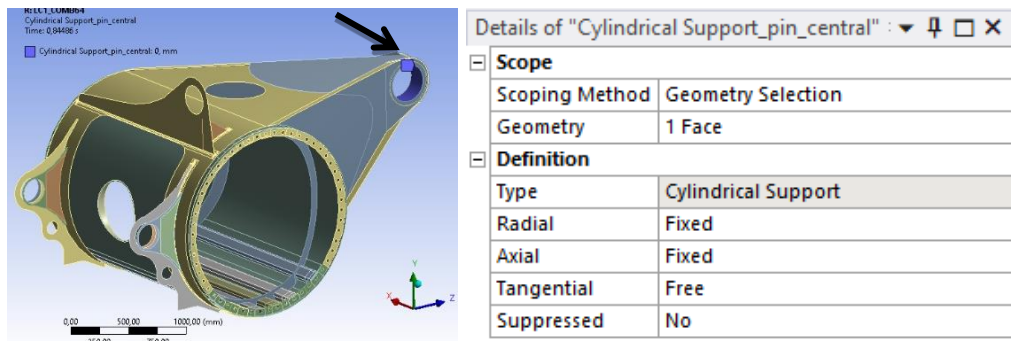


Nota. [1]= Pin central, [2]=Soportes Sistema de suspensión, [3]=Soporte barra antivuelco.

4.6.1 Pin central

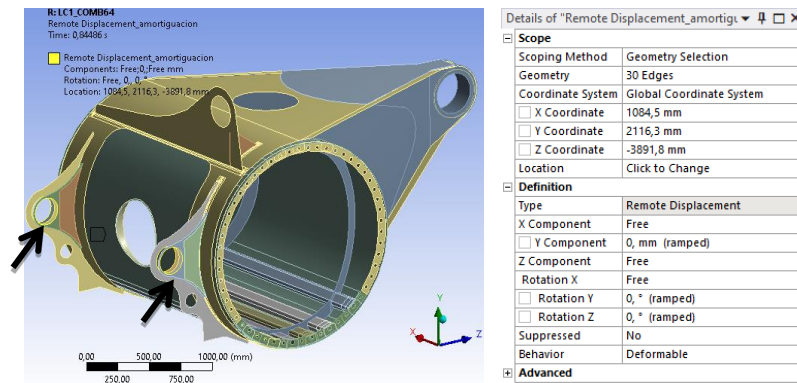
Definido como *soporte cilíndrico*, simula el comportamiento del *pin rey* permitiendo únicamente el movimiento tangencial alrededor del eje de rotación (eje x) (**Figura 4-11**).

Figura 4-11: Restricción de movimiento - Pin central.



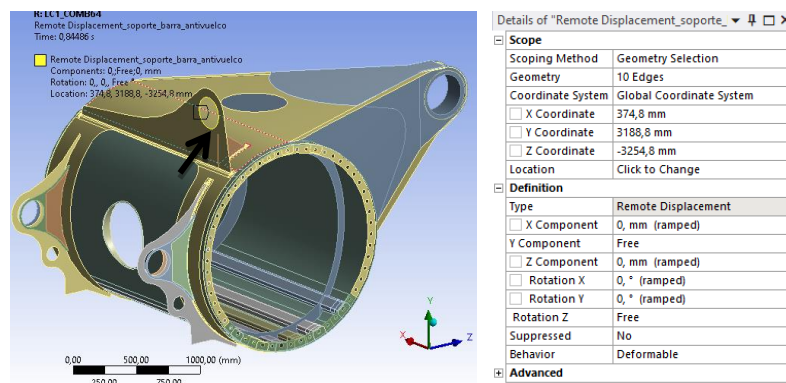
4.6.2 Soportes sistema de suspensión

Definido como *soporte de desplazamiento remoto*, simula el comportamiento de los pines que soportan dos pistones del sistema de suspensión, permiten la rotación alrededor de su eje de rotación (eje x), y el movimiento traslacional (eje x, eje z). Los demás movimientos y rotaciones están restringidos (**Figura 4-12**).

Figura 4-12: Restricción de movimiento – Sistema de suspensión.

4.6.3 Soporte barra antivuelco

Definido como *soporte de desplazamiento remoto*, simula el comportamiento del Pin de barra antivuelco, permite la rotación alrededor del eje de rotación (eje z) y el movimiento lineal vertical (eje y). Los demás movimientos y rotaciones están restringidos (**Figura 4-13**).

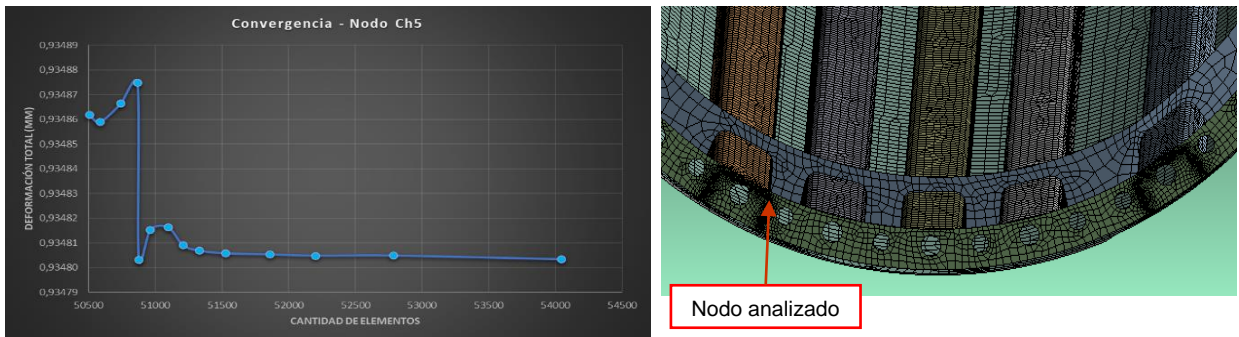
Figura 4-13: Restricción de movimiento – Soporte barra antivuelco.

4.7 Configuración de malla

Generalmente en los análisis FEM, el nivel de esfuerzo depende de la densidad de malla y propiedades de los elementos; por lo tanto, se realizó una detallada configuración de malla, con el fin de acoplar adecuadamente el *mallado del modelo* y la obtención de esfuerzos *en pie de soldadura*. Esto se obtuvo mediante el **Análisis de convergencia** y la **Extrapolación de esfuerzos (Esfuerzo nominal y "Hot-spot stress")**, a continuación, se presenta una breve descripción de cada uno.

Análisis de convergencia. Con el fin de garantizar que los resultados son independientes del tamaño del elemento, se realiza el análisis de convergencia en la unión soldada Brida-“Channel 5”, reduciendo gradualmente el tamaño de los elementos de 50mm a 2mm. Los resultados mostraron un comportamiento asintótico para el nivel de esfuerzos en elementos menores a siete milímetros, con errores relativos menores al 5% (**Figura 4-14**).

Figura 4-14: Análisis de convergencia – Unión Brida-“Channel 5”.



Tamaño de elementos	Nodo-Ch1 Total Deformation	Nodo-Ch5 Total Deformation	Cantidad Elementos	error relativo (%)	error relativo (%)
mm	mm	mm			
2	1,149657	0,934803	54041	0,0021%	0,0022%
3	1,149642	0,934805	52783	0,0008%	0,0021%
4	1,149656	0,934805	52200	0,0020%	0,0021%
5	1,149633	0,934805	51858	0,0000%	0,0020%
7	1,149647	0,934806	51525	0,0013%	0,0020%
10	1,149588	0,934807	51331	0,0039%	0,0018%
15	1,149591	0,934809	51207	0,0036%	0,0016%
20	1,149600	0,934816	51093	0,0028%	0,0008%
25	1,149599	0,934815	50958	0,0029%	0,0010%
30	1,149587	0,934803	50874	0,0040%	0,0022%
35	1,149677	0,934875	50864	0,0039%	0,0054%
40	1,149665	0,934866	50740	0,0028%	0,0045%
45	1,149653	0,934859	50584	0,0018%	0,0037%
50	1,149660	0,934862	50503	0,0024%	0,0040%

Extrapolación de esfuerzos. Consistió en extraer resultados del nivel de esfuerzos a una determinada distancia del pie de soldadura evaluado, en este caso se utilizó el método de *extrapolación superficial de esfuerzos -SSE* (por sus siglas en inglés). Estas distancias dependen del tipo de detalle evaluado; ya sea, **“Hot Spot stress”**⁶ (**Figura 4-15**) o **Esfuerzo nominal**⁷ (**Figura 4-16**), de acuerdo a configuraciones de malla recomendadas

⁶ Ver numeral 4.9.1: Determinación de distancias – “Hot-spot stress”

⁷ Ver numeral 4.9.2: Determinación de distancias - Esfuerzo nominal

por diversos autores⁸ (Hobbacher, 2019, table 2.3, p. 24), junto a la metodología de BS 7608.

Figura 4-15: Refinamiento de malla para "Hot-spot stress".

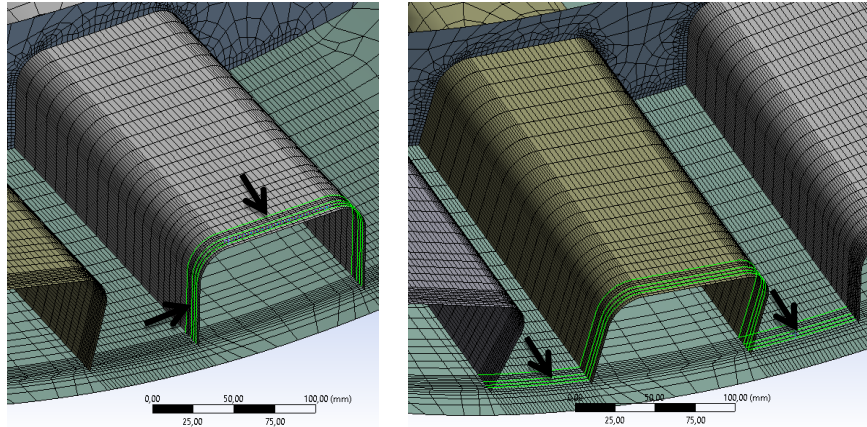
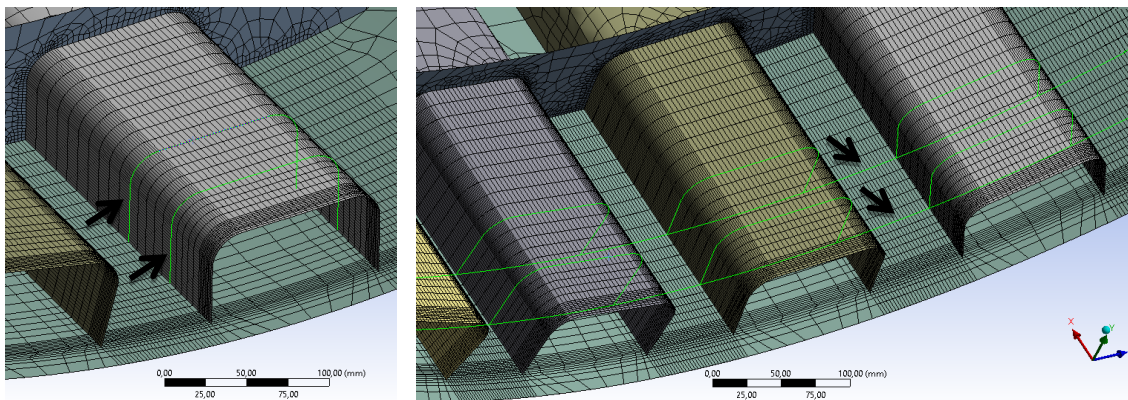


Figura 4-16: Refinamiento de malla para *esfuerzo nominal*.



La calidad de malla es un factor determinante en términos de confiabilidad de resultados, entre sus parámetros usualmente utilizados se encuentran la **oblicuidad** y la **calidad ortogonal** según lo recomiendan compañías desarrolladoras de software FEA (**Figura 4-17**). Tras la evaluación de estos parámetros de malla, se logró confirmar que su configuración es adecuada para la aplicación (**Figura 4-18**).

⁸ Ver numeral 1.3.5: Metodología de esfuerzo estructural ("Hot-spot stress")

Figura 4-17: Métrica espectral de oblicuidad y ortogonalidad de malla.

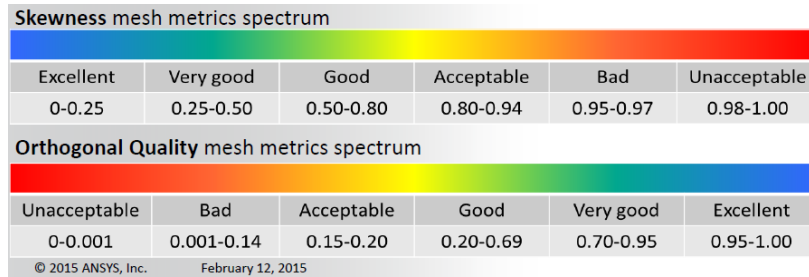


Figura 4-18: Calidad de malla - oblicuidad y ortogonalidad.

Parámetro	mínimo	Máximo	Promedio	Desviación estándar
Oblicuidad	1,30E-10	0,996	0,172	0,185
Ortogonalidad	3,08E-02	1	0,946	9,28E-02

Nota. Datos extraídos del software de análisis por elementos finitos.

Finalmente, los parámetros de malla utilizados en todas simulaciones para el modelo tipo “Shell” son presentados en la **Tabla 4-9**, y el detalle del refinamiento son detallados en la **Figura 4-19**, **Figura 4-20**, **Figura 4-21**, **Figura 4-22** y **Figura 4-23**.

Tabla 4-9: Características de los elementos empleados las simulaciones FEM.

Nombre del elemento	Forma del elemento	Cantidad de nodos	Cantidad de elementos	Usos
SHELL181	QUAD4	4	84196	Se utiliza en análisis de estructuras "shell", de láminas moderadamente delgadas
CONTA174	QUAD8	8	51297	Representa contacto y deslizamiento entre superficies deformables 3-D
TARGE170	QUAD4	4	48022	Representa varias superficies "target" 3-D, asociadas a los elementos de contacto CONTA173, CONTA174, CONTA175, CONTA176, CONTA177.
SURF154	QUAD8	8	5051	Se utiliza para varias aplicaciones de carga y efectos superficiales que pueden existir simultáneamente
CONTA175	POINT	1	616	Representa el contacto y deslizamiento entre nodos y superficies (superficies deformables 2-D y 3-D)
CONTA177	LINE2	2	84	Representa el contacto y deslizamiento entre superficies 3-D "target" y un segmento de línea deformable, o contacto entre elementos "beams"

Figura 4-19: Malla global y zonas con refinamiento de malla.

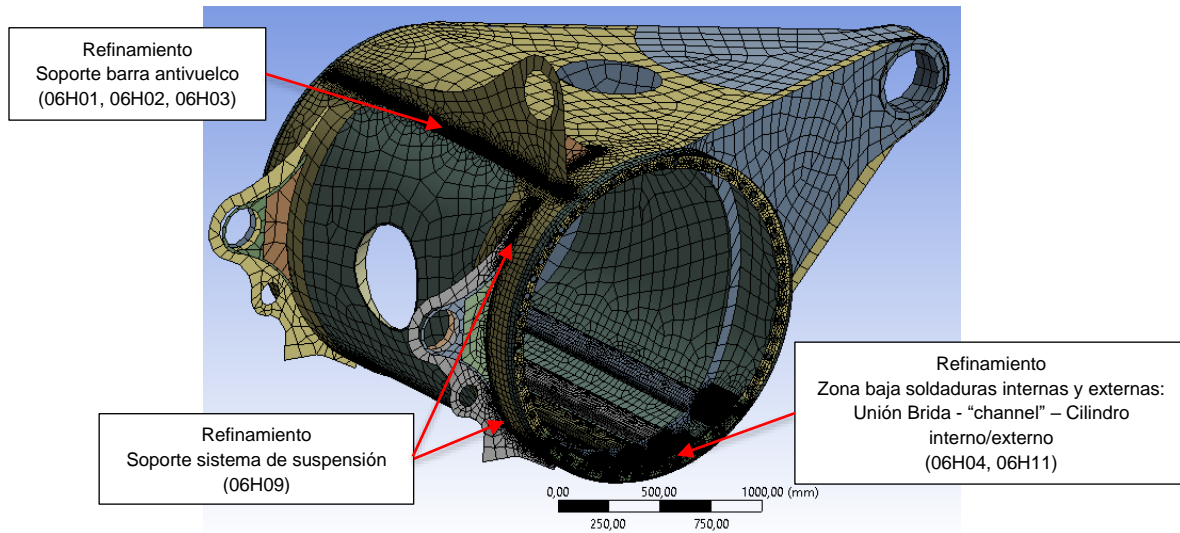


Figura 4-20: Refinamiento de malla - Soporte barra antivuelco.

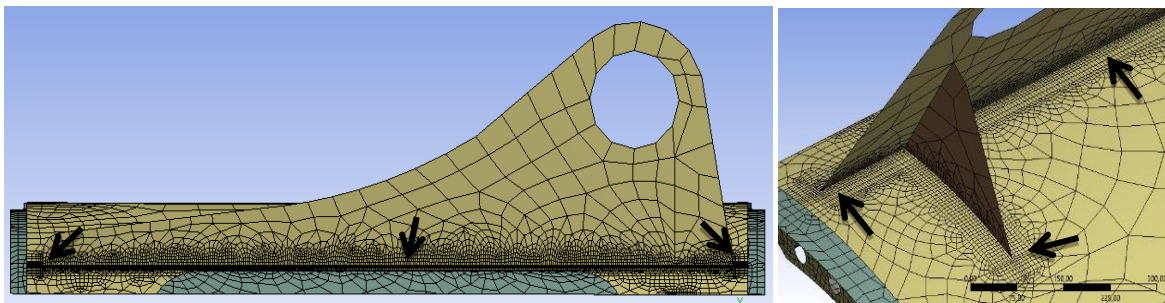


Figura 4-21: Refinamiento de malla – "channels" de refuerzo y Cilindro interno.

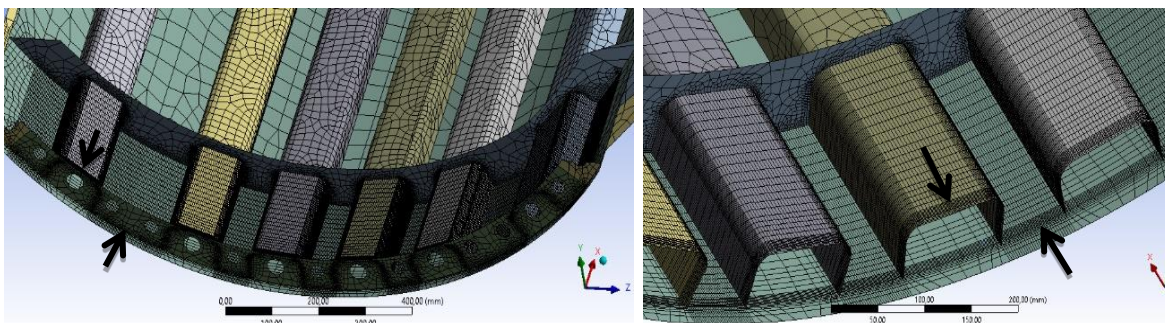


Figura 4-22: Refinamiento de malla – Soporte sistema de suspensión.

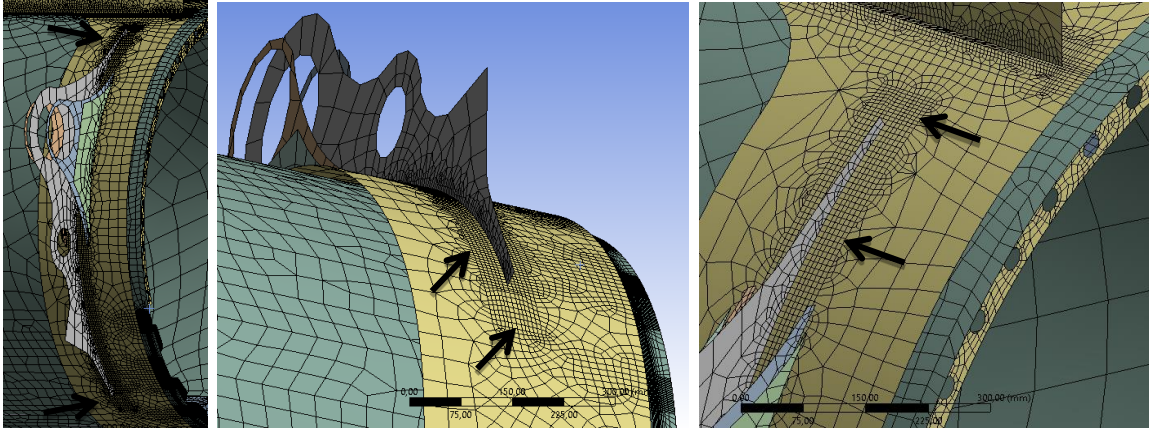
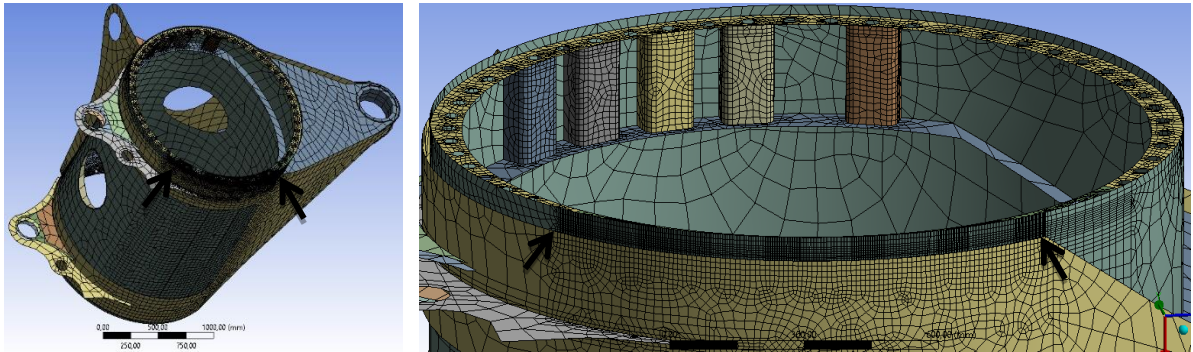


Figura 4-23: Refinamiento de malla – Cilindro externo.



4.8 Análisis estático y efecto de barras tensoras fracturadas (BTF)

Como se explicó en las generalidades del *Diseño del “Housing”*⁹, al aumentar el nivel de tensión en la zona baja del “Housing” por efecto de falla en barras tensoras, se incrementa el nivel de esfuerzos en dicha zona; sin embargo, este efecto no es tan evidente al analizar zonas alejadas; además, la naturaleza aleatoria respecto a cantidad y ubicación de falla en barras tensoras, hace necesario comprender la *relación entre barras tensoras fracturadas y agrietamiento en zonas alejadas*. Para tal efecto, se realizan análisis estáticos, tomando en consideración cinco zonas sensibles al agrietamiento, *configuración de malla y geometría del modelo*. Se adjunta nomenclatura utilizada por el fabricante:

⁹ Ver Capítulo 2: Antecedentes de falla – Num. 2.1.1

- **Zona 1 (06H11):** Barras o "channels" de refuerzo (**Figura 4-24**).
- **Zona 2 (06H11):** Cilindro interno (**Figura 4-25**).
- **Zona 3 (06H09):** Soporte Amortiguador (**Figura 4-26**).
- **Zona 4 (06H01, 06H02, 06H03):** Soporte Barra antivuelco 1 & 2 (**Figura 4-27**).
- **Zona 5 (06H04):** Cilindro externo (**Figura 4-28**).

Figura 4-24: Zona 1 (06H11) – "channels" de refuerzo.

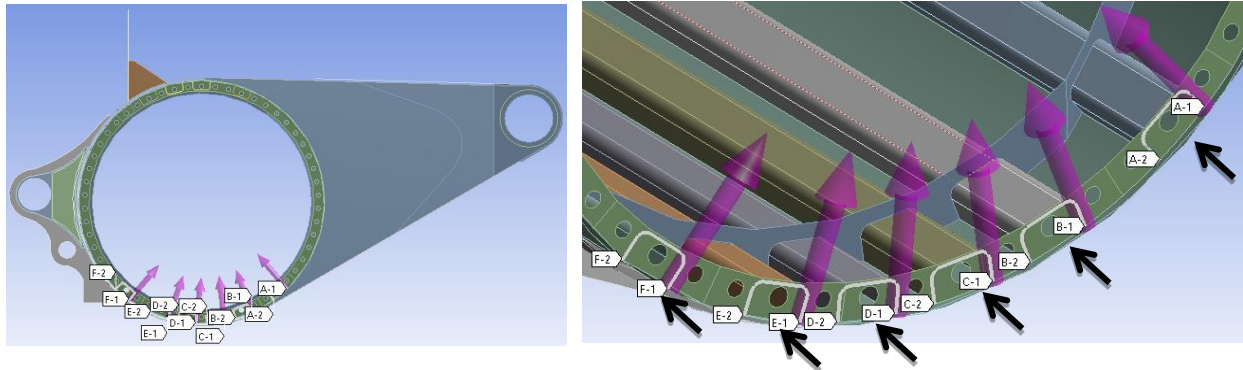


Figura 4-25: Zona 2 (06H11) – Cilindro interno.

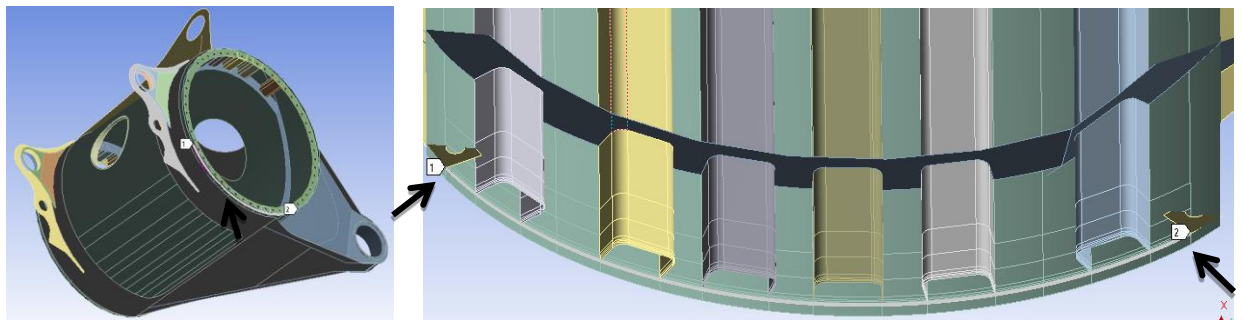


Figura 4-26: Zona 3 (06H09) – Soporte Amortiguador.

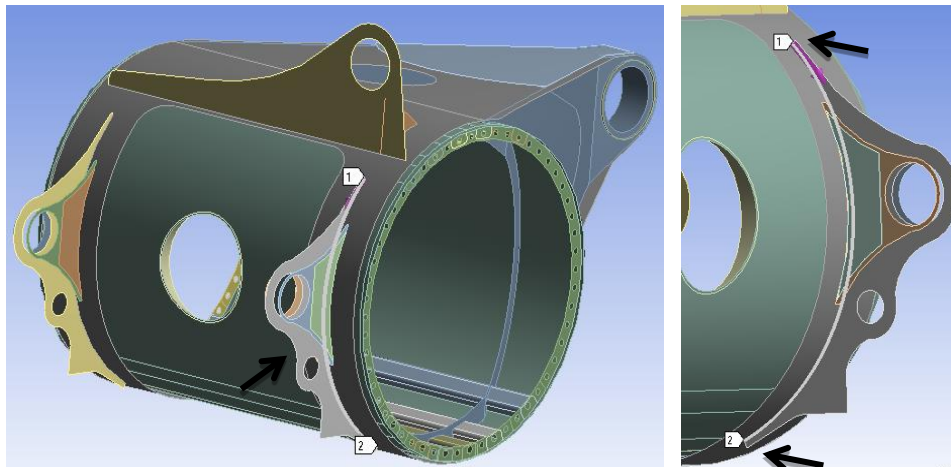


Figura 4-27: Zona 4 (06H01, 06H02, 06H03) – Soporte Barra antivuelco.

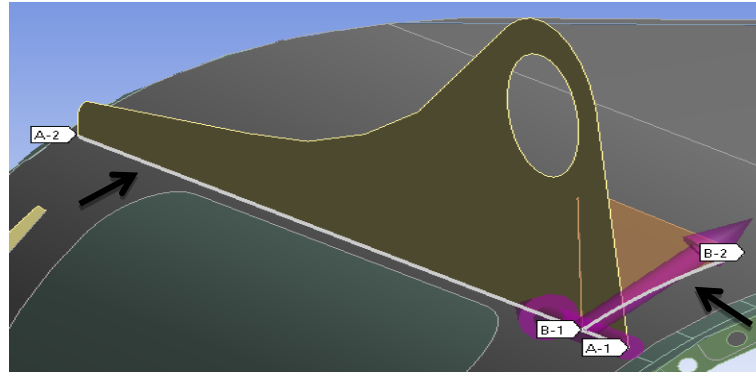
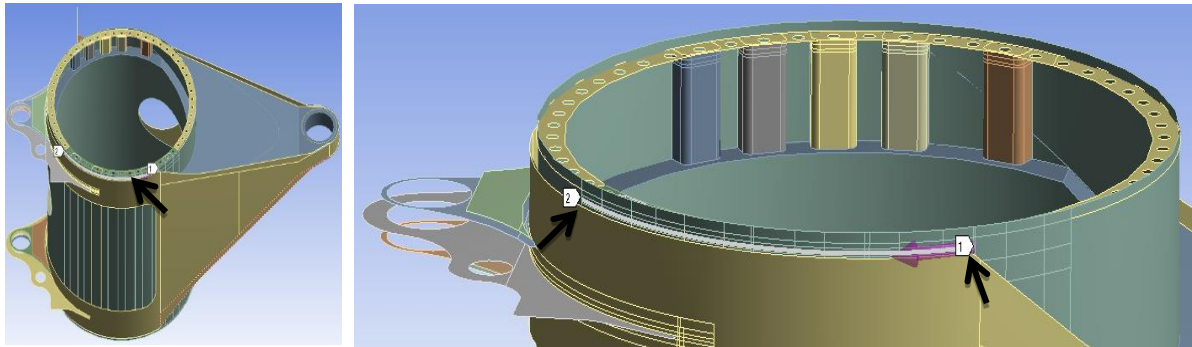


Figura 4-28: Zona 5 (06H04) – Cilindro externo.



4.8.1 Combinaciones posibles de barras tensoras fracturadas

Originalmente el “Housing” fue diseñado para operar bajo el efecto de seis barras tensoras en óptimo estado; sin embargo, al tener en cuenta su aleatoriedad de falla, se pudo estimar que son 64 la cantidad total de combinaciones posibles (ver Ecuación (4.4) y Anexo O):

$$\text{Combinaciones posibles} = 2^n = 2^6 = 64 \quad (4.4)$$

Donde:

$n = \text{Total de barras tensoras}$

Debido a que las barras tensoras tres & cuatro actúan simultáneamente sobre la lámina inferior tres (**Figura 4-7**), y tras asumir que distribución de esfuerzo constante, es posible reducir de 64 a 48 el total de combinaciones posibles (Anexo P). El historial de fallas mostró que los camiones operaron con una o dos barras tensoras fracturadas, indicando una alta probabilidad de encontrar barras fracturadas en condiciones normales de operación; por

tal motivo, se asume que las condiciones **más probables** de operación se dan al operar con 0, 1, 2 y 3 barras tensoras fracturadas, siendo **poco probables** las condiciones de operación con 4, 5 y 6. Es por ello que, 30 combinaciones probables fueron modeladas junto a ocho casos improbables representativos, para un total de 38 combinaciones de barras tensoras fracturadas analizadas (Ver **Tabla 4-10** y Anexo Q).

Tabla 4-10: Combinaciones posibles y casos más probables de BTF.

	1 BTF						2 BTF						3 BTF						4 BTF				5 BTF	6 BTF	0													
No. Barra	C1	C2	C3	C5	C6	C7	C8	C10	C11	C12	C14	C15	C16	C17	C18	C21	C22	C24	C25	C26	C27	C28	C31	C32	C33	C34	C37	C38	C39	C40	C43	C44	C47	C48	C53	C59	C63	C64
1	X					X	X	X	X								X	X	X	X	X	X	X							X	X	X	X		X	X		
2		X				X											X	X	X					X	X	X	X			X	X	X		X	X	X		
3			X				X			X	X	X					X		X	X	X			X	X	X		X	X	X		X	X	X		X	X	
4																			X					X				X	X							X		X
5				X			X			X				X	X		X		X		X			X		X	X	X	X		X	X	X	X	X	X	X	
6					X			X			X			X	X		X		X		X	X			X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	

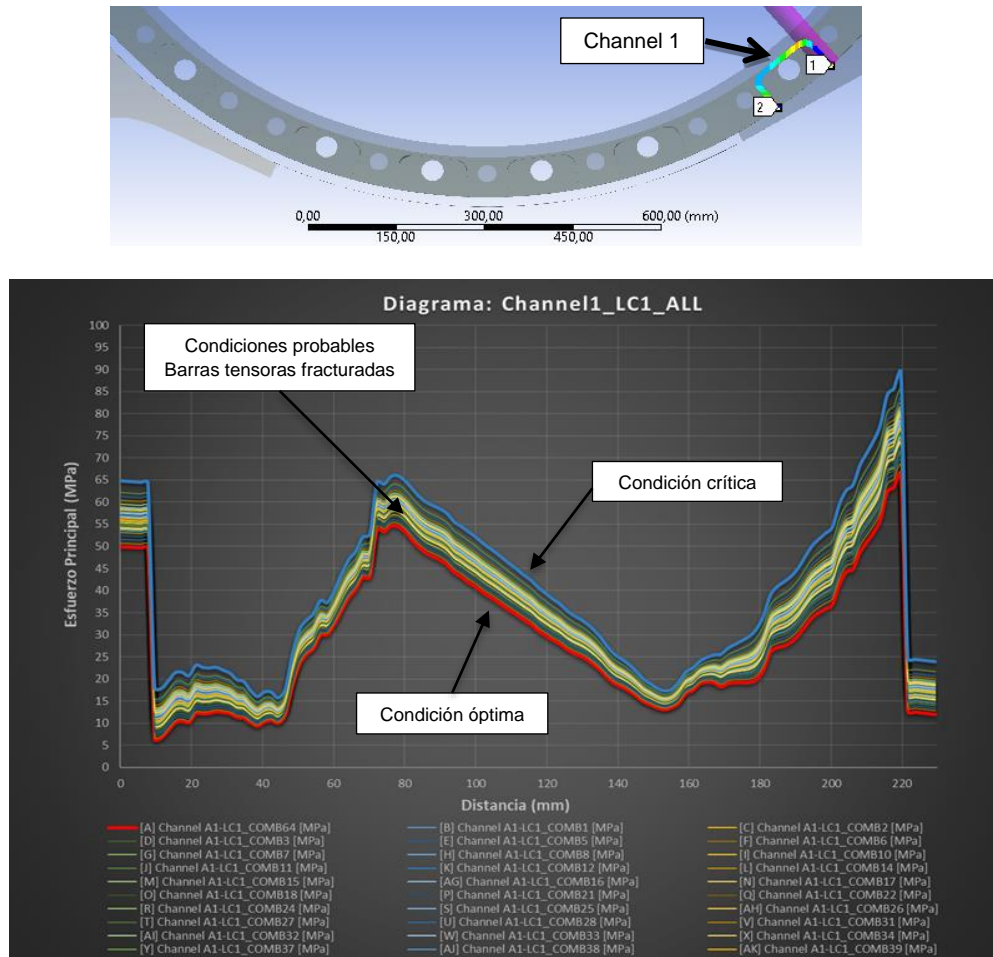
Donde:
 x = Barra fracturada
 " " = Barra No fracturada

4.8.2 Determinación de nodos de interés

Los resultados en cada zona fueron extraídos mediante arreglos de nodos consecutivos denominados "paths", los cuales representan las uniones soldadas; de esta forma, la selección de los nodos, fue el resultado de analizar 228 simulaciones (38 combinaciones de barras tensoras, experimentando 6 condiciones de carga en un ciclo normal de operación) utilizando el **criterio del mayor nivel de esfuerzo principal** al compararlo respecto a su condición ideal (Barras tensoras en óptimas condiciones); determinando así, el incremento o disminución de esfuerzos.

Para efectos de ejemplo, se presentan los perfiles de esfuerzos en "channel" 1", para todas las combinaciones de barras tensoras fracturadas en condición de carga uno (LC1) (**Figura 4-29**); de esta manera, la totalidad de los perfiles de esfuerzo en las zonas de interés, experimentando 38 combinaciones de barras tensoras fracturadas junto a 6 condiciones de carga (LC1, LC2, LC3, LC4, LC5 y LC6) son graficados. Para facilitar su interpretación, únicamente se graficó su estado óptimo (todas las barras tensoras sin fracturar) y su estado crítico (todas las barras tensoras fracturadas), ver Anexo R.

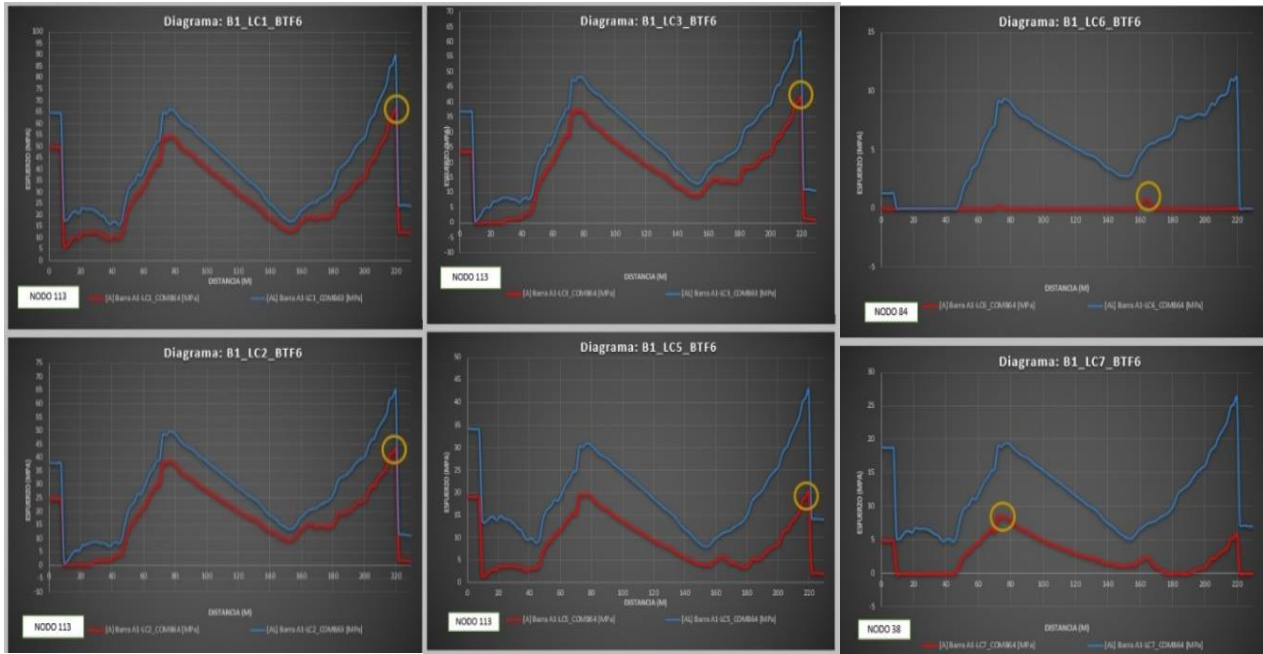
Figura 4-29: Variación de esfuerzos en “Channel 1”.



Nota. Variación del perfil de esfuerzos en “Channel 1” para 38 combinaciones posibles de barras tensores fracturadas (BTF) en condición de carga uno (LC1). La *Distancia*, representa la longitud del cordón de soldadura en la unión *Brida - “Channel”*, iniciando en el punto 1 y finalizando en el punto 2 (imagen superior).

Debido a que el estado de esfuerzos varía con respecto a las condiciones de carga (LC1-LC7), se espera que cada una genere diversos picos de esfuerzo. Por ejemplo, en la zona “channel” 1 se determinaron tres nodos de interés (Nodos 38, 84 y 113); a partir de allí, el Nodo 113 fue seleccionado de acuerdo al criterio de máximo esfuerzo principal y mayor número de repeticiones (Figura 4-30 y Tabla 4-11).

Figura 4-30: Diversos picos de esfuerzo en “channel” 1”.



Nota. Distintas condiciones de carga (LC1 – LC7) generan distintos perfiles de esfuerzos, nótese que los picos de esfuerzo pueden o no cambiar de ubicación.

Tabla 4-11: Selección de nodos en “channel” 1.

		BTF xOK	BTF x1	BTF x2	BTF x3	BTF x4	BTF x5	BTF x6
N38	% AUMENTO NIVEL ESFUERZOS:	-	4,84	9,15	12,67	15,13	16,48	20,03
	VALOR ESFUERZO (MPa)	53,73	56,33	58,65	60,54	61,86	62,58	64,49
N84	% AUMENTO NIVEL ESFUERZOS:	-	5,94	11,52	16,38	20,07	22,44	27,47
	VALOR ESFUERZO (MPa)	18,87	19,99	21,04	21,96	22,66	23,10	24,05
N113	% AUMENTO NIVEL ESFUERZOS:	-	7,57	14,64	20,75	25,38	28,34	34,55
	VALOR ESFUERZO (MPa)	66,40	71,43	76,12	80,18	83,26	85,22	89,34

Nota. Al comparar diversas condiciones de carga (LC1-LC7) y distintas combinaciones de barras tensoras fracturadas (BTF), se selecciona el Nodo 113 de acuerdo al criterio de máximo nivel de esfuerzo principal y mayor número de repeticiones.

Un proceso equivalente **se realizó en cada una de las zonas sensibles al agrietamiento**, metodología que permitió seleccionar nodos y examinar su variación en nivel de esfuerzos, obteniendo los siguientes resultados (**Tabla 4-12**).

Tabla 4-12: Variación del nivel de esfuerzos en nodos seleccionados.

Zona	Nodo	-	BTF xOK	BTF x1	BTF x2	BTF x3	BTF x4	BTF x5	BTF x6
"Channel 1"	N113	% AUMENTO NIVEL ESFUERZOS:	-	7.57	14.64	20.75	25.38	28.34	34.55
		VALOR ESFUERZO (MPa)	66.40	71.43	76.12	80.18	83.26	85.22	89.34
"Channel 2"	N41	% AUMENTO NIVEL ESFUERZOS:	-	5.69	10.97	15.53	19.01	21.30	25.89
		VALOR ESFUERZO (MPa)	56.07	59.25	62.21	64.77	66.72	68.01	70.58
"Channel 3"	N34	% AUMENTO NIVEL ESFUERZOS:	-	2.42	4.74	6.84	8.54	9.78	11.89
		VALOR ESFUERZO (MPa)	145.11	148.62	151.99	155.03	157.50	159.30	162.36
"Channel 4"	N83	% AUMENTO NIVEL ESFUERZOS:	-	2.20	4.40	6.61	8.51	10.25	12.46
		VALOR ESFUERZO (MPa)	113.30	115.79	118.29	120.79	122.94	124.91	127.42
"Channel 5"	N8	% AUMENTO NIVEL ESFUERZOS:	-	8.09	16.23	23.79	29.96	34.35	42.11
		VALOR ESFUERZO (MPa)	43.59	47.11	50.66	53.96	56.65	58.56	61.94
"Channel 6"	N6	% AUMENTO NIVEL ESFUERZOS:	-	5.05	9.78	13.84	16.86	18.68	22.78
		VALOR ESFUERZO (MPa)	97.49	102.41	107.02	110.98	113.92	115.70	119.69
Soporte Barra Antivuelco 1	N52	% AUMENTO NIVEL ESFUERZOS:	-	0.82	1.48	1.68	1.29	0.10	0.31
		VALOR ESFUERZO (MPa)	46.16	46.54	46.85	46.94	46.76	46.21	46.31
Soporte Barra Antivuelco 2	N1	% AUMENTO NIVEL ESFUERZOS:	-	0.89	1.61	1.84	1.45	0.24	0.48
		VALOR ESFUERZO (MPa)	41.47	41.84	42.14	42.23	42.07	41.57	41.67
Amortiguador	N3	% AUMENTO NIVEL ESFUERZOS:	-	0.19	0.15	-0.02	-0.31	-0.63	-0.80
		VALOR ESFUERZO (MPa)	69.84	69.98	69.95	69.83	69.62	69.40	69.28
Anillo interno	N699	% AUMENTO NIVEL ESFUERZOS:	-	7.54	14.16	19.41	22.91	24.61	29.90
		VALOR ESFUERZO (MPa)	49.89	53.66	56.96	59.58	61.33	62.17	64.81
Anillo externo	N66	% AUMENTO NIVEL ESFUERZOS:	-	4.90	9.27	12.77	15.05	16.05	19.58
		VALOR ESFUERZO (MPa)	52.03	54.58	56.86	58.67	59.86	60.38	62.22

4.9 Determinación de vida a fatiga

Inicialmente la metodología BS 7608 asigna a cada detalle de junta la *clase* más alta posible, y especifica el tipo de esfuerzo que debe ser utilizado ("Hot-spot", "Nominal stress" o ambos). A continuación, se detallan las generalidades en el proceso de estimación de esfuerzos recordando que se seleccionó el método SSE.

4.9.1 Determinación de distancias – "Hot-spot stress"

Varios modelos de extrapolación han sido propuestos e investigados, dependientes de su ubicación respecto al pie de soldadura y la naturaleza del análisis de esfuerzos. En los casos donde la distribución de esfuerzos depende del espesor de placa – "**Hot spot**" **tipo "a"** y se trabaja con sólidos de superficie ("Shells"), es recomendable utilizar el método SSE correspondiente a la extracción de esfuerzos a una distancia de $0,4t$ y $1,0t$ a partir del pie de soldadura. En nuestro caso de estudio, las distancias apropiadas para la extracción de esfuerzos se detallan a continuación (**Tabla 4-13**).

Tabla 4-13: Distancias estimadas para hallar "hot-spot stress".

Ubicación	Espesor (t) (mm)	Extracción Dato 1 0,4t (mm)	Extracción Dato 2 1,0t (mm)
Barras	9,52	3,81	9,52
Cilindro	15,87	6,35	15,87
"Nose cone"	19,05	7,62	19,05

4.9.2 Determinación de distancias - Esfuerzo nominal

Si bien es cierto, el esfuerzo nominal se puede calcular fácilmente mediante las ecuaciones clásicas de ingeniería para geometrías simples; ya que, depende del *esfuerzo de membrana* y el *esfuerzo flector*, caso contrario ocurre en geometrías complejas, ya que el cálculo del esfuerzo nominal puede ser ardua tarea.

En nuestro caso de estudio, se realiza un análisis de la distribución de esfuerzos en zonas circundantes a los detalles de soldadura que requieren esfuerzos nominales, el análisis se enfoca en estimar la distancia a la cual las No linealidades del pie de soldadura dejan de influir en la variación lineal del esfuerzo. Dicho método fue implementado independientemente para el esfuerzo "bending" y "membrane" variando la distancia respecto al pie de soldadura (Grové, 2006). Los detalles que requieren esfuerzo nominal corresponden a los cordones verticales en la zona de "Barras" y a la totalidad de la junta en la zona "cilindro", las cuales fueron modeladas bajo la aplicación de cargas de flexión, cargas de tracción y gravedad (**Figura 4-31**, **Figura 4-32**, **Figura 4-33** y **Figura 4-34**).

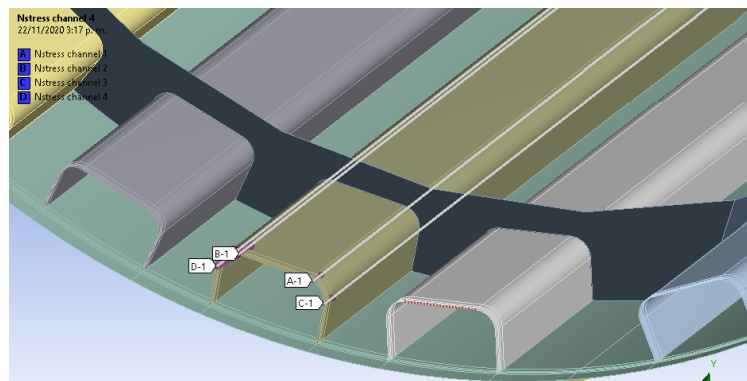
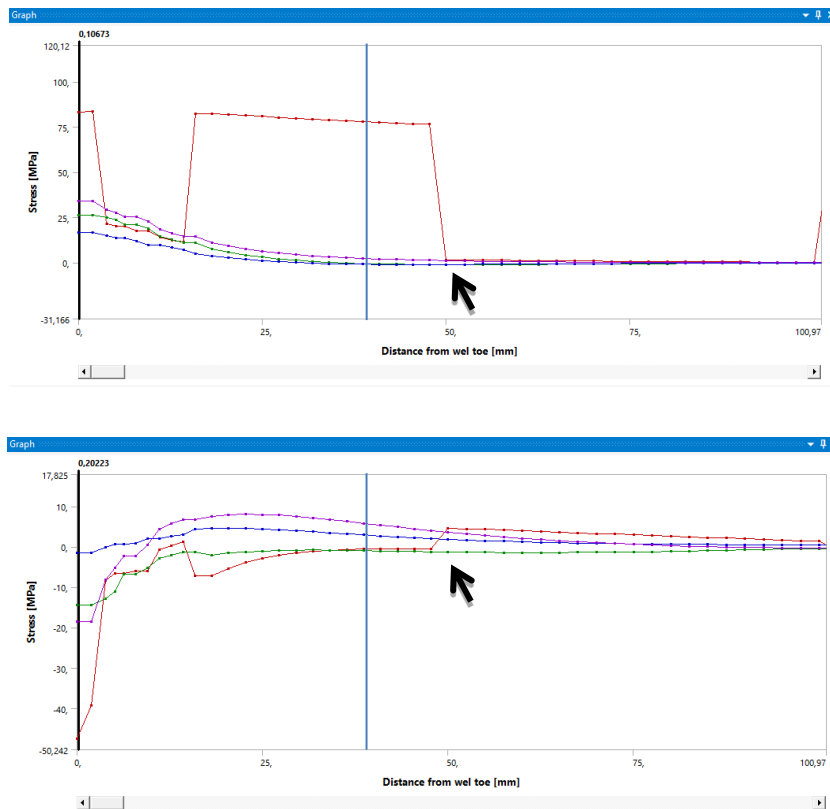
Figura 4-31: Trayectorias "paths" para análisis de esfuerzo nominal - Zona Barras.

Figura 4-32: Distribución esfuerzos “Membrane” y “Bending” en “paths” - Zona Barras.



Nota. Se indica la distancia respecto al pie de soldadura donde inicia una distribución de esfuerzos lineal, bajo tres tipos de carga (Flexión, tensión y gravedad): “Membrane”: 50mm, “Bending”: 50mm.

Figura 4-33: Trayectorias para análisis de esfuerzo nominal - Zona Cilindro.

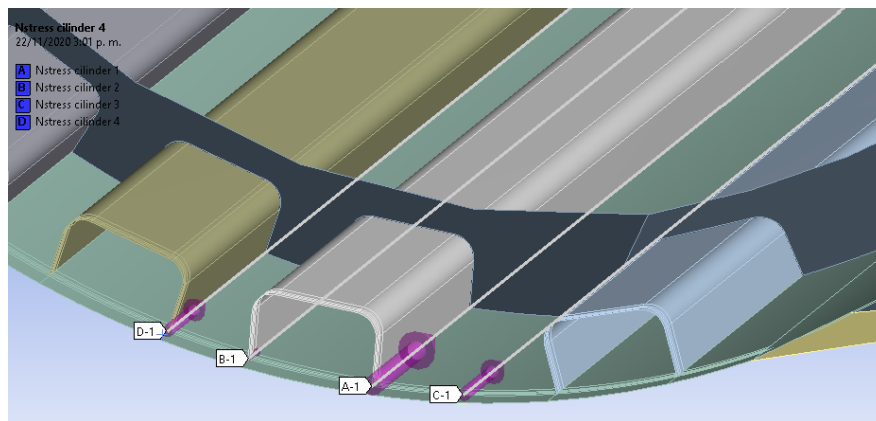
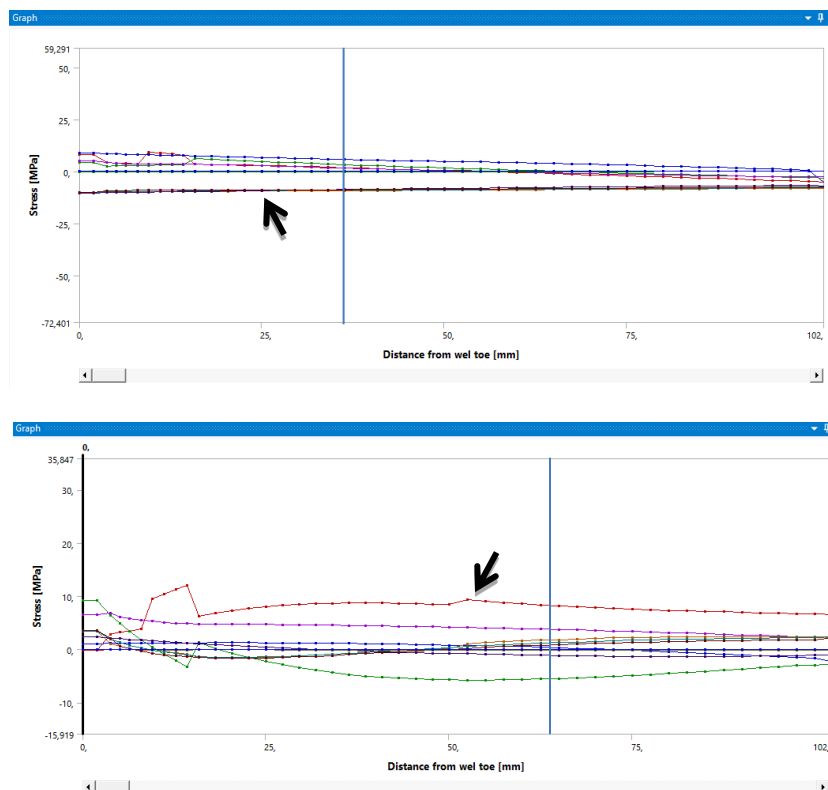


Figura 4-34: Distribución esfuerzos "Membrane" y "Bending" en "paths" – Zona Cilindro.

Nota. Se indica la distancia respecto al pie de soldadura donde inicia una distribución de esfuerzos lineal, bajo tres tipos de carga (Flexión, tensión y gravedad): "Membrane": 25mm, "Bending": 50mm. Nótese que la distancia es distinta para los dos tipos de esfuerzos.

Finalmente, para las 2 zonas de interés se estableció que la distancia mínima requerida para extraer el primer resultado de esfuerzo nominal es de 50mm a partir del cordón de soldadura; luego, con el objetivo de extrapolar, se selecciona un segundo punto a una distancia mayor a 50mm, en este caso se estableció una distancia de 100mm a partir del pie de soldadura, ya que se encuentra fuera de la zona de influencia de las no linealidades.

4.9.3 Vida a fatiga en zonas sensibles al agrietamiento

Las estimaciones de vida a fatiga en zonas sensibles al agrietamiento, se realizan para dos historiales de carga, *ideal* y *real*, utilizando como guía las recomendaciones de BS 7608 e IIW; a continuación, se detallan las generalidades del procedimiento:

1. **Condiciones de carga ideal (LC1-LC7):** Historial de cargas que experimenta el camión en un ciclo ideal de operación, sus resultados son extraídos de análisis estáticos & dinámicos, y son representados por siete condiciones de carga (LC1 -

LC7) (Ver **Figura 4-35**). La cantidad de repeticiones en cada ciclo de operación es el resultado del análisis de videos registrados en sitio e información proporcionada por de la división de operación (Ver **Tabla 4-14**).

Figura 4-35: Cargas esperadas en un ciclo normal de operación (LC1-LC7).

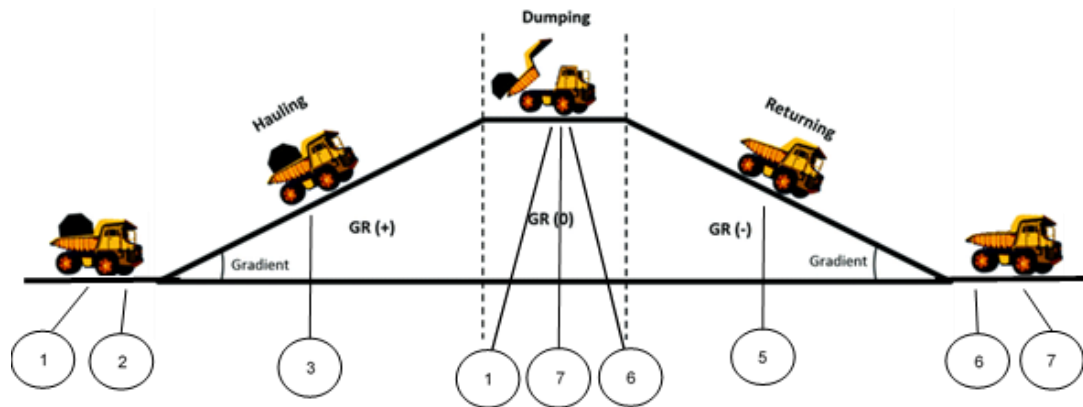


Tabla 4-14: Repeticiones asociadas a condiciones de carga ideal (LC1 – LC7).

Condición de carga ideal	Repeticiones por ciclo
LC1-LC2	10
LC2-LC3	1
LC1-LC3	1
LC1-LC7	2
LC6-LC7	11
LC5-LC6	2

- Condición de carga real (Monitoreo):** Historial de cargas que experimentó el camión en dos ciclos reales de operación (**Figura 4-36**). En este caso se realizó la extracción indirecta de variación de esfuerzos, asumiendo que **el porcentaje de variación del torque es proporcional al porcentaje de variación de carga vertical**. De esta manera, mediante extrapolación lineal se estima el porcentaje de variación del Torque teniendo en cuenta los valores de Torque Máximo y Torque mínimo, en un rango de 0% - 100%, utilizando la siguiente expresión (ver Ecuación (4.5)). Este procedimiento permitió hallar el espectro de variación de esfuerzos (**Figura 4-37**). Cabe resaltar que factores externos que incrementan la incertidumbre en el estado de esfuerzos como el rizado del terreno y la oscilación de su centro de gravedad, no fueron incluidos en el análisis.

Figura 4-36: Monitoreo de torque para dos ciclos de operación.

Nota. Registro del torque (Nm) para dos ciclos completos de operación en mando final A, adquirido mediante el Sistema SiBas - Siemens®.

$$x = \frac{(\sigma_{M\acute{a}x} - \sigma_{m\acute{i}n})(P\%)}{100\%} + \sigma_{m\acute{i}n} \quad (4.5)$$

Donde:

$\sigma_{M\acute{a}x}$ = *Máximo valor de esfuerzo*

$\sigma_{m\acute{i}n}$ = *Mínimo valor de esfuerzo*

$P\%$ = *Porcentaje de variación*

Figura 4-37: Porcentaje de variación de torque para dos ciclos de operación.

Nota. Porcentaje de variación de esfuerzos a partir del registro del torque (Nm).

Una vez seleccionado el **tipo de historial de carga**, se clasificó el detalle de junta según las recomendaciones de las tablas 4, 5 y 7 del estándar (Anexo S):

- Tabla 4: Otras uniones soldadas.
- Tabla 5: Soldaduras transversales a tope en láminas.
- Tabla 7: Juntas en filete y en T soportando carga.

Posteriormente, se seleccionó el **Tipo** y **Clase** de junta de acuerdo a los esquemas proporcionados por el estándar (Anexo S); así como, los requerimientos de manufactura y clasificación del tipo de rango de esfuerzo (“Hot-spot stress”, “Nominal stress”) (Ver **Tabla 4-15**). Los rangos de esfuerzo utilizados en cada detalle de junta se presentan en el **Anexo T, Anexo U, Anexo V, Anexo W, Anexo X, Anexo Y y Anexo Z**. Se ha de aclarar que, con el objetivo de realizar estimaciones de vida a fatiga más realistas y poco conservadoras, se asume una *probabilidad nominal de falla del 50%*, correspondiente a la curva de línea-media (desviación estándar igual a cero)¹⁰.

El conteo de ciclos se realizó mediante el algoritmo Rainflow (para el espectro de cargas monitoreado en campo) y finalmente se estimó la vida a fatiga mediante la hipótesis del daño acumulado de Palmgren-Miner, para la condición óptima de barras tensoras (BTF x0) y condiciones más probables de barras tensoras fracturadas (BTF x1, x2, x3). Con la variante de que la suma total del daño (D) ha sido limitada a 0.5, debido a la incertidumbre del espectro de esfuerzos en servicio (British Standards Institution, 2014).

Tabla 4-15: Clasificación de juntas soldadas - BS 7608.

Zona evaluada	Código fabricante	Tipo	Clase	Tipo Junta	Esfuerzo evaluado
“channel” Horizontal	06H011	5.3	G2	Butt Weld - V	HS
“channel” Vertical	06H011	7.9	G2	Butt Weld	NS
Cilindro interno	06H011	-	G2	Lap joint	NS
Soporte barra Antivuelco (HP1)	06H01, 06H02, 06H03	4.4	G2	Butt Weld - V	HS
Soporte barra Antivuelco (HP2)	06H01	4.4	G2	Butt Weld - V	HS
Amortiguador	06H09	4.4	D	Butt Weld - V	HS
Cilindro externo (06H04B)	06H04	-	G2	Lap joint	HS

A continuación, se presentan estimaciones de vida a fatiga para los dos tipos de historial de cargas **Ideal** y **Real**; y, un resumen de resultados (Ver **Tabla 4-21**):

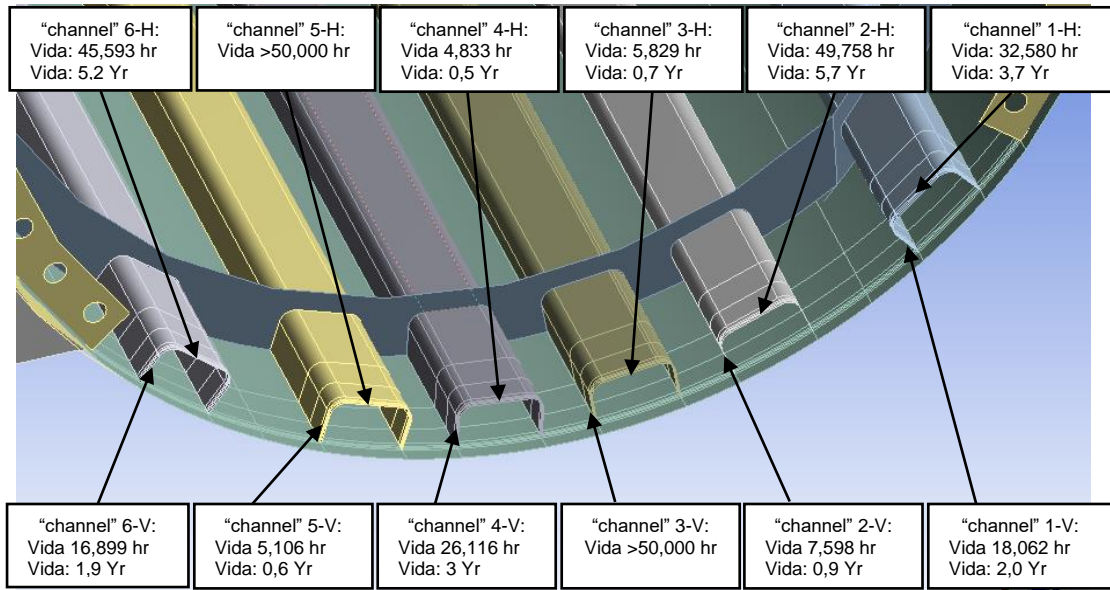
¹⁰ Ver Capítulo 1: Marco teórico, Num. 1.3.2, Tabla 1-1.

- Zona de Barras (**Tabla 4-16** y **Figura 4-38**)
- Cilindro (**Tabla 4-17** y **Figura 4-39**)
- Amortiguador (Ver **Tabla 4-18** y **Figura 4-40**)
- Soporte barra antivuelco 1 & 2 (**Tabla 4-19** y **Figura 4-41**).
- Cilindro externo (**Tabla 4-20** y **Figura 4-42**)

Tabla 4-16: Vida a fatiga (BS 7608) – Zona "channel" "horizontal & Vertical".

Zona evaluada	Tipo	Clase	Tipo Junta	Ciclos (LC1-LC7) (hr)	Ciclos (Monitoreado) (hr)	Esfuerzo evaluado
"channel"1 Horizontal	5.3	G2	Butt Weld - V	32,580	32,342	HS
"channel"2 Horizontal	5.3	G2	Butt Weld - V	49,758	47,691	HS
"channel"3 Horizontal	5.3	G2	Butt Weld - V	5,829	43,477	HS
"channel"4 Horizontal	5.3	G2	Butt Weld - V	4,833	25,054	HS
"channel"5 Horizontal	5.3	G2	Butt Weld - V	158,568	141,555	HS
"channel"6 Horizontal	5.3	G2	Butt Weld - V	45,593	52,634	HS
"channel"1 Vertical	7.9	G2	Butt Weld	18,062	3,319	NS
"channel"2 Vertical	7.9	G2	Butt Weld	7,598	743	NS
"channel"3 Vertical	7.9	G2	Butt Weld	407,765	47,991	NS
"channel"4 Vertical	7.9	G2	Butt Weld	26,116	1,991	NS
"channel"5 Vertical	7.9	G2	Butt Weld	5,106	3,908	NS
"channel"6 Vertical	7.9	G2	Butt Weld	16,899	797	NS

Figura 4-38: Ubicación de juntas – “channels” horizontales & “channels” verticales”.

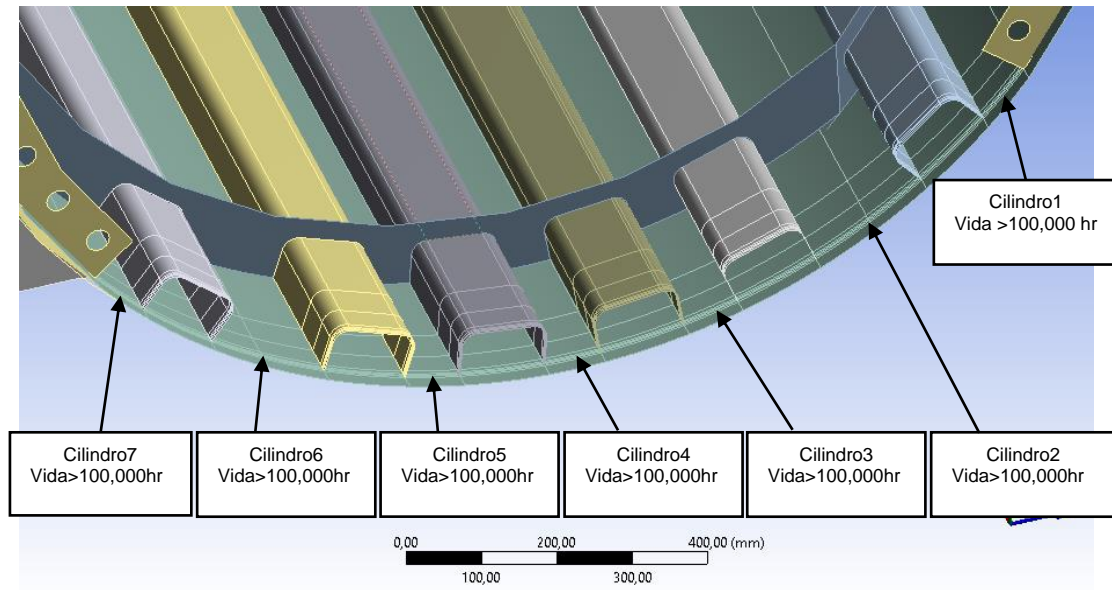


Nota: 50,000 hr \cong 5.7 años de operación. V = Vertical, H = Horizontal.

Tabla 4-17: Vida a fatiga (BS 7608) – Zona “Cilindro interno”.

Zona evaluada	Tipo	Clase	Tipo Junta	Ciclos (LC1-LC7) (hr)	Ciclos (Monitoreado) (hr)	Esfuerzo evaluado
Cilindro1	-	G2	Lap joint	454,610	159,746	NS
Cilindro2	-	G2	Lap joint	6,920,205	85,760	NS
Cilindro3	-	G2	Lap joint	29,895,967,769	35,133,220,829	NS
Cilindro4	-	G2	Lap joint	2,826,035,984	20,647,130,599	NS
Cilindro5	-	G2	Lap joint	2,127,411	441,571	NS
Cilindro6	-	G2	Lap joint	1,158,679	239,437	NS
Cilindro7	-	G2	Lap joint	229,209	26,312	NS

Figura 4-39: Ubicación de juntas analizadas – "Cilindro interno".

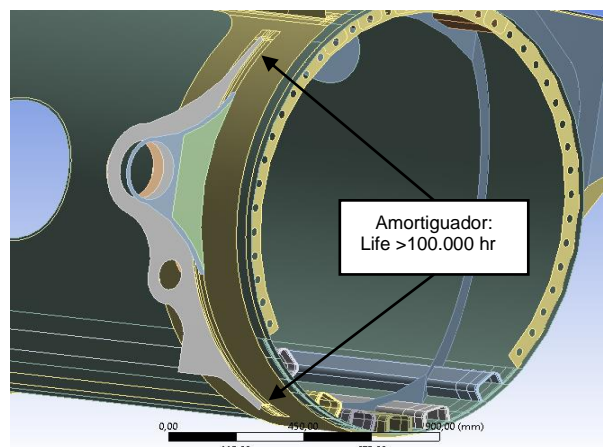


Nota: 100,000 hr \cong 11.4 años de operación

Tabla 4-18: Vida a fatiga (BS 7608) – Zona "Amortiguador".

Zona evaluada	Tipo	Clase	Tipo Junta	Ciclos (LC1-LC7) (hr)	Ciclos (Monitoreado) (hr)	Esfuerzo evaluado
Amortiguador	5.3	D	Butt Weld - V	442,277	110,874	HS

Figura 4-40: Ubicación de juntas analizadas – "Amortiguador".

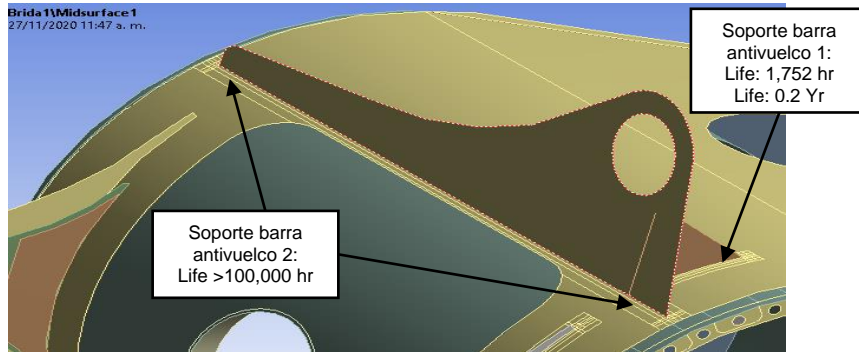


Nota: 100,000 hr \cong 11.4 años de operación.

Tabla 4-19: Vida a fatiga (BS 7608) – Zona “Soporte barra antivuelco 1 & 2”.

Zona evaluada	Tipo	Clase	Tipo Junta	Ciclos (LC1-LC7) (hr)	Ciclos (Monitoreado) (hr)	Esfuerzo evaluado
Soporte barra Antivuelco 1	5.3	G	Butt Weld - V	672,163	326,470	HS
Soporte barra Antivuelco 2	5.3	G	Butt Weld - V	1,752	4,003	HS

Figura 4-41: Ubicación de juntas analizadas – “Soporte barra antivuelco 1 & 2”.

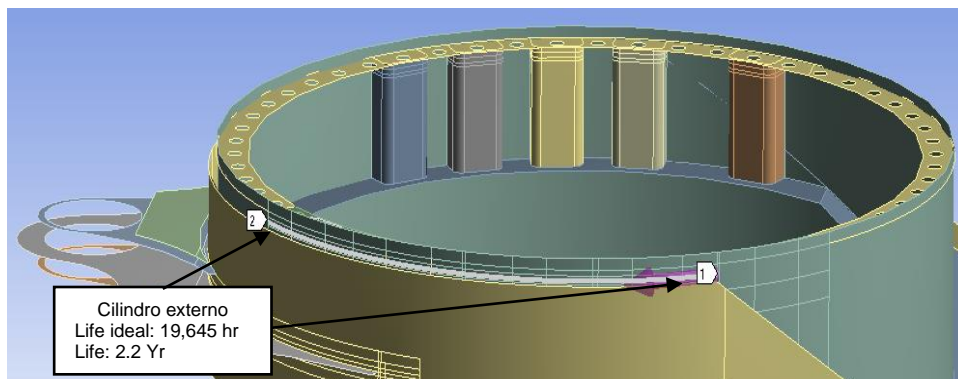


Nota: 100,000 hr \cong 11.4 años de operación

Tabla 4-20: Vida a fatiga (BS 7608) – Zona Cilindro externo.

Zona evaluada	Tipo	Clase	Tipo Junta	Ciclos (LC1-LC7) (hr)	Ciclos (Monitoreado) (hr)	Esfuerzo evaluado
Cilindro externo	-	G2	Lap joint	19,645	10,851	HS

Figura 4-42: Ubicación de juntas analizadas – “Zona Cilindro externo.”.



Nota: 50,000 hr \cong 5.7 años de operación.

Tabla 4-21: Vida a fatiga - barras tensoras en óptimas condiciones.

Zona crítica	Tipo	Clase	Tipo Junta	Ciclos a falla (LC1-LC7) (Yr)	Ciclos a falla (Monitoreo) (Yr)	Esfuerzo aplicado
"channel"1 Horizontal	5.3	G2	Butt Weld - V	3.7	3.7	HS
"channel"2 Horizontal	5.3	G2	Butt Weld - V	5.7	5.4	HS
"channel"3 Horizontal	5.3	G2	Butt Weld - V	0.7	5.0	HS
"channel"4 Horizontal	5.3	G2	Butt Weld - V	0.6	2.9	HS
"channel"5 Horizontal	5.3	G2	Butt Weld - V	18.1	16.2	HS
"channel"6 Horizontal	5.3	G2	Butt Weld - V	5.2	6.0	HS
"channel"1 Vertical	7.9	G2	Butt Weld	1.0	0.4	NS
"channel"2 Vertical	7.9	G2	Butt Weld	0.4	0.1	NS
"channel"3 Vertical	7.9	G2	Butt Weld	23.3	5.5	NS
"channel"4 Vertical	7.9	G2	Butt Weld	1.0	0.2	NS
"channel"5 Vertical	7.9	G2	Butt Weld	0.3	0.4	NS
"channel"6 Vertical	7.9	G2	Butt Weld	1.0	0.2	NS
Cilindro interno1	-	G2	Lap joint	7.4	7.4	NS
Cilindro interno2	-	G2	Lap joint	84.2	17.9	NS
Cilindro interno3	-	G2	Lap joint	212,060.6	498,419.9	NS
Cilindro interno4	-	G2	Lap joint	20,045.9	292,912.0	NS
Cilindro interno5	-	G2	Lap joint	39.3	15.7	NS
Cilindro interno6	-	G2	Lap joint	20.8	9.0	NS
Cilindro interno7	-	G2	Lap joint	3.7	0.9	NS
Soporte barra Antivuelco HP1	4.4	G2	Butt Weld - V	76.7	37.3	HS
Soporte barra Antivuelco HP2	4.4	G2	Butt Weld - V	0.2	0.5	HS
Amortiguador1	4.4	D	Butt Weld - V	50.5	12.7	HS
Cilindro externo	-	G2	Lap joint	2.2	1.2	HS

Por lo tanto, las estimaciones de vida a fatiga determinaron el siguiente orden jerárquico entre las zonas sensibles al agrietamiento:

1. **Soporte de barra antivuelco** es la zona más sensible al agrietamiento con una vida total a falla de 2-3 meses (1,752hr); sin embargo, los registros de mantenimiento muestran que las fallas catastróficas no han sido causadas por el desprendimiento de dicho elemento.
2. Las uniones "**channel**"-**Brida** en la zona baja del "Housing", son propensas al agrietamiento preferencialmente en soldaduras horizontales de "channel" 3 & 4 y

en soldaduras verticales de "channel" 2 & 5, una vida total a falla de aproximadamente cuatro meses (2,880hr).

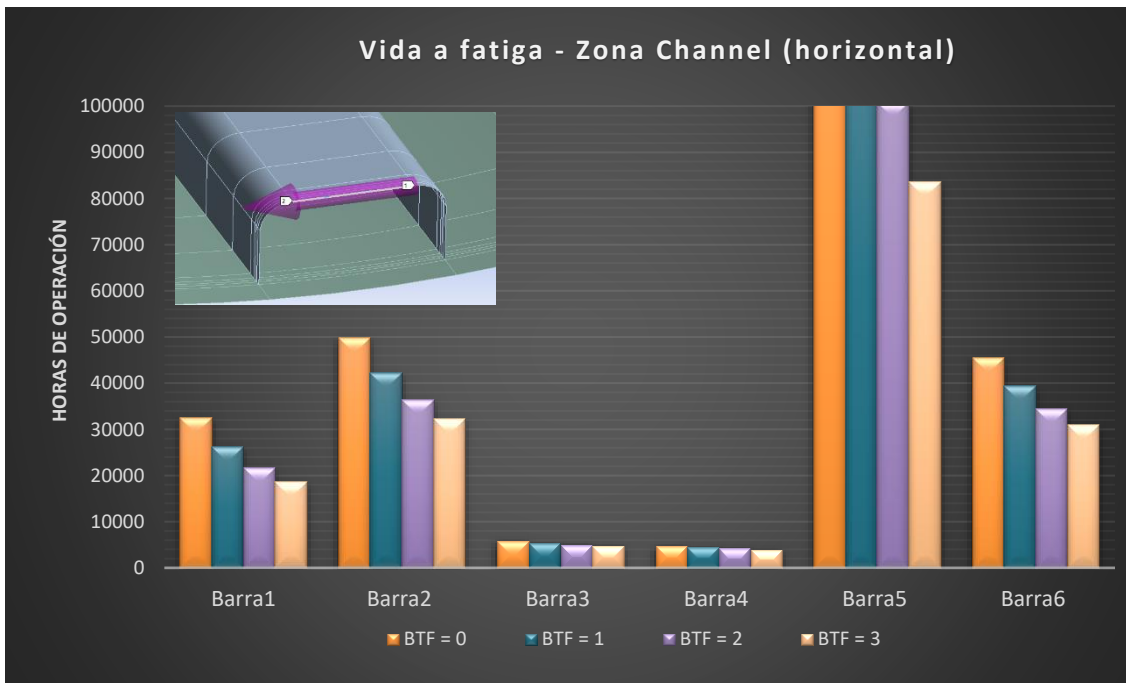
3. **Cilindro externo** son juntas de sensibilidad media, presentan una vida a falla estimada de 2.2 años (19,645hr).
4. **Cilindro interno y Soporte Amortiguador** son las menos sensibles al agrietamiento, cuentan con una vida a falla estimada mayor a 10 años (10,5120hr).

Finalmente, la relación entre la cantidad de barras tensoras fracturadas y su efecto en las estimaciones de vida a fatiga, puede ser representado gráficamente para las condiciones más probables en operación (0, 1, 2 y 3 barras tensoras fracturadas):

- "Channel" *Cordón horizontal* (Tabla 4-22)
- "Channel" *Cordón vertical* (Tabla 4-23)
- Soporte barra antivuelco (Tabla 4-24)
- Cilindro interno (Tabla 4-25)
- Amortiguador (Tabla 4-26)
- Cilindro externo (Tabla 4-27)

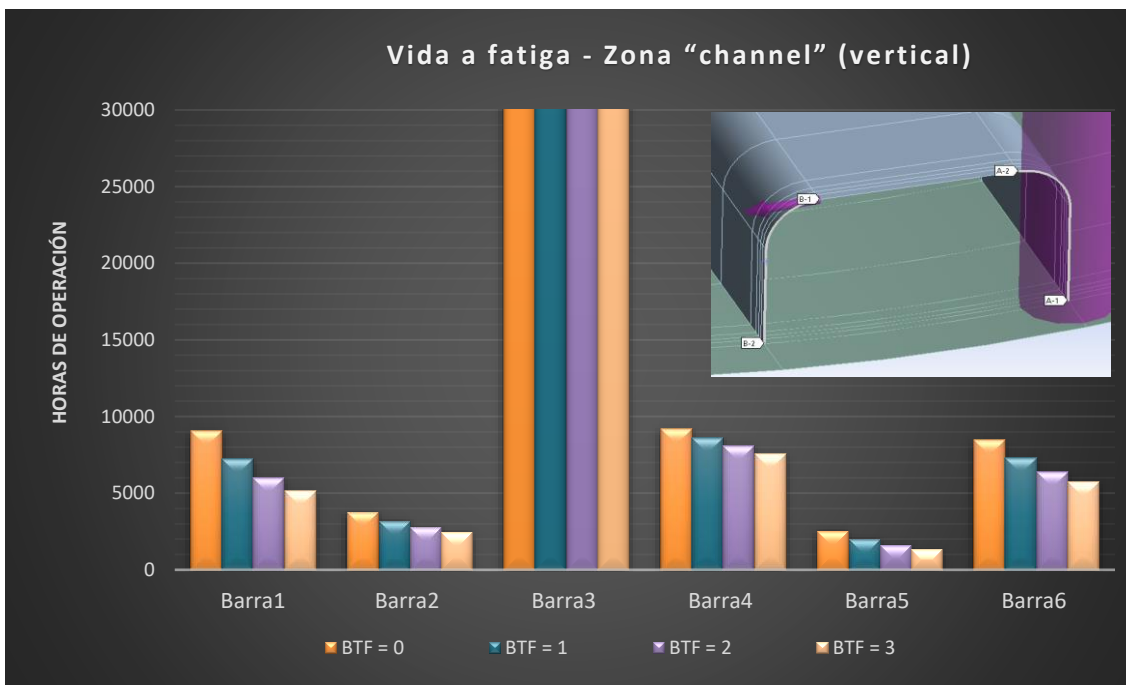
La evaluación de las gráficas muestra, que el incremento en número de barras tensoras fracturadas disminuye gradualmente la vida a fatiga en todas las zonas sensibles al agrietamiento, a excepción del *soporte de barra antivuelco*, donde la vida a fatiga no presenta tendencia y su variación es poco significativa.

Tabla 4-22: Efecto barras tensoas fracturadas – "channel" (Cordón horizontal).



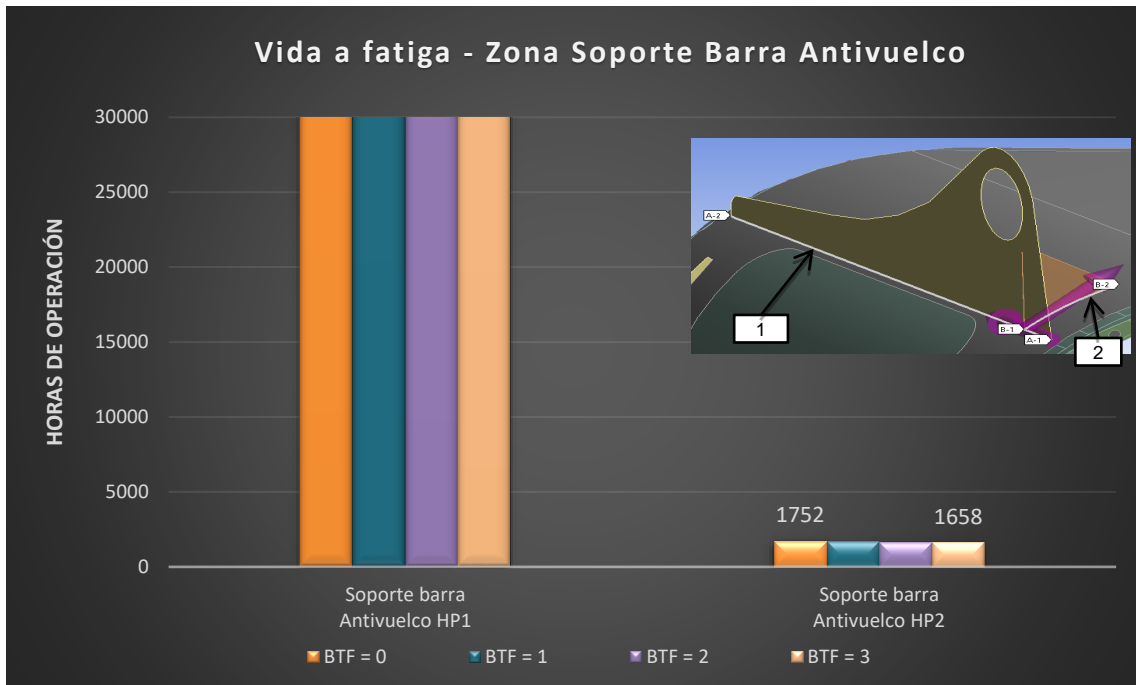
Nota: BTF = Barras Tensoas Fracturadas; 50,000 hr \cong 5.7 años de operación.

Tabla 4-23: Efecto barras tensoas fracturadas – "channel" (Cordón vertical).



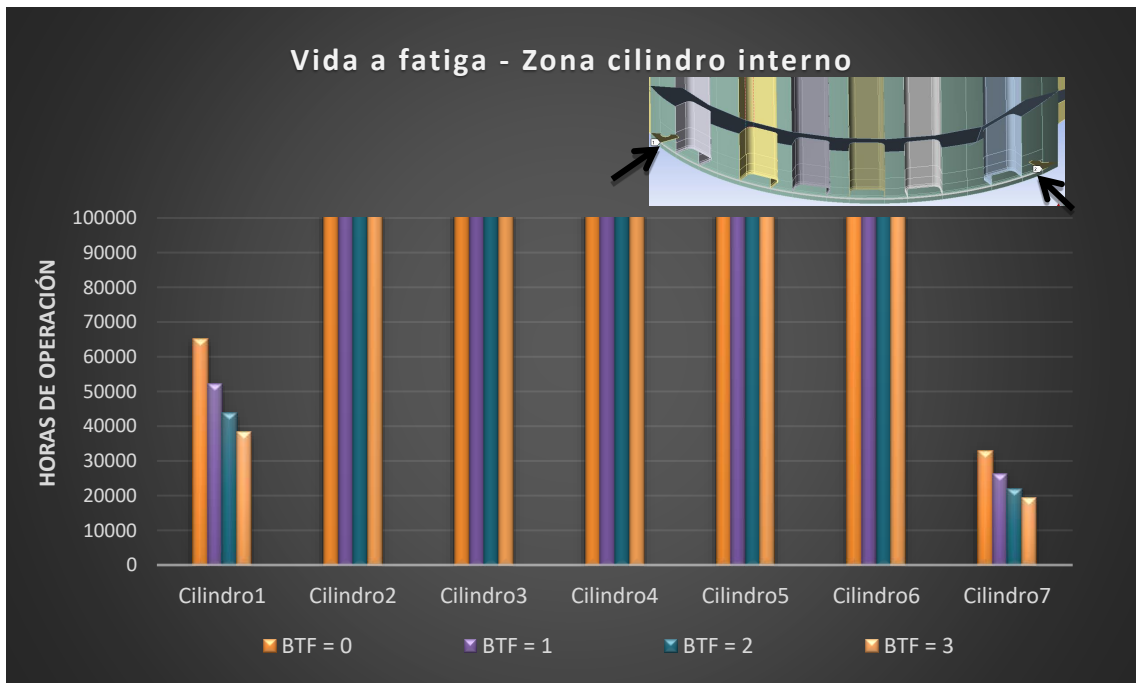
Nota: BTF = Barras Tensoas Fracturadas; 50,000 hr \cong 5.7 años de operación.

Tabla 4-24: Efecto barras tensoras fracturadas – Zona soporte barra antivuelco.



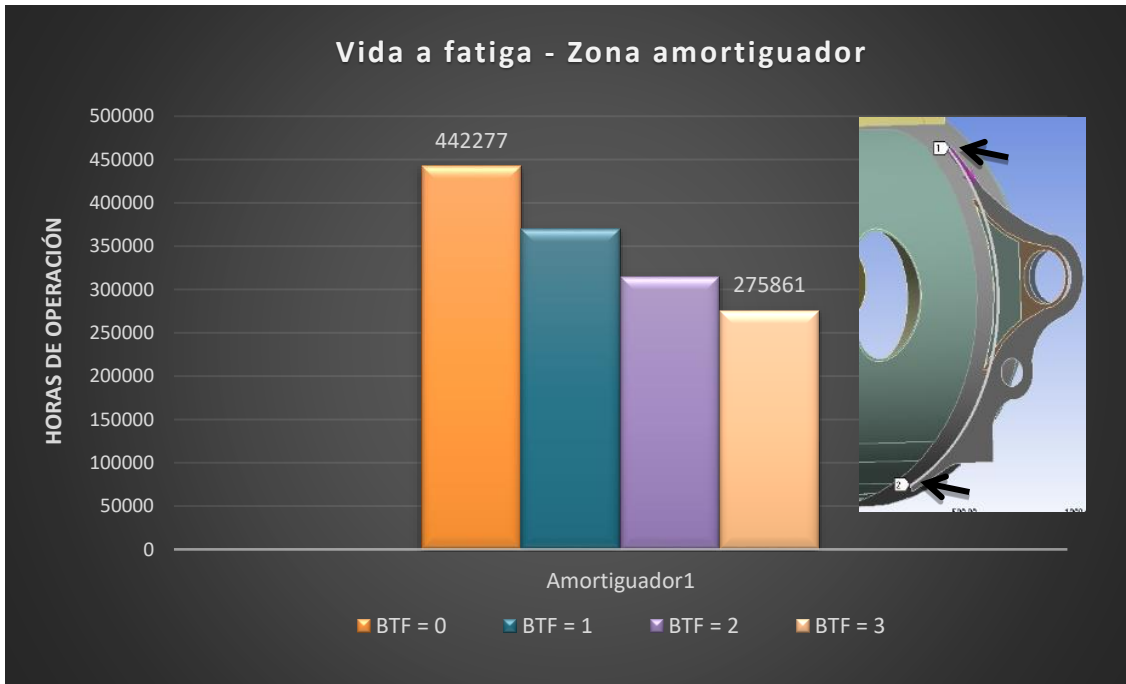
Nota: BTF = Barras Tensoras Fracturadas; 50,000 hr ≅ 5.7 años de operación.

Tabla 4-25: Efecto de barras tensoras fracturadas – Zona cilindro interno.



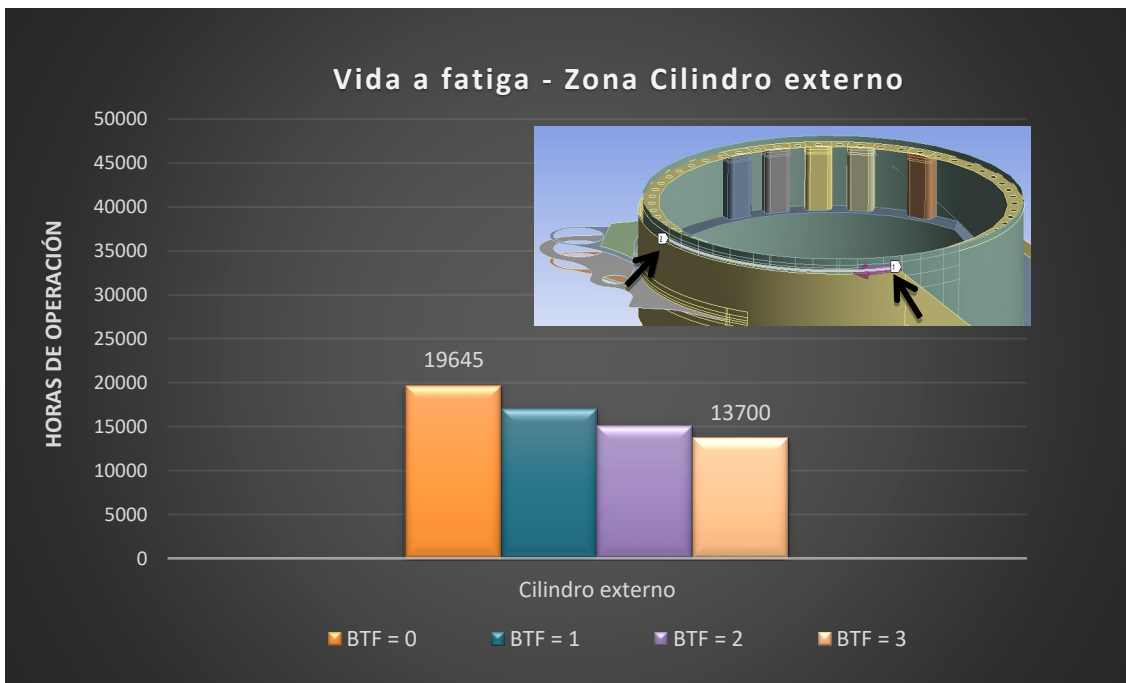
Nota: BTF = Barras Tensoras Fracturadas; 50,000 hr ≅ 5.7 años de operación.

Tabla 4-26: Efecto de barras tensoras fracturadas – Zona amortiguador.



Nota: BTF = Barras Tensoras Fracturadas; 50,000 hr \cong 5.7 años de operación.

Tabla 4-27: Efecto de barras tensoras fracturadas – Cilindro externo.



Nota: BTF = Barras Tensoras Fracturadas; 50,000 hr \cong 5.7 años de operación.

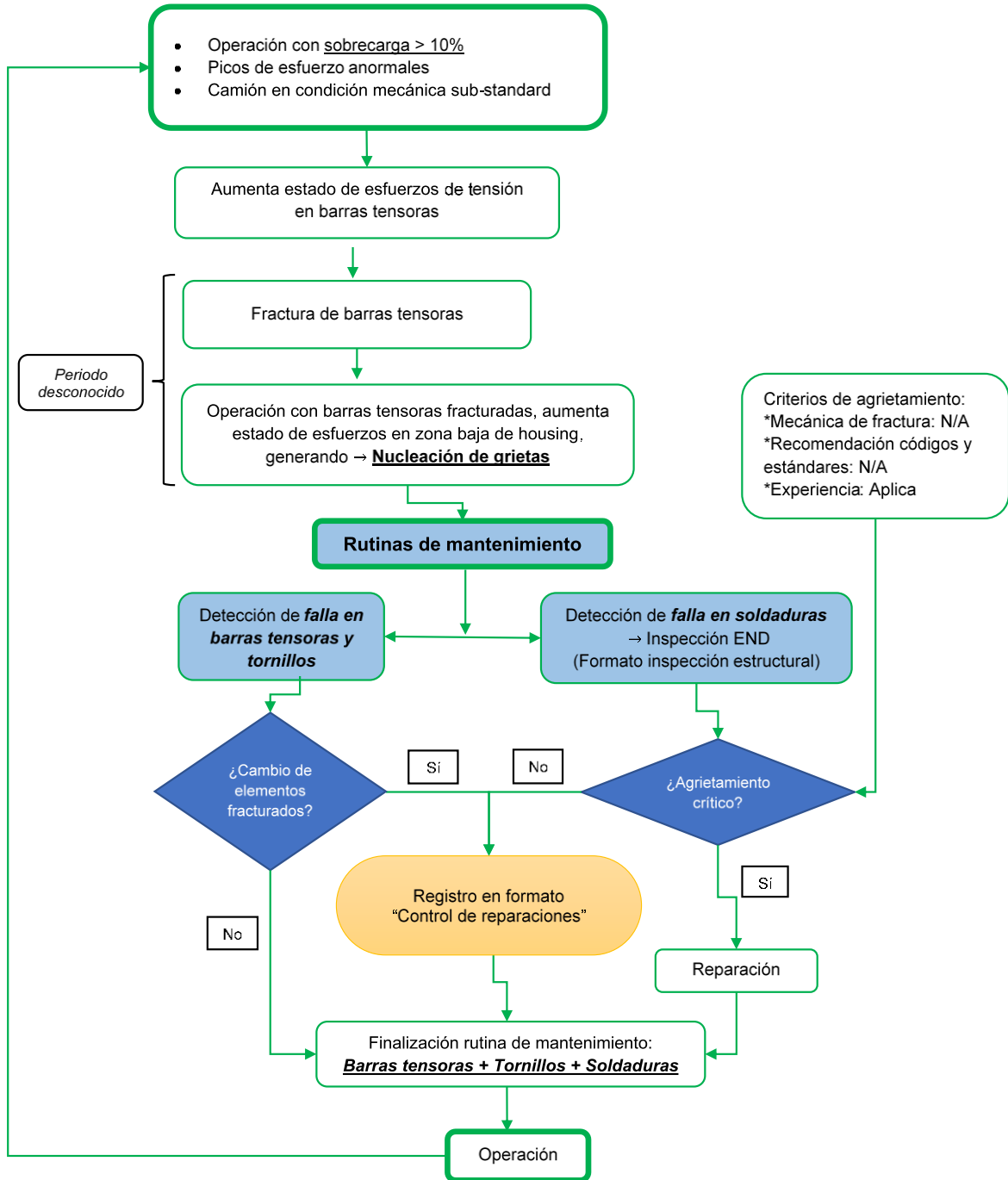
5. Concepto mecanismo de falla

La evaluación de rutinas de mantenimiento y condiciones de operación, junto a la documentación compartida por la compañía, permitió detectar relaciones nocivas y falencias entre actividades de operación y mantenimiento (**Figura 5-1**). Por lo tanto, de acuerdo a todo lo anterior los eventos que generan falla catastrófica en el “Housing”, cumplen probablemente la siguiente secuencia, y pueden ser representados mediante un diagrama causa-efecto (**Figura 5-2**):

1. Los camiones operan con nivel de sobrecarga que **excede el nivel recomendado** por fábrica, evidenciando falta de control estricto en política de carga.
2. Esta condición genera en **barras tensoras dos efectos**:
 - i. *Picos de esfuerzo que consumen rápidamente su vida a fatiga, generando agrietamiento y fractura en extremos roscados o zona lisa.*
 - ii. *Pérdida de apriete por deformación plástica excesiva.*
3. La falla en barras tensoras, aumenta el nivel de esfuerzos de tracción en las juntas soldadas de la zona baja del “Housing”, con **incrementos máximos** de 8% para una barra tensora fracturada, 16% para dos barras y 24% para tres barras, en los casos más probables.
4. Estas nuevas condiciones de operación reducen aceleradamente la vida a fatiga en tornillos y juntas soldadas de “Housing”, principalmente en su zona baja (**Tabla 4-22, Tabla 4-23, Tabla 4-24, Tabla 4-25, Tabla 4-26, Tabla 4-27**).
5. La comparación entre estimaciones de vida a fatiga y registros reales de falla, determinaron que el agrietamiento que da lugar a fallas catastróficas inicia al interior del “Housing”, aproximadamente a las 3,000 horas de operación continua (4 meses) con barras tensoras en óptimas condiciones, específicamente en las juntas Brida-”channel”-Cilindro interno (“channels” 2, 3, 4 y 5), con ubicación preferencial en raíz de cordón horizontal, pie de cordón vertical o en campo triaxial de esfuerzos (**Figura 2-43**).

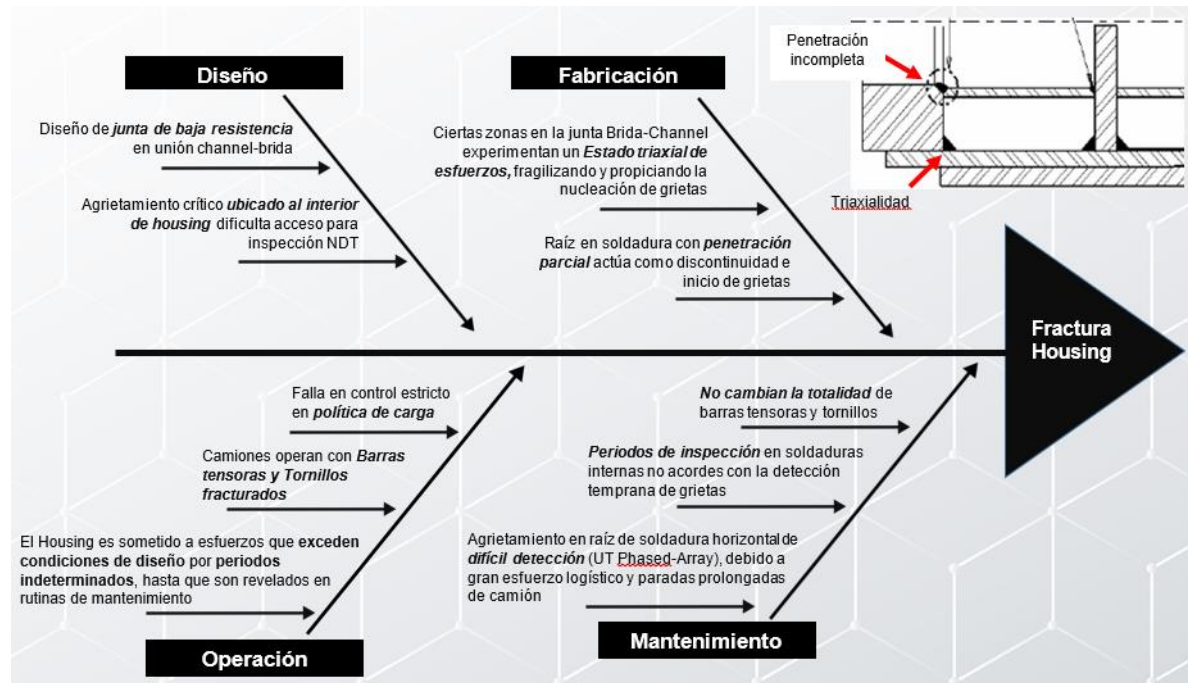
6. Las inspecciones rutinarias se centran en zonas recomendadas por el fabricante; sin embargo, discontinuidades internas en la zona baja del "Housing" no siempre son detectadas; ya que, la técnica recomendada para su detección en raíz de soldadura horizontal (junta Brida-"channel") es "Phased Array-UT", la cual requiere de una gran coordinación logística debiendo desmontar por completo los mandos finales e inhabilitando cada camión por largos periodos.
7. La división de mantenimiento no siempre ejecuta el reemplazo de barras tensoras y tornillos, ni realiza todas las reparaciones por soldadura en el "Housing". El criterio para atender dichas reparaciones se basa en la longitud de grieta detectada y experiencia acumulada; y no, en metodologías predictivas de falla como la mecánica de fractura o estándares y códigos relacionados.
8. Estándares de evaluación de componentes a fatiga como el BS 7608 afirman que, cada vez que una junta soldada es sometida a reparación, su calidad y resistencia a fatiga se reducen. Por lo tanto, cada vez que el "Housing" es reparado su vida a fatiga se acorta, esta condición se agrava si actúan simultáneamente sobrecargas, discontinuidades y barras tensoras fracturadas; por lo tanto, su vida a fatiga será cada vez menor.
9. La periodicidad en inspecciones rutinarias NDT, poco a poco pierde sincronismo con la detección de grietas en su estado inicial. De esta manera las grietas logran nuclear y avanzar sin ser detectadas hasta alcanzar el punto de no retorno, fracturando por completo el "Housing".

Figura 5-1: Diagrama de flujo - Operación & Mantenimiento.



Nota: El diagrama de flujo representa la interacción entre actividades de operación y rutinas de mantenimiento. Nótese que existe un *periodo desconocido* donde el “Housing” experimenta altos niveles de esfuerzo debido a la operación con barras tensoras fracturadas.

Figura 5-2: Diagrama causa – efecto.



Nota: El diagrama causa-efecto presenta los factores más influyentes en la fractura del "Housing".

6. Conclusiones

Conclusiones relacionadas con el *primer* objetivo específico:

- *Historial de fallas y registros de mantenimiento & operación*, evidencian que los camiones operaron por fuera de parámetros recomendados por fabrica, con presencia de *agrietamiento en diversos componentes (“Housing”, barras tensoras, tornillos)*, *fractura o pérdida de apriete en barras tensoras & tornillos*, y *niveles de sobrecarga que excedieron el 10%*. Estas condiciones causaron el agrietamiento de la **zona baja e interna del “Housing”** para los siete eventos de falla catastrófica ocurridos entre las 17.178hr – 35.667hr en el periodo 2009 - 2011 (**Tabla 2-4**).
- El fabricante advierte sobre **zonas internas y externas** sensibles al agrietamiento, en términos generales las **zonas externas** no han sido fuente de falla catastrófica; ya que, sus defectos son fácilmente detectados y controlados (Anexo A). En contraparte, los agrietamientos en **zonas internas** son de difícil detección y reparación; ya que, requiere de una gran gestión logística que inhabilita el camión por largos periodos.
- El registro de reparación y control, identifica **ubicación y longitud de grieta**; sin embargo, el **criterio de longitud crítica de grieta** implementado por la compañía está basado en experiencia acumulada y no en metodologías predictivas de falla como la mecánica de fractura, estándares o códigos relacionados.

Conclusiones relacionadas con el *segundo* objetivo específico:

- El efecto de barras tensoras fracturadas fue cuantificado, mediante la variación del nivel de esfuerzos en distintas zonas del “Housing”. Para ello, se recrearon distintas condiciones de carga para un ciclo estándar de operación minera **-Carga - Transporte -Ciclo de volcado -Retorno -Posicionamiento (Figura 4-4)**, junto a 38 combinaciones probables de barras tensoras fracturadas (Anexo Q).

- La fractura de barras tensoras incrementa el nivel de esfuerzos en juntas internas **Brida-“channel”**, debidas a las condiciones de carga *LC1*, *LC2* y *LC3*; de la siguiente manera (**Tabla 4-12** y Anexo R):
 - Una barra tensora: 2 - 8%
 - Dos barras tensoras: 4 - 16%
 - Tres barras tensoras: 6 - 24%
 - Cuatro barras tensoras: 8 - 30%
 - Cinco barras tensoras: 10 - 34%
 - Seis barras tensoras: 12 - 42%
- El efecto de barras tensoras fracturadas en las demás zonas de interés, tiene el siguiente efecto (**Tabla 4-12** y Anexo R):
 - Zona **Cilindro interno**: Incrementos de esfuerzo entre el 8-30%, generadas por las condiciones de carga *LC1*, *LC2* y *LC3*.
 - Zona **Cilindro externo**: Variaciones entre el 5-20%, generadas principalmente por las condiciones de carga *LC2* y *LC3*.
 - Zona **Soporte de barra antivuelco 1 y 2** y **Soporte de amortiguadores**: Presentan los menores niveles con variaciones menores al 2%.
- En el análisis de vida a fatiga se implementaron dos historiales de carga **ideal** y **monitoreado**, a pesar de que las estimaciones poseen cierto grado de proximidad llegando incluso a coincidir numéricamente en algunas zonas (**Tabla 4-21**), se prefiere el historial de cargas **ideal** debido a su similitud con registros reales de fallas catastróficas centrado en la parte baja del “Housing”.
- Respecto a las estimaciones de vida a fatiga con **barras tensoras en óptimas condiciones**, se determinó el siguiente orden de criticidad (**Tabla 4-21**):
 - i. Uniones **Soporte de barra antivuelco**: 2-3 meses (1,752hr)
 - ii. Uniones **“channel”-Brida** (horizontales “channel” 3 & 4 y verticales “channel” 2 & 5): Alrededor de 4 meses (2,880hr)
 - iii. Uniones **Cilindro externo**: 2.2 años (19,645hr)
 - iv. Uniones **Cilindro interno** y **Soporte amortiguador**: > 10 años (10,5120hr)

Conclusiones relacionadas con el tercer objetivo específico:

- El análisis de inclusiones determinó que los aceros de “*Housing*”, *barras tensoras* y *tornillos* cuentan con un grado bajo de saturación de *inclusiones alargadas* donde predominan silicatos y sulfuros, con un nivel de severidad máximo de 0.5 entre serie gruesa y delgada; sin embargo, respecto a *óxidos globulares*, se pudo determinar que el *nivel de severidad* en “*Housing*” y *barras tensoras*, sobrepasan los niveles recomendados con valores de 3 y 3.5 respectivamente.
- Se determinó que el modo de falla en los tres componentes analizados (“*Housing*”, *barra tensora* y *tornillo*) es **fractura por fatiga**. La dirección y avance de grieta indican que la **zona baja del “*Housing*”** experimentó preferencialmente cargas combinadas tensión–flexión. Estos se iniciaron en raíz & pie de soldadura, y avanzaron preferencialmente hacia el exterior del “*Housing*”. En ***barras tensoras*** los agrietamientos se originaron en valle de rosca y en superficie barra lisa, la dirección del plano de grieta indica que las *barras tensoras* estuvieron sometidas principalmente a esfuerzos de tensión. En ***tornillos*** el agrietamiento originado en valle de rosca avanzó por su núcleo en un ángulo aproximado de 45° hasta alcanzar su fractura final, indicando condiciones de carga combinada tensión–flexión.

Conclusiones relacionadas con el cuarto objetivo específico:

- El fabricante indica en su metodología de reparación, que el agrietamiento en la junta *Brida-“channel”* se genera inicialmente en el cordón horizontal, avanzando hacia los cordones verticales; por lo tanto, en términos de vida a fatiga es más sensible el cordón horizontal que el vertical. Lo cual concuerda con las estimaciones teóricas de vida a fatiga.
- Detalles de fabricación como la penetración incompleta en cordones verticales y horizontales de la *junta Brida-“channel”*, actúan como discontinuidades que facilitan la formación de grietas; dicho comportamiento, fue evidenciado en el examen fractográfico (**Numeral 3.1**, Anexo D y Anexo F).
- La configuración de la unión soldada *Brida-“channel”-Cilindro interno ubicada al interior del “*Housing*”*, genera un estado triaxial de esfuerzos en su intersección (**Figura 2-43**); como resultado, esta zona tiende a comportarse de manera frágil, siendo propensa a la nucleación de grietas. Este comportamiento concuerda con

las marcas de playa que emanan de estas zonas, como se evidencia en los antecedentes de falla (**Numeral 2.5**) y en el examen fractográfico (**Numeral 3.1**).

- La corta vida a fatiga en la parte baja del “Housing”, confirma que dicho elemento no está diseñado para operar en condiciones distintas a las recomendadas por el fabricante. Por lo tanto, se debe *evitar operar camiones con “Housings” agrietados, barras tensoras y/o tornillos fracturados o con pérdida de apriete.*
- Existe cierto grado de correlación entre **estimaciones de vida a fatiga y periodos de agrietamiento registrados en el año 2010** (Anexo AA). Este comportamiento fue experimentado por el *soporte de barra antivuelco*; sin embargo, la información suministrada no permitió encontrar otros patrones similares.
- El resumen de fallas catastróficas (Anexo B), muestra que el máximo periodo de operación fue de 5300hr con barras tensoras fracturadas. Comportamiento cercano a las 5072hr de vida a fatiga estimada, para el caso de dos barras tensoras fracturadas (**Tabla 4-22**).

7.Recomendaciones

Respecto a mantenimiento y operación:

- **Reemplazar** todas las barras tensoras, si una o más se encuentran fracturadas o con pérdida del nivel de torque (Aflojamiento).
- **Reemplazar** todas las barras tensoras cada 16,000 hr (~2 años).
- Seguir un estricto control en la **política de carga** y garantizar la idoneidad de los caminos es fundamental para reducir factores que influyen de manera directa en las fallas del “Housing”.
- Evaluar alternativas de **modificación al diseño de junta**, en la unión *Brida-“channel”-Cilindro interno*; ya que, el **estado triaxial de esfuerzos** en su intersección es uno de los factores que facilitan la nucleación de grietas (**Figura 2-43**).
- Debido a que los cordones verticales y horizontales de la junta *Brida-“channel”* son de **penetración incompleta**, se recomienda **reevaluar el diseño de junta**; ya que, su raíz actúa como concentrador de esfuerzos que facilita la nucleación de grietas. De igual forma, el código ANSI/AWS D1.1 [sección 9], recomienda “*evitar el uso de cordones de soldadura de penetración incompleta en construcción de estructuras dinámicas*”.
- Se recomienda analizar e implementar acciones que **mejoran la resistencia en pie de soldadura**; ya que, se obtendrá un incremento de hasta un 50% en vida a fatiga, si el detalle seleccionado es sometido a rangos de esfuerzo menores que el rango de esfuerzo en el punto de transición de pendiente a $N=5 \times 10^7$ ciclos; en este caso, menores a 14MPa (British Standards Institution, 2014 - Anexo F). respaldando dichas acciones, autores como Lotsberg *et al.*, 2014; Åstrand *et al.*, 2016; Braun and Wang, 2021, muestran igualmente resultados benéficos en pie de soldadura; por lo tanto se recomienda:

- Reducir la severidad del concentrador de esfuerzos en pie de soldadura, por medio de la **remoción de rebabas** y **re-fusión** del pie de soldadura mediante las técnicas TIG o plasma revestida. El cual busca aumentar geoméricamente el radio de curvatura en la zona de concentración de esfuerzos y, remueve o reduce el tamaño de los microdefectos en pie de soldadura.
- Debido a que los esfuerzos residuales de compresión son producidos por las restricciones impuestas al material elástico circundante, es recomendable introducir esfuerzos residuales de compresión benéficos, que deforman plásticamente el pie de soldadura. Técnicas como **-Hammer peening, needle peening, peening de alta frecuencia y granallado localizado (Shot peening)** son usualmente utilizadas para lograr este objetivo.
- Para obtener la máxima vida útil del camión, se deben cumplir estrictamente las siguientes indicaciones del fabricante:
 - Carga nominal 100% (286,384 Kg)
 - Sobrecarga máxima del 10% (315,023 Kg)
 - Torque en barras tensoras: recomendado 2,094Nm (“machine coating”).
- Se recomienda que los periodos de inspección sean **dinámicos**; ya que generalmente, la vida a fatiga en juntas reparadas es cada vez menor. Por lo tanto, las inspecciones NDT en juntas internas de “Housing” serán cada vez más frecuentes. Este comportamiento debe verse reflejado en los periodos de inspección NDT.
- Según las aproximaciones de vida a fatiga, se recomienda continuar inspeccionando las zonas sensibles al agrietamiento según indicaciones del fabricante, incluyendo todas las juntas soldadas de la parte interna del “Housing” cada 1,8 meses (1296hr), a pesar del gran esfuerzo logístico que implica su desmontaje. Adicionalmente, se recomienda realizar la totalidad de las reparaciones, previa evaluación de hallazgos mediante normativas más restrictivas como el AWS D14.1-D14.1M-2005 (*Specification for welding of industrial and mill cranes and other material handling equipment*) y el BS 7910:2019 (*“Guide to methods for assessing the acceptability of flaws in metallic Structures”*), hasta que se realice un estudio minucioso que permita determinar longitudes críticas de grieta para cada zona sensible.

Respecto a monitoreo:

- Se recomienda incluir un sistema de monitoreo que advierta sobre la *fractura en barras tensoras*, este sistema instrumentado puede estar basado en la medición de continuidad eléctrica en cada barra; de forma que, su fractura genere pérdida de continuidad eléctrica. Esta condición se transmitirá al operador, quien inmediatamente deberá dirigir el camión al hangar de mantenimiento. Esta aplicación permitirá conocer los periodos de operación con barras tensoras fracturadas, evitando que la zona baja del “Housing” sea expuesta a picos elevados de esfuerzos, como se explicó en la **Figura 5-1**.
- El camión cuenta con un sistema de monitoreo robusto; el cual, está dirigido principalmente al monitoreo del sistema y motores eléctricos; por ejemplo, es posible monitorear corrientes, voltajes, velocidad angular, torque, inclinación del terreno (lateral y longitudinal), nivel de carga, entre otros; sin embargo, no incluye un sistema que permita detectar barras tensoras fracturadas.

Bibliografía

Aaron D., D., Michels, W. J. and Wilson, C. E. (1987) *DISEÑO DE MÁQUINAS - Teoría y Práctica*. COMPAÑÍA EDITORIAL CONTINENTAL S.A DE C.V., MEXICO.

ASTM Standard E8/E8M-13a (2013) “Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials”, *ASTM International*, (May 2004), pp. 1–27. doi: 10.1520/E0008_E0008M-13A.

Åstrand, E. *et al.* (2016) ‘Welding procedures for fatigue life improvement of the weld toe’, *Welding in the World*, 60(3), pp. 573–580. doi: 10.1007/s40194-016-0309-9.

Becker, W. and Shipley, R. (2002) *ASM HANDBOOK, Volumen 11, Failure Analysis and Prevention*. 2002nd edn, *ASM International*. 2002nd edn.

Beretta, S. *et al.* (2005) ‘Mode II fatigue failures at rail butt-welds’, *Engineering Failure Analysis*, 12(1), pp. 157–165. doi: 10.1016/j.engfailanal.2004.02.004.

Braun, M. and Wang, X. (2021) ‘A review of fatigue test data on weld toe grinding and weld profiling’, *International Journal of Fatigue*. Elsevier Ltd, 145(November 2020), p. 106073. doi: 10.1016/j.ijfatigue.2020.106073.

British Standards Institution (2014) *BSI Standards Publication Guide to fatigue design and assessment of steel products*. Second. BSI Standards Limited.

Budynas-Nisbett (2006) *Mechanical Engineering : Shigley's Mechanical Engineering Design 8th Edition*.

Carrejón - Sistema eléctrico, C. del (no date) *SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA*.

Cho, H. N., Lim, J. K. and Choi, H. H. (2001) ‘Reliability-based fatigue failure analysis for causes assessment of a collapsed steel truss bridge’, *Engineering Failure Analysis*, 8(4), pp. 311–324. doi: 10.1016/S1350-6307(00)00020-0.

Coffey, J. P. (2016) *Mine haul road rolling resistance: influences and impacts*. Available at: <https://espace.curtin.edu.au/handle/20.500.11937/2336>.

Espejo, E. (2009) *Af fractura tunel del camión 22-759*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia - Sede Bogotá D.C.

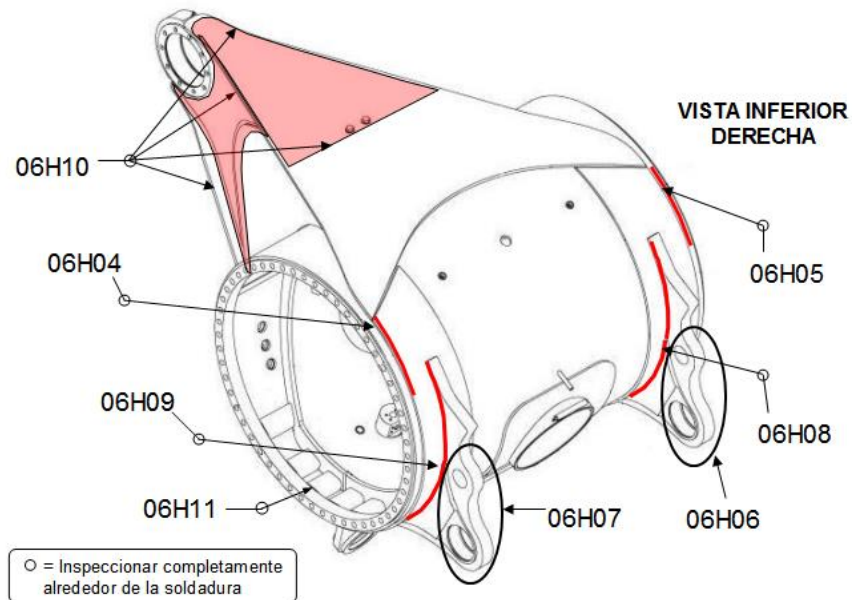
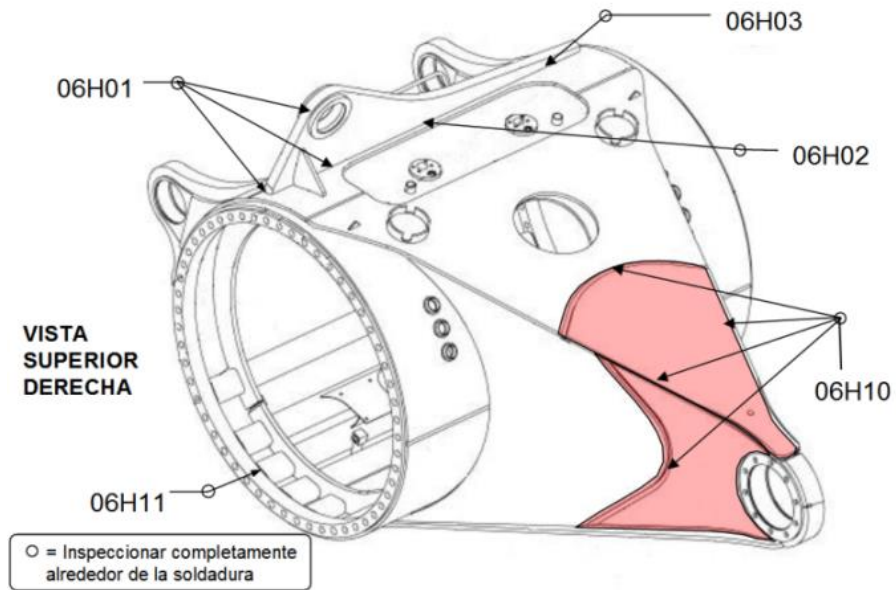
Espejo, E. (2010a) *Af fractura tunel del camión 22-713*. Bogotá D.C.

Espejo, E. (2010b) *Af fractura tunel del camión 22-748*. Bogotá D.C.

- Espejo, E. (2010c) *Af fractura tunel del camión 22-777*. Bogotá D.C.
- Espejo, E. (2010d) *Af fractura tunel del camión 22-778*. Bogotá D.C.
- Espejo, E. (2010e) *Af fractura tunel del camión 22-783*. Bogotá D.C.
- EUCLID-HITACHI Heavy Equipment Inc. (2010) *Mejoras de fabrica área Tunel, Dic2010*.
- Faires, V. M. (1970) *Diseño de elementos de maquinas*. Cuarta. Barcelona: MONTANER Y SIMON S.A. BARCELONA.
- Fricke, W. (2013) 'IIW guideline for the assessment of weld root fatigue', *Welding in the World*, 57(6), pp. 753–791. doi: 10.1007/s40194-013-0066-y.
- Grové, A. P. (2006) *Development of a Finite Element Based Nominal Stress Extraction Procedure for Fatigue Analysis of Welded Structures, Engineering*. University of Pretoria.
- Hernández, H. and Espejo, E. (2002) *Mecanica de la fractura y analisis de falla*. Segunda. Bogotá D.C.: Editorial El Malpensante S.A.
- Hitachi Construction Machinery (2014) *HITACHI EH5000 SPECIFICATIONS*.
- Hitachi Construction Machinery (no date) *STRUCTURAL INSPECTION (SPECIAL ATTENTION AREAS)*.
- Hobbacher, A. F. (2019) *Erratum to: Recommendations for Fatigue Design of Welded Joints and Components*. doi: 10.1007/978-3-319-23757-2_8.
- Hurtado, J. E. (2002) *Introducción al análisis estructural por elementos finitos*. Primera ed. Edited by U. N. de C.-S. Manizales. Manizales: Universidad Nacional de Colombia - Sede Manizales.
- Juvinall, R. C. and Marshek, K. M. (2012) *Fundamentals of Machine Component Design*. 5th edn. John Wiley & Sons, Inc.
- Lampman, S. (1996) *ASM HANDBOOK, Volumen 19, Fatigue and fracture*. Edited by G. M. Davidson. ASM International.
- Lotsberg, I. et al. (2014) 'Fatigue life improvement of welded doubling plates by grinding and ultrasonic peening', *Welding in the World*, 58(6), pp. 819–830. doi: 10.1007/s40194-014-0161-8.
- Neto, M. A. et al. (2015) *Engineering computation of structures: The finite element method, Engineering Computation of Structures: The Finite Element Method*. doi: 10.1007/978-3-319-17710-6.
- Norton, R. L. (2006) *Machine Design - An integrated approach*. 3th edn. Pearson Prentice Hall.
- Roa, M. A. and Garzón, D. A. (2002) *Introducción al Modelamiento por Elementos Finitos con ANSYS*. Primera ed. Bogotá D.C.: Universidad Nacional de Colombia - Sede Manizales.
- Savaidis, G. and Vormwald, M. (2000) 'Hot-spot stress evaluation of fatigue in welded

- structural connections supported by finite element analysis', *International Journal of Fatigue*, 22(2), pp. 85–91. doi: 10.1016/S0142-1123(99)00119-X.
- Shao, Y., Liu, J. and Mechefske, C. K. (2011) 'Drive axle housing failure analysis of a mining dump truck based on the load spectrum', *Engineering Failure Analysis*. Elsevier Ltd, 18(3), pp. 1049–1057. doi: 10.1016/j.engfailanal.2010.12.023.
- Socie, D. (1992) *Rainflow Cycle Counting: A Historical Perspective, The Rainflow Method in Fatigue*. Butterworth-Heinemann Ltd. doi: 10.1016/b978-0-7506-0504-5.50009-6.
- Soofastaei, A. et al. (2016) 'A discrete-event model to simulate the effect of truck bunching due to payload variance on cycle time, hauled mine materials and fuel consumption', *International Journal of Mining Science and Technology*. China University of Mining & Technology, 26(5), pp. 745–752. doi: 10.1016/j.ijmst.2016.05.047.
- Soofastaei, A. et al. (2018) *Energy-efficient loading and hauling operations, Green Energy and Technology*. doi: 10.1007/978-3-319-54199-0_7.
- Stollery, J. L. (1997) *Aerodynamics, Aeronautics and Flight Mechanics, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*. doi: 10.1177/095441009721100102.
- Topaç, M. M., Günal, H. and Kuralay, N. S. (2009) 'Fatigue failure prediction of a rear axle housing prototype by using finite element analysis', *Engineering Failure Analysis*. Elsevier Ltd, 16(5), pp. 1474–1482. doi: 10.1016/j.engfailanal.2008.09.016.

Anexo A: Inspección de soldaduras en “Housing”, Camiones Hitachi®- EH5000



Anexo B: Resumen de fallas catastróficas 2009 – 2011

Item	Análisis de falla	Fecha del suceso	Vida total "Housing" (hr)	Falla catastrófica	Mecanismo de falla & ubicación	Condición antes de falla	Ubicación	Tiempo operación en falla (hr)
1	Camión 22-759	Octubre 15 - 2009	17,178	Desprendimiento o Mando final A	Grietas por Fatiga - Junta soldada Anillo/"Housing" - 06H05	Grieta en una barra tensora	Barra tensora	-
						Grieta en metal base barra antivuelco 200mm	06H01, 06H03	-
2	Camión 22-777	Junio 12 - 2010	17,572	Desprendimiento o Mando final B	Grietas por Fatiga - Junta soldada Anillo/Metal base - 06H04, 06H11	Fractura de 2 barras tensoras (No reparado)	Barra tensora	2,732
						Agrietamiento frecuente en metal base barra antivuelco (No reparado)	06H01, 06H03	1,200
						Sobrecarga excedida 10.7% - 14.7%	-	1,200 y 5,400
						Fractura de una barra tensora x4	Barra tensora	-
						Fractura de tornillo x9	Tornillo	-
3	Camión 22-778	Septiembre 06 - 2010	18,795	Desprendimiento o Mando final A	Grietas por Fatiga - Junta soldada Anillo/Metal base - 06H05, 06H11	Grieta de 250mm en metal base (Reparado ~1 mes antes de falla)	06H05, 06H11	2,650
						Grieta de 160mm en metal base (Reparado ~1 mes antes de falla)	06H04, 06H11	2,650
						Grieta en 2 barras tensoras (No reparado)	Barra tensora	2,650
						Grieta en un tornillo (No reparado)	Tornillo	2,650
4	Camión 22-783	Septiembre 29 - 2010	18,336	Desprendimiento o Mando final B	Grietas por Fatiga - Junta soldada Anillo/Metal base - 06H04, 06H11	Fractura de 2 barras tensoras (No reparado)	Barra tensora	5,300
						Fractura de 2 tornillos (No reparado)	Tornillo	5,300
						Grieta de 330mm en metal base (Reparado ~12 meses antes de falla)	06H04, 06H11	2,650
5	Camión 22-748	Octubre 06 - 2010	26,337	Desprendimiento o Mando final A	Grietas por Fatiga - Junta soldada Anillo/Metal base - 06H05, 06H11	Grieta en una barra tensora (No reparado)	Barra tensora	5,040
						Grieta en un tornillo (No reparado)	Tornillo	5,040

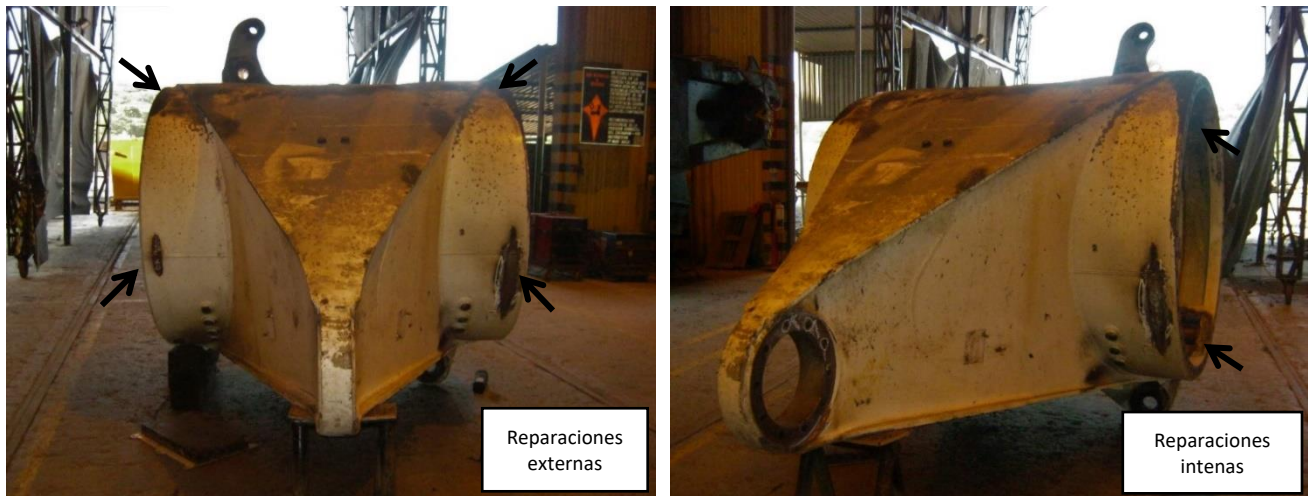
Item	Análisis de falla	Fecha del suceso	Vida total "Housing" (hr)	Falla catastrófica	Mecanismo de falla & ubicación	Condición antes de falla	Ubicación	Tiempo operación en falla (hr)
6	Camión 22-713	Noviembre 12 – 2010	35,667	Desprendimiento o Mando final A	Grietas por Fatiga - Junta soldada Anillo/Metal base - 06H05, 06H11	Fractura de 2 barras tensoras (No reparado)	Barra tensora	1,080
						Fractura de 2 tornillos (No reparado)	Tornillo	1,080
						Grieta externa reparada de 270mm en metal base (Reparado ~2 meses antes de falla)	En soldadura de reparación sin desmonte del mando final -06H05	900
7	Camión 22-807	Junio 26 – 2011	17,454	Desprendimiento o Mando final A	Grietas por Fatiga - Junta soldada Anillo/Metal base - 06H05, 06H11	Fractura de una barra tensora	Barra tensora	3,000
						Fractura de un tornillo	Tornillo	3,000

Anexo C: Registro fotográfico Reparación de “Housing”

Fotografía C-1: “Housing” camión C709 en reparación.



Fotografía C-2: Reparación por agrietamiento en zonas internas y externas.



Fotografía C-3: Cambio de "channels".



Fotografía C-4: Frenos de disco alojados al interior del "Housing".



Fotografía C-5: Reparación por agrietamiento y cambio de “channels” de refuerzo en parte alta de “Housing”.

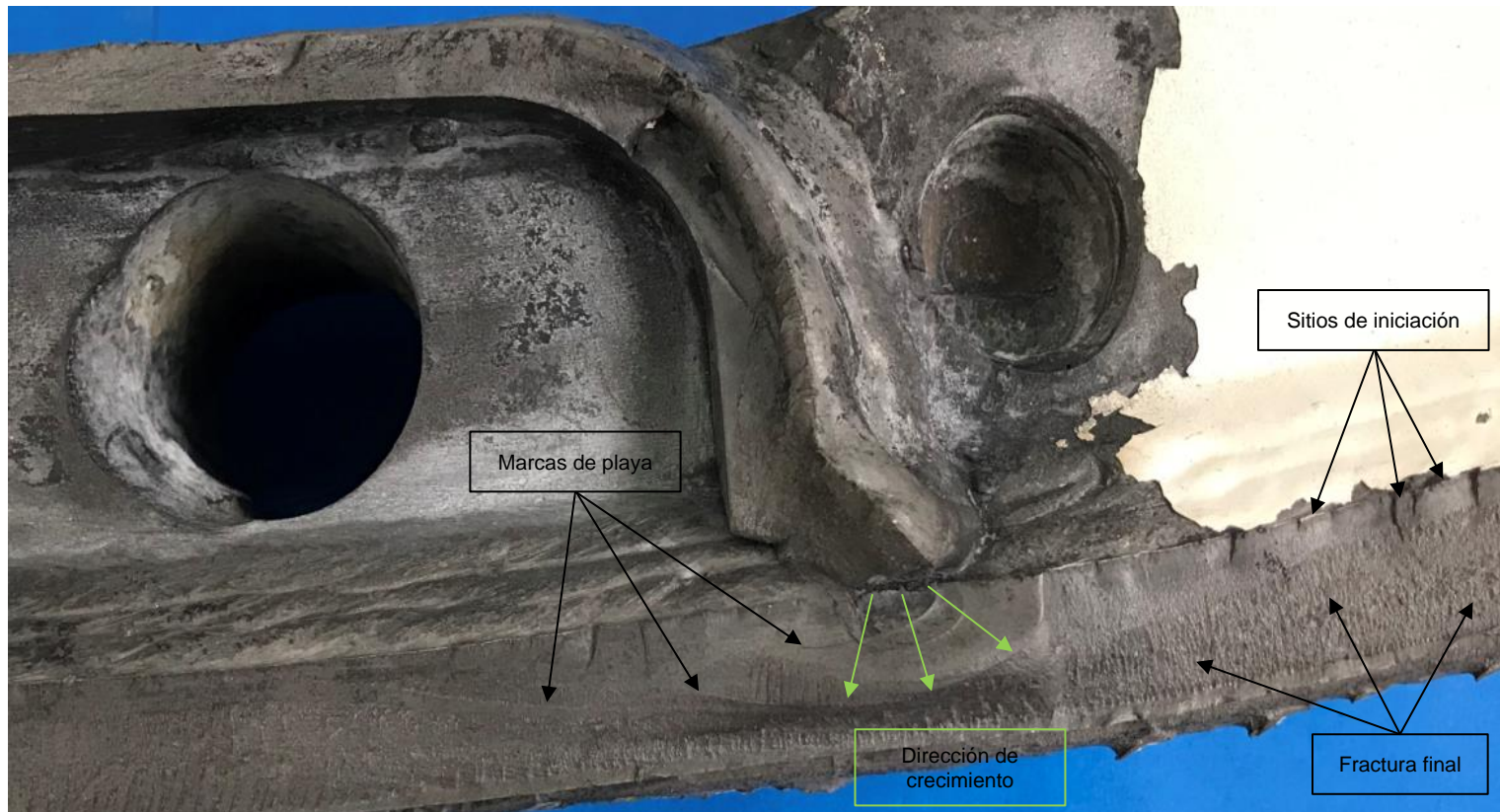


Fotografía C-6: “channels” de refuerzo en parte alta instalados.



Anexo D: Fractografía unión soldada Cilindro interno – Brida

Fotografía D-1: Fractografía de unión “channel”-Brida-Cilindro externo, zona cercana a “channel 2”.



Fotografía D-2: Vista general – Cilindro interno.



Fotografía D-3: Detalles superficie de fractura – Cilindro interno.



Continuación



Anexo E: Fractografía unión soldada Cilindro interno – Cilindro externo

Fotografía E-1: Detalles cordón de soldadura fracturado.



Anexo F: Fractografía en unión soldada “Channel” – Brida

Fotografía F-1: Detalles cordones de soldadura fracturados – unión “Channel” - Brida.



Anexo G: Ensayos de tracción

Fotografía G-1: Apariencia de fractura - "Housing" (H1, H2).



Tabla G-1: Resultados ensayo de tracción - "Housing" (H1, H2).

Tracción 2 probetas planas

German Sanabria - Profesor Edgar Espejo

Fecha : 2018/12/18
 Temperatura : 20,5°C

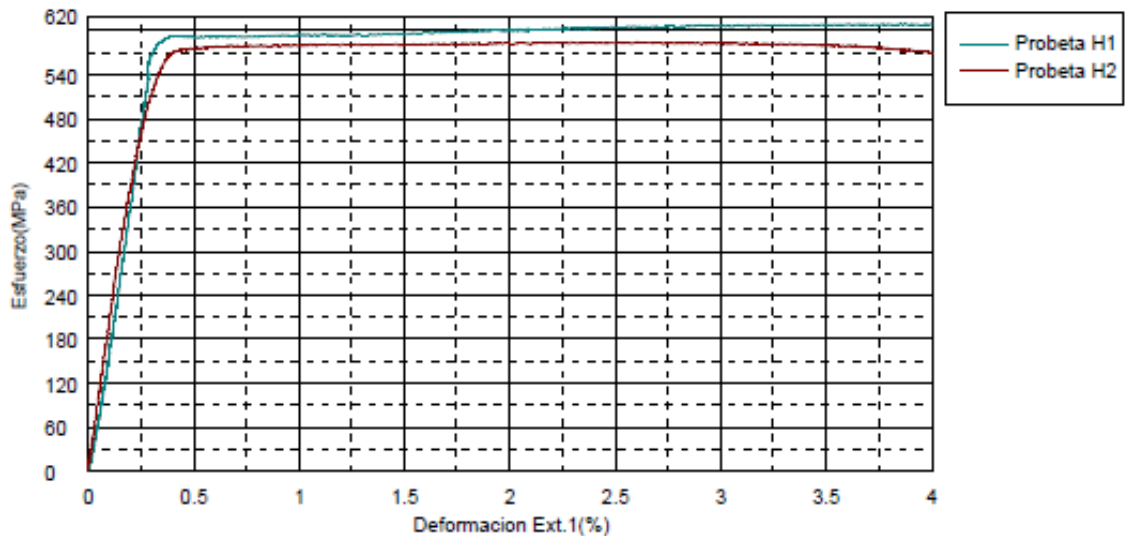
Operador : Diego Romero Sicachá
 Humedad : 48%

Forma: Plana

	Espesor	Anchura	Longitud calibrada
Unidades	mm	mm	mm
Probeta H1	6.2000	8.4900	49.8400
Probeta H2	5.8400	8.4000	49.7100

Nombre	Carga Máxima	Esfuerzo Máximo	Carga de Fluencia	Esfuerzo de Fluencia	Reducción de Área
Parametro			0.2 %	0.2 %	
Unidades	N	MPa	N	MPa	%
Probeta H1	32285.6	612.972	31140.6	591.600	56.6232
Probeta H2	28718.8	585.428	28250.0	575.872	58.7677

Nombre	Alargamiento	M.Elastico
Parametro		100, 200 MPa
Unidades	%	MPa
Probeta H1	17.8571	183325.
Probeta H2	-100.00	197143.



Comentarios

No se puede calcular el alargamiento de la muestra H2, la falla se da fuera de marcas

Fotografía G-2: Apariencia de fractura en ensayo de tracción - Tornillos (T1, T2).



Fotografía G-3: Apariencia de fractura en ensayo de tracción - Barras tensoras (B1, B2).

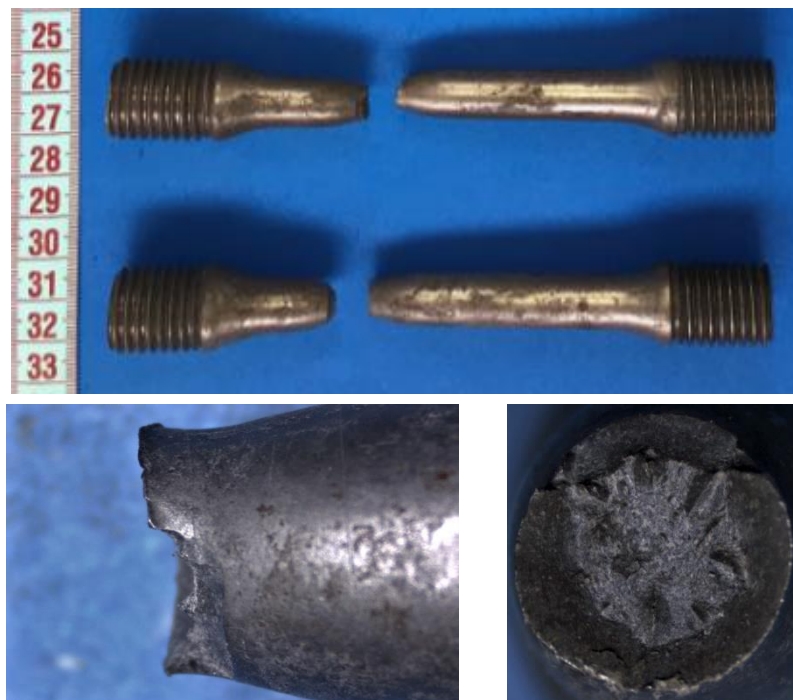


Tabla G-2: Resultados ensayos de tracción, Tornillos (T1, T2) & Barras tensoras (B1, B2).

Tracción 4 probetas cilíndricas German Sanabria - Profesor Edgar Espejo

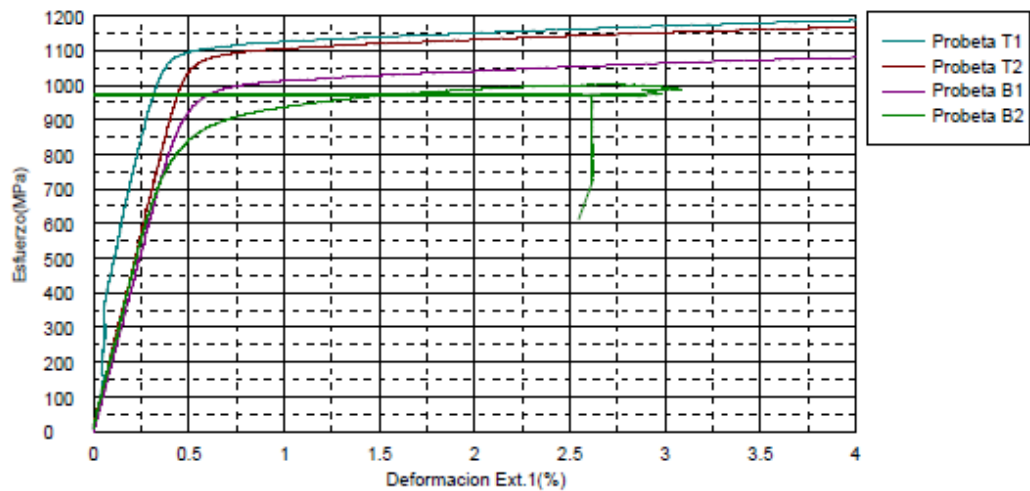
Fecha : 2016/12/16 Operador : Diego Romero Sicachá
Temperatura : 20,7°C Humedad : 49%

Forma: Cilíndrica

	Diametro	Longitud calibrada
Unidades	mm	mm
Probeta T1	12.4000	51.6000
Probeta T2	12.2800	50.1600
Probeta B1	12.3600	49.9600
Probeta B2	12.3000	50.7000

Nombre	Carga Máxima	Esfuerzo Máximo	Carga de Fluencia	Esfuerzo de Fluencia	Reducción de Área
Parametro			0.2 %	0.2 %	
Unidades	N	MPa	N	MPa	%
Probeta T1	144891.	1199.80	133891.	1108.71	50.3202
Probeta T2	139734.	1179.82	128500.	1084.97	52.3138
Probeta B1	131063.	1092.32	118672.	989.056	55.9860
Probeta B2	119109.	1002.41	105158.	884.983	53.2500

Nombre	Alargamiento	M.Elastico
Parametro		100, 200 MPa
Unidades	%	MPa
Probeta T1	15.6783	246234.
Probeta T2	16.9258	235943.
Probeta B1	17.3939	209953.
Probeta B2	11.7357	200979.



Comentarios

Anexo H: Análisis composición química

Tabla H-1: Clasificación de aceros según ASM.

Subclass	Carbon content (a), %
Low-carbon steels	Under 0.2
Medium-carbon steels	0.2–0.5
High-carbon steels	Above 0.5

(a) All percentages in this Chapter are weight percent, unless otherwise noted.

Nota. Clasificación para Plain Carbon steels. tomado de *Metallographer's Guide: Irons and Steels; Ch. 1 Introduction to Steels and Cast Irons*. [Tabla], por ASM International, 2002, p. 4.

Tabla H-2: Composición química - "Housing" (H1, H2 y HN2).

```

STORE DATA      :      4095
ORDEN DE TRABAJO : INTERNA
COMPANIA        : ESTUDIANTE
ENTERANTE       : GERMAN SANABRIA
FIRMA ANALISTA  :
ANALISTA        : JHON JAIRD CASTANEDA B.
FIRMA JEFE LAB  :
JEFE LABORATORIO : ING. EDGAR ESPEJO
REFERENCIA      : MUESTRA H1
Alloy           : LAS2010      Mode :SD 24-Mar-2021   Time 15:13
  
```

Number of burns : 3

Element	Average	S.D.	R.S.D.	Minimum	Maximum
Fe (%)	98.062	0.0430	0.0	98.035	98.111
C (%)	0.240	0.0193	8.0	0.226	0.262
Mn (%)	1.135	0.0299	2.6	1.116	1.169
P (%)	0.031	0.0021	6.8	0.029	0.033
S (%)	0.018	0.0074	41.9	0.013	0.026
Si (%)	0.327	0.0077	2.4	0.321	0.336
Cu (%)	0.049	0.0026	5.4	0.047	0.052
Ni (%)	0.015	0.0003	1.8	0.015	0.016
Cr (%)	0.017	0.0005	3.2	0.017	0.018
V (%)	0.043	0.0010	2.4	0.041	0.043
Mo (%)	0.013	0.0007	5.0	0.013	0.014
W (%)	0.004	0.0030	72.5	0.002	0.007
Co (%)	0.004	0.0007	16.7	0.004	0.005
Ti (%)	0.001	0.0001	4.8	0.001	0.001
Sn (%)	0.003	0.0006	18.7	0.003	0.004
Al (%)	0.023	0.0033	14.0	0.020	0.027
Nb (%)	0.003	0.0014	49.2	0.002	0.005
B (%)	0.0008	0.00015	18.7	0.0006	0.0009
Pb (%)	0.011	0.0018	16.7	0.009	0.013
Mg (%)	0.001	0.0001	22.3	0.000	0.001

Continuación.

STORE DATA : 4096
 ORDEN DE TRABAJO : INTERNA
 COMPANIA : ESTUDIANTE
 ENTERANTE : GERMAN SANABRIA
 FIRMA ANALISTA :
 ANALISTA : JHON JAIRD CASTANEDA B.
 FIRMA JEFE LAB :
 JEFE LABORATORIO : ING. EDGAR ESPEJO
 REFERENCIA : MUESTRA H2
 Alloy : LAS2010 Mode :SD 24-Mar-2021 Time 15:18

Number of burns : 3		Average	S.D.	R.S.D.	Minimum	Maximum
Fe (%)		98.078	0.0966	0.1	97.968	98.148
C (%)		0.214	0.0028	1.3	0.211	0.217
Mn (%)		1.139	0.0513	4.5	1.107	1.198
P (%)		0.033	0.0071	21.3	0.025	0.039
S (%)		0.018	0.0072	39.8	0.011	0.026
Si (%)		0.320	0.0135	4.2	0.308	0.335
Cu (%)		0.049	0.0051	10.4	0.044	0.054
Ni (%)		0.015	0.0010	6.8	0.014	0.016
Cr (%)		0.017	0.0014	8.4	0.016	0.019
V (%)		0.043	0.0023	5.3	0.040	0.044
Mo (%)		0.014	0.0014	10.0	0.013	0.015
W (%)		0.011	0.0070	66.1	0.007	0.019
Co (%)		0.005	0.0013	28.4	0.003	0.006
Ti (%)		0.001	0.0003	21.3	0.001	0.001
Sn (%)		0.004	0.0014	37.6	0.002	0.005
Al (%)		0.023	0.0033	14.5	0.020	0.027
Nb (%)		0.004	0.0024	62.0	0.002	0.006
B (%)		0.0009	0.00016	17.4	0.0008	0.0011
Pb (%)		0.011	0.0032	29.1	0.008	0.014
Ma (%)		0.001	0.0002	35.4	0.000	0.001

STORE DATA : 4100
 ORDEN DE TRABAJO : INTERNA
 COMPANIA : ESTUDIANTE
 ENTERANTE : GERMAN SANABRIA
 FIRMA ANALISTA :
 ANALISTA : JHON JAIRD CASTANEDA B.
 FIRMA JEFE LAB :
 JEFE LABORATORIO : ING. EDGAR ESPEJO
 REFERENCIA : HN2
 Alloy : LAS2010 Mode :SD 26-Mar-2021 Time 16:11

Number of burns : 3		Average	S.D.	R.S.D.	Minimum	Maximum
Fe (%)		97.702	0.1246	0.1	97.591	97.837
C (%)		0.197	0.0024	1.2	0.195	0.200
Mn (%)		1.511	0.0779	5.2	1.427	1.581
P (%)		0.019	0.0033	16.9	0.016	0.022
S (%)		0.011	0.0014	13.3	0.009	0.012
Si (%)		0.402	0.0193	4.8	0.380	0.417
Cu (%)		0.029	0.0029	9.9	0.026	0.032
Ni (%)		0.023	0.0019	8.6	0.020	0.024
Cr (%)		0.021	0.0013	6.1	0.020	0.022
V (%)		0.003	0.0005	16.8	0.002	0.003
Mo (%)		0.015	0.0017	11.0	0.014	0.017
W (%)		0.003	0.0070	214.5	0.000	0.010
Co (%)		0.005	0.0014	27.1	0.004	0.006
Ti (%)		0.002	0.0002	10.6	0.001	0.002
Sn (%)		0.006	0.0016	28.0	0.004	0.007
Al (%)		0.026	0.0015	5.9	0.025	0.028
Nb (%)		0.005	0.0030	56.9	0.002	0.008
B (%)		0.0008	0.00015	17.6	0.0007	0.0010
Pb (%)		0.017	0.0043	24.6	0.013	0.021
Ma (%)		0.001	0.0003	32.3	0.001	0.001

Tabla H-3: Composición química - Barras tensoras (B1 y B2).

STORE DATA : 4091
 ORDEN DE TRABAJO : INTERNA
 COMPANIA : ESTUDIANTE
 ENTERANTE : GERMAN SANABRIA
 FIRMA ANALISTA :
 ANALISTA : JHON JAIRO CASTANEDA B.
 FIRMA JEFE LAB :
 JEFE LABORATORIO : ING. EDGAR ESPEJO
 REFERENCIA : MUESTRA B1
 Alloy : LAS2010 Mode :SD 24-Mar-2021 Time 14:50

Number of burns : 3

Element	Average	S.D.	R.S.D.	Minimum	Maximum
Fe (%)	97.164	0.0297	0.0	97.137	97.196
C (%)	0.422	0.0061	1.5	0.417	0.428
Mn (%)	0.714	0.0228	3.2	0.690	0.735
P (%)	0.004	0.0020	53.4	0.002	0.006
S (%)	0.004	0.0006	14.9	0.003	0.005
Si (%)	0.237	0.0092	3.9	0.227	0.245
Cu (%)	0.088	0.0055	6.2	0.084	0.095
Ni (%)	0.049	0.0023	4.7	0.047	0.052
Cr (%)	1.035	0.0160	1.5	1.018	1.050
V (%)	0.007	0.0003	4.1	0.007	0.007
Mo (%)	0.160	0.0018	1.1	0.158	0.161
W (%)	0.015	0.0061	41.1	0.009	0.021
Co (%)	0.015	0.0017	10.9	0.014	0.017
Ti (%)	0.003	0.0001	5.5	0.003	0.003
Sn (%)	0.009	0.0011	12.1	0.008	0.010
Al (%)	0.060	0.0424	71.2	0.033	0.108
Nb (%)	0.004	0.0020	47.1	0.002	0.006
B (%)	0.0007	0.00011	16.2	0.0006	0.0008
Pb (%)	0.009	0.0016	18.0	0.007	0.010
Ma (%)	0.001	0.0001	7.6	0.001	0.001

STORE DATA : 4092
 ORDEN DE TRABAJO : INTERNA
 COMPANIA : ESTUDIANTE
 ENTERANTE : GERMAN SANABRIA
 FIRMA ANALISTA :
 ANALISTA : JHON JAIRO CASTANEDA B.
 FIRMA JEFE LAB :
 JEFE LABORATORIO : ING. EDGAR ESPEJO
 REFERENCIA : MUESTRA B2
 Alloy : LAS2010 Mode :SD 24-Mar-2021 Time 14:55

Number of burns : 3

Element	Average	S.D.	R.S.D.	Minimum	Maximum
Fe (%)	97.566	0.1112	0.1	97.459	97.681
C (%)	0.408	0.0054	1.3	0.404	0.414
Mn (%)	0.773	0.0235	3.0	0.747	0.792
P (%)	0.013	0.0014	11.0	0.011	0.014
S (%)	0.024	0.0049	20.4	0.020	0.029
Si (%)	0.208	0.0131	6.3	0.193	0.219
Cu (%)	0.071	0.0083	11.7	0.061	0.077
Ni (%)	0.030	0.0058	19.4	0.025	0.036
Cr (%)	0.814	0.0179	2.2	0.794	0.828
V (%)	0.024	0.0010	4.2	0.023	0.025
Mo (%)	0.013	0.0017	12.8	0.012	0.015
W (%)	0.014	0.0023	15.8	0.013	0.017
Co (%)	0.005	0.0011	21.4	0.004	0.006
Ti (%)	0.001	0.0002	22.6	0.001	0.001
Sn (%)	0.005	0.0013	24.6	0.004	0.006
Al (%)	0.010	0.0411	397.4	0.000	0.058
Nb (%)	0.002	0.0016	71.2	0.000	0.004
B (%)	0.0013	0.00060	45.4	0.0007	0.0019
Pb (%)	0.007	0.0023	33.0	0.004	0.008
Ma (%)	0.001	0.0002	41.5	0.000	0.001

Tabla H-4: Composición química - Tornillos (T1 y T2).

STORE DATA : 4093
 ORDEN DE TRABAJO : INTERNA
 COMPANIA : ESTUDIANTE
 ENTERANTE : GERMAN SANABRIA
 FIRMA ANALISTA :
 ANALISTA : JHON JAIRO CASTANEDA B.
 FIRMA JEFE LAB :
 JEFE LABORATORIO : ING. EDGAR ESPEJO
 REFERENCIA : MUESTRA T1
 Alloy : LAS2010 Mode :SD 24-Mar-2021 Time 15:03

Number of burns : 3

Element	Average	S.D.	R.S.D.	Minimum	Maximum
Fe (%)	95.046	0.2520	0.3	94.782	95.284
C (%)	0.415	0.0115	2.8	0.405	0.427
Mn (%)	0.750	0.0274	3.7	0.727	0.780
P (%)	0.025	0.0019	7.4	0.024	0.027
S (%)	0.011	0.0009	8.5	0.010	0.012
Si (%)	0.365	0.0145	4.0	0.352	0.381
Cu (%)	0.217	0.0210	9.7	0.197	0.239
Ni (%)	2.040	0.1663	8.1	1.872	2.205
Cr (%)	0.830	0.0174	2.1	0.814	0.848
V (%)	0.005	0.0003	6.3	0.005	0.005
Mo (%)	0.229	0.0037	1.6	0.225	0.232
W (%)	0.005	0.0036	72.5	0.001	0.007
Co (%)	0.012	0.0014	11.7	0.011	0.013
Ti (%)	0.003	0.0002	7.9	0.002	0.003
Sn (%)	0.012	0.0012	10.3	0.011	0.013
Al (%)	0.021	0.0023	10.8	0.019	0.023
Nb (%)	0.005	0.0017	36.4	0.003	0.006
B (%)	0.0007	0.00006	8.7	0.0007	0.0008
Pb (%)	0.009	0.0022	24.6	0.007	0.011
Mg (%)	0.001	0.0001	23.6	0.000	0.001

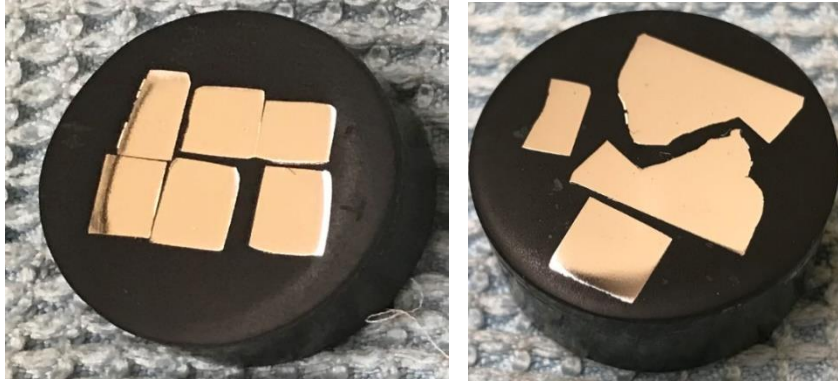
STORE DATA : 4094
 ORDEN DE TRABAJO : INTERNA
 COMPANIA : ESTUDIANTE
 ENTERANTE : GERMAN SANABRIA
 FIRMA ANALISTA :
 ANALISTA : JHON JAIRO CASTANEDA B.
 FIRMA JEFE LAB :
 JEFE LABORATORIO : ING. EDGAR ESPEJO
 REFERENCIA : MUESTRA T2
 Alloy : LAS2010 Mode :SD 24-Mar-2021 Time 15:07

Number of burns : 3

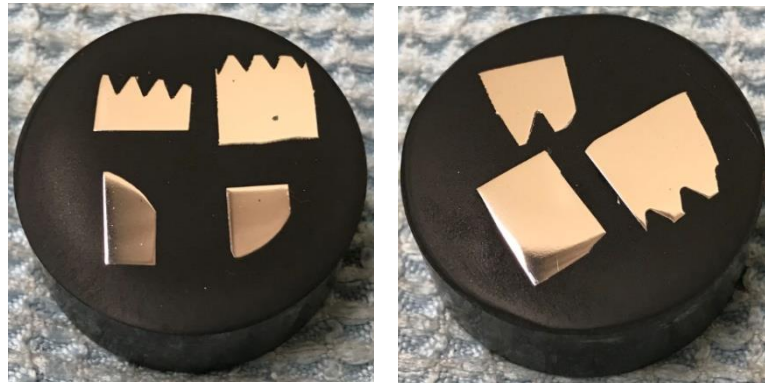
Element	Average	S.D.	R.S.D.	Minimum	Maximum
Fe (%)	95.064	0.1689	0.2	94.941	95.256
C (%)	0.428	0.0164	3.8	0.409	0.440
Mn (%)	0.764	0.0118	1.5	0.751	0.773
P (%)	0.031	0.0010	3.4	0.030	0.032
S (%)	0.013	0.0002	1.7	0.012	0.013
Si (%)	0.371	0.0113	3.0	0.361	0.384
Cu (%)	0.214	0.0163	7.6	0.196	0.224
Ni (%)	1.953	0.1322	6.8	1.801	2.032
Cr (%)	0.839	0.0075	0.9	0.830	0.844
V (%)	0.005	0.0002	3.9	0.005	0.005
Mo (%)	0.232	0.0070	3.0	0.224	0.237
W (%)	0.019	0.0043	22.9	0.014	0.022
Co (%)	0.013	0.0008	6.4	0.012	0.013
Ti (%)	0.003	0.0001	5.1	0.002	0.003
Sn (%)	0.013	0.0009	6.8	0.012	0.014
Al (%)	0.020	0.0012	6.2	0.019	0.021
Nb (%)	0.006	0.0011	20.2	0.004	0.007
B (%)	0.0009	0.00004	4.6	0.0009	0.0010
Pb (%)	0.010	0.0015	14.8	0.008	0.011
Mg (%)	0.001	0.0001	9.7	0.001	0.001

Anexo J: Probetas metalográficas

Fotografía J-1: Encapsulado - "Housing".



Fotografía J-2: Encapsulado - Barras tensoras.

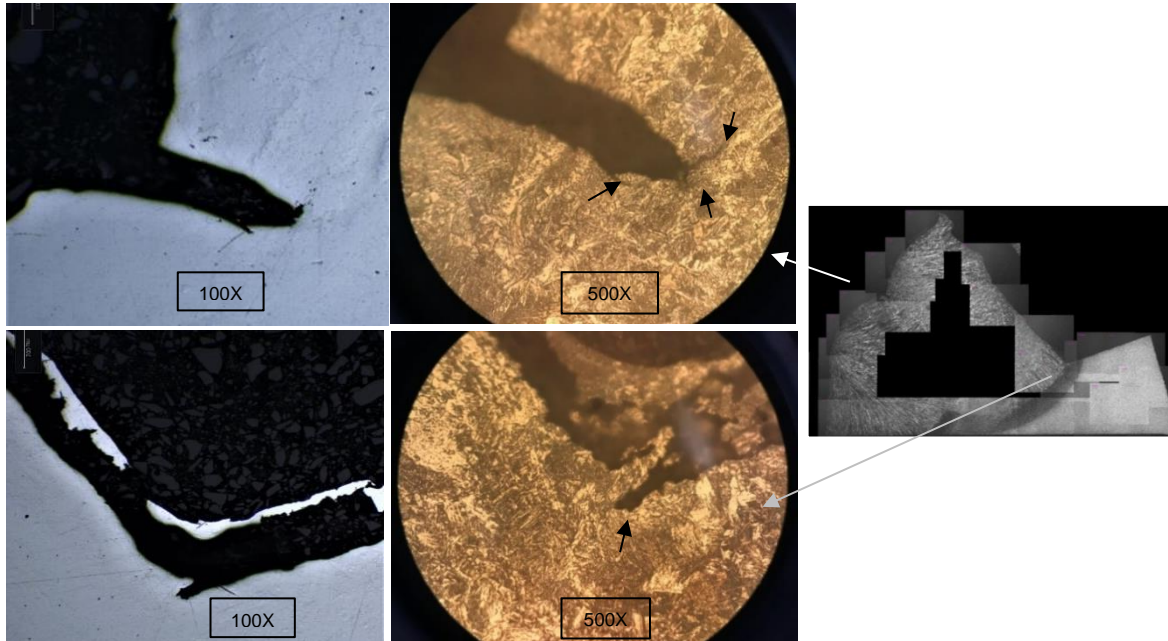


Fotografía J-3: Encapsulado - Tornillos.



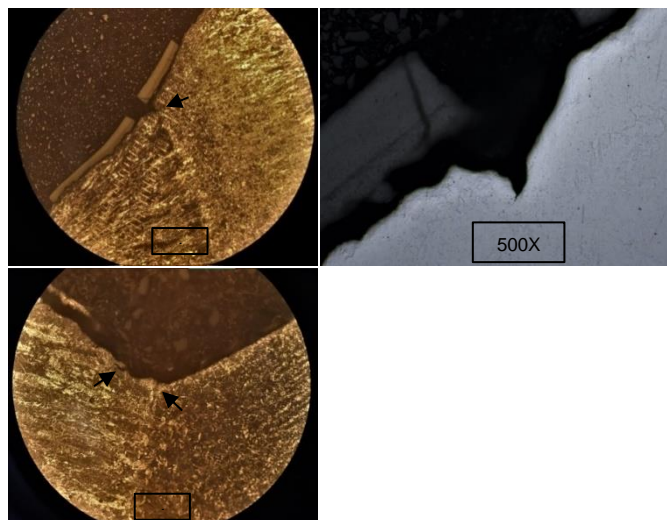
Anexo K: Detalle discontinuidades en unión soldada – “Housing”

Fotografía K-1: Discontinuidades en unión soldada - Sección 1.



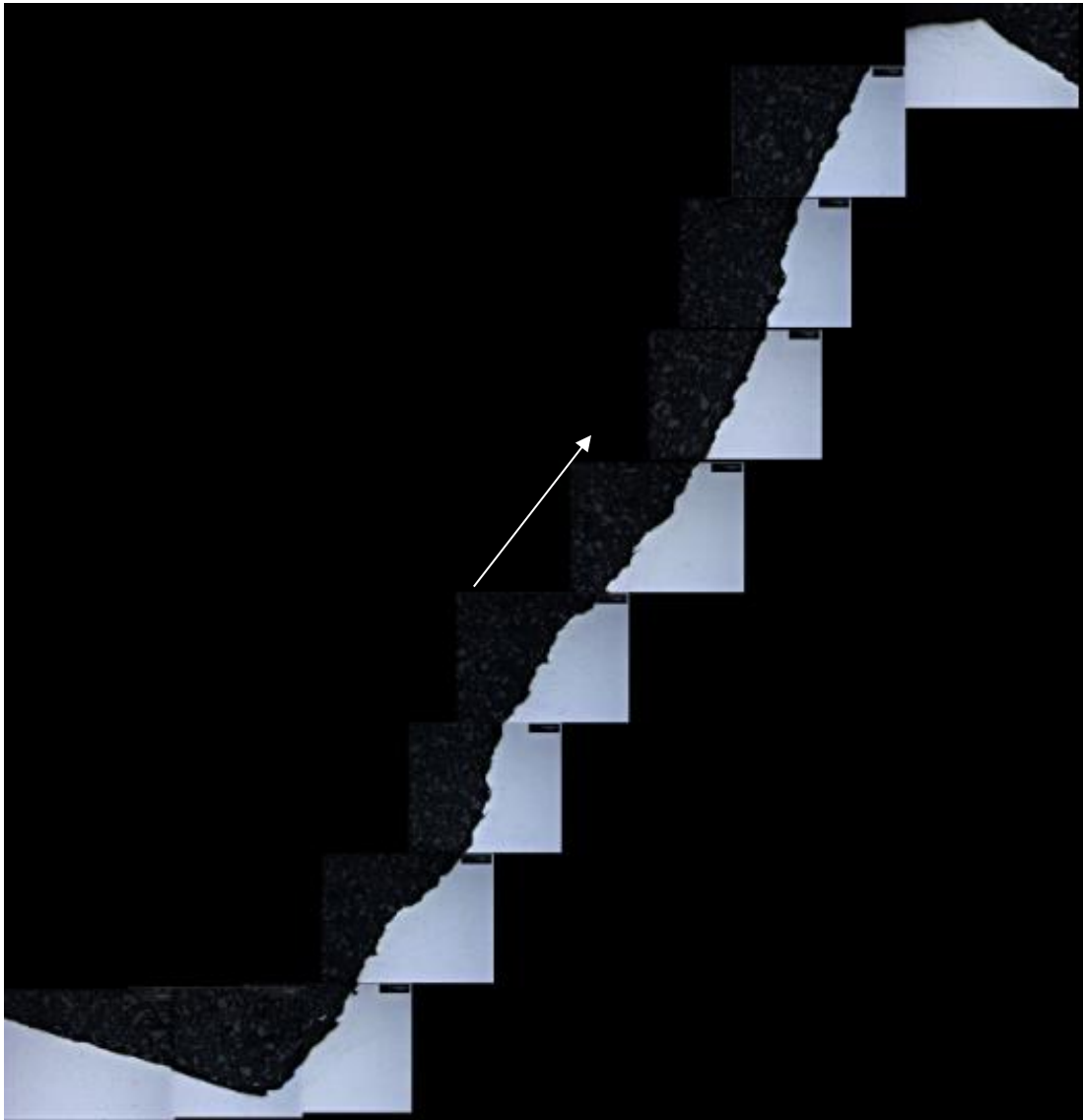
Nota. Grietas ramificadas generadas a partir de pliegue de soldadura (arriba). Nucleación de grieta a partir del concentrador de esfuerzos en la ZAC (abajo). Con y sin ataque. 500X. Nital 2%.

Fotografía K-2: Discontinuidades en unión soldada - Sección 2.



Nota. Discontinuidad entre pliegues de soldadura (arriba) y agrietamiento múltiple en zona cercana a concentrador de esfuerzos en ZAC (derecha). 100X y 500X. Con y sin ataque. Nital 2%.

Fotografía K-3: Dirección de propagación de grieta - Sección 1.



Fotografía K-4: Dirección de propagación de grieta - Sección 2.



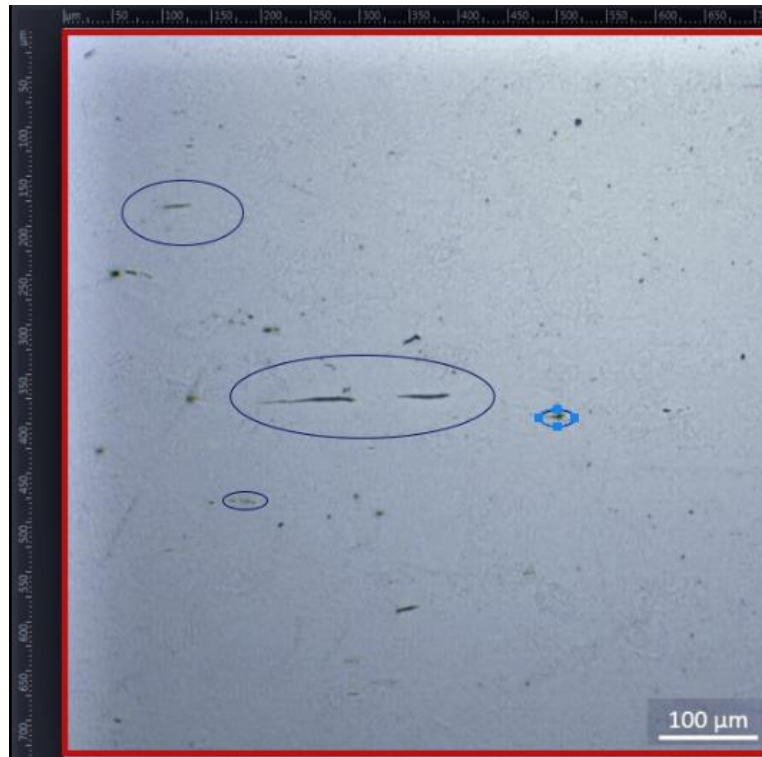
Anexo L: Conteo de inclusiones- "Housing"

Fotografía L-1: Detalle conteo de inclusiones "Housing".



Conteo de inclusiones ASTM E45, método D, magnificación 100x							
Inclusiones	Serie	Nivel de severidad					
		0,5	1	1,5	2	2,5	3
Alargadas Tipos A, B, C	Delgada	730	-	-	-	-	-
	Gruesa	-	-	-	-	-	-
Óxidos globulares	Delgada	-	-	-	-	-	30
	Gruesa	-	-	-	-	-	-

Fotografía L-2: Detalle conteo de inclusiones Barra tensora.



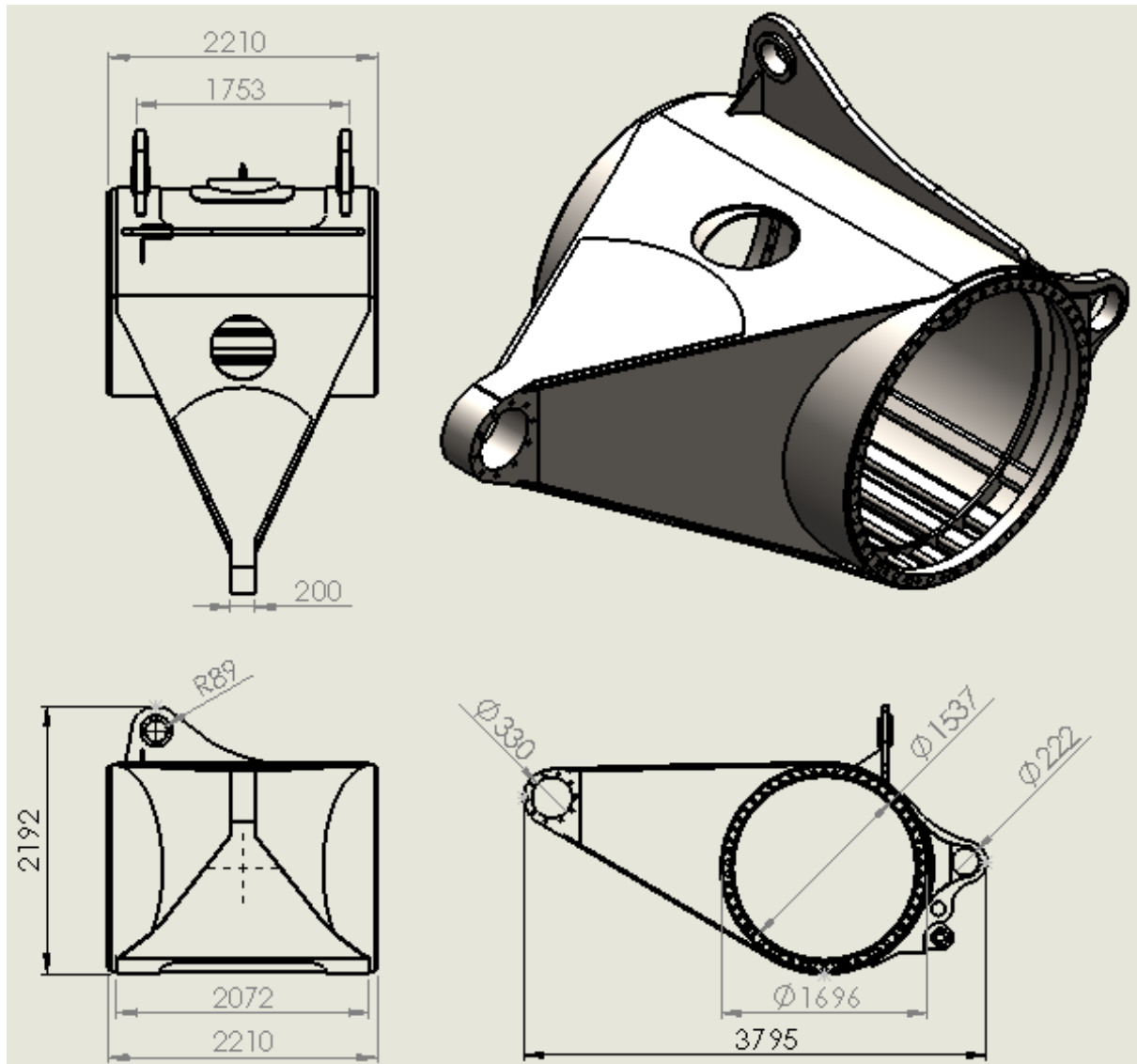
Conteo de inclusiones ASTM E45, método D, magnificación 100x							
Inclusiones	Serie	Nivel de severidad					
		0,5	1	1,5	2	2,5	3,5
Alargadas Tipos A, B, C	Delgada	0,325	-	-	-	-	-
	Gruesa	-	-	-	-	-	-
Óxidos globulares	Delgada	-	-	-	-	-	48
	Gruesa	-	-	-	-	-	-

Fotografía L-3: Detalle conteo de inclusiones Tornillo.



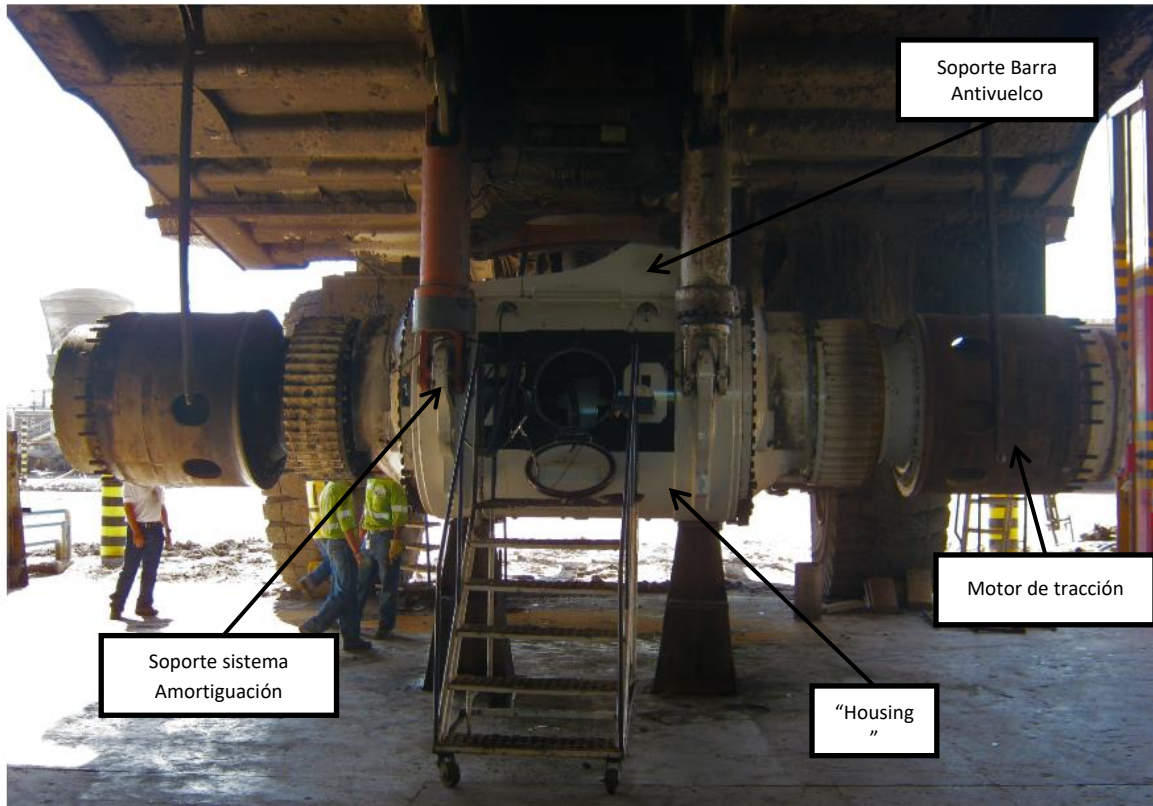
Conteo de inclusiones ASTM E45, método D, magnificación 100x							
Inclusiones	Serie	Nivel de severidad					
		0,5	1	1,5	2	2,5	3
Alargadas Tipos A, B, C	Delgada	-	-	-	-	-	-
	Gruesa	124	-	-	-	-	-
Óxidos globulares	Delgada	-	-	-	-	20	-
	Gruesa	-	-	-	-	-	-

Anexo M: Dimensiones generales “Housing”

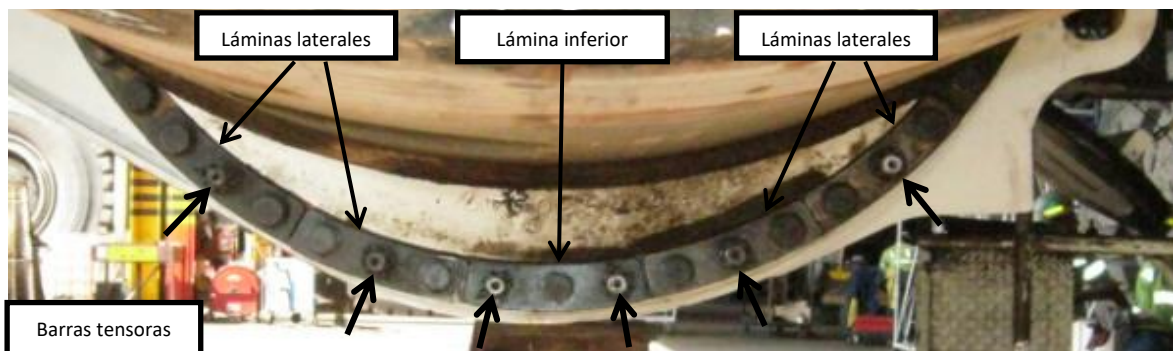


Anexo N: Registro fotográfico montaje de mandos finales

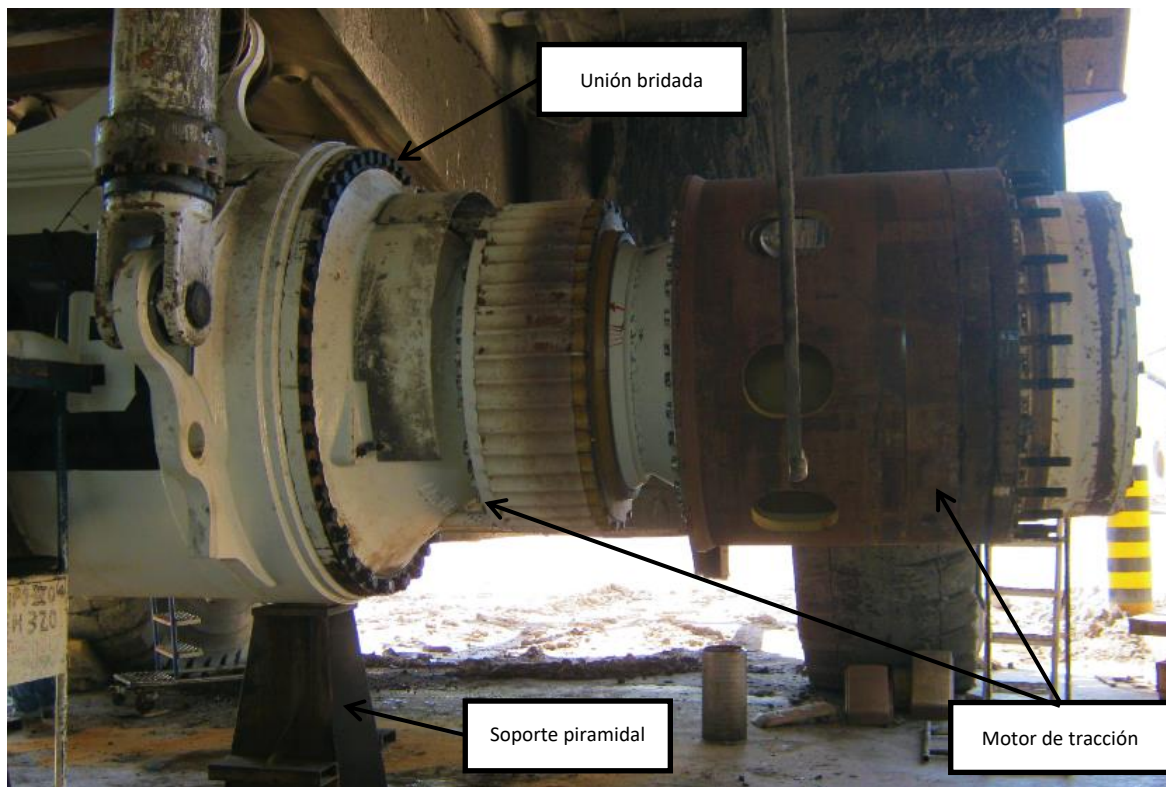
Fotografía N-1: Ensamble motores de tracción.



Fotografía N-2: Detalle zona baja unión: "Housing" - Motor de tracción.



Fotografía N-3: Unión "Housing" - Motor de tracción.



Fotografía N-4: La implementación de Nut castle en barras tensoras como método de fijación al "Housing", permite la pretensión en los mismos.



Anexo P: Total combinaciones – seis barras tensoras disminuido (64 - 48)

CORREGIDO	COMBINACIONES 1 BARRA TENSORA						COMBINACIONES 2 BARRAS TENSORAS						COMBINACIONES 3 BARRAS TENSORAS						COMBINACIONES 4 BARRAS TENSORAS						COMBINACIONES 5 BARRAS TENSORAS						6	0																					
No. Barra	C1	C2	C3	C5	C6	C7	C8	C10	C11	C12	C14	C15	C16	C17	C18	C21	C22	C24	C25	C26	C27	C28	C31	C32	C33	C34	C37	C38	C39	C40	C42	C43	C44	C45	C46	C47	C48	C52	C53	C55	C56	C57	C58	C59	C61	C62	C63	C64					
1	X					X	X	X	X								X	X	X	X	X	X	X								X	X	X		X	X	X		X		X	X	X	X	X	X	X	X					
2		X				X				X	X	X					X	X	X					X	X	X	X				X	X	X	X		X		X	X			X	X	X		X	X	X					
3			X				X			X			X	X	X		X			X	X	X		X	X	X		X	X	X	X	X	X	X		X	X		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X				
4													X						X				X				X	X		X			X	X			X	X		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X				
5				X				X			X			X		X		X		X		X		X		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X			
6					X			X			X			X	X			X		X		X	X		X	X		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		

Donde:

x = Barra fracturada

“ “= Barra No fracturada

_ = Combinación repetida (Barra 3 y 4)

Anexo Q: Total combinaciones analizadas - seis barras tensoras (38)

No. Barra	1 BTF					2 BTF										3 BTF										4 BTF					5 BTF	6 BTF	0							
	C1	C2	C3	C5	C6	C7	C8	C10	C11	C12	C14	C15	C16	C17	C18	C21	C22	C24	C25	C26	C27	C28	C31	C32	C33	C34	C37	C38	C39	C40	C43	C44	C47	C48	C53	C59	C63	C64		
1	X					X	X	X	X								X	X	X	X	X	X	X									X	X	X	X			X	X	
2		X				X				X	X	X					X	X	X					X	X	X	X					X	X	X		X		X	X	
3			X				X			X				X	X		X			X	X	X		X	X	X		X	X	X		X	X		X			X	X	
4																				X				X			X	X								X				X
5				X				X			X			X		X	X			X		X		X		X	X		X	X		X	X	X	X	X		X	X	
6					X				X			X		X	X		X				X	X			X	X		X	X		X	X	X	X	X		X	X		

Donde:

x = Barra fracturada

“ “= Barra No fracturada

Anexo R: Variación de esfuerzos en zonas sensibles al agrietamiento

Figura R-1: Uniones analizadas “channel 1”, “channel 2”, “channel 3”, “channel 4”, “channel 5” y “channel 6”.

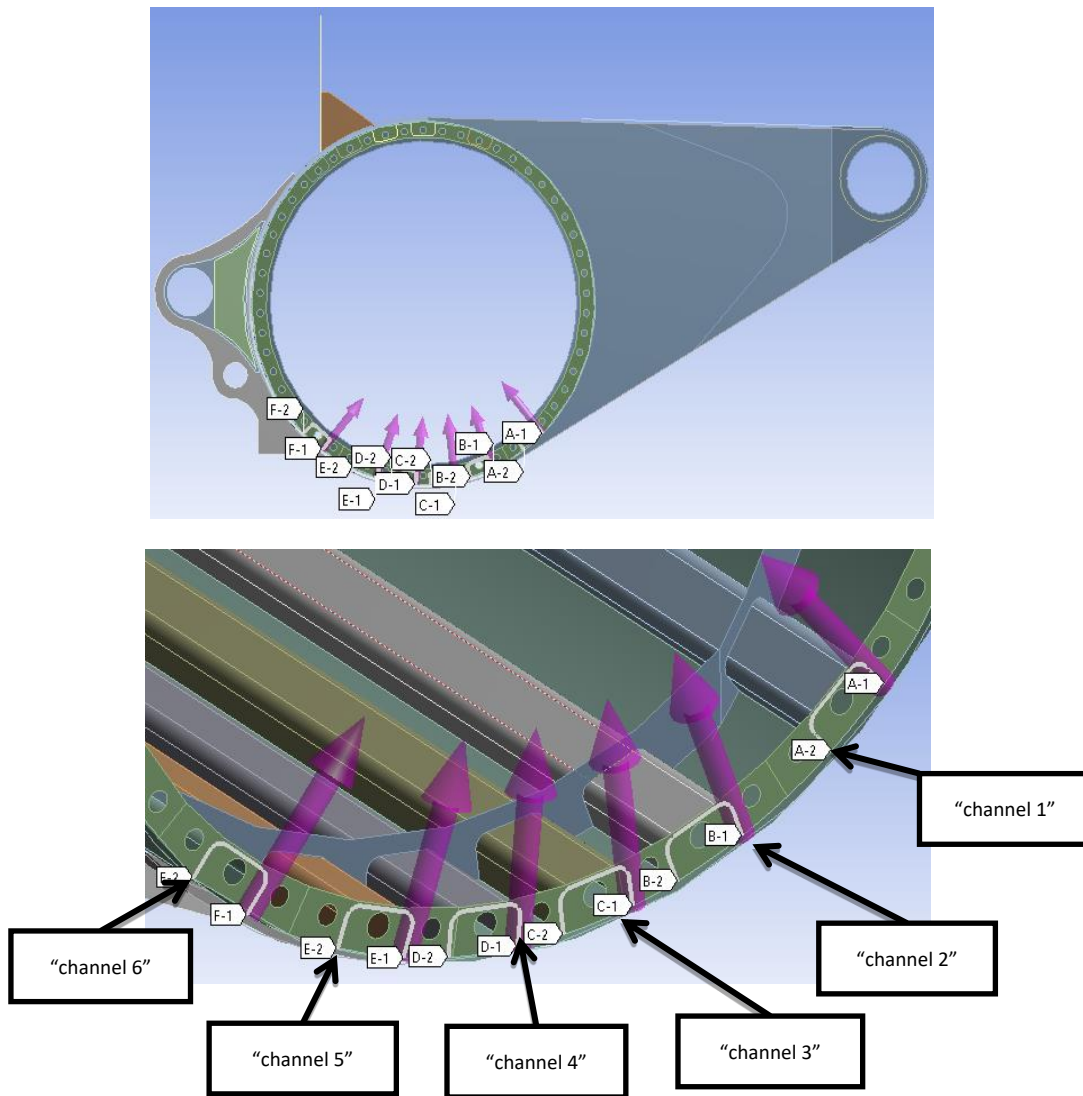


Gráfico R-1.1: “**CHANNEL 1**”. Variación de esfuerzos según condición de barras tensoras -óptima (COMB64) & fracturada (COMB63), para cada condición de carga (LC1-LC7).

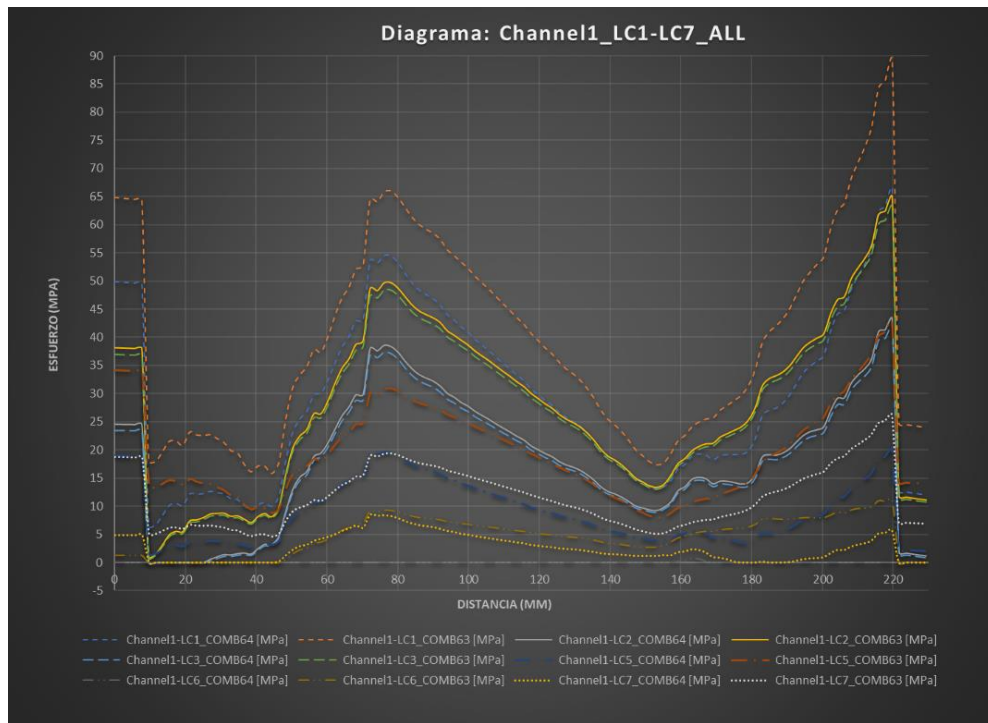


Gráfico R-1.2: “**CHANNEL 2**”. Variación de esfuerzos según condición de barras tensoras -óptima (COMB64) & fracturada (COMB63), para cada condición de carga (LC1-LC7).

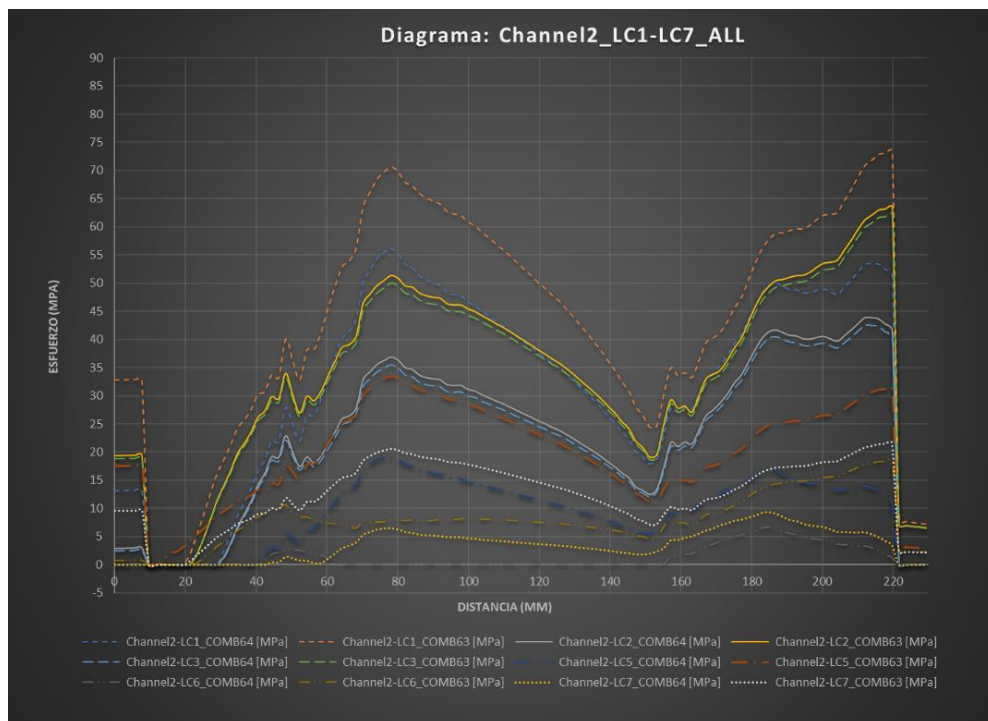


Gráfico R-1.3: “**CHANNEL 3**”. Variación de esfuerzos según condición de barras tensoras -óptima (COMB64) & fracturada (COMB63), para cada condición de carga (LC1-LC7).

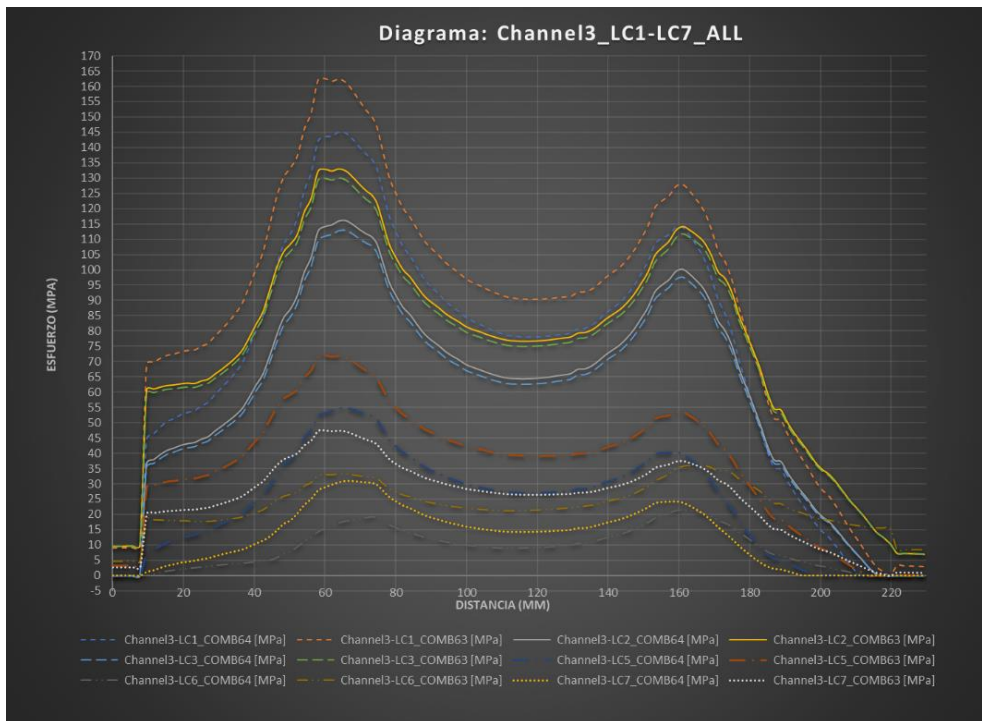


Gráfico R-1.4: “**CHANNEL 4**”. Variación de esfuerzos según condición de barras tensoras -óptima (COMB64) & fracturada (COMB63), para cada condición de carga (LC1-LC7).

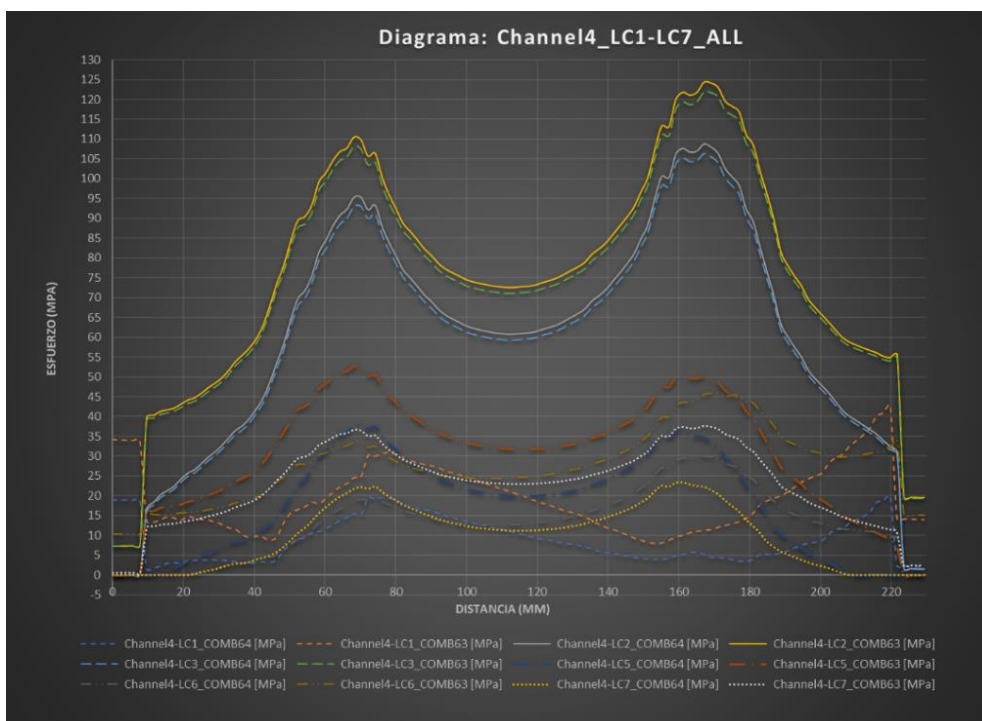


Gráfico R-1.5: “**CHANNEL 5**”. Variación de esfuerzos según condición de barras tensoras -óptima (COMB64) & fracturada (COMB63), para cada condición de carga (LC1-LC7).

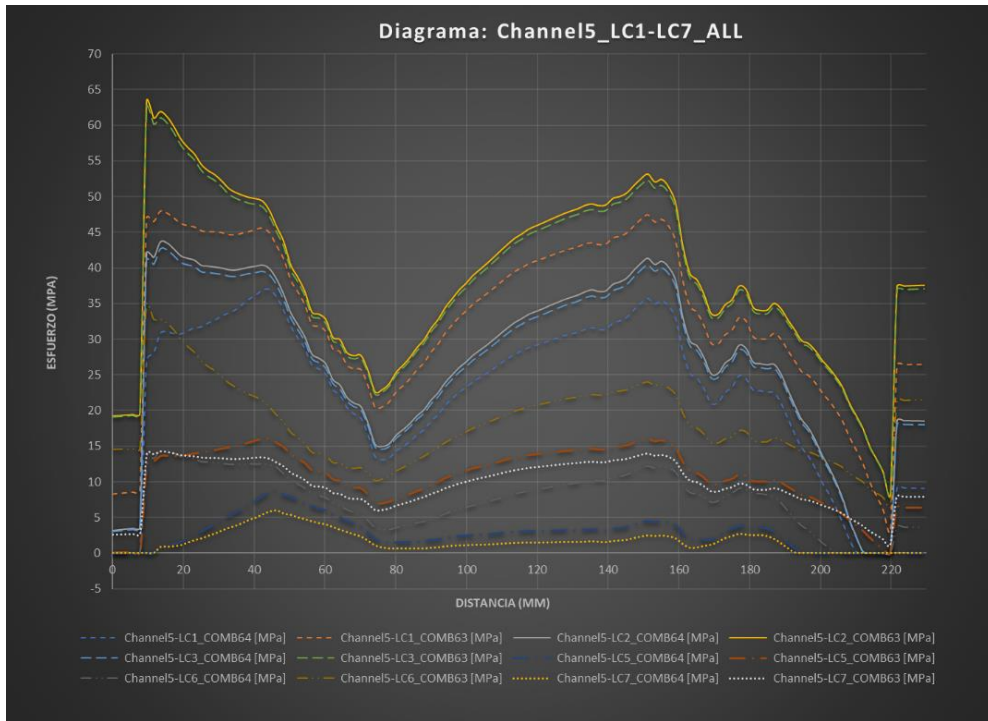


Gráfico R-1.6: “**CHANNEL 6**”. Variación de esfuerzos según condición de barras tensoras -óptima (COMB64) & fracturada (COMB63), para cada condición de carga (LC1-LC7).

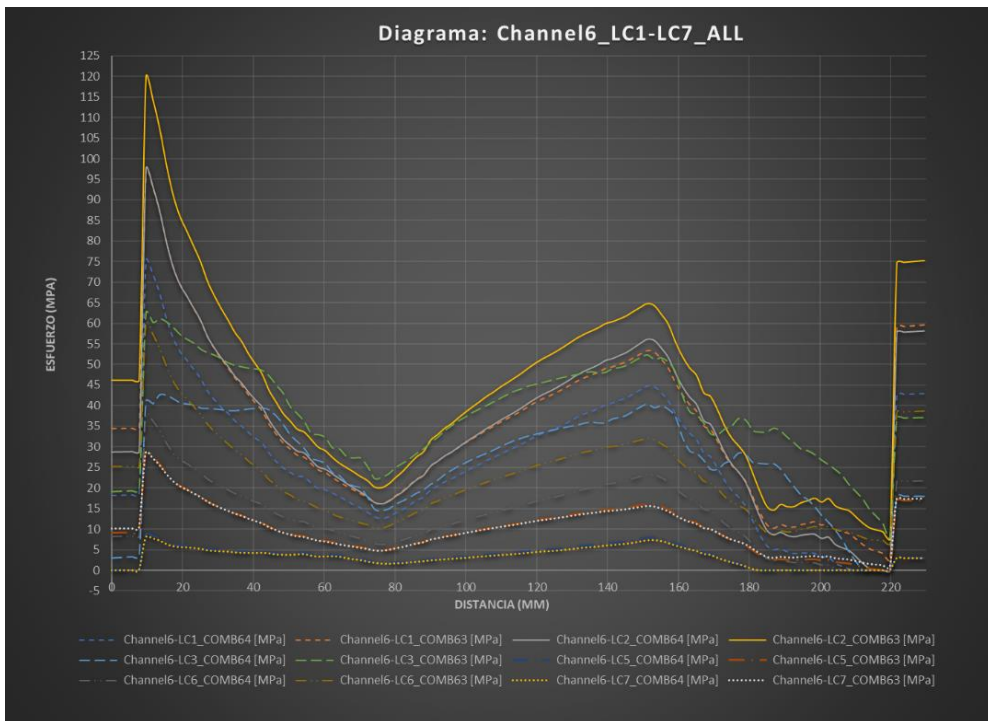


Figura R-2: Zona analizada: SOPORTE BARRA ANTIVUELCO 1.

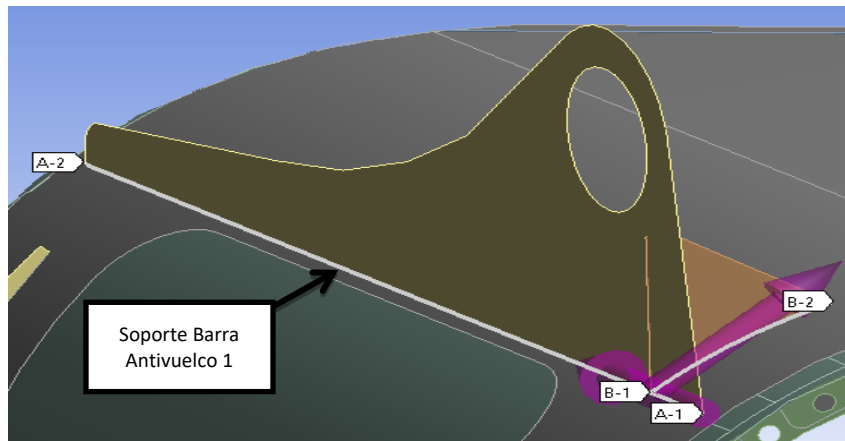


Gráfico R-2.1: **SOPORTE BARRA ANTIVUELCO 1**. Variación de esfuerzos según condición de barras tensoras -óptima (COMB64) & fracturada (COMB63), para cada condición de carga (LC1-LC7).

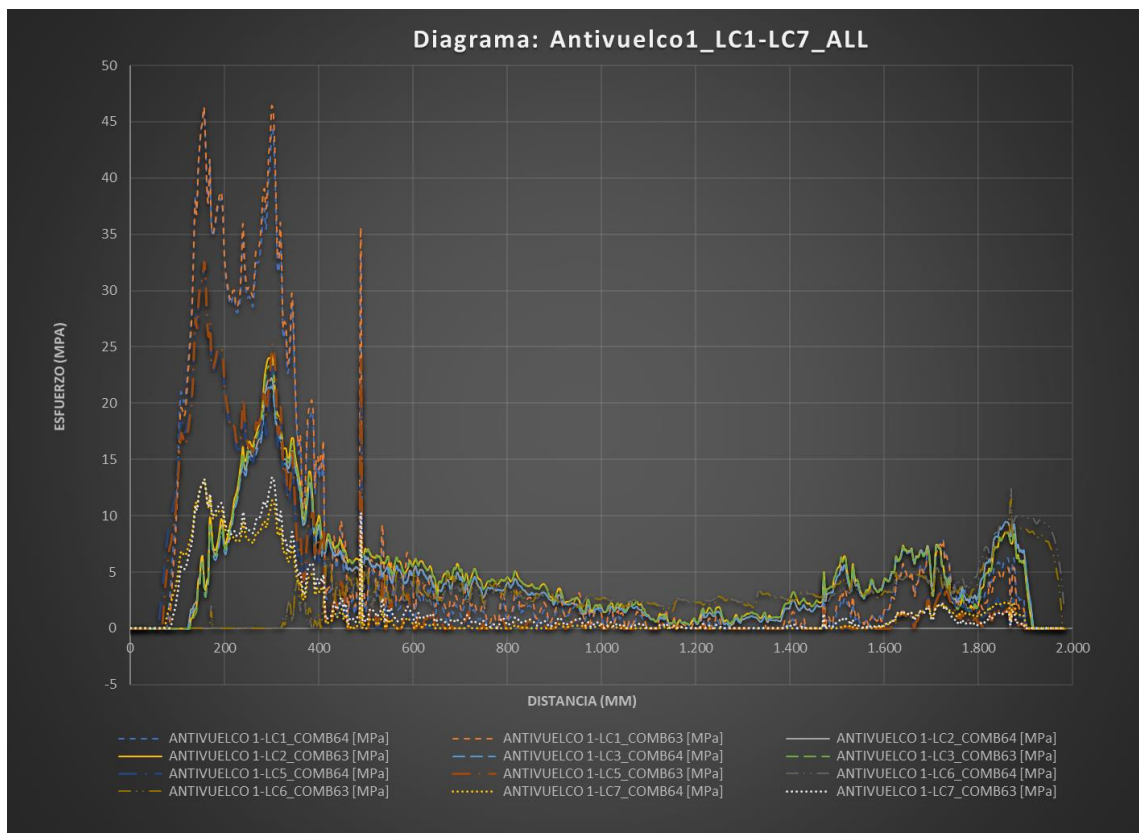


Figura R-3: Zona analizada: SOPORTE BARRA ANTIVUELCO 2.

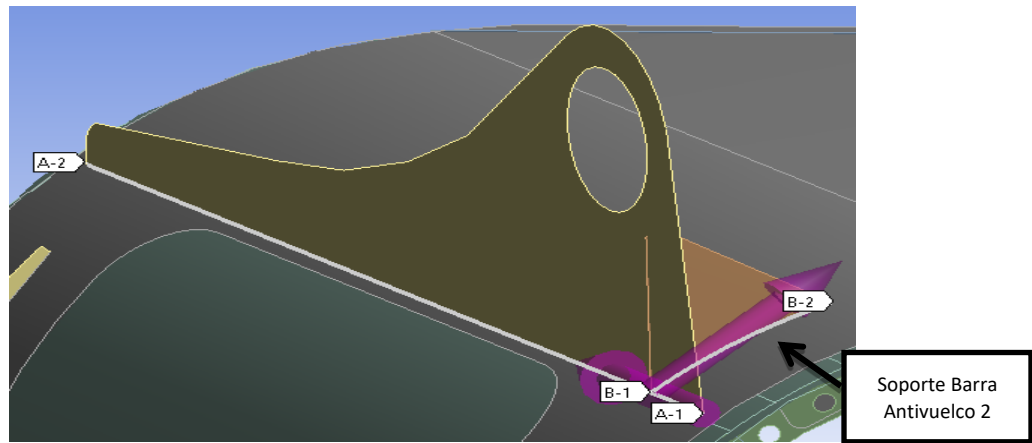


Gráfico R-3.1: **SOPORTE BARRA ANTIVUELCO 2.** Variación de esfuerzos según condición de barras tensoras -óptima (COMB64) & fracturada (COMB63), para cada condición de carga (LC1-LC7).

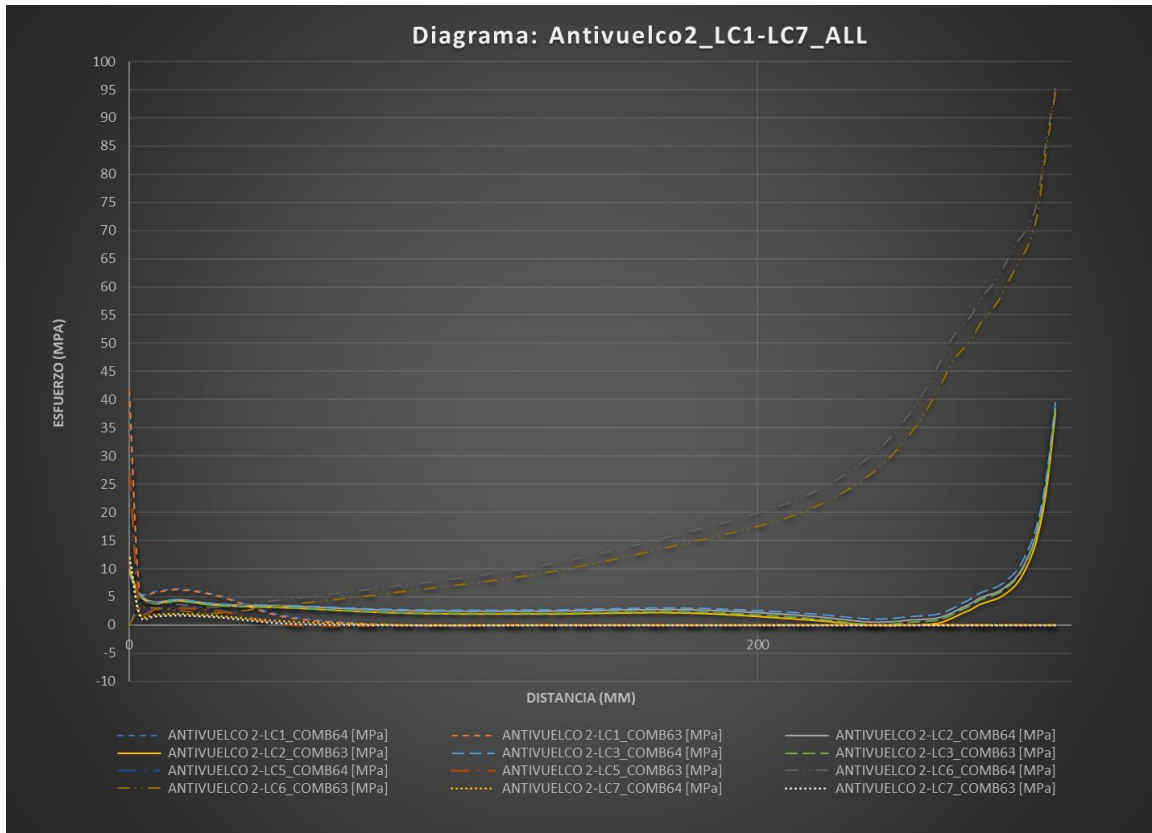


Figura R-4: Zona analizada: SOPORTE AMORTIGUADOR.

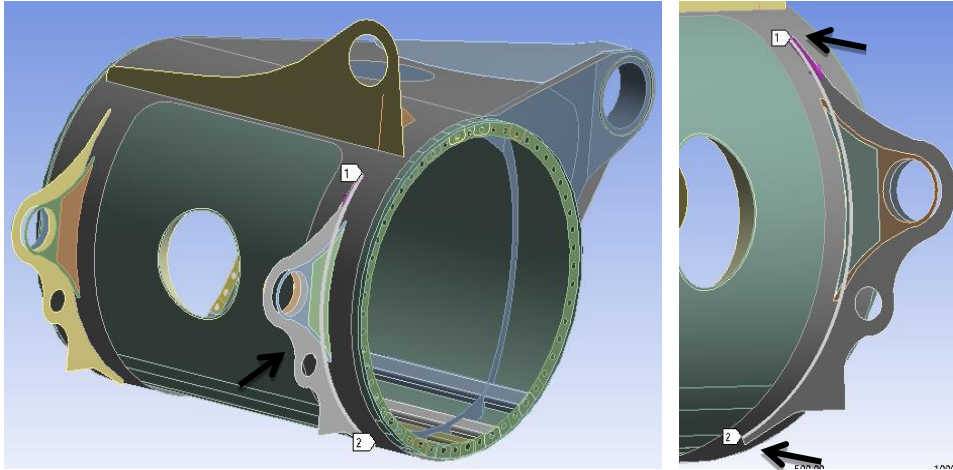


Gráfico R-4.1: **SOPORTE AMORTIGUADOR**. Variación de esfuerzos según condición de barras tensoras -óptima (COMB64) & fracturada (COMB63), para cada condición de carga (LC1-LC7).

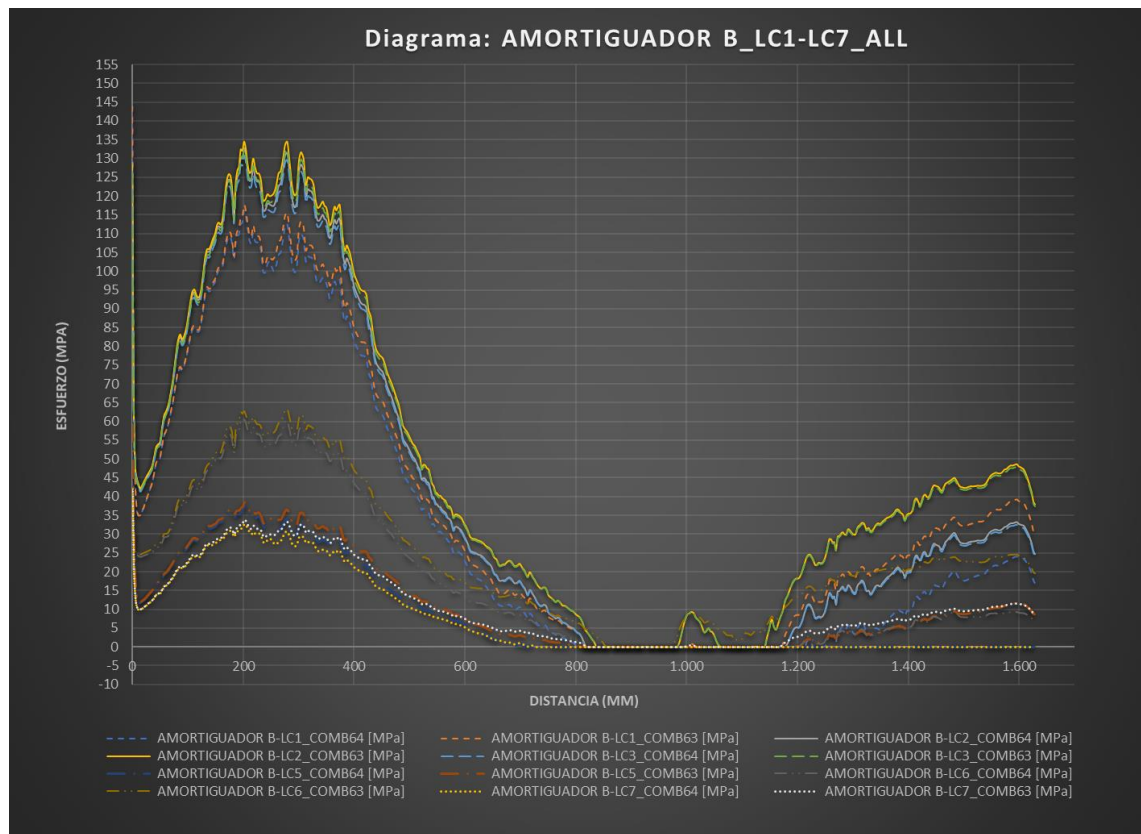


Figura R-5: Zona analizada: CILINDRO INTERNO.

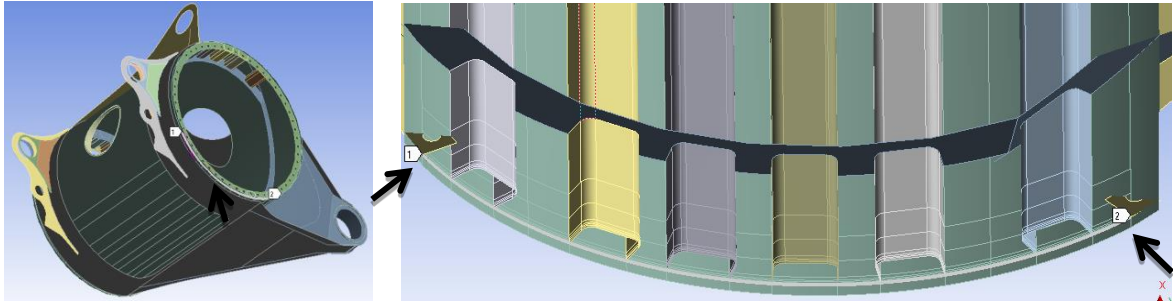


Gráfico R-5.1: **CILINDRO INTERNO**. Variación de esfuerzos según condición de barras tensoras -óptima (COMB64) & fracturada (COMB63), para cada condición de carga (LC1-LC7).

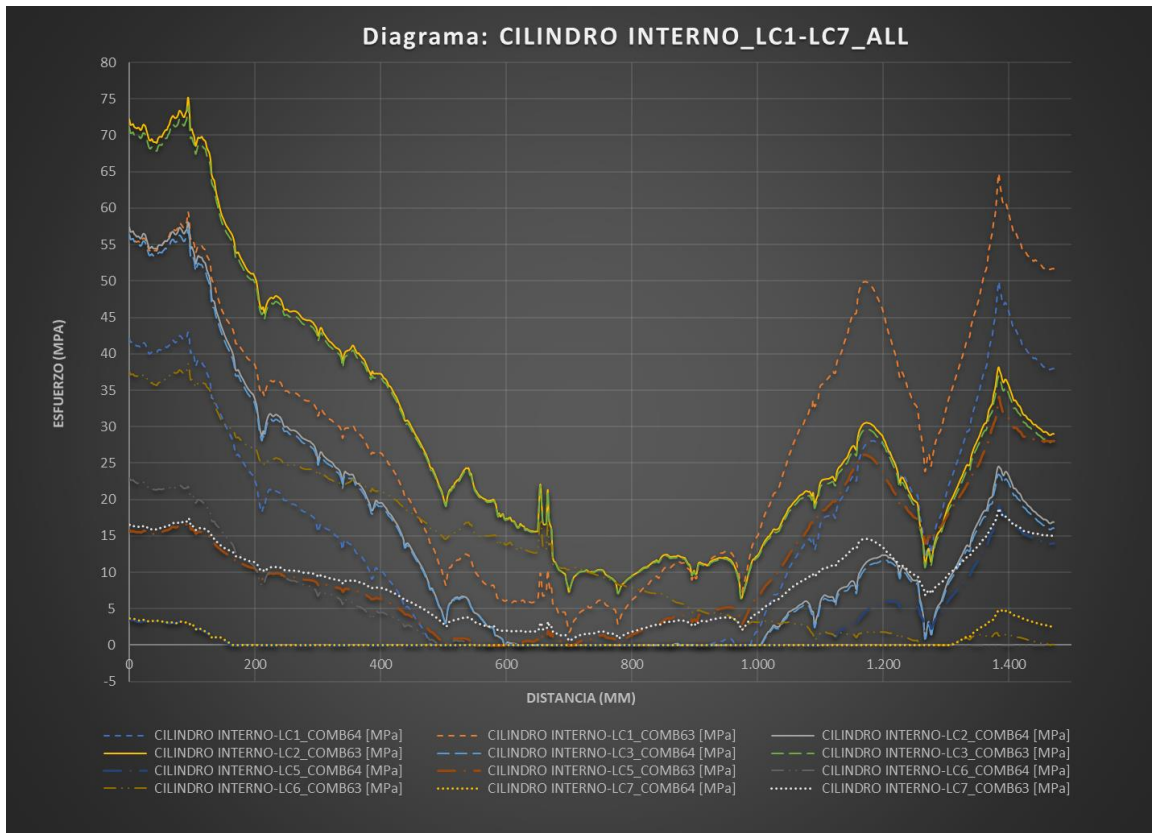


Figura R-6: Zona analizada: CILINDRO EXTERNO.

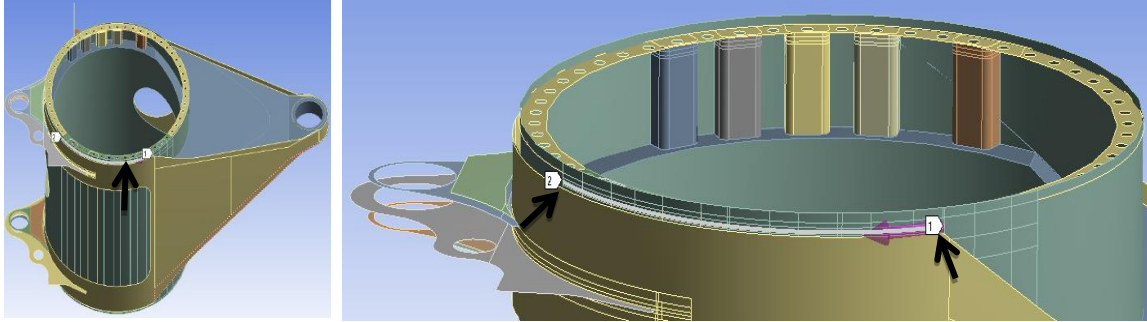
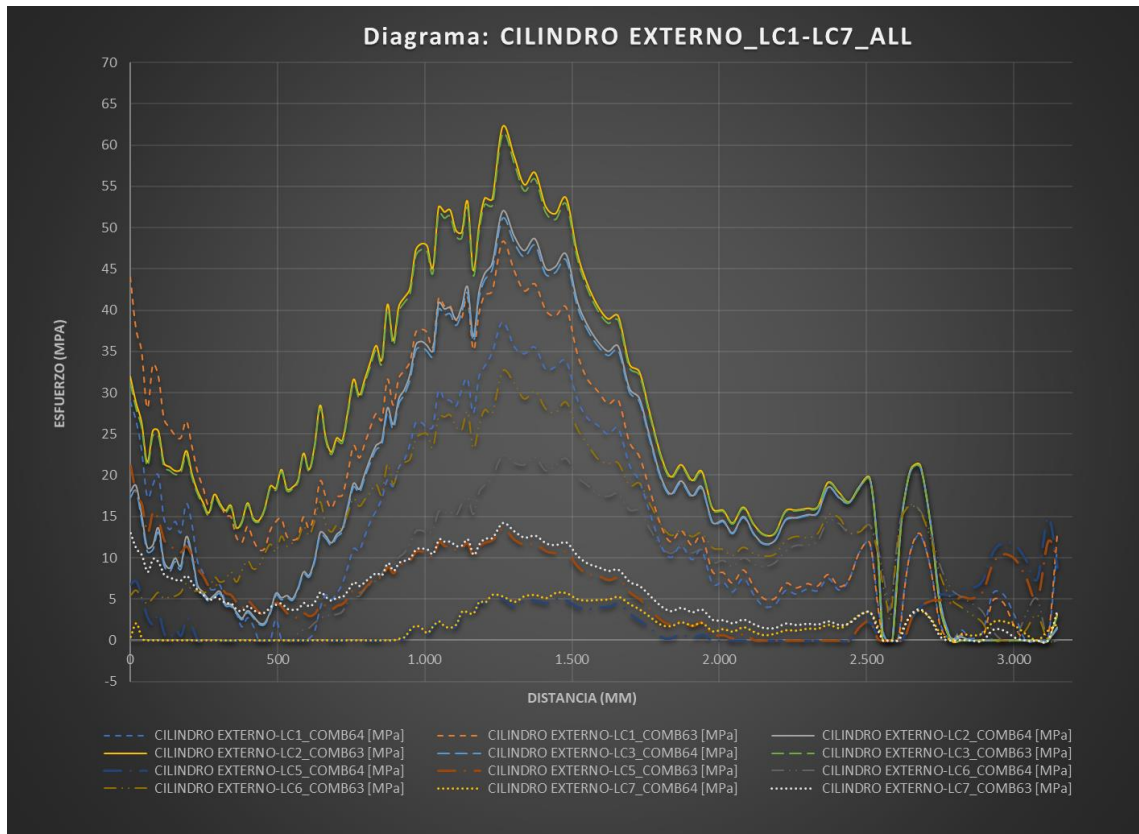


Gráfico R-6.1: **CILINDRO EXTERNO**. Variación de esfuerzos según condición de barras tensoras -óptima (COMB64) & fracturada (COMB63), para cada condición de carga (LC1-LC7).



Anexo S: Clasificación general de detalles BS 7608:2014

Fotografía S-1: *Clasificación de detalles*; Recuperado de “BS 7608:2014” (p. 13); por “The British Standards Institution, 2014, BSI Standards Limited”.

Classification of details

Table 1 to Table 10 correspond to the following basic types of details:

- plain material (Table 1);
- bolted or riveted connections (Table 2);
- continuous longitudinal butt welds and welded attachments (Table 3);
- other welded attachments (Table 4);
- transverse butt welds in plates (Table 5);
- transverse butt welds in sections, tubes and pipes (Table 6);
- load-carrying fillet and T-butt joints (Table 7);
- slotted connections and penetrations through stressed members (Table 8);
- details relating to tubular members (Table 9); and
- branch connections to vessels (Table 10).

Detail classifications are given for assessments based on applied nominal stresses and, where appropriate, hot-spot stresses. Where relevant, the need to apply a correction for thickness and bending (see 16.3.2) and the applicability of a weld toe improvement technique (see 16.3.5) are included. Each classified detail is illustrated and given a type number. Table 1 to Table 10 also give associated criteria and diagrams that illustrate the geometrical features and potential crack locations for the direction of loading shown which determine the class of each detail. They should be used to assist with initial selection of the appropriate type number.

A detail should only be designated a particular classification if it conforms to all criteria in Table 1 to Table 10 appropriate to its type number or if a suitable classification can be justified on the basis of relevant published fatigue data or the results of specific fatigue tests in accordance with Annex E. Class A is generally inappropriate for structural work and therefore no design data are provided. The practical difficulty of achieving the special inspection standards relevant to classes B and C might limit the feasibility of adopting these classifications in structural work.

Tabla S-1: Uniones soldadas en esquina o superficie de un miembro esforzado; Recuperado de "BS 7608:2014" (Tabla 4, p. 18); por "The British Standards Institution, 2014, BSI Standards Limited".

Table 4 Classification of details: welded attachments on the surface or edge of a stressed member ^{A)}


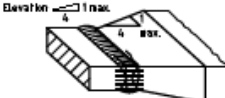


Type no.	Product form	Location of potential crack initiation	Detail	Manufacturing requirements	Special treatments or requirements	Design stress area	Class		Thickness and bending correction (see 16.3.2)	Notes	Sketch
							Nominal stress	Hot-spot stress			
4.1	Rolled steel plates, sections, tubes, and built-up members	At weld toe	Fillet welded shear connector. Stud diameter or bracket thickness ≤ 15 mm. For larger values treat as type 4.3 equating diameter or thickness to l .		Weld toe improvement techniques applicable but whole toe should be treated	Minimum transverse cross section of member at location of potential crack initiation	E	D	Applicable assuming $b = 0.25$		
4.2		At weld toe or end	Small transverse or longitudinal (in direction of S_x) attachment with thickness W (transverse to S_x) or length (parallel to S_x) $l \leq 15$ mm	Fillet or butt welds with welds continued around ends or not. Care needed to avoid undercutting plate edge if weld ends at or close to plate edge. Any such undercutting should be ground out.	Weld toe improvement techniques applicable but only if weld continued around ends in the case of longitudinal attachments. Weld toe improvement might lead to fatigue failure from weld root but the stated benefit still applies.		E	D	Applicable assuming $b = 0.25$	Butt welded joints require an additional reinforcing fillet so as to provide a toe profile transverse to S_x similar to that which would exist in a fillet welded joint (see B.4.2.2)	
4.3		At weld toe or end	Transverse or longitudinal attachment with thickness W (transverse to S_x) or length (parallel to S_x) $15 < l$ or $W \leq 150$ mm				F	D			
4.4		At weld toe or end	Long, narrow attachment with $l \geq 150$ mm, $W \leq 50$ mm				F2	D			
4.5		At weld toe or end	Long, wide attachment with $l > 150$ mm $W > 50$ mm $t_c \leq 32$ mm				G	D	Applicable assuming $t_{c,pl} =$ main plate thickness and $b = 0.25$	The nominal stress classification may be deemed to include stress concentrations arising from normal eccentricities in the thickness direction.	
4.6			$l > 150$ mm $W > 50$ mm $t_c > 32$ mm				G2	D			

BS 7608:2014

BRITISH STANDARD

Tabla S-2: Soldaduras a tope en láminas co-planares de penetración completa; Recuperado de "BS 7608:2014" (Tabla 5, p. 20); por "The British Standards Institution, 2014, BSI Standards Limited".

Table 5 Classification of details: full penetration butt welds between co-planar plates ^{A)}

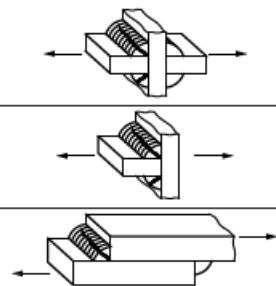
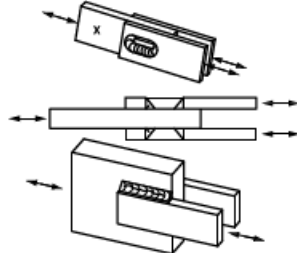
Type no.	Product form	Location of potential crack initiation	Detail	Manufacturing requirements	Special treatments or requirements	Design stress area	Class		Thickness and bending correction (see 16.3.2)	Notes	Sketch
							Nominal stress	Hot-spot stress			
5.1	Rolled steel plates only	Weld surface or embedded flaw	Transverse butt weld between plates of equal width and thickness Longitudinal axes in line	Full penetration weld. Misalignment slope ≤ 1 in 4. Weld reinforcement dressed flush with all traces of the original weld toe removed.	Proved free of all flaws which are likely to degrade the joint below its stated classification (see 14.3.4)	Minimum transverse cross section of member at location of crack initiation. These classifications do not include allowance for any misalignment of the joint (see 8.5.2.1)	C	Not applicable	Not applicable	In view of view of the difficulty of ensuring freedom from significant flaws (see 14.3.4), this class should not normally be used in structural work (see 8.2.2.1 and 8.5.2.6).	
5.2		At weld toe	Transverse butt welds made from both sides by any arc welding process in any position. Longitudinal axes in line Any width or thickness change ≤ 1 in 4 slope	Full penetration weld. Grind smooth any undercut.	Proved free of all flaws which are likely to degrade the joint below its stated classification (see 14.3.4) Weld toe improvement techniques applicable		D	D	Applicable assuming $b = 0.2$ and $t_{eff} = t$ at weld toe considered		
5.3		At root or toe of weld root bead (Note: classification for weld cap toe same as that for welds made from both sides)	Transverse butt weld made from one side either with temporary non-fusible backing or without backing.	Plate surfaces in contact with temporary backing should be aligned within ± 1 mm to justify Class E. Grind smooth undercut on weld face.	Proved free of all flaws which are likely to degrade the joint below its stated classification especially at the weld root where there should be full weld penetration but freedom from excess penetration and significant undercut (see 14.3.4).		E	E	Applicable assuming $t_{eff} = t$ and $b = 0.2$	Weld root condition assessed by appropriate NDT. Without direct access to root inspection by automated ultrasonic testing (AUT) is recommended (see 8.5.2.4).	
5.4					Weld toe improvement techniques applicable with access to root.		F2	F2		Weld root condition not assessed directly by NDT	

BS 7608:2014

BRITISH STANDARD

Tabla S-3: Soldaduras a tope de penetración completa en láminas co-planares; Recuperado de “BS 7608:2014” (Tabla 7, p. 25); por “The British Standards Institution, 2014, BSI Standards Limited”.

Table 7 Classification of details: load carrying fillet and T-butt joints ^{A)} between plates ^{B)}

Type no.	Product form	Location of potential crack initiation	Detail	Manufacturing requirements	Special treatments or requirements	Design stress area	Class		Thickness and bending correction (see 16.3.2)	Notes	Sketch
							Nominal stress	Hot-spot stress			
7.8	Rolled steel plates, sections and built-up members	At weld root	Cruciform, lap or T-joint	Fillet or partial penetration weld made from both sides	Weld toe improvement techniques not applicable	Effective weld throat area (see 15.3) Allowance to be made for any misalignment of cruciform joints exceeding that already allowed for in the classification and for that in a single lap joint (see B.5.2.1)	W1 if $A_{r,w} < 0.3A_{n,w}$ (see 15.3) S_2 if $A_{r,w} \geq 0.3A_{n,w}$ (see 15.3)	Not applicable	Not applicable	This includes joints in which a pulsating load may be carried in bearing, such as the connection of bearing stiffeners to flanges. In such examples the welds should be designed on the assumption that none of the load is carried in bearing.	
7.10		At fillet weld root	Lap joints	Fillet welded		Effective weld throat area (see 15.3)	S_2	-	Not applicable	Refers to fatigue failure by shear across weld throat	

^{A)} Butt welded joints should be made with an additional reinforcing fillet so as to provide a similar toe profile to that which would exist in a fillet welded joint (see B.4.2.2).
^{B)} The classifications apply for stresses acting within $\pm 15^\circ$ of the stressing direction shown. For greater angles see 15.2.

Anexo T: Distribución de esfuerzos en “Cordón horizontal” – Junta “channel”-Brida; Condiciones de carga LC1-LC7

Figura T-1: Ubicación Cordón horizontal en junta “channel”-Brida.

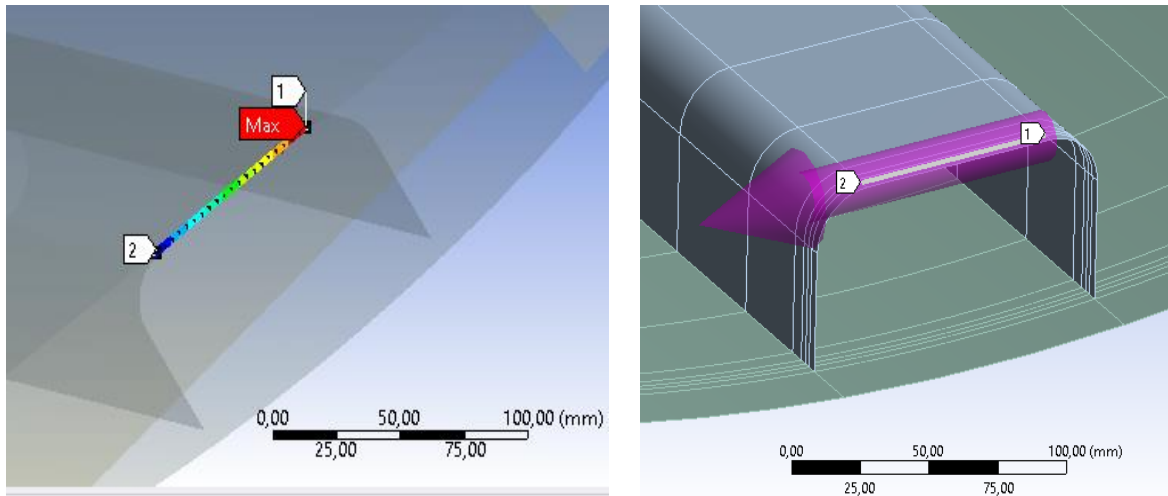


Gráfico T-1.1: Unión horizontal “channel 1” – Brida. Variación de esfuerzos según condición de carga (LC1-LC7).

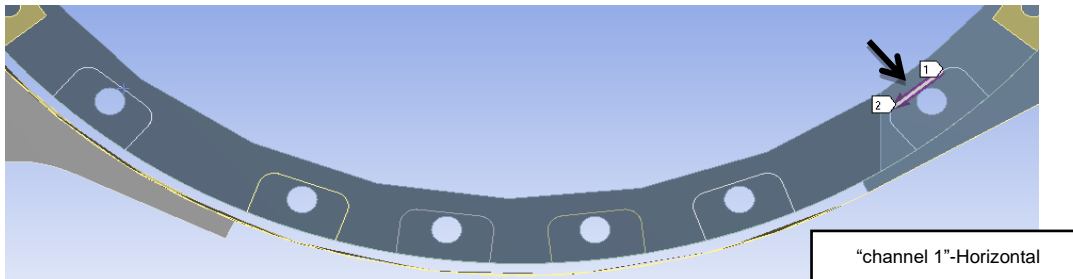
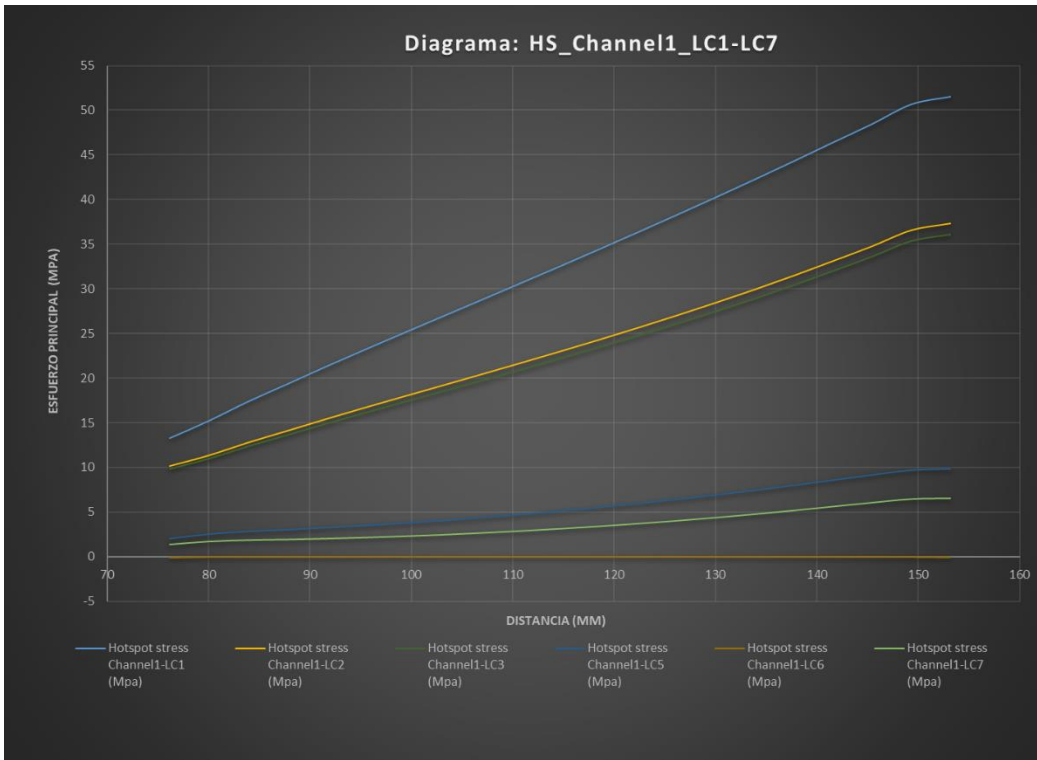


Gráfico T-1.2: Unión horizontal “channel 2” – Brida. Variación de esfuerzos según condición de carga (LC1-LC7).

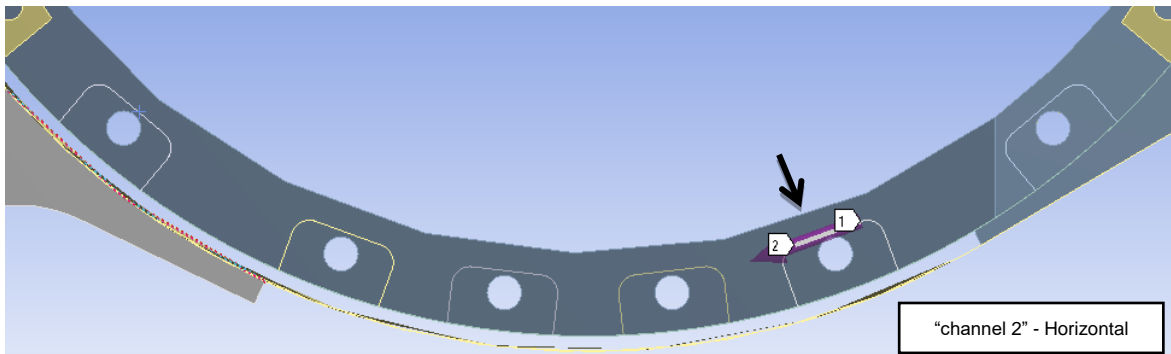
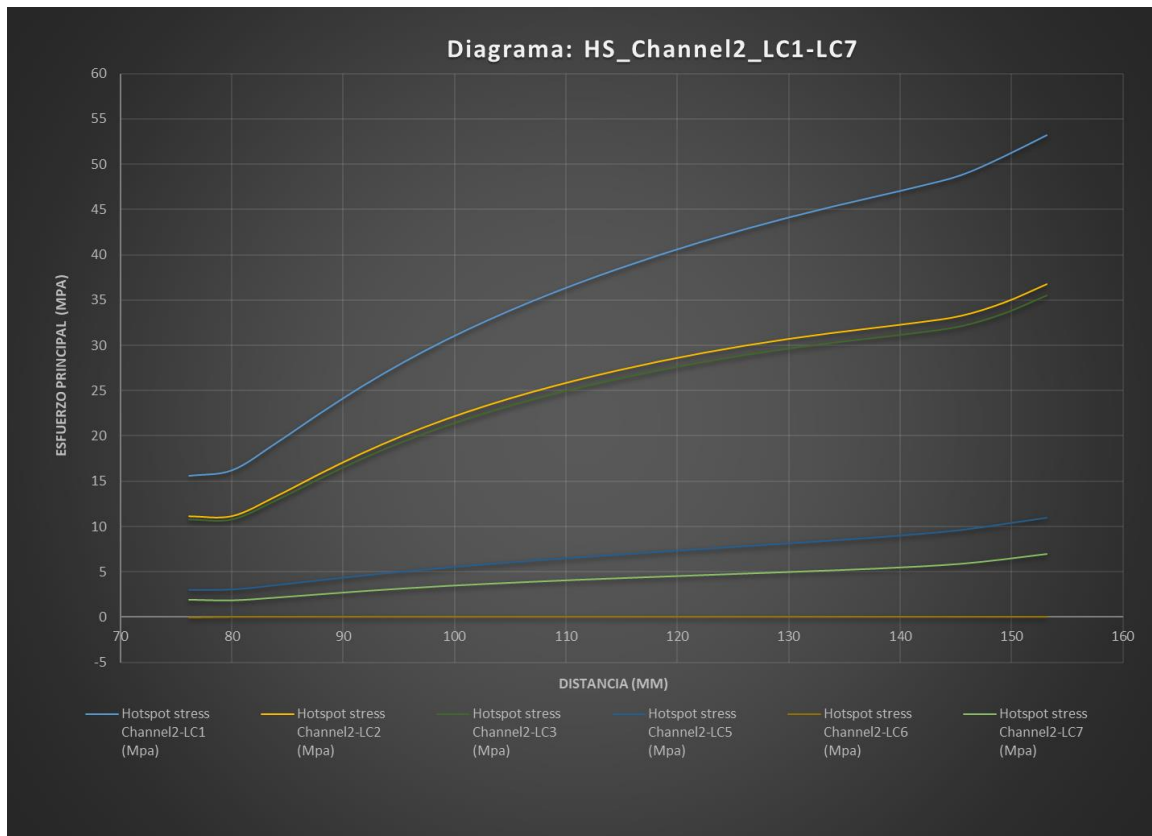


Gráfico T-1.3: Unión horizontal “channel 3” – Brida. Variación de esfuerzos según condición de carga (LC1-LC7).

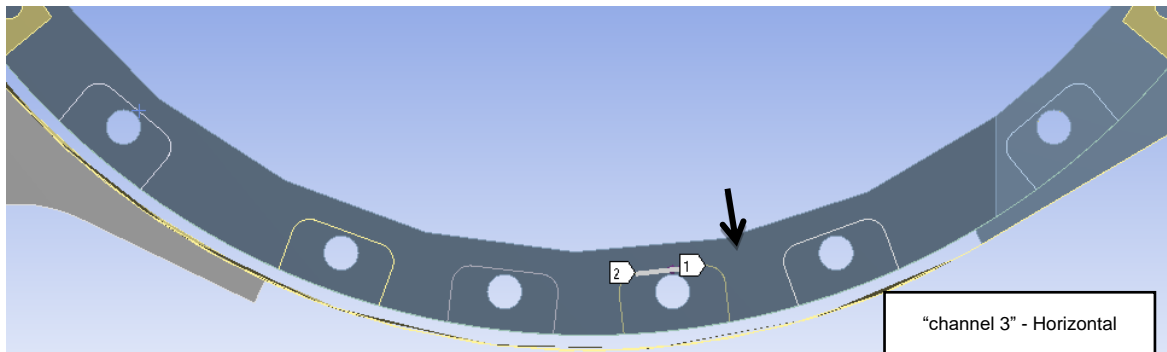
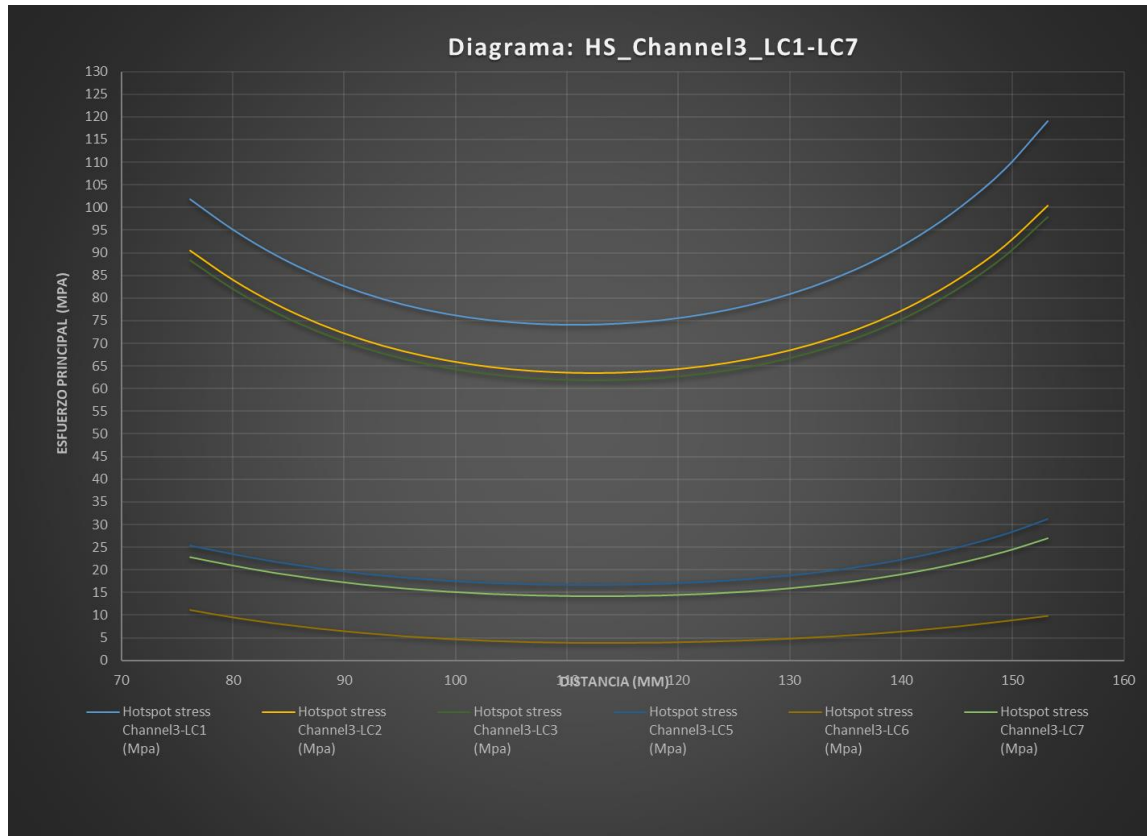


Gráfico T-1.4: Unión horizontal “channel 4” – Brida. Variación de esfuerzos según condición de carga (LC1-LC7).

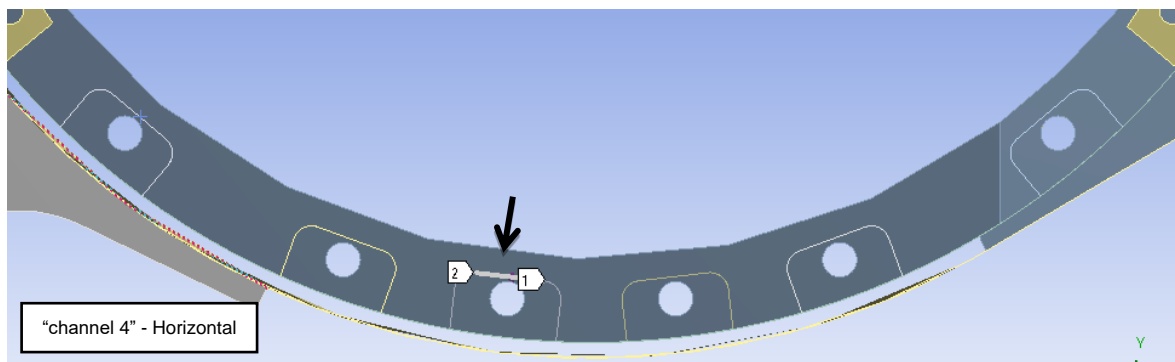
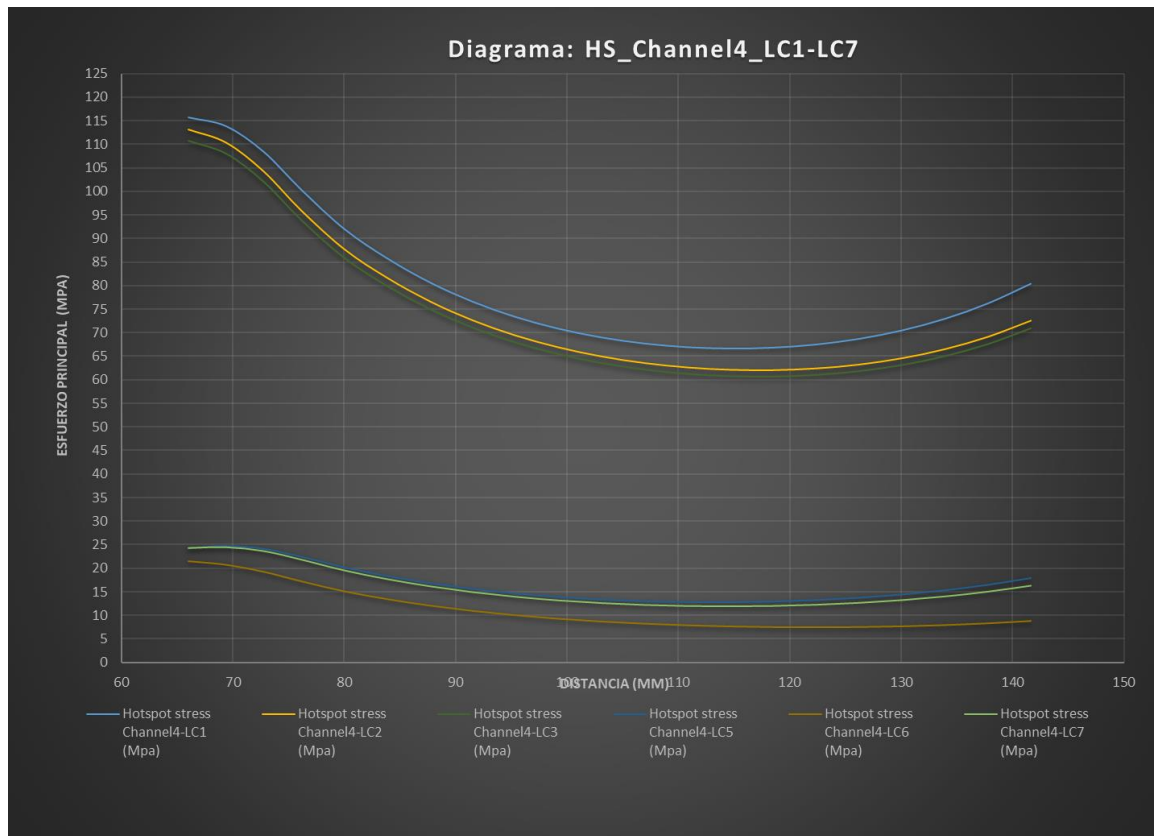


Gráfico T-1.5: Unión horizontal “channel 5” – Brida. Variación de esfuerzos según condición de carga (LC1-LC7).

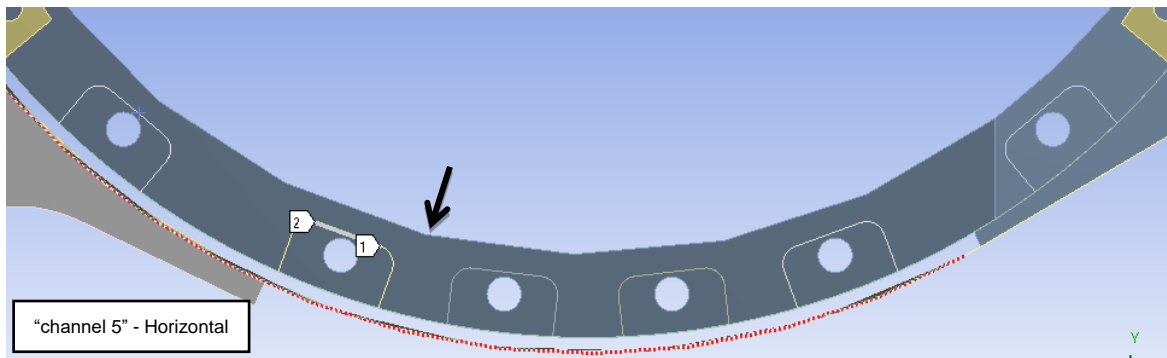
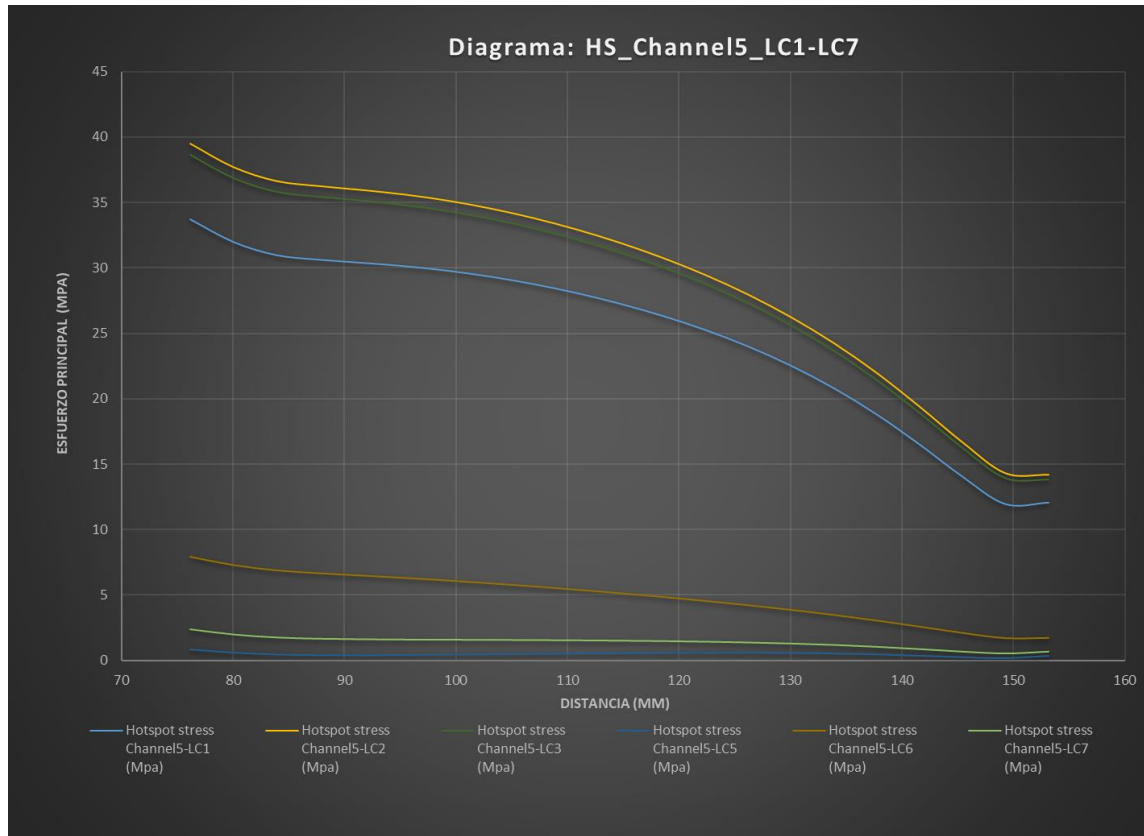
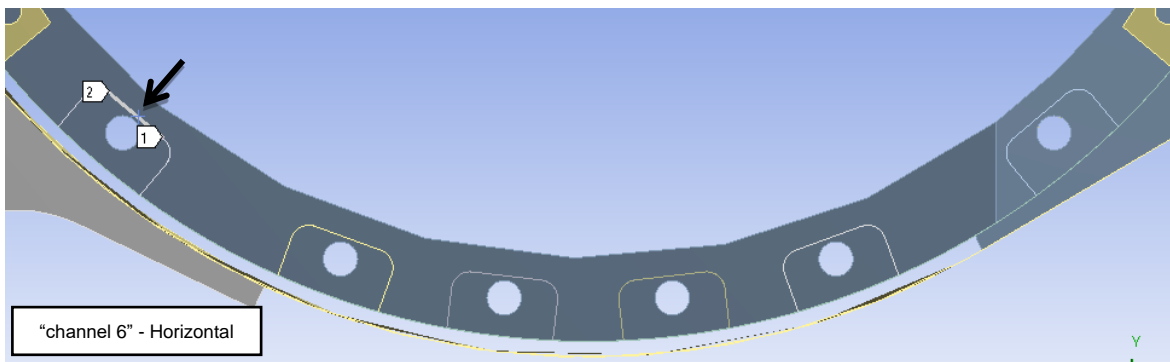
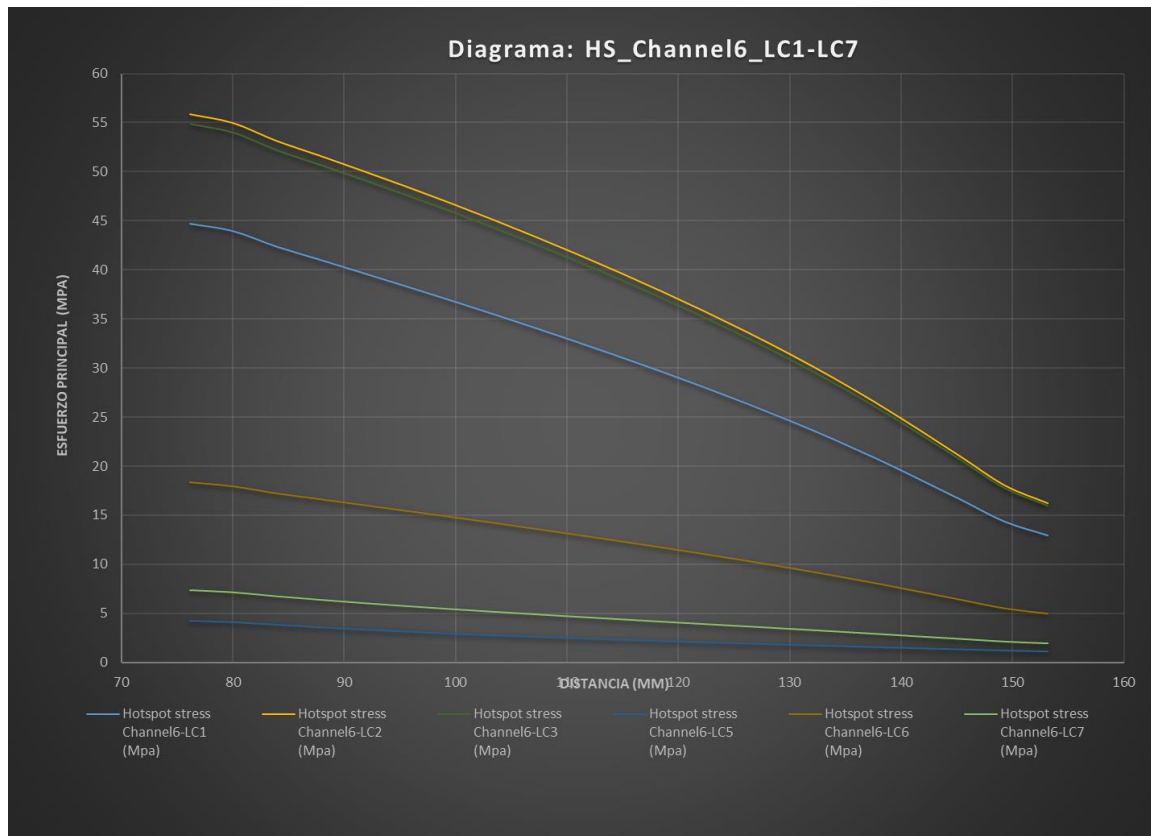


Gráfico T-1.6: Unión horizontal “channel 6” – Brida. Variación de esfuerzos según condición de carga (LC1-LC7).



Anexo U: Distribución de esfuerzos en “Cordón vertical” – Junta “channel”-Brida; Condiciones de carga LC1-LC7

Figura U-1: Cada gráfica representa la unión de dos “paths” verticales *lado derecho* (75mm) y *lado izquierdo* (75mm), para efectos de comparación.

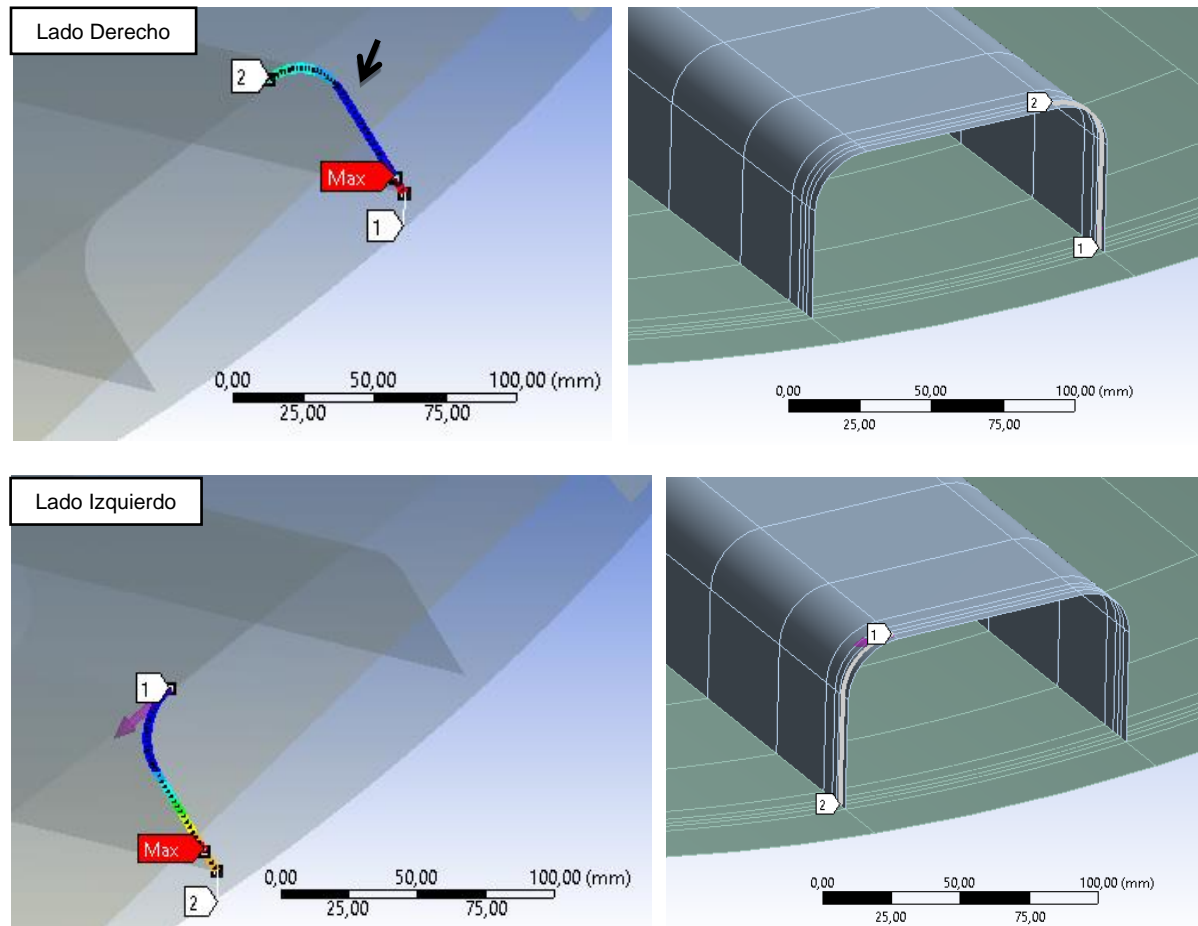


Gráfico U-1.1: Unión vertical “channel 1” – Brida. Variación de esfuerzos, condición de carga (LC1-LC7).

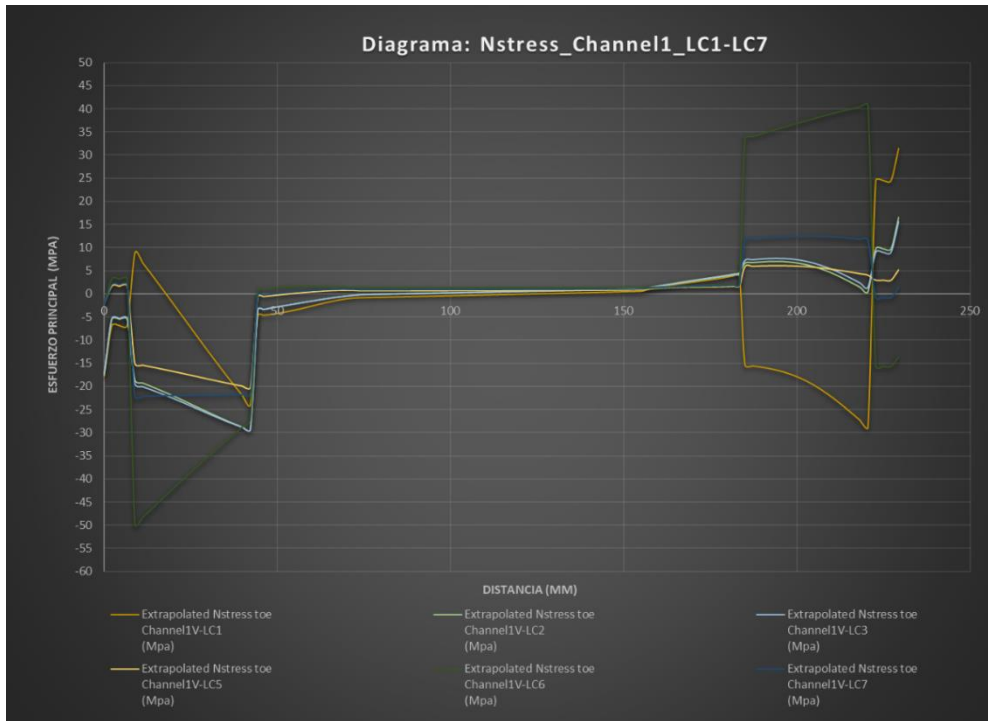


Gráfico U-1.2: Unión vertical “channel 2” – Brida. Variación de esfuerzos, condición de carga (LC1-LC7).

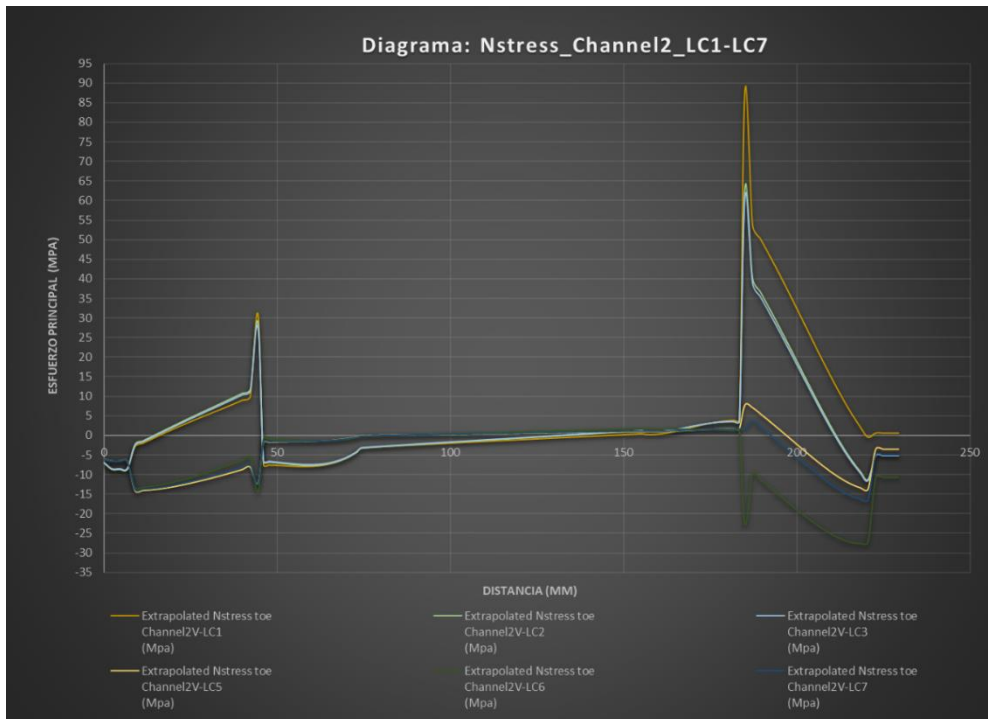


Gráfico U-1.3: Unión vertical “channel 3” – Brida. Variación de esfuerzos, condición de carga (LC1-LC7).

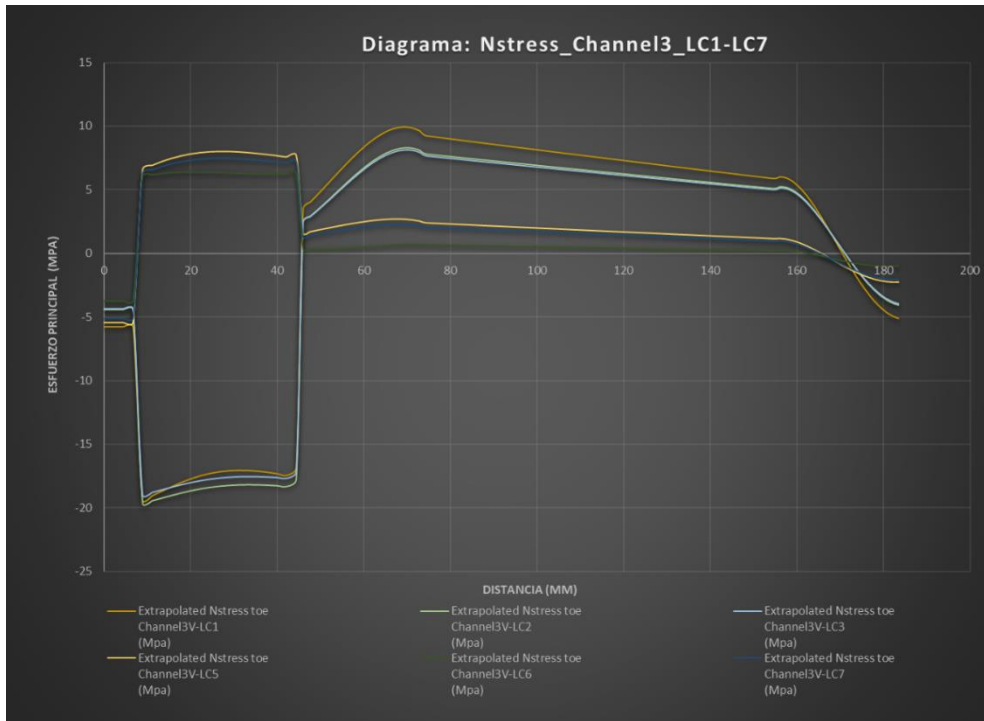


Gráfico U-1.4: Unión vertical “channel 4” – Brida. Variación de esfuerzos, condición de carga (LC1-LC7).

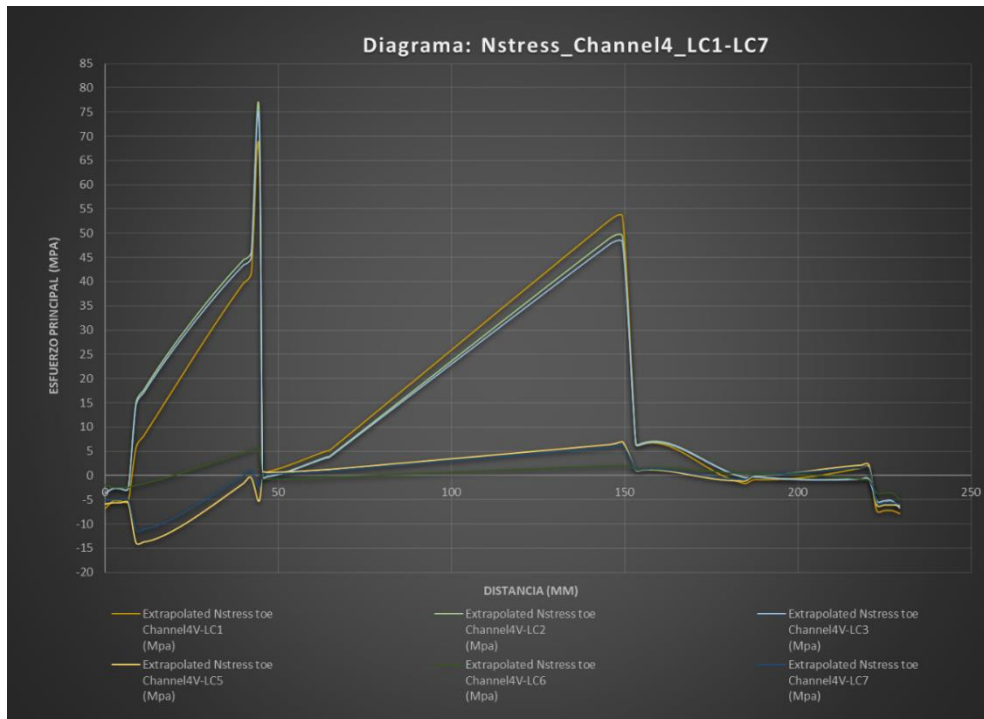


Gráfico U-1.5: Unión vertical “channel 5” – Brida. Variación de esfuerzos, condición de carga (LC1-LC7).

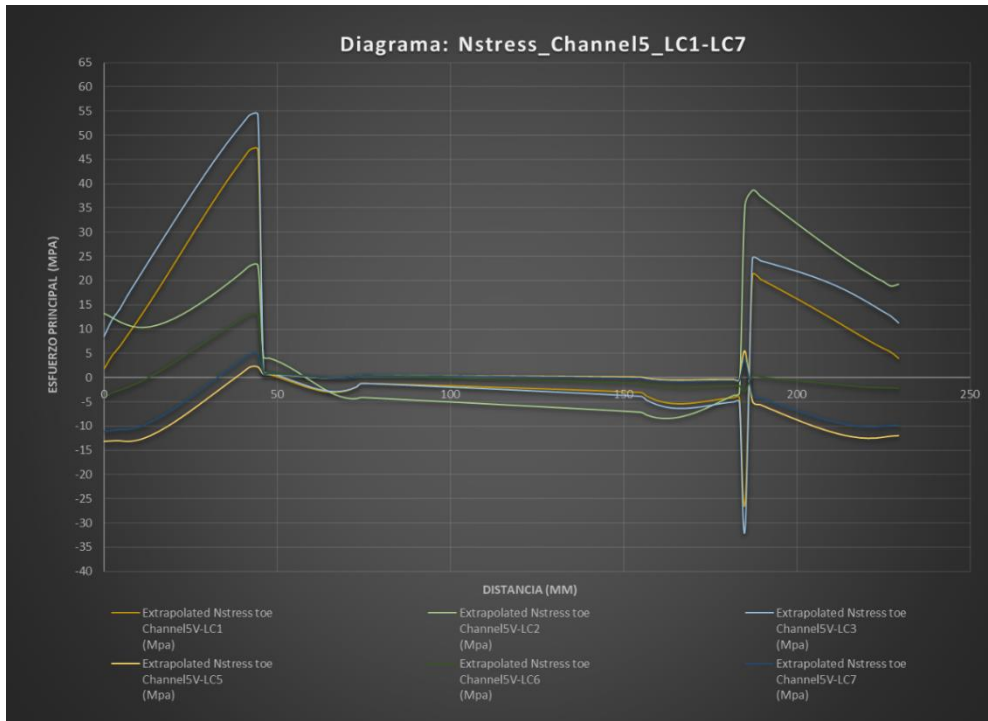
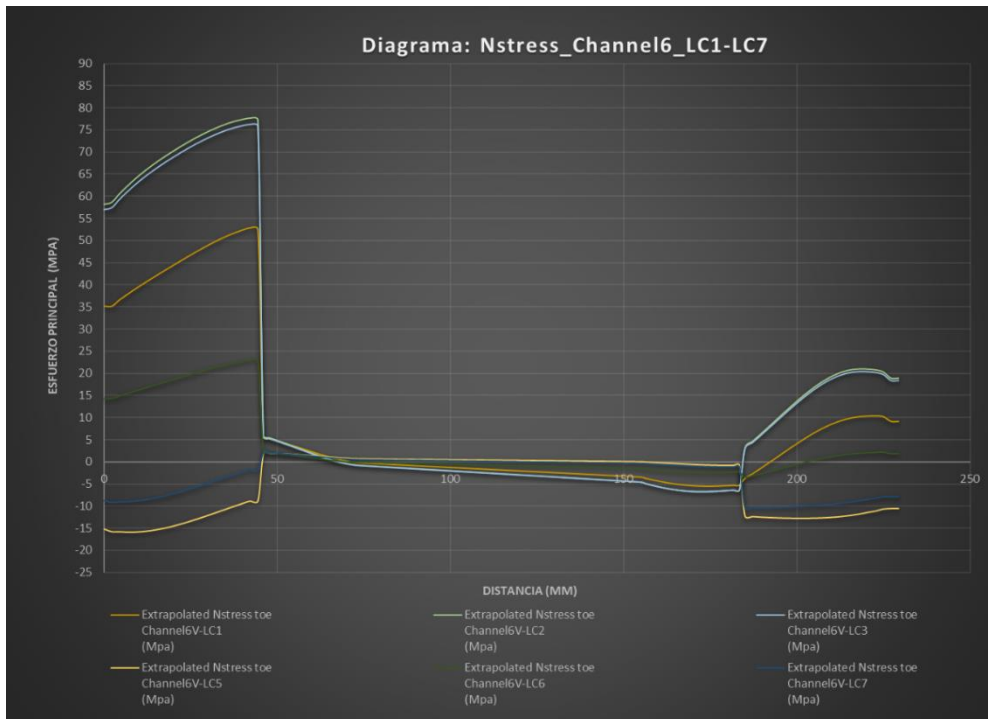


Gráfico U-1.6: Unión vertical “channel 6” – Brida. Variación de esfuerzos, condición de carga (LC1-LC7).



Anexo V: Distribución de esfuerzos en “Cilindro interno”; Condiciones de carga LC1-LC7

Figura V-1: Ubicación de las uniones soldadas *Cilindro interno - Brida*.

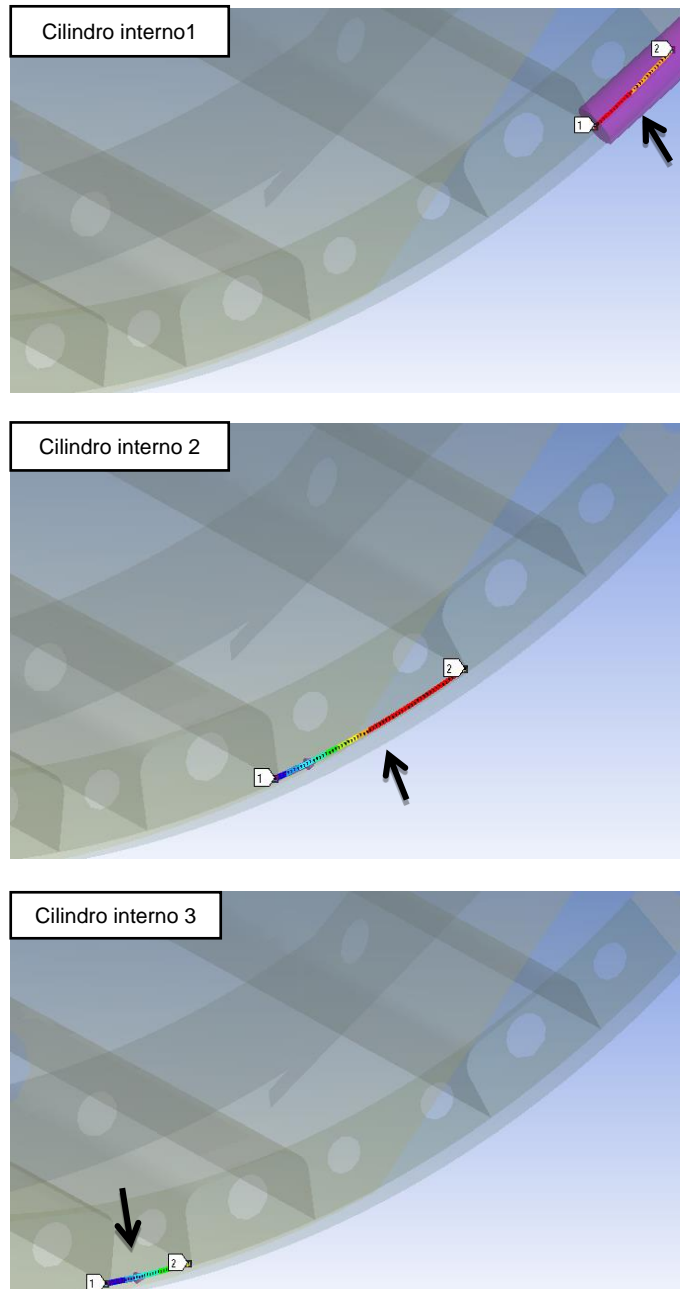


Gráfico V-1.1: Unión Cilindro interno1- Brida. Variación de esfuerzos según condición de carga (LC1-LC7).

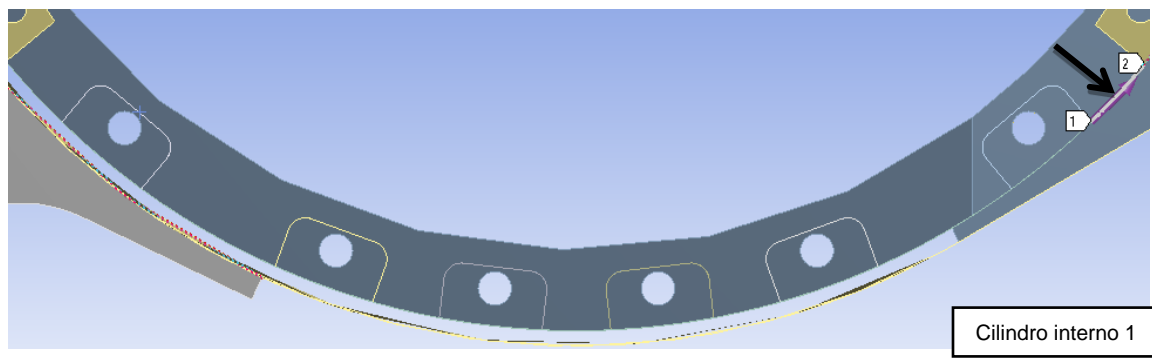
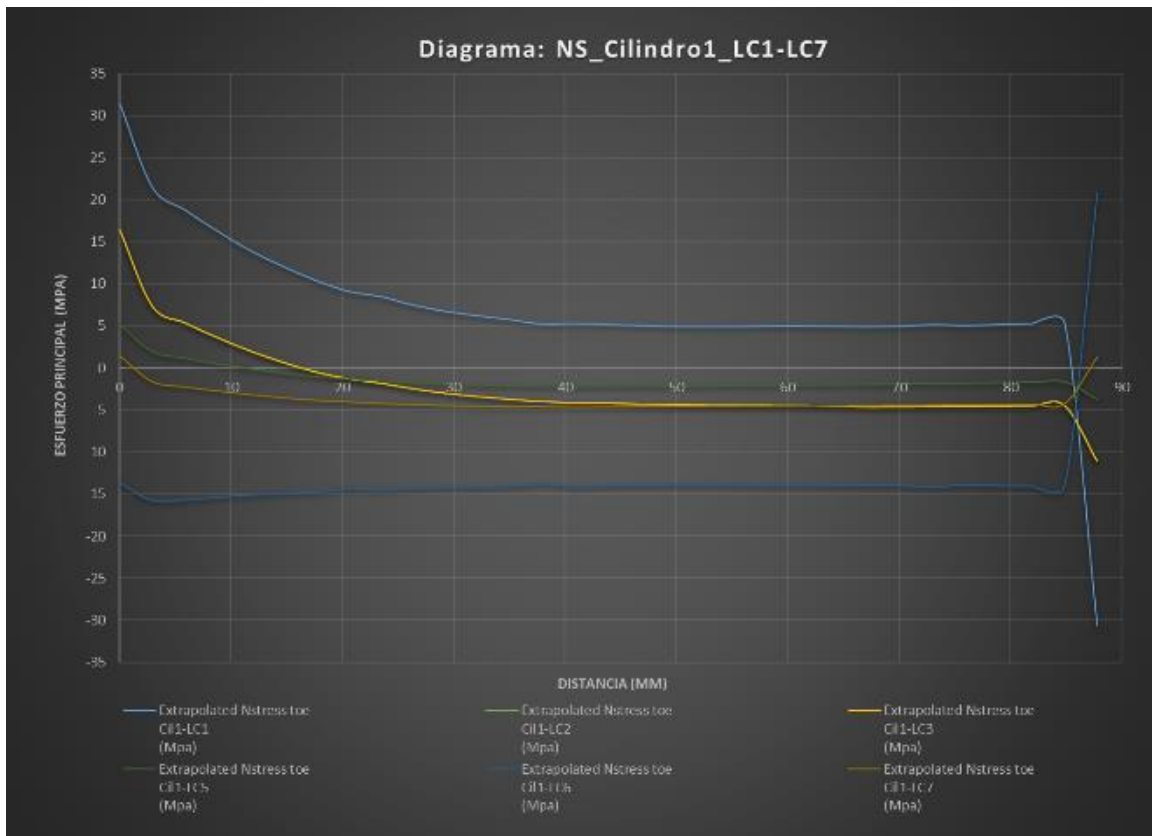


Gráfico V-1.2: Unión Cilindro interno2- Brida. Variación de esfuerzos según condición de carga (LC1-LC7).

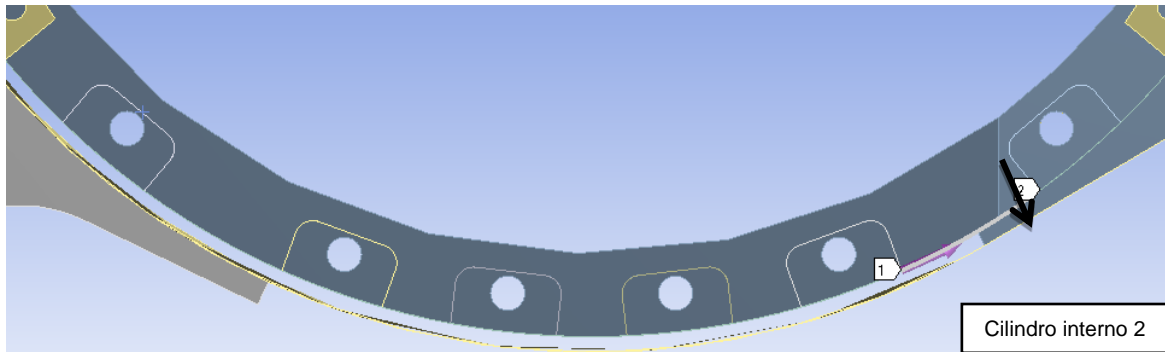
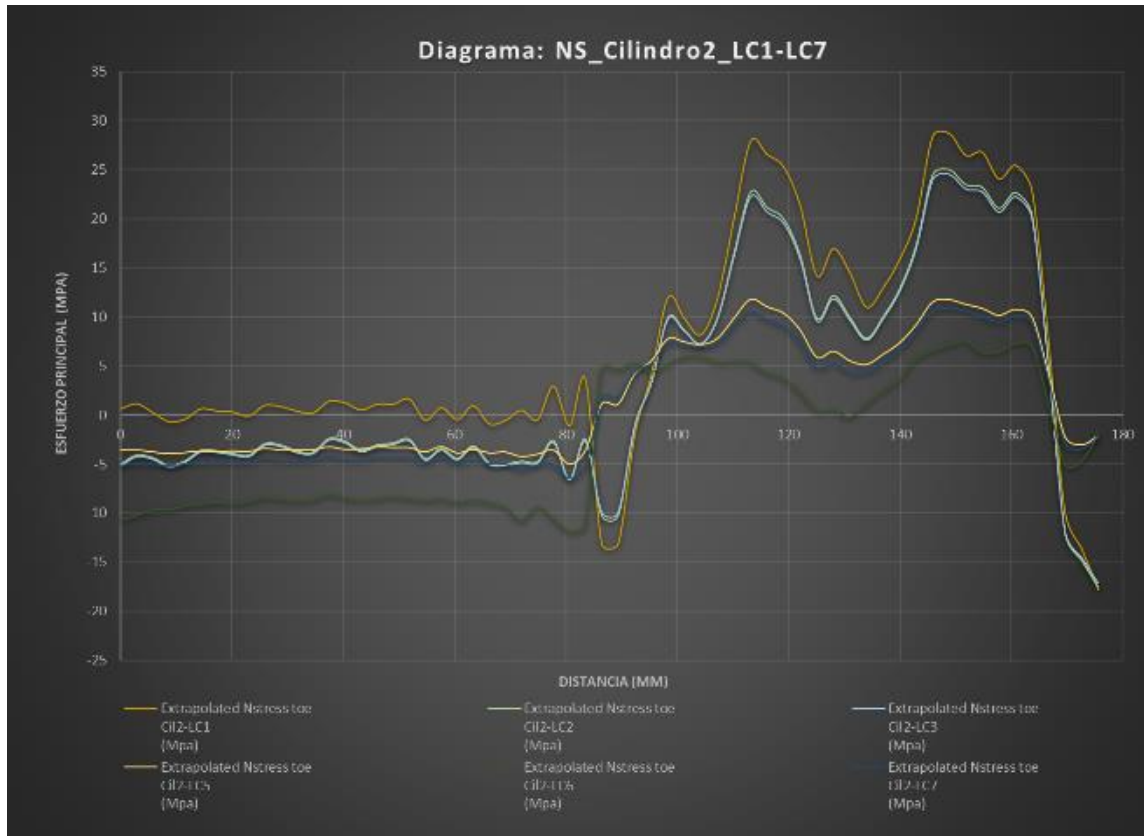


Gráfico V-1.3: Unión Cilindro interno3- Brida: Variación de esfuerzos según condición de carga (LC1-LC7).

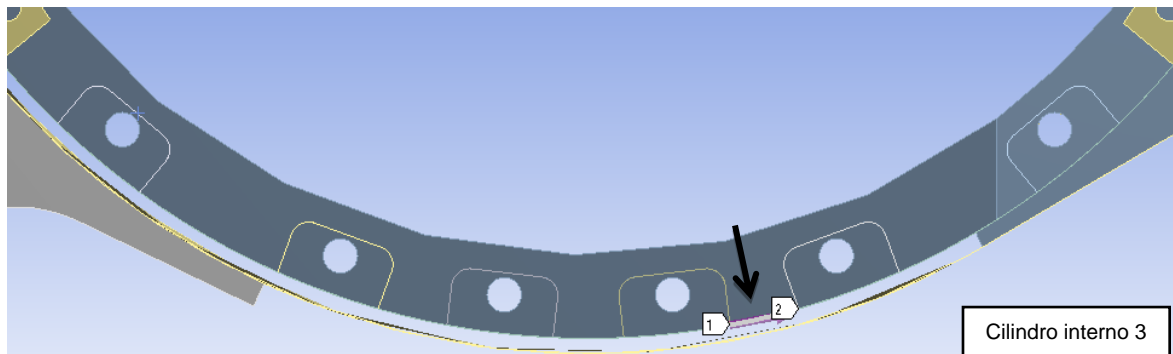
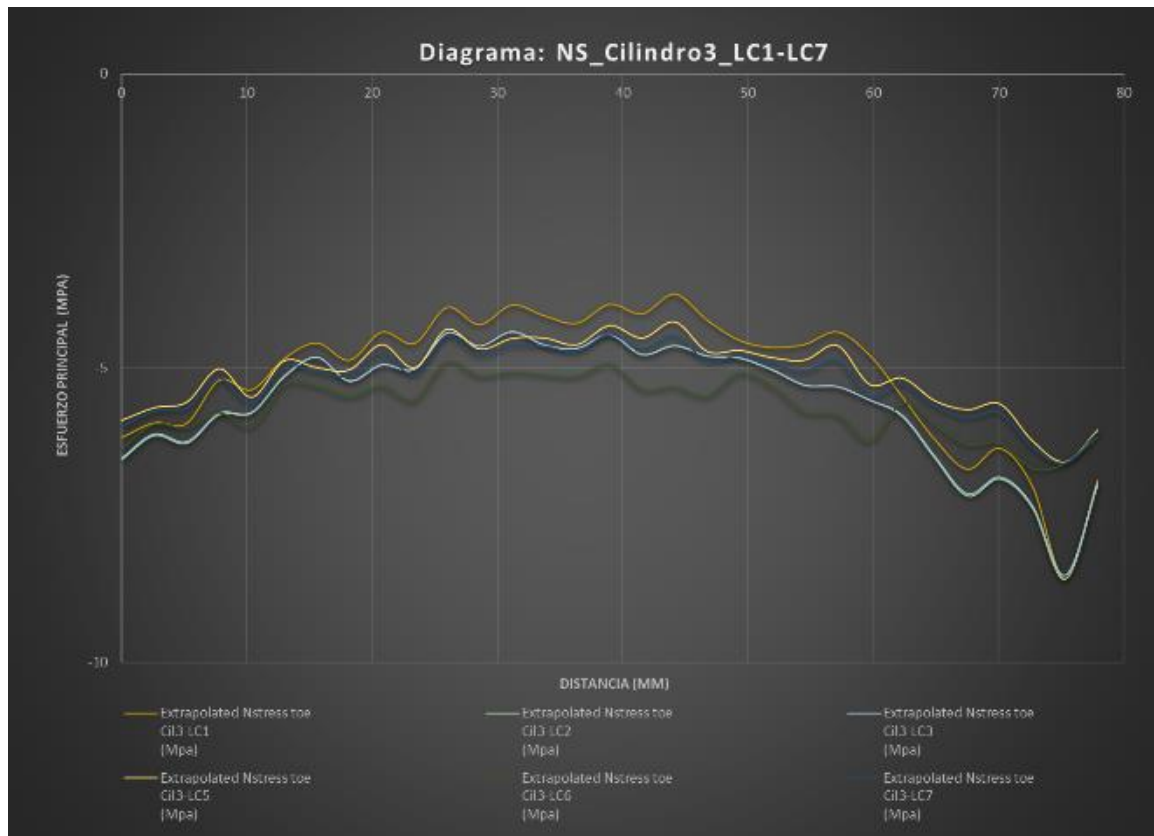


Gráfico V-1.4: Unión Cilindro interno4- Brida: Variación de esfuerzos según condición de carga (LC1-LC7).

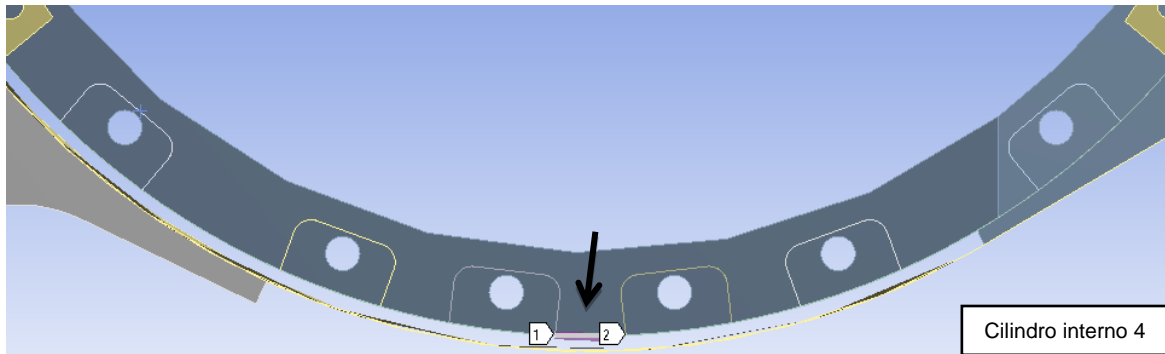
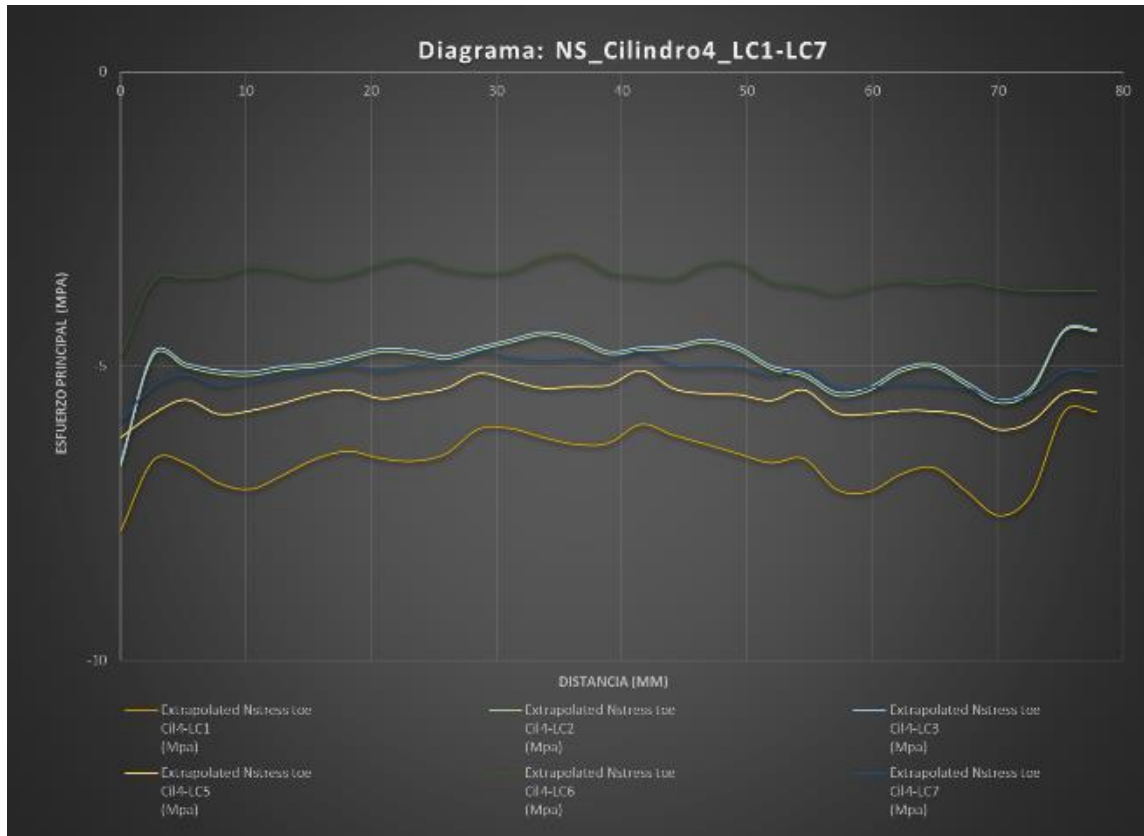


Gráfico V-1.5: Unión Cilindro interno5- Brida: Variación de esfuerzos según condición de carga (LC1-LC7).

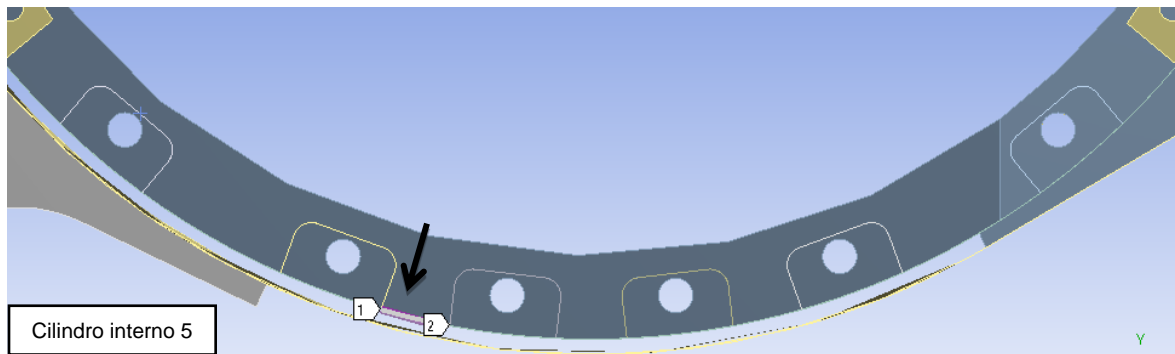
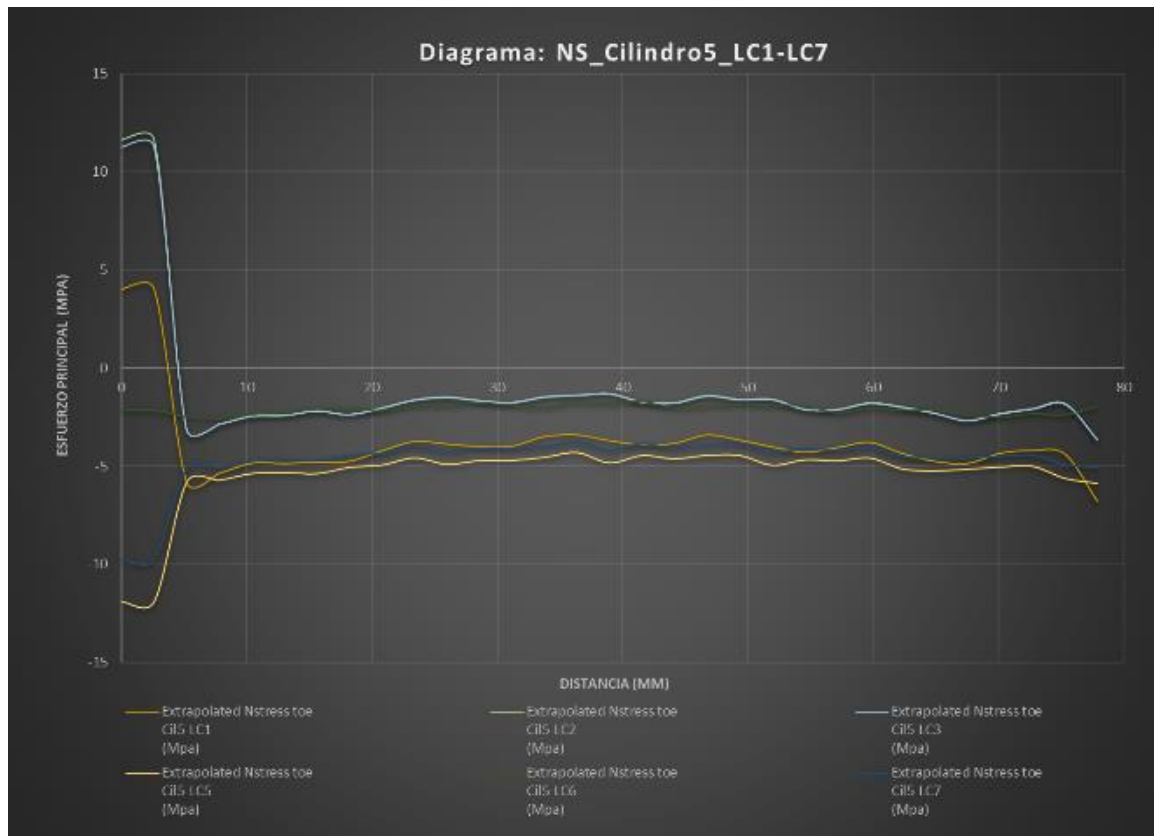


Gráfico V-1.6: Unión Cilindro interno6- Brida: Variación de esfuerzos según condición de carga (LC1-LC7).

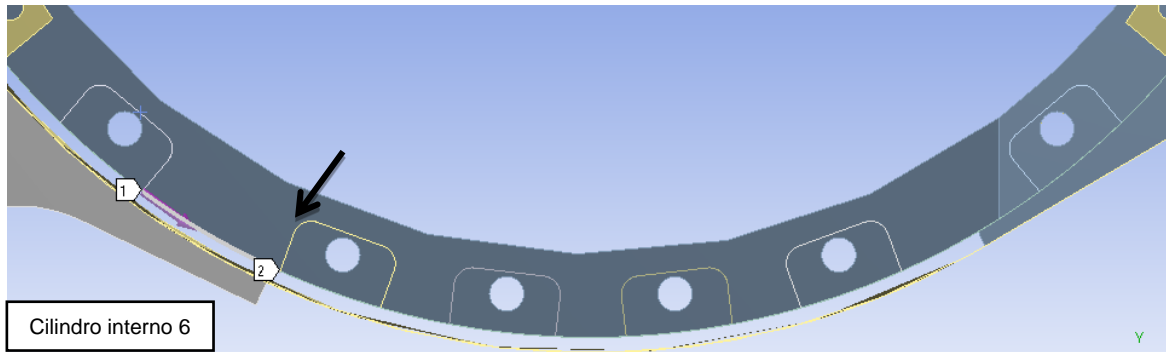
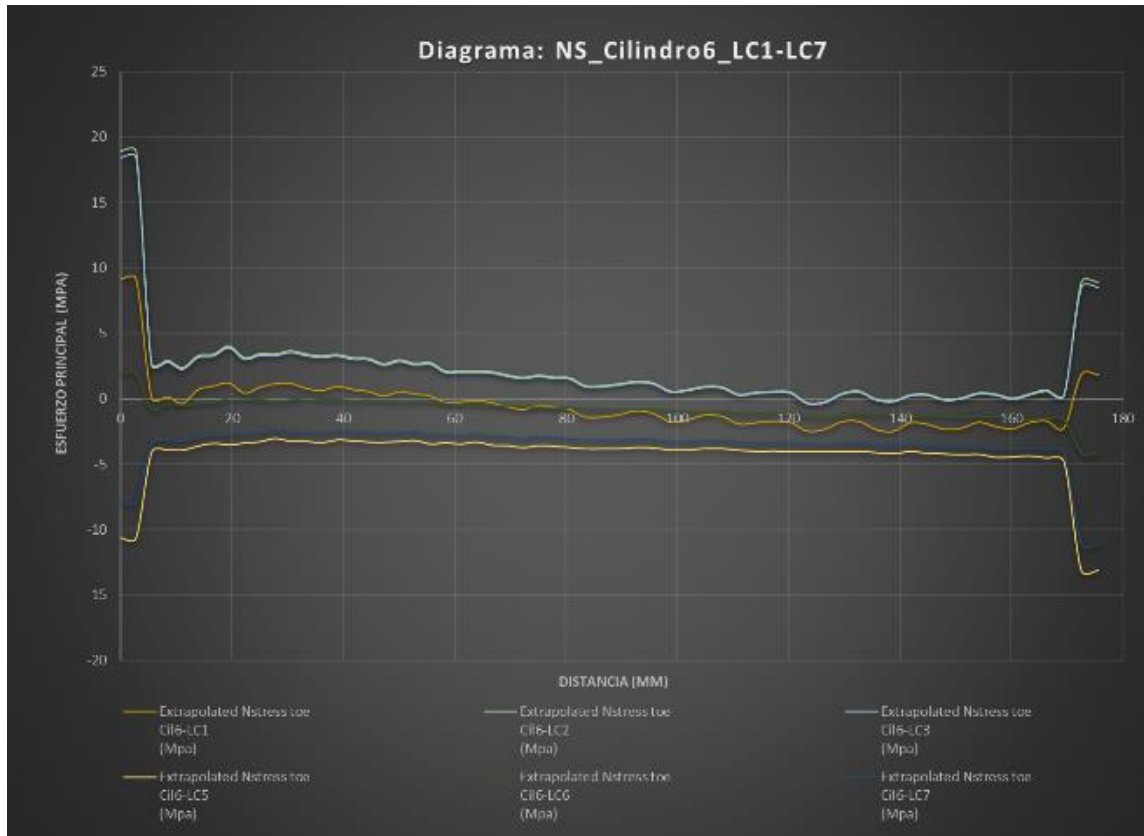
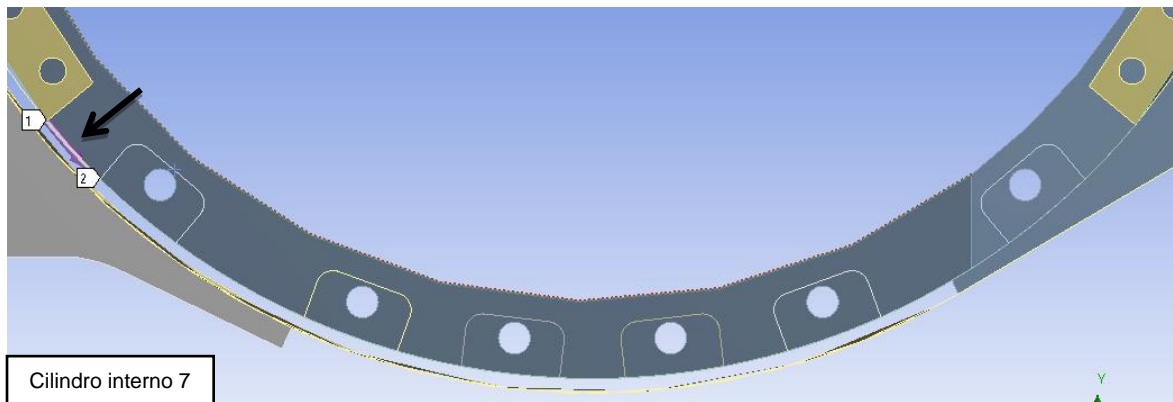
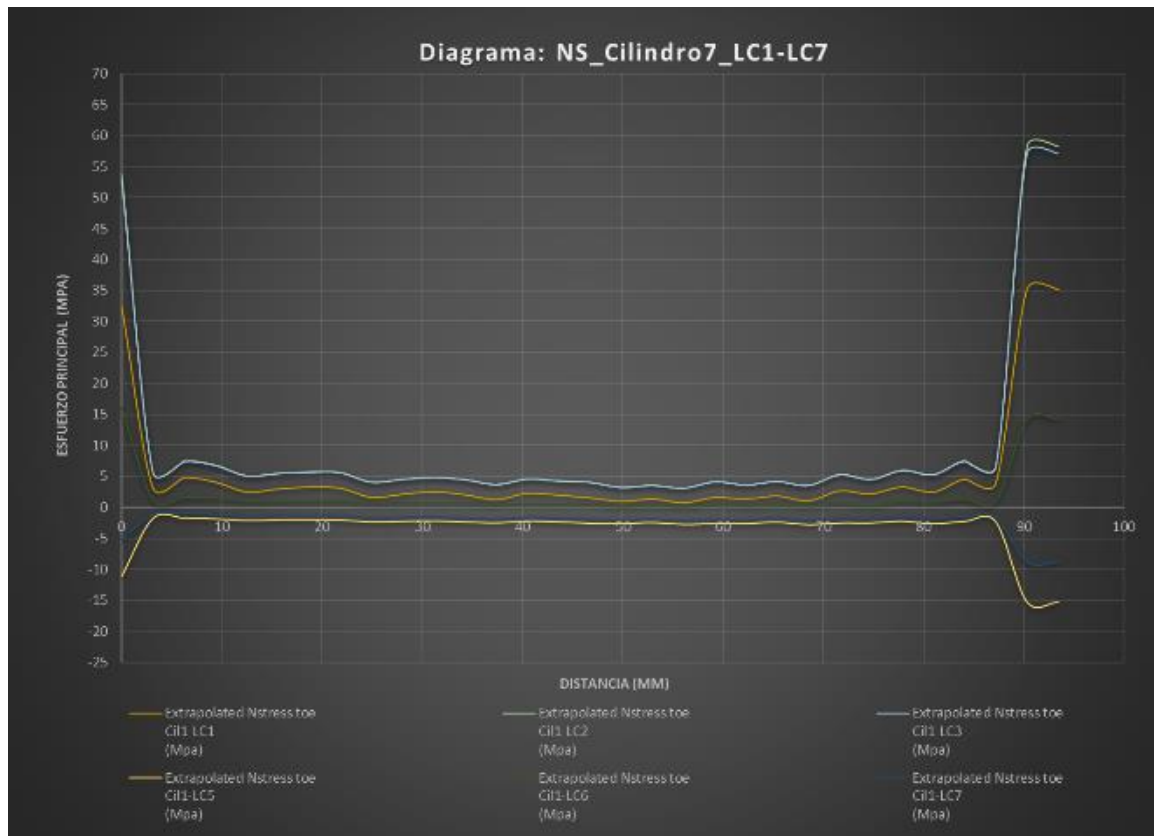
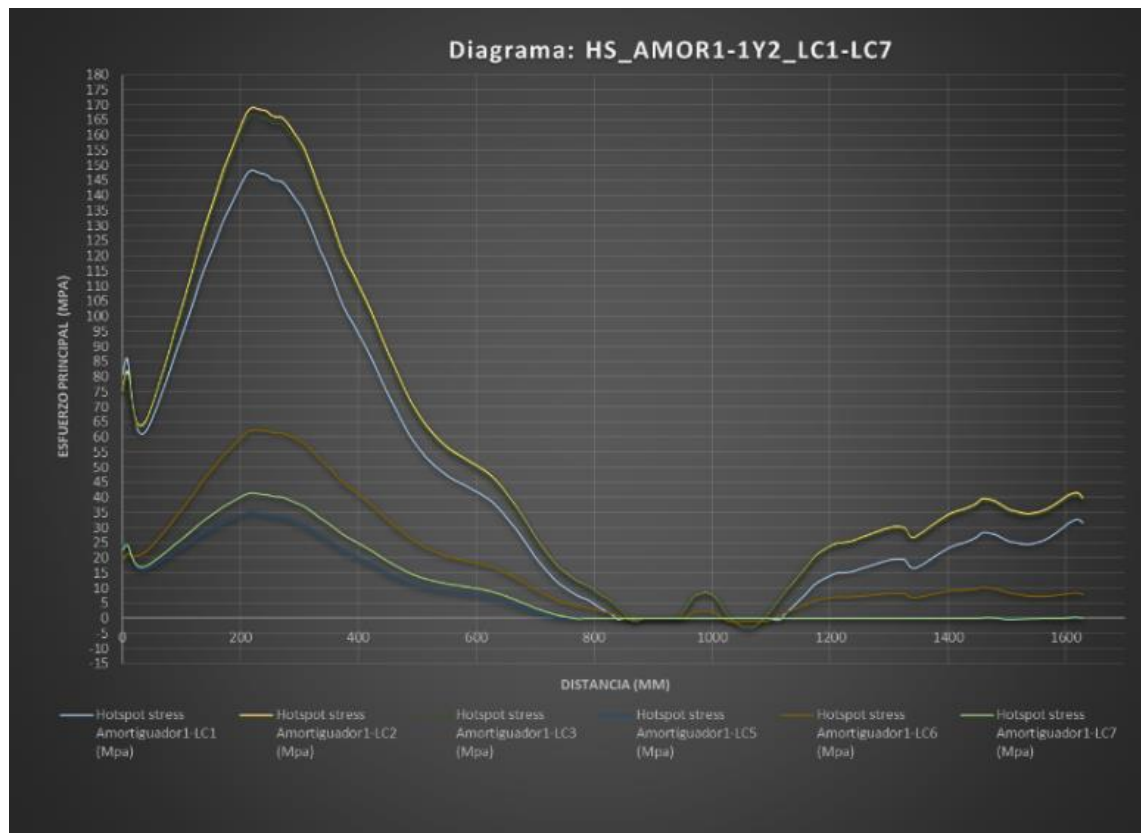
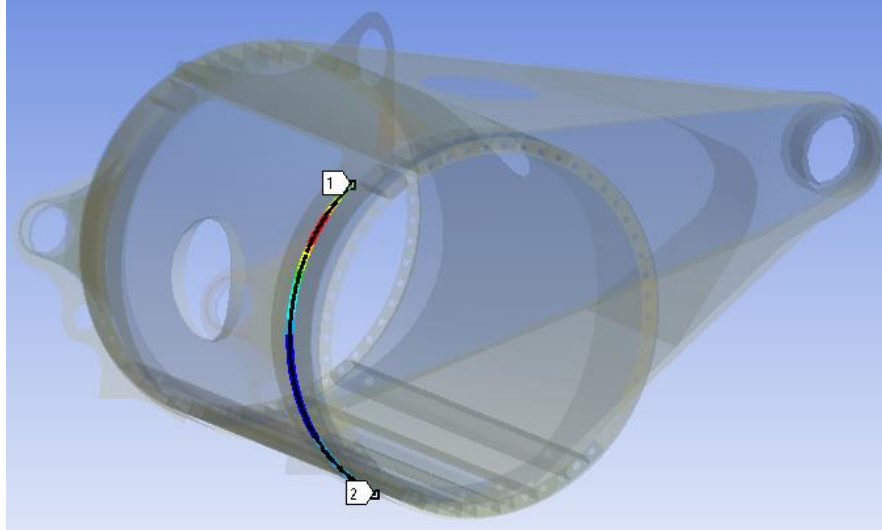


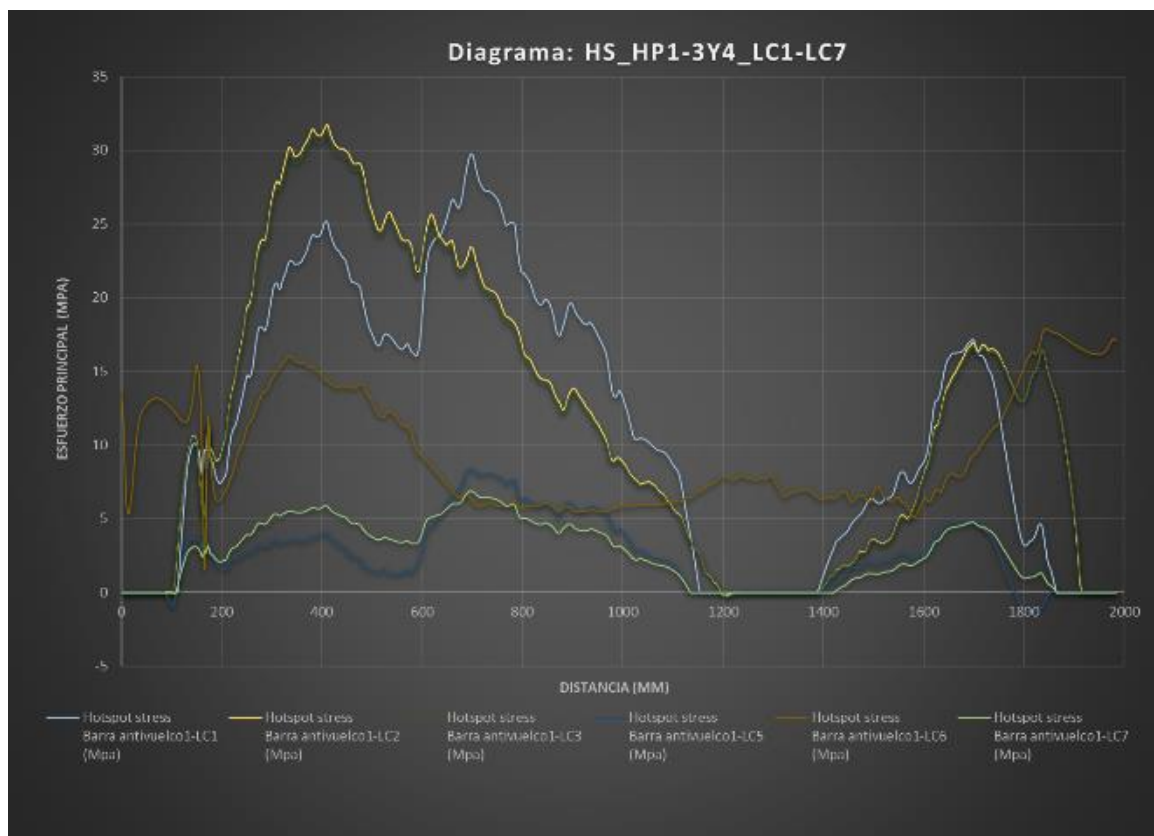
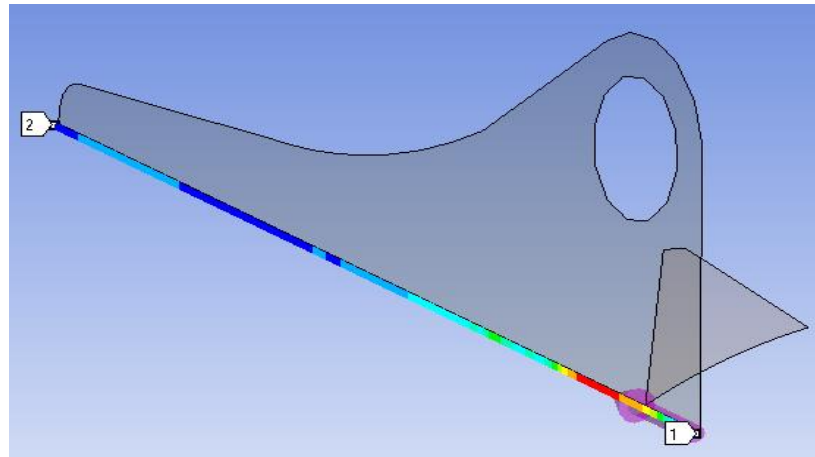
Gráfico V-1.7: Unión Cilindro interno7- Brida: Variación de esfuerzos según condición de carga (LC1-LC7).



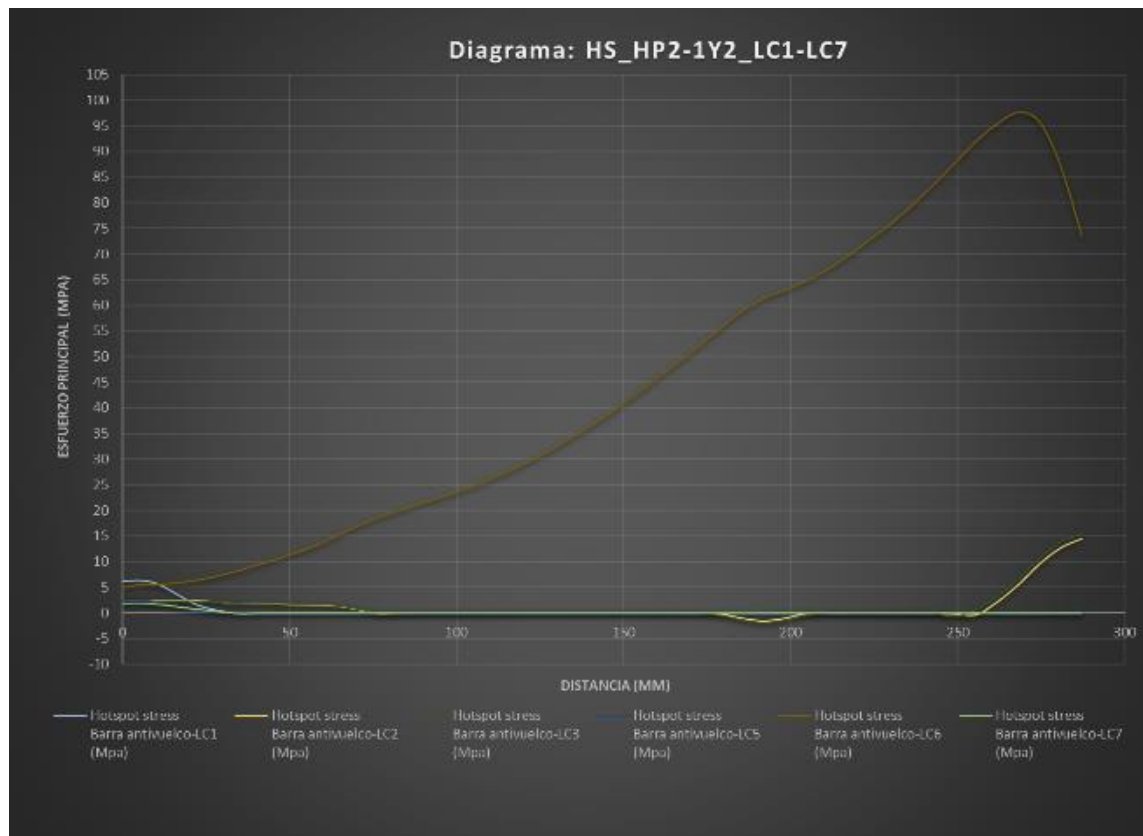
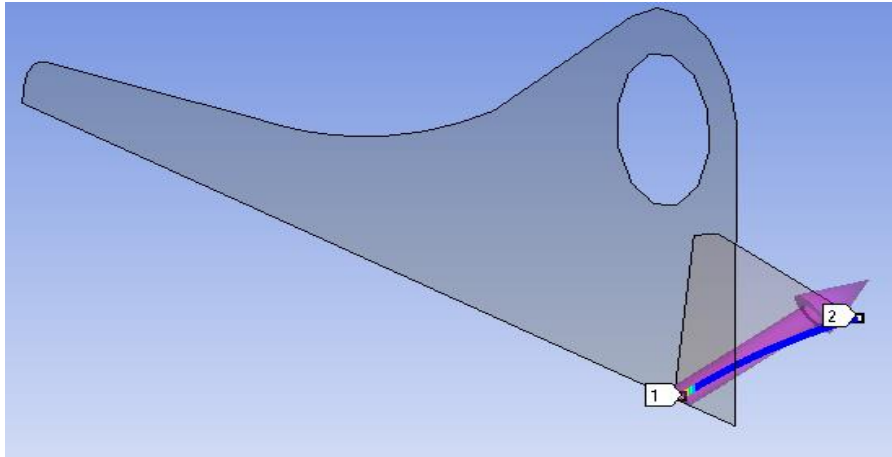
Anexo W: Distribución de esfuerzos en “Amortiguador”; Condiciones de carga LC1-LC7



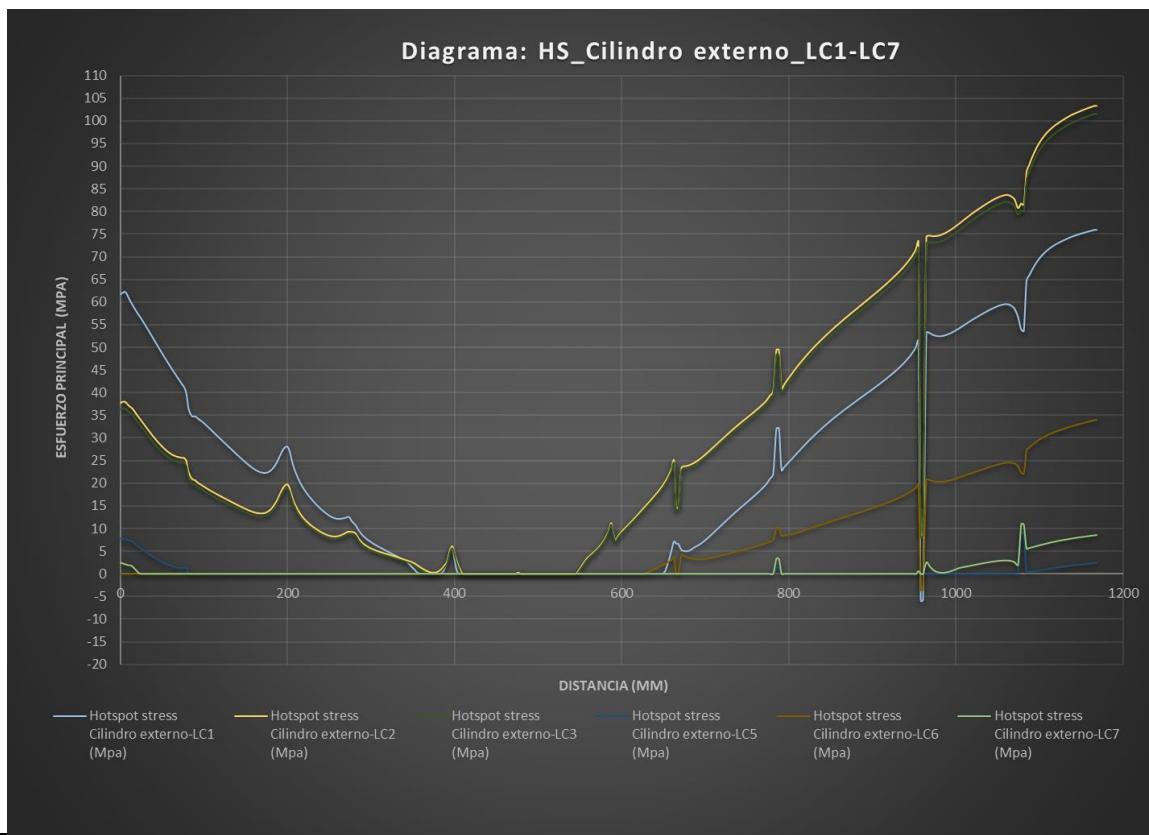
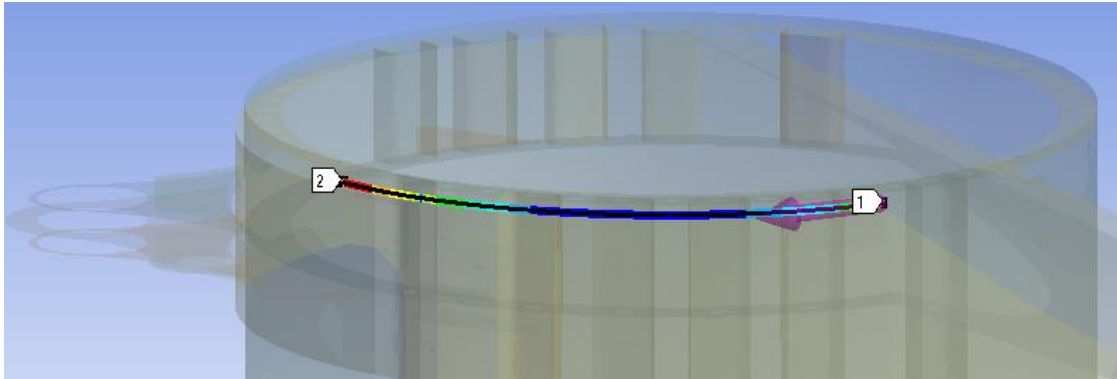
Anexo X: Distribución de esfuerzos en “Soporte barra antivuelco 1”; Condiciones de carga LC1-LC7



Anexo Y: Distribución de esfuerzos en “Soporte barra antivuelco 2”; Condiciones de carga LC1-LC7



Anexo Z: Distribución de esfuerzos en “Zona Cilindro externo”; Condiciones de carga LC1-LC7



EQUIPO	FECHA INSPECCION O REPARACION	Fecha NDT o Reparación	Tiempo (días)	Tiempo (hr)	Union soporte de barra antivuelco lado PIN		Union soporte de barra antivuelco centro		Union soporte de barra antivuelco lado izquierdo		Soldadura de unión flanche derecho		Soldadura de unión flanche izquierdo		Soldadura de unión oreja izquierda		Soldadura de unión oreja derecha		Grietas en parte interna canales de refuerzo	
					06H01		06H02		06H03		06H04		06H05		06H08		06H09		06H11	
					Length	Repaired by	Length	Repaired by	Length	Repaired by	Length	Repaired by	Length	Repaired by	Length	Repaired by	Length	Repaired by	Length	Repaired by
	WARNING				280		280		280		210		210		350		350		280	
	DANGER				400		400		400		300		300		500		500		400	
707	20101119	19/11/2010																		
708	20101112	12/11/2010																		
	20101125	25/11/2010	13	312																
	20110113	13/01/2011	49	1176															450	
709	20101020	20/10/2010														240				
	20101216	16/12/2010	57	1368						300									100	
	20110103	3/01/2011	18	432						300									100	
710	20101030	30/10/2010			200		210													
	20110105	5/01/2011	67	1608	200		210													
	20110110	10/01/2011	5	120	200		210													
711	20101004	4/10/2010																		
	20101119	19/11/2010	46	1104	150															
	20101126	26/11/2010	7	168	150															
712	20100915	15/09/2010			340		650													
	20101101	1/11/2010	47	1128	340		650													
	20101110	10/11/2010	9	216	340		650													
	20101112	12/11/2010	2	48																
713	20100927	27/09/2010											270							
	20101118	18/11/2010	52	1248									0	New "Housing"						
	20101120	20/11/2010	2	48																
714	20101116	16/11/2010					80													
715																				
716	20101019	19/10/2010	40470	971280	130		80							70						

