

Universidad Carlos III de Madrid
Departamento de Ingeniería Mecánica



Ingeniería Técnica Industrial: Especialidad Mecánica
Proyecto Fin de Carrera

**ANÁLISIS PARAMÉTRICO DE FISURAS
EN EJES FERROVIARIOS:
- CÓDIGO PRO/ENGINEER -**

Autor: Andrés García-Velasco García

Director: D. Juan Carlos García Prada

Junio de 2012



RESUMEN

El siguiente proyecto está basado en el estudio del comportamiento de un eje de ferrocarril bajo cargas de servicio. Para ello se han desarrollado varios estudios estáticos y dinámicos (fatiga) para posteriormente valorar los resultados y estudiar posibles variaciones de geometría y composición del eje.

Para la realización de este trabajo se ha utilizado Pro/Engineer, programa informático de diseño mecánico y análisis de fatiga.

El proyecto ha sido efectuado en dos fases. La primera ha consistido en el aprendizaje del software, la modelización de la geometría del eje con Pro/Engineer y la aplicación de cargas y condiciones de contorno con el módulo de Pro/Mechanica. La segunda fase se ha basado en calcular la vida del eje ferroviario con el módulo de Pro/Mechanica partiendo de un análisis estático para posteriormente hacer un análisis del comportamiento a fatiga.

De esta manera se consigue una adaptación a la filosofía de trabajo llevada a cabo hoy en día en el sector de la ingeniería, que apuesta por hacer frente a los problemas de I+D+i del modo más eficaz y eficiente posible. No obstante, no se han abandonado las técnicas tradicionales de experimentación.



ÍNDICE GENERAL

1.- OBJETIVOS Y CONTENIDO	18
1.1.- OBJETIVOS.....	19
1.2.- INTRODUCCIÓN	20
1.3.- CONTENIDO.....	23
2.- MECÁNICA DE LA FRACTURA	24
2.1.- INTRODUCCIÓN	25
2.2.- FUNDAMENTOS DE FRACTURA	27
2.2.1. Análisis de fallos.....	27
2.2.2. Clasificación de los fallos	27
2.2.3. Mecanismos de fractura	29
2.3.- DEFECTOS Y CONCENTRACIÓN DE TENSIONES	31
2.4.- MECÁNICA DE LA FRACTURA	32
2.4.1. Criterios de diseño	32
2.4.2. Criterios de fractura	33
2.4.3. Modos de fractura	33
3.- FATIGA EN ELEMENTOS MECÁNICOS	35
3.1.- FUNDAMENTOS DE FATIGA	36
3.1.1. Características de la rotura por fatiga	36
3.1.2. Estadios de fatiga.....	37
3.2.- DIAGRAMA DE FATIGA S-N.....	40
3.2.1. Zonas en el diagrama de fatiga	41
3.3.- COEFICIENTES MODIFICATIVOS DEL LÍMITE DE FATIGA	43
3.3.1. Factor de acabado superficial: K_a	44
3.3.2. Factor de tamaño: K_b	46
3.3.3. Factor de confiabilidad: K_c	47
3.3.4. Factor de temperatura: K_d	48
3.3.5. Factor de concentración de tensiones: K_e	48
3.3.6. Factor de efectos diversos: K_f	52
3.4.- ESFUERZOS FLUCTUANTES	54
3.4.1. Métodos de análisis con esfuerzo medio no nulo	55
3.4.2. Línea de carga.....	58
3.5.- PREDICCIÓN DE LA VIDA A FATIGA	60
3.5.1. Predicción de la vida a fatiga.....	60



4.- PRO/ENGINEER WILDFIRE 5.0.....	62
4.1.- INTRODUCCIÓN	63
4.2.- ENTORNO DE PRO/ENGINEER.....	64
4.3.- CAPACIDADES DE PRO/ENGINEER.....	57
4.4.- TIPOS DE FICHEROS SOPORTADOS	58
4.5.- PRINCIPALES VENTAJAS	59
4.6.- FUNCIONES Y ESPECIFICACIONES	60
4.6.1. Prestaciones CAD 3D de Pro/Engineer	60
4.6.2. Pro/Engineer <i>Advanced Assembly</i>	60
4.6.3. Pro/Engineer <i>Interactive Surface Design</i>	61
4.6.4. Pro/Engineer <i>Mechanism Dynamics</i>	61
4.6.5. Pro/Engineer <i>Piping and Cabling</i>	61
4.6.6. Pro/Engineer <i>Behavioral Modeling</i>	62
4.6.7. Sistema de prototipado rápido	62
4.6.8. Compatibilidad de los datos.....	62
4.6.9. Reparación de datos importados	63
4.6.10. <i>Windchill ProjectLink</i>	63
4.6.11. <i>Windchill PDMLink</i>	64
4.6.12. <i>Pro/Intralink</i>	64
5.- PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	65
5.1.- DESCRIPCIÓN	66
5.2.- SIMPLIFICACIONES A TENER EN CUENTA	67
6.- MODELADO DEL EJE FERROVIARIO.....	71
6.1.- INTRODUCCIÓN	72
6.2.- MODELADO DEL EJE SOMETIDO A ESTUDIO	73
6.3.- FISURAS SOBRE EL EJE FERROVIARIO	77
6.3.1. Modelado de fisura cúbica:.....	78
6.3.2. Modelado de fisura radial:	80
7.- CÁLCULOS PREVIOS	82
7.1.- TIPOS DE CARGA	83
7.2.- CARGA DE DISEÑO	84
7.3.- CÁLCULO DE LA PRECARGA.....	85



8.- CONDICIONES DE CONTORNO DEL EJE	87
8.1.- INTRODUCCIÓN DE LOS ESTADOS DE CARGA	88
8.2.- REFINAMIENTO DE MALLA	94
9.- CONFIGURACIÓN DE LOS ANÁLISIS.....	96
9.1.- CONFIGURACIÓN DE LOS ANÁLISIS ESTÁTICOS	97
9.2.- CONFIGURACIÓN DEL ANÁLISIS A FATIGA	103
9.3.- ANÁLISIS A FATIGA DEL EJE. NORMA EN 13261	108
10.- RESULTADOS.....	111
10.1- INTRODUCCIÓN	112
10.2- FISURA CÚBICA CON REFINAMIENTO DE MALLA. A. ESTÁTICO.....	113
10.2.1. Eje con fisura cúbica y refinamiento de malla nº 1	115
10.2.2. Eje con fisura cúbica y refinamiento de malla nº 2	116
10.2.3. Eje con fisura cúbica y refinamiento de malla nº 3	117
10.2.5. Eje con fisura cúbica y refinamiento de malla nº 5	119
10.2.6. Eje con fisura cúbica y refinamiento de malla nº 6	120
10.2.7. Eje con fisura cúbica y refinamiento de malla nº 7	121
10.2.8. Eje con fisura cúbica y refinamiento de malla nº 8	122
10.2.9. Eje con fisura cúbica y refinamiento de malla nº 9	123
10.2.10. Eje con fisura cúbica y refinamiento de malla nº 10	124
10.2.11. Eje con fisura cúbica y refinamiento de malla nº 11	125
10.3- FISURA CÚBICA CON REFINAMIENTO DE MALLA. FATIGA.....	126
10.3.1. Eje con fisura cúbica y refinamiento de malla nº 1	128
10.3.2. Eje con fisura cúbica y refinamiento de malla nº 2	130
10.3.3. Eje con fisura cúbica y refinamiento de malla nº 3	132
10.3.4. Eje con fisura cúbica y refinamiento de malla nº 4	134
10.3.5. Eje con fisura cúbica y refinamiento de malla nº 5	136
10.3.6. Eje con fisura cúbica y refinamiento de malla nº 6	138
10.3.7. Eje con fisura cúbica y refinamiento de malla nº 7	140
10.3.8. Eje con fisura cúbica y refinamiento de malla nº 8	142
10.3.9. Eje con fisura cúbica y refinamiento de malla nº 9	144
10.3.10. Eje con fisura cúbica y refinamiento de malla nº 10	146
10.3.11. Eje con fisura cúbica y refinamiento de malla nº 11	148



10.4- FISURA RADIAL CON REFINAMIENTO DE MALLA A. ESTÁTICO	150
10.4.1. Eje con fisura radial y refinamiento de malla nº 1	152
10.4.2. Eje con fisura radial y refinamiento de malla nº 2.....	153
10.4.4. Eje con fisura radial y refinamiento de malla nº 4.....	155
10.4.5. Eje con fisura radial y refinamiento de malla nº 5.....	156
10.4.6. Eje con fisura radial y refinamiento de malla nº 6.....	157
10.4.7. Eje con fisura radial y refinamiento de malla nº 7.....	158
10.4.8. Eje con fisura radial y refinamiento de malla nº 8.....	159
10.4.9. Eje con fisura radial y refinamiento de malla nº 9.....	160
10.4.10. Eje con fisura radial y refinamiento de malla nº 10.....	161
10.4.11. Eje con fisura radial y refinamiento de malla nº 11.....	162
10.5- FISURA RADIAL CON REFINAMIENTO DE MALLA. FATIGA.....	163
10.5.1. Eje con fisura radial y refinamiento de malla nº 1.....	165
10.5.2. Eje con fisura radial y refinamiento de malla nº 2.....	167
10.5.3. Eje con fisura radial y refinamiento de malla nº 3.....	169
10.5.4. Eje con fisura radial y refinamiento de malla nº 4.....	171
10.5.5. Eje con fisura radial y refinamiento de malla nº 5.....	173
10.5.6. Eje con fisura radial y refinamiento de malla nº 6.....	175
10.5.7. Eje con fisura radial y refinamiento de malla nº 7.....	177
10.5.8. Eje con fisura radial y refinamiento de malla nº 8.....	179
10.5.9. Eje con fisura radial y refinamiento de malla nº 9.....	181
10.5.10. Eje con fisura radial y refinamiento de malla nº 10.....	183
10.5.11. Eje con fisura radial y refinamiento de malla nº 11.....	185
10.6- ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	187
10.6.1. Fisura cúbica vs. fisura radial. Análisis estático.....	187
10.6.2. Fisura cúbica vs. fisura radial. Análisis de fatiga	190
10.6.3. Fisura cúbica vs. radial con refinamiento de malla. Análisis estático	192
10.6.4. Fisura cúbica vs. radial con refinamiento de malla. Análisis de fatiga	195
11.- CONCLUSIONES Y PROPUESTAS DE MEJORA	197
11.1.- CONCLUSIONES	198
11.2.- PROPUESTAS DE MEJORA	200



12.- PRESUPUESTO	201
13.- BIBLIOGRAFÍA	203
14.- ANEXOS	205
14.1- RESULTADOS FISURA CÚBICA. ANÁLISIS ESTÁTICO	206
14.1.1. Eje con fisura cúbica nº 1	206
14.1.2. Eje con fisura cúbica nº 2	207
14.1.3. Eje con fisura cúbica nº 3	208
14.1.4. Eje con fisura cúbica nº 4	209
14.1.5. Eje con fisura cúbica nº 5	210
14.1.6. Eje con fisura cúbica nº 6	211
14.1.7. Eje con fisura cúbica nº 7	212
14.1.9. Eje con fisura cúbica nº 9	214
14.1.10. Eje con fisura cúbica nº 10	215
14.1.11. Eje con fisura cúbica nº 11	216
14.2- RESULTADOS FISURA CÚBICA. ANÁLISIS DE FATIGA.....	217
14.2.1. Eje con fisura cúbica nº 1	217
14.2.2. Eje con fisura cúbica nº 2	219
14.2.3. Eje con fisura cúbica nº 3	221
14.2.4. Eje con fisura cúbica nº 4	223
14.2.5. Eje con fisura cúbica nº 5	225
14.2.6. Eje con fisura cúbica nº 6	227
14.2.7. Eje con fisura cúbica nº 7	229
14.2.8. Eje con fisura cúbica nº 8	231
14.2.9. Eje con fisura cúbica nº 9	233
14.2.10. Eje con fisura cúbica nº 10	235
14.2.11. Eje con fisura cúbica nº 11	237



14.3- RESULTADOS FISURA RADIAL. ANÁLISIS ESTÁTICO	239
14.3.1. Eje con fisura radial nº 1	239
14.3.2. Eje con fisura radial nº 2.....	240
14.3.3. Eje con fisura radial nº 3.....	241
14.3.4. Eje con fisura radial nº 4.....	242
14.3.5. Eje con fisura radial nº 5.....	243
14.3.6. Eje con fisura radial nº 6.....	244
14.3.7. Eje con fisura radial nº 7.....	245
14.3.8. Eje con fisura radial nº 8.....	246
14.3.9. Eje con fisura radial nº 9.....	247
14.3.10. Eje con fisura radial nº 10.....	248
14.3.11. Eje con fisura radial nº 11.....	249
14.4- RESULTADOS FISURA RADIAL. ANÁLISIS DE FATIGA.....	250
14.4.1. Eje con fisura radial nº 1	250
14.4.2. Eje con fisura radial nº 2.....	252
14.4.3. Eje con fisura radial nº 3.....	254
14.4.4. Eje con fisura radial nº 4.....	256
14.4.5. Eje con fisura radial nº 5.....	258
14.4.6. Eje con fisura radial nº 6.....	260
14.4.7. Eje con fisura radial nº 7.....	262
14.4.8. Eje con fisura radial nº 8.....	264
14.4.9. Eje con fisura radial nº 9.....	266
14.4.10. Eje con fisura radial nº 10.....	268
14.4.11. Eje con fisura radial nº 11.....	270
14.5- PLANO EJE	272



ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. 1 Bogie	21
Ilustración 1. 2 Conjunto eje-rueda	21
Ilustración 1. 3 Caja de grasa	21
Ilustración 1. 4 Sistema de suspensión.....	22
Ilustración 2. 1 Diagrama Esfuerzo-Deformación para materiales dúctiles y frágiles.....	29
Ilustración 2. 2 Esquema de una fractura frágil sin ninguna deformación plástica	29
Ilustración 2. 3 Esquema de una fractura muy dúctil (a) y una moderadamente dúctil después de una cierta estricción (b)	30
Ilustración 2. 4 Localización de la tensión máxima en la grieta	31
Ilustración 2. 5 Criterio convencional de diseño en un componente sin defectos	32
Ilustración 2. 6 Criterio convencional de diseño en un componente fisurado	32
Ilustración 2. 7 Modo de apertura	33
Ilustración 2. 8 Modo de deslizamiento	34
Ilustración 2. 9 Modo de desgarro.....	34
Ilustración 3. 1 Zonas diferenciadas en la superficie de fractura de un eje por fatiga	36
Ilustración 3. 2 Reorientación de la grieta al Modo I en el Estadio II de fatiga.....	38
Ilustración 3. 3 Ritmo de crecimiento de grieta frente a ΔK	39
Ilustración 3. 4 Máquina empleada en el ensayo de viga rotatoria a fatiga	40
Ilustración 3. 5 Curva de <i>Wöhler</i> correspondiente a la calidad S700MC AM FCE	41
Ilustración 3. 6 Diagrama de fatiga o curva S-N.....	41
Ilustración 3. 7 Curva S-N de una pieza real sometida a tensión alternante con tensión media nula	43
Ilustración 3. 8 Factores de modificación de acabados superficiales.....	45
Ilustración 3. 9 Barra de sección rectangular con dos muescas sometida a tensión o compresión simple.	49
Ilustración 3. 10 Barra de sección rectangular con dos muescas sometida a flexión.....	49
Ilustración 3. 11 Barra de sección circular con estrechamiento y entalles en torsión.....	50
Ilustración 3. 12 Barra de sección circular con estrechamiento y entalles en flexión.....	50
Ilustración 3. 13 Sensibilidad a las ranuras para cargas de flexión y axiales alternantes .	51
Ilustración 3. 14 Sensibilidad a las ranuras para cargas de torsión alternantes.....	51
Ilustración 3. 15 Pieza con temple superficial en flexión o torsión	53
Ilustración 3. 16 Diagrama de un esfuerzo fluctuante senoidal	54
Ilustración 3. 17 Diagrama de fatiga con criterios de <i>Goodman</i> , <i>Soderberg</i> y <i>Gerber</i>	56
Ilustración 3. 18 Diagrama de fatiga: criterios de <i>Goodman</i> , <i>Soderberg</i> , <i>Gerber</i> y recta de fluencia.....	57
Ilustración 3. 19 Línea de carga en el diagrama de <i>Goodman</i> para vida infinita.....	58
Ilustración 3. 20 Predicción de vida a fatiga. Diseño y análisis de ingeniería.	60
Ilustración 3. 21 Diseño analítico.....	61
Ilustración 3. 22 Diseño experimental	61



Ilustración 4. 1 Software con compatibilidades muy diversas	63
Ilustración 4. 2 Ilustración inicio sesión Pro/Engineer	64
Ilustración 4. 3 Esquema disposición software Pro/Engineer	64
Ilustración 4. 4 <i>System Toolbar</i>	65
Ilustración 4. 5 <i>FeatureToolbar</i>	56
Ilustración 5. 1 Caja de grasa	67
Ilustración 5. 2 Contacto rueda y rail	68
Ilustración 5. 3 Definición de las propiedades del material	69
Ilustración 5. 4 Eje con simetría.....	70
Ilustración 6. 1 Eje ferroviario	72
Ilustración 6. 2 Generación del perfil de revolución (sin cotas)	73
Ilustración 6. 3 Generación del perfil de revolución (con cotas)	73
Ilustración 6. 4 Definición dinámica del eje	74
Ilustración 6. 5 Definición del eje de revolución	74
Ilustración 6. 6 Definición del chaflán	75
Ilustración 6. 7 Definición del redondeo	75
Ilustración 6. 8 Eje ferroviario modelado en Pro/Engineer.....	76
Ilustración 6. 9 Eje ferroviario modelado en Pro/Engineer (Vista frontal).....	76
Ilustración 6. 10 Eje ferroviario modelado (con plano de referencia)	77
Ilustración 6. 11 Eje modelado con plano de referencia y fisura cúbica (vista lateral)	77
Ilustración 6. 12 Inicio progresión de fisura cúbica	78
Ilustración 6. 13 Fin progresión de fisura cúbica	78
Ilustración 6. 14 Fin progresión de fisura cúbica (ampliación sobre fisura).....	79
Ilustración 6. 15 Fisura radial (ampliación sobre fisura)	80
Ilustración 6. 16 Modelado de fisura radial	81
Ilustración 7. 1 Carga aplicada en la mitad superior de la superficie del eje	84
Ilustración 7. 2 Cálculo de la precarga en el eje	85
Ilustración 7. 3 Resultados de la precarga en el eje	86
Ilustración 8. 1 Carga 1	89
Ilustración 8. 2 Carga 2	89
Ilustración 8. 3 Carga 3	90
Ilustración 8. 4 Carga 4	90
Ilustración 8. 5 Carga 5	91
Ilustración 8. 6 Carga 6	91
Ilustración 8. 7 Carga 7	92
Ilustración 8. 8 Carga 8	92
Ilustración 8. 9 Resumen estado de cargas ajustado del eje.....	93
Ilustración 8. 10 Ventana de refinado de malla.....	94
Ilustración 8. 11 Refinamiento de malla en cambio de sección	95
Ilustración 8. 12 Refinamiento de malla en la fisura.....	95



Ilustración 9. 1 Ventana de selección del tipo de análisis.....	97
Ilustración 9. 2 Ventana de selección del tipo de análisis.....	98
Ilustración 9. 3 Ventana del estado del análisis	99
Ilustración 9. 4 Resultados de Mecanica.....	99
Ilustración 9. 5 Ventana de resolución de resultados.....	100
Ilustración 9. 6 Resultados del análisis sin ajuste de escala.....	101
Ilustración 9. 7 Edición de la leyenda	102
Ilustración 9. 8 Resultados del análisis con ajuste de escala.....	102
Ilustración 9. 9 Definición de las secciones críticas	103
Ilustración 9. 10 Barra de sección circular con estrechamiento y entalles en flexión.....	103
Ilustración 9. 11 Sensibilidad a las ranuras para cargas de flexión y axiales alternantes	104
Ilustración 9. 12 Ventana de <i>Definición del material</i> para el problema	106
Ilustración 9. 13 Definición de parámetros necesarios para los análisis de fatiga	107
Ilustración 9. 14 Definición de las propiedades del análisis a fatiga	108
Ilustración 9. 15 Selección del análisis estático previo.....	109
Ilustración 10. 1 Inicio de la progresión de la fisura cúbica	112
Ilustración 10. 2 Fin de la progresión de la fisura cúbica	112
Ilustración 10. 3 Inicio progresión fisura cúbica.....	113
Ilustración 10. 4 Fin de la progresión de la fisura cúbica	114
Ilustración 10. 5 Desplazamiento del eje con fisura cúbica nº1	115
Ilustración 10. 6 Tensión del eje con fisura cúbica nº1.....	115
Ilustración 10. 7 Desplazamiento del eje con fisura cúbica nº2.....	116
Ilustración 10. 8 Tensión del eje con fisura cúbica nº2.....	116
Ilustración 10. 9 Desplazamiento del eje con fisura cúbica nº3.....	117
Ilustración 10. 10 Tensión del eje con fisura cúbica nº3.....	117
Ilustración 10. 11 Desplazamiento del eje con fisura cúbica nº4.....	118
Ilustración 10. 12 Tensión del eje con fisura cúbica nº4.....	118
Ilustración 10. 13 Desplazamiento del eje con fisura cúbica nº5.....	119
Ilustración 10. 14 Tensión del eje con fisura cúbica nº5.....	119
Ilustración 10. 15 Desplazamiento del eje con fisura cúbica nº6.....	120
Ilustración 10. 16 Tensión del eje con fisura cúbica nº6.....	120
Ilustración 10. 17 Desplazamiento del eje con fisura cúbica nº7.....	121
Ilustración 10. 18 Tensión del eje con fisura cúbica nº7.....	121
Ilustración 10. 19 Desplazamiento del eje con fisura cúbica nº8.....	122
Ilustración 10. 20 Tensión del eje con fisura cúbica nº8.....	122
Ilustración 10. 21 Desplazamiento del eje con fisura cúbica nº9.....	123
Ilustración 10. 22 Tensión del eje con fisura cúbica nº9.....	123
Ilustración 10. 23 Desplazamiento del eje con fisura cúbica nº10.....	124
Ilustración 10. 24 Tensión del eje con fisura cúbica nº10.....	124
Ilustración 10. 25 Desplazamiento del eje con fisura cúbica nº11	125
Ilustración 10. 26 Tensión del eje con fisura cúbica nº11.....	125
Ilustración 10. 27 Inicio de la progresión de la fisura cúbica	126



Ilustración 10. 28 Fin de la progresión de la fisura cúbica	127
Ilustración 10. 29 <i>Log damage</i> eje con fisura cúbica nº1.....	128
Ilustración 10. 30 <i>Log life</i> eje con fisura cúbica nº1	128
Ilustración 10. 31 <i>Confidence of life</i> eje fisura cúbica nº1	129
Ilustración 10. 32 <i>Factor of safety</i> eje fisura cúbica nº1	129
Ilustración 10. 33 <i>Log damage</i> eje con fisura cúbica nº2.....	130
Ilustración 10. 34 <i>Log life</i> eje con fisura cúbica nº2	130
Ilustración 10. 35 <i>Confidence of life</i> eje fisura cúbica nº2.....	131
Ilustración 10. 36 <i>Factor of safety</i> eje fisura cúbica nº2.....	131
Ilustración 10. 37 <i>Log damage</i> eje con fisura cúbica nº3.....	132
Ilustración 10. 38 <i>Log life</i> eje con fisura cúbica nº3	132
Ilustración 10. 39 <i>Confidence of life</i> eje fisura cúbica nº3.....	133
Ilustración 10. 40 <i>Factor of safety</i> eje fisura cúbica nº3.....	133
Ilustración 10. 41 <i>Log damage</i> eje con fisura cúbica nº4.....	134
Ilustración 10. 42 <i>Log life</i> eje con fisura cúbica nº4	134
Ilustración 10. 43 <i>Confidence of life</i> eje fisura cúbica nº4.....	135
Ilustración 10. 44 <i>Factor of safety</i> eje fisura cúbica nº4.....	135
Ilustración 10. 45 <i>Log damage</i> eje con fisura cúbica nº5.....	136
Ilustración 10. 46 <i>Log life</i> eje con fisura cúbica nº5	136
Ilustración 10. 47 <i>Confidence of life</i> eje fisura cúbica nº5.....	137
Ilustración 10. 48 <i>Factor of safety</i> eje fisura cúbica nº5	137
Ilustración 10. 49 <i>Log damage</i> eje con fisura cúbica nº6.....	138
Ilustración 10. 50 <i>Log life</i> eje con fisura cúbica nº6	138
Ilustración 10. 51 <i>Confidence of life</i> eje fisura cúbica nº6.....	139
Ilustración 10. 52 <i>Factor of safety</i> eje fisura cúbica nº6.....	139
Ilustración 10. 53 <i>Log damage</i> eje con fisura cúbica nº7.....	140
Ilustración 10. 54 <i>Log life</i> eje con fisura cúbica nº7	140
Ilustración 10. 55 <i>Confidence of life</i> eje fisura cúbica nº7	141
Ilustración 10. 56 <i>Factor of safety</i> eje fisura cúbica nº7	141
Ilustración 10. 57 <i>Log damage</i> eje con fisura cúbica nº8.....	142
Ilustración 10. 58 <i>Log life</i> eje con fisura cúbica nº8	142
Ilustración 10. 59 <i>Confidence of life</i> eje fisura cúbica nº8.....	143
Ilustración 10. 60 <i>Factor of safety</i> eje fisura cúbica nº8.....	143
Ilustración 10. 61 <i>Log damage</i> eje con fisura cúbica nº9.....	144
Ilustración 10. 62 <i>Log life</i> eje con fisura cúbica nº9	144
Ilustración 10. 63 <i>Confidence of life</i> eje fisura cúbica nº9.....	145
Ilustración 10. 64 <i>Factor of safety</i> eje fisura cúbica nº9.....	145
Ilustración 10. 65 <i>Log damage</i> eje con fisura cúbica nº10.....	146
Ilustración 10. 66 <i>Log life</i> eje con fisura cúbica nº10	146
Ilustración 10. 67 <i>Confidence of life</i> eje fisura cúbica nº10.....	147
Ilustración 10. 68 <i>Factor of safety</i> eje fisura cúbica nº10.....	147
Ilustración 10. 69 <i>Log damage</i> eje con fisura cúbica nº11.....	148
Ilustración 10. 70 <i>Log life</i> eje con fisura cúbica nº11	148
Ilustración 10. 71 <i>Confidence of life</i> eje fisura cúbica nº11	149



Ilustración 10. 72 <i>Factor of safety</i> eje fisura cúbica nº1	149
Ilustración 10. 73 Fisura radial.....	150
Ilustración 10. 74 Inicio de la progresión de la fisura radial.....	151
Ilustración 10. 75 Fin de la progresión de la fisura radial.....	151
Ilustración 10. 76 Desplazamiento del eje con fisura radial nº1	152
Ilustración 10. 77 Tensión del eje con fisura radial nº1	152
Ilustración 10. 78 Desplazamiento del eje con fisura radial nº2	153
Ilustración 10. 79 Tensión del eje con fisura radial nº2	153
Ilustración 10. 80 Desplazamiento del eje con fisura radial nº3	154
Ilustración 10. 81 Tensión del eje con fisura radial nº3	154
Ilustración 10. 82 Desplazamiento del eje con fisura radial nº4	155
Ilustración 10. 83 Tensión del eje con fisura radial nº4	155
Ilustración 10. 84 Desplazamiento del eje con fisura radial nº5	156
Ilustración 10. 85 Tensión del eje con fisura radial nº5	156
Ilustración 10. 86 Desplazamiento del eje con fisura radial nº6	157
Ilustración 10. 87 Tensión del eje con fisura radial nº6	157
Ilustración 10. 88 Desplazamiento del eje con fisura radial nº7	158
Ilustración 10. 89 Tensión del eje con fisura radial nº7	158
Ilustración 10. 90 Desplazamiento del eje con fisura radial nº8	159
Ilustración 10. 91 Tensión del eje con fisura radial nº8	159
Ilustración 10. 92 Desplazamiento del eje con fisura radial nº9	160
Ilustración 10. 93 Tensión del eje con fisura radial nº9	160
Ilustración 10. 94 Desplazamiento del eje con fisura radial nº10	161
Ilustración 10. 95 Tensión del eje con fisura radial nº10	161
Ilustración 10. 96 Desplazamiento del eje con fisura radial nº11	162
Ilustración 10. 97 Tensión del eje con fisura radial nº11	162
Ilustración 10. 98 Fisura radial.....	163
Ilustración 10. 99 Inicio de la progresión de la fisura radial.....	164
Ilustración 10. 100 Fin de la progresión de la fisura radial.....	164
Ilustración 10. 101 <i>Log damage</i> eje con fisura radial nº1	165
Ilustración 10. 102 <i>Log life</i> eje con fisura radial nº1	165
Ilustración 10. 103 <i>Confidence of life</i> eje fisura radial nº1	166
Ilustración 10. 104 <i>Factor of safety</i> eje fisura radial nº1	166
Ilustración 10. 105 <i>Log damage</i> eje con fisura radial nº2.....	167
Ilustración 10. 106 <i>Log life</i> eje con fisura radial nº2	167
Ilustración 10. 107 <i>Confidence of life</i> eje fisura radial nº2	168
Ilustración 10. 108 <i>Factor of safety</i> eje fisura radial nº2	168
Ilustración 10. 109 <i>Log damage</i> eje con fisura radial nº3.....	169
Ilustración 10. 110 <i>Log life</i> eje con fisura radial nº3	169
Ilustración 10. 111 <i>Confidence of life</i> eje fisura radial nº3	170
Ilustración 10. 112 <i>Factor of safety</i> eje fisura radial nº3	170
Ilustración 10. 113 <i>Log damage</i> eje con fisura radial nº4.....	171
Ilustración 10. 114 <i>Log life</i> eje con fisura radial nº4	171
Ilustración 10. 115 <i>Confidence of life</i> eje fisura radial nº4	172



Ilustración 10. 116 <i>Factor of safety</i> eje fisura radial nº4	172
Ilustración 10. 117 <i>Log damage</i> eje con fisura radial nº5	173
Ilustración 10. 118 <i>Log life</i> eje con fisura radial nº5	173
Ilustración 10. 119 <i>Confidence of life</i> eje fisura radial nº5	174
Ilustración 10. 120 <i>Factor of safety</i> eje fisura radial nº5	174
Ilustración 10. 121 <i>Log damage</i> eje con fisura radial nº6.....	175
Ilustración 10. 122 <i>Log life</i> eje con fisura radial nº6	175
Ilustración 10. 123 <i>Confidence of life</i> eje fisura radial nº6	176
Ilustración 10. 124 <i>Factor of safety</i> eje fisura radial nº6	176
Ilustración 10. 125 <i>Log damage</i> eje con fisura radial nº7	177
Ilustración 10. 126 <i>Log life</i> eje con fisura radial nº7	177
Ilustración 10. 127 <i>Confidence of life</i> eje fisura radial nº7	178
Ilustración 10. 128 <i>Factor of safety</i> eje fisura radial nº7	178
Ilustración 10. 129 <i>Log damage</i> eje con fisura radial nº8.....	179
Ilustración 10. 130 <i>Log life</i> eje con fisura radial nº8	179
Ilustración 10. 131 <i>Confidence of life</i> eje fisura radial nº8	180
Ilustración 10. 132 <i>Factor of safety</i> eje fisura radial nº8	180
Ilustración 10. 133 <i>Log damage</i> eje con fisura radial nº9	181
Ilustración 10. 134 <i>Log life</i> eje con fisura radial nº9	181
Ilustración 10. 135 <i>Confidence of life</i> eje fisura radial nº9	182
Ilustración 10. 136 <i>Factor of safety</i> eje fisura radial nº9	182
Ilustración 10. 137 <i>Log damage</i> eje con fisura radial nº10.....	183
Ilustración 10. 138 <i>Log life</i> eje con fisura radial nº10	183
Ilustración 10. 139 <i>Confidence of life</i> eje fisura radial nº10	184
Ilustración 10. 140 <i>Factor of safety</i> eje fisura radial nº10	184
Ilustración 10. 141 <i>Log damage</i> eje con fisura radial nº11	185
Ilustración 10. 142 <i>Log life</i> eje con fisura radial nº11	185
Ilustración 10. 143 <i>Confidence of life</i> eje fisura radial nº11	186
Ilustración 10. 144 <i>Factor of safety</i> eje fisura radial nº11	186
Ilustración 14. 1 Desplazamiento del eje con fisura cúbica nº1	206
Ilustración 14. 2 Tensión del eje con fisura cúbica nº1	206
Ilustración 14. 3 Desplazamiento del eje con fisura cúbica nº2.....	207
Ilustración 14. 4 Tensión del eje con fisura cúbica nº2.....	207
Ilustración 14. 5 Desplazamiento del eje con fisura cúbica nº3.....	208
Ilustración 14. 6 Tensión del eje con fisura cúbica nº3.....	208
Ilustración 14. 7 Desplazamiento fisura cúbica nº4	209
Ilustración 14. 8 Tensión del eje con fisura cúbica nº4.....	209
Ilustración 14. 9 Desplazamiento del eje con fisura cúbica nº5.....	210
Ilustración 14. 10 Tensión del eje con fisura cúbica nº5.....	210
Ilustración 14. 11 Desplazamiento del eje con fisura cúbica nº6.....	211
Ilustración 14. 12 Tensión del eje con fisura cúbica nº6.....	211
Ilustración 14. 13 Desplazamiento del eje con fisura cúbica nº7.....	212
Ilustración 14. 14 Tensión del eje con fisura cúbica nº7.....	212



Ilustración 14. 15 Desplazamiento del eje con fisura cúbica nº8.....	213
Ilustración 14. 16 Tensión del eje con fisura cúbica nº8.....	213
Ilustración 14. 17 Desplazamiento del eje con fisura cúbica nº9.....	214
Ilustración 14. 18 Tensión del eje con fisura cúbica nº9.....	214
Ilustración 14. 19 Desplazamiento del eje con fisura cúbica nº10.....	215
Ilustración 14. 20 Tensión del eje con fisura cúbica nº10.....	215
Ilustración 14. 21 Desplazamiento del eje con fisura cúbica nº11.....	216
Ilustración 14. 22 Tensión del eje con fisura cúbica nº11.....	216
Ilustración 14. 23 <i>Log damage</i> eje con fisura cúbica nº1.....	217
Ilustración 14. 24 <i>Log life</i> eje con fisura cúbica nº1.....	217
Ilustración 14. 25 <i>Confidence of life</i> eje fisura cúbica nº1.....	218
Ilustración 14. 26 <i>Factor of safety</i> eje fisura cúbica nº1.....	218
Ilustración 14. 27 <i>Log damage</i> eje con fisura cúbica nº2.....	219
Ilustración 14. 28 <i>Log life</i> eje con fisura cúbica nº2.....	219
Ilustración 14. 29 <i>Confidence of life</i> eje fisura cúbica nº2.....	220
Ilustración 14. 30 <i>Factor of safety</i> eje fisura cúbica nº2.....	220
Ilustración 14. 31 <i>Log damage</i> eje con fisura cúbica nº3.....	221
Ilustración 14. 32 <i>Log life</i> eje con fisura cúbica nº3.....	221
Ilustración 14. 33 <i>Confidence of life</i> eje fisura cúbica nº3.....	222
Ilustración 14. 34 <i>Factor of safety</i> eje fisura cúbica nº3.....	222
Ilustración 14. 35 <i>Log damage</i> eje con fisura cúbica nº4.....	223
Ilustración 14. 36 <i>Log life</i> eje con fisura cúbica nº4.....	223
Ilustración 14. 37 <i>Confidence of life</i> eje fisura cúbica nº4.....	224
Ilustración 14. 38 <i>Factor of safety</i> eje fisura cúbica nº4.....	224
Ilustración 14. 39 <i>Log damage</i> eje con fisura cúbica nº5.....	225
Ilustración 14. 40 <i>Log life</i> eje con fisura cúbica nº5.....	225
Ilustración 14. 41 <i>Confidence of life</i> eje fisura cúbica nº5.....	226
Ilustración 14. 42 <i>Factor of safety</i> eje fisura cúbica nº5.....	226
Ilustración 14. 43 <i>Log damage</i> eje con fisura cúbica nº6.....	227
Ilustración 14. 44 <i>Log life</i> eje con fisura cúbica nº6.....	227
Ilustración 14. 45 <i>Confidence of life</i> eje fisura cúbica nº6.....	228
Ilustración 14. 46 <i>Factor of safety</i> eje fisura cúbica nº6.....	228
Ilustración 14. 47 <i>Log damage</i> eje con fisura cúbica nº7.....	229
Ilustración 14. 48 <i>Log life</i> eje con fisura cúbica nº7.....	229
Ilustración 14. 49 <i>Confidence of life</i> eje fisura cúbica nº7.....	230
Ilustración 14. 50 <i>Factor of safety</i> eje fisura cúbica nº7.....	230
Ilustración 14. 51 <i>Log damage</i> eje con fisura cúbica nº8.....	231
Ilustración 14. 52 <i>Log life</i> eje con fisura cúbica nº8.....	231
Ilustración 14. 53 <i>Confidence of life</i> eje fisura cúbica nº8.....	232
Ilustración 14. 54 <i>Factor of safety</i> eje fisura cúbica nº8.....	232
Ilustración 14. 55 <i>Log damage</i> eje con fisura cúbica nº9.....	233
Ilustración 14. 56 <i>Log life</i> eje con fisura cúbica nº9.....	233
Ilustración 14. 57 <i>Confidence of life</i> eje fisura cúbica nº9.....	234
Ilustración 14. 58 <i>Factor of safety</i> eje fisura cúbica nº9.....	234



Ilustración 14. 59 <i>Log damage</i> eje con fisura cúbica nº10.....	235
Ilustración 14. 60 <i>Log life</i> eje con fisura cúbica nº10	235
Ilustración 14. 61 <i>Confidence of life</i> eje fisura cúbica nº10.....	236
Ilustración 14. 62 <i>Factor of safety</i> eje fisura cúbica nº10	236
Ilustración 14. 63 <i>Log damage</i> eje con fisura cúbica nº11.....	237
Ilustración 14. 64 <i>Log life</i> eje con fisura cúbica nº11	237
Ilustración 14. 65 <i>Confidence of life</i> eje fisura cúbica nº11	238
Ilustración 14. 66 <i>Factor of safety</i> eje fisura cúbica nº11	238
Ilustración 14. 67 Desplazamiento del eje con fisura radial nº1	239
Ilustración 14. 68 Tensión del eje con fisura radial nº1	239
Ilustración 14. 69 Desplazamiento del eje con fisura radial nº2	240
Ilustración 14. 70 Tensión del eje con fisura radial nº2	240
Ilustración 14. 71 Desplazamiento del eje con fisura radial nº3	241
Ilustración 14. 72 Tensión del eje con fisura radial nº3	241
Ilustración 14. 73 Desplazamiento del eje con fisura radial nº4	242
Ilustración 14. 74 Tensión del eje con fisura radial nº4	242
Ilustración 14. 75 Desplazamiento del eje con fisura radial nº5	243
Ilustración 14. 76 Tensión del eje con fisura radial nº5	243
Ilustración 14. 77 Desplazamiento del eje con fisura radial nº6	244
Ilustración 14. 78 Tensión del eje con fisura radial nº6	244
Ilustración 14. 79 Desplazamiento del eje con fisura radial nº7	245
Ilustración 14. 80 Tensión del eje con fisura radial nº7	245
Ilustración 14. 81 Desplazamiento del eje con fisura radial nº8	246
Ilustración 14. 82 Tensión del eje con fisura radial nº8	246
Ilustración 14. 83 Desplazamiento del eje con fisura radial nº9	247
Ilustración 14. 84 Tensión del eje con fisura radial nº9	247
Ilustración 14. 85 Desplazamiento del eje con fisura radial nº10	248
Ilustración 14. 86 Tensión del eje con fisura radial nº10	248
Ilustración 14. 87 Desplazamiento del eje con fisura radial nº11	249
Ilustración 14. 88 Tensión del eje con fisura radial nº11	249
Ilustración 14. 89 <i>Log damage</i> eje con fisura radial nº1	250
Ilustración 14. 90 <i>Log life</i> eje con fisura radial nº1	250
Ilustración 14. 91 <i>Confidence of life</i> eje fisura radial nº1	251
Ilustración 14. 92 <i>Factor of safety</i> eje fisura radial nº1	251
Ilustración 14. 93 <i>Log damage</i> eje con fisura radial nº2	252
Ilustración 14. 94 <i>Log life</i> eje con fisura radial nº2	252
Ilustración 14. 95 <i>Confidence of life</i> eje fisura radial nº2	253
Ilustración 14. 96 <i>Factor of safety</i> eje fisura radial nº2	253
Ilustración 14. 97 <i>Log damage</i> eje con fisura radial nº3	254
Ilustración 14. 98 <i>Log life</i> eje con fisura radial nº3	254
Ilustración 14. 99 <i>Confidence of life</i> eje fisura radial nº3	255
Ilustración 14. 100 <i>Factor of safety</i> eje fisura radial nº3	255
Ilustración 14. 101 <i>Log damage</i> eje con fisura radial nº4	256
Ilustración 14. 102 <i>Log life</i> eje con fisura radial nº4	256



Ilustración 14. 103 <i>Confidence of life</i> eje fisura radial nº4	257
Ilustración 14. 104 <i>Factor of safety</i> eje fisura radial nº4	257
Ilustración 14. 105 <i>Log damage</i> eje con fisura radial nº5	258
Ilustración 14. 106 <i>Log life</i> eje con fisura radial nº5	258
Ilustración 14. 107 <i>Confidence of life</i> eje fisura radial nº5	259
Ilustración 14. 108 <i>Factor of safety</i> eje fisura radial nº5	259
Ilustración 14. 109 <i>Log damage</i> eje con fisura radial nº6	260
Ilustración 14. 110 <i>Log life</i> eje con fisura radial nº6	260
Ilustración 14. 111 <i>Confidence of life</i> eje fisura radial nº6	261
Ilustración 14. 112 <i>Factor of safety</i> eje fisura radial nº6	261
Ilustración 14. 113 <i>Log damage</i> eje con fisura radial nº7	262
Ilustración 14. 114 <i>Log life</i> eje con fisura radial nº7	262
Ilustración 14. 115 <i>Confidence of life</i> eje fisura radial nº7	263
Ilustración 14. 116 <i>Factor of safety</i> eje fisura radial nº7	263
Ilustración 14. 117 <i>Log damage</i> eje con fisura radial nº8	264
Ilustración 14. 118 <i>Log life</i> eje con fisura radial nº8	264
Ilustración 14. 119 <i>Confidence of life</i> eje fisura radial nº8	265
Ilustración 14. 120 <i>Factor of safety</i> eje fisura radial nº8	265
Ilustración 14. 121 <i>Log damage</i> eje con fisura radial nº9	266
Ilustración 14. 122 <i>Log life</i> eje con fisura radial nº9	266
Ilustración 14. 123 <i>Confidence of life</i> eje fisura radial nº9	267
Ilustración 14. 124 <i>Factor of safety</i> eje fisura radial nº9	267
Ilustración 14. 125 <i>Log damage</i> eje con fisura radial nº10	268
Ilustración 14. 126 <i>Log life</i> eje con fisura radial nº10	268
Ilustración 14. 127 <i>Confidence of life</i> eje fisura radial nº10	269
Ilustración 14. 128 <i>Factor of safety</i> eje fisura radial nº10	269
Ilustración 14. 129 <i>Log damage</i> eje con fisura radial nº11	270
Ilustración 14. 130 <i>Log life</i> eje con fisura radial nº11	270
Ilustración 14. 131 <i>Confidence of life</i> eje fisura radial nº11	271
Ilustración 14. 132 <i>Factor of safety</i> eje fisura radial nº11	271



ÍNDICE DE TABLAS Y GRÁFICAS DE RESULTADOS

Tabla 6. 1 Dimensiones de fisuras cúbicas	79
Tabla 6. 2 Dimensiones de fisuras radiales	81
Tabla 10. 1 Ubicación y dimensión. Fisuras cúbicas	113
Tabla 10. 2 Ubicación y dimensión. Fisuras cúbicas	126
Tabla 10. 3 Ubicación y dimensión. Fisuras radiales.....	150
Tabla 10. 4 Ubicación y dimensión. Fisuras radiales.....	163
Tabla 10. 5 Resultados del eje con fisura cúbica. Análisis estático	187
Tabla 10. 6 Resultados del eje con fisura radial. Análisis estático	187
Tabla 10. 7 Resultados del eje con fisura cúbica. Análisis de fatiga	190
Tabla 10. 8 Resultados del eje con fisura radial. Análisis de fatiga.....	190
Tabla 10. 9 Resultados del eje con fisura cúbica y refinamiento de malla. Análisis estático	192
Tabla 10. 10 Resultados del eje con fisura radial y refinamiento de malla. Análisis estático	192
Tabla 10. 11 Resultados del eje con fisura cúbica y refinamiento de malla. Análisis de fatiga ...	195
Tabla 10. 12 Resultados del eje con fisura radial y refinamiento de malla. Análisis de fatiga.....	195



1.- OBJETIVOS Y CONTENIDO

1.1.- OBJETIVOS

1.2.- INTRODUCCIÓN

1.3.- CONTENIDO



1.1.- OBJETIVOS

El gran incremento que está registrando la instalación de trenes de alta velocidad en el curso de los últimos años ha impulsado la fabricación de componentes ferroviarios con propiedades mecánicas mejoradas, capaces de soportar las acciones de servicio, disminuir las operaciones de reposición y mantenimiento y alargar su vida útil.

El análisis de la integridad estructural de los principales componentes ferroviarios tiene por objeto prevenir su fallo en servicio, lo que está estrechamente ligado tanto a la seguridad de la industria ferroviaria como a la disminución de costes.

Se pone así de manifiesto la importancia de realizar investigaciones en este contexto, con objeto de reducir los fallos en servicio y los riesgos asociados de descarrilamiento de los trenes, así como ajustar los costes asociados a estos servicios.

Además, la tendencia en los últimos años también es la de aumentar la densidad del tráfico ferroviario y la carga sobre los ejes, por lo que los citados problemas son cada vez más relevantes.

Este trabajo se ha centrado en el **estudio sobre un eje** de un tren de mercancías. Durante su vida útil se pueden producir diferentes defectos bajo las cargas de servicio que pueden llegar a provocar un fallo catastrófico. De este modo, la integridad estructural de los ejes debe hoy en día analizarse desde una filosofía de diseño de tolerancia al daño, asumiendo que en el curso de su servicio pueden formarse grietas y éstas deben poder ser detectadas antes de que alcancen un tamaño crítico mediante la planificación de programas de inspección apropiados.

El objetivo de este trabajo es aportar nuevos **datos experimentales** sobre **análisis paramétricos de fisuras en ejes ferroviarios**. También se pretende profundizar en el **comportamiento a fatiga** del eje ferroviario para dar una estimación aproximada de la vida del mismo, frente a las diversas circunstancias que vendrán marcadas por los distintos ciclos de carga aplicados y las fisuras generadas sobre la superficie.

Para ello, se ha realizado un exhaustivo análisis con el reciente software instalado en la Universidad Carlos III de Madrid, Pro/Engineer, válido tanto para el modelado 3D como para el análisis del comportamiento a fatiga, teniendo en cuenta la geometría y la presencia de fisuras en la vida útil del eje.



1.2.- INTRODUCCIÓN

Actualmente el ferrocarril, tanto en su uso como transporte de mercancías como de personas, es uno de los medios de transporte más importante y con mayor uso, constituyendo un elemento básico de comunicación territorial y de movilidad de los ciudadanos.

El planeta está rodeado por un amplio entramado de vías y raíles los cuales permiten conseguir una óptima comunicación entre distintos lugares alejados por miles de kilómetros.

Durante la primera mitad del siglo XIX, época de la Revolución Industrial, el ferrocarril gozó de su época de mayor esplendor ya que la red de carreteras de aquellos años no permitía un flujo cómodo y continuo de vehículos. En aquella situación, el ferrocarril cobraba mucha ventaja ya que permitía el transporte de viajeros y mercancías a un bajo costo y se podía realizar de forma regular y segura.

Hoy en día el ferrocarril sigue erigiéndose como uno de los medios de transporte de mayor uso y trascendencia.

Se trata de un transporte con ventajas comparativas en ciertos aspectos, tales como el consumo de combustible por tonelada/kilómetro transportada. Gracias a esta ventaja este tipo de transporte respeta el medio ambiente bastante más que otros medios de transporte de similar capacidad.

La principal característica que distingue este medio de locomoción de otros como los vehículos convencionales es su particular medio de contacto con la vía, el contacto raíl-rueda entre materiales metálicos, a diferencia del contacto convencional entre goma y pavimento. La ventaja más significativa de este tipo de contacto es su bajo coeficiente de rodadura, mucho menor que el coeficiente de rodadura en carretera.

El sistema que sirve de contacto entre el vagón y la vía es llamado tren de rodadura o bogie. Además de transmitir la carga vertical procedente del vagón al rail posee más funciones tales como:

- Sistema direccional del vagón
- Sistema de suspensión
- Vehículo trasmisor de fuerzas de aceleración y frenado, etc.



Son muchas las partes que conforman un bogie. Sin tener en cuenta el sistema de frenado y tracción entre las más importantes podemos incluir:

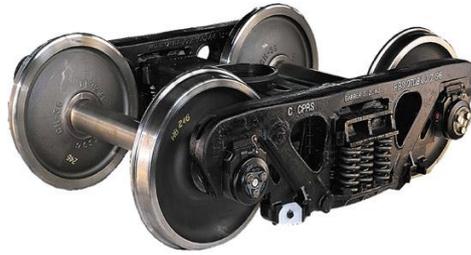


Ilustración 1. 1 Bogie

- **Conjunto formado por eje y rueda:** En el eje se centran las fuerzas de apoyo y carga de todo el vehículo. Consiste en una pieza rodante que soporta el encastre de la rueda y sufre tensiones de todo tipo a lo largo de toda su longitud. Las ruedas constituyen la base fundamental de contacto con el raíl y se encuentran encastradas en dos secciones del eje.

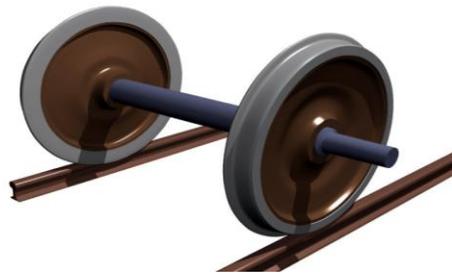


Ilustración 1. 2 Conjunto eje-rueda

- **Cajas de grasa:** Se encuentran situadas en los extremos del eje. Su función es conseguir una óptima rotación entre los miembros metálicos del equipo. Además debe lubricar correctamente las zonas en contacto rotatorio para disminuir el desgaste y la fricción. Para conseguir esta deseada rotación, en el interior de la caja de grasa se alojan cojinetes de rodillos con sus respectivas pistas y anillos de obturación.



Ilustración 1. 3 Caja de grasa



- **Suspensión Primaria:** Situado entre los ejes y el bastidor del bogie, se encuentra el sistema de suspensión primaria. La suspensión primaria se encarga de filtrar las pequeñas vibraciones producidas por las irregularidades transmitidas desde la vía hasta las ruedas, evitando que dicha vibración influya en los demás sistemas del vehículo.

Además del filtrado, la suspensión primaria asegura un correcto reparto de pesos sobre las ruedas, evitando de esta forma la pérdida de contacto entre ambas, que podría desencadenar grandes inestabilidades.

- **Suspensión secundaria:** Al igual que entre los ejes y el bogie se aloja la suspensión primaria para filtrar las vibraciones generadas entre la rueda y el carril, es también necesario un sistema que se encargue de filtrar los movimientos del bogie respecto de la caja del vagón. Esta función la desempeña la suspensión secundaria. Para realizar esta función, la suspensión secundaria se aloja entre el bogie y la caja del vagón.

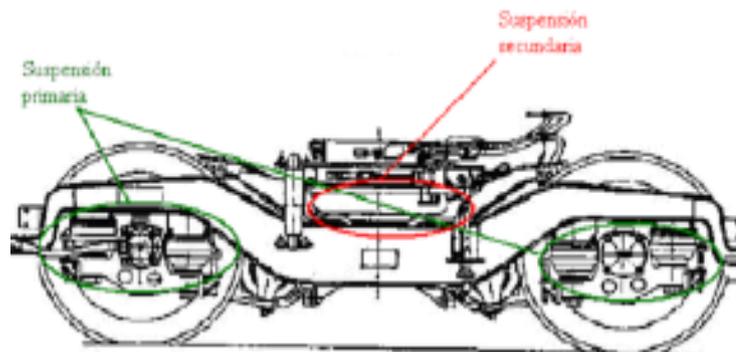


Ilustración 1. 4 Sistema de suspensión

- **Bastidor:** Estructura de acero de fundición que conforma el bogie. Sirve de soporte para todos los elementos del tren de rodadura.



1.3.- CONTENIDO

El contenido de este trabajo se divide en catorce capítulos, siendo el primero de ellos los objetivos del trabajo en el que se detalla el alcance del trabajo.

El segundo y tercer capítulo presentan una introducción al análisis a fatiga a través de los acontecimientos históricos relacionados con este fenómeno, así como la situación actual del mismo en la industria ferroviaria. También se analiza la propagación de grietas y las influencias que incrementan la vida a fatiga.

El cuarto capítulo detalla el entorno, capacidades y ventajas de la herramienta informática empleada: Pro/Engineer Wildfire 5.0. Así como la definición de sus funciones y especificaciones.

Posteriormente, en el capítulo quinto se expone el planteamiento del problema a estudiar. En los capítulos sexto, séptimo y octavo se muestra el modelado, cálculos previos a los análisis realizados en el eje ferroviario y condiciones de contorno.

Seguidamente, en el capítulo noveno se define la configuración de los análisis estáticos y de fatiga, mostrándose los resultados obtenidos en el capítulo décimo.

Por último, en los capítulos finales se recogen las conclusiones alcanzadas, y distintas propuestas de mejora para futuros estudios. También se incluye el presupuesto del proyecto y un capítulo de anexos.



2.- MECÁNICA DE LA FRACTURA

2.1.- INTRODUCCIÓN

2.2.- FUNDAMENTOS DE FRACTURA

2.3.- DEFECTOS Y CONCENTRACIÓN DE TENSIONES

2.4.- MECÁNICA DE LA FRACTURA



2.1.- INTRODUCCIÓN

La mayoría de los sistemas mecánicos están sometidos durante su funcionamiento a cargas variables con el tiempo. La aplicación continuada de estas cargas puede conllevar a la aparición de pequeñas grietas en el material, generalmente en la superficie, que progresan a través de él reduciendo la capacidad portante del componente, pudiendo desembocar en su fractura. Dicho fenómeno se conoce como **fallo por fatiga** y es el responsable de más del 50% de los fallos en componentes mecánicos. Por tanto, una de las consideraciones importantes en el diseño de tales componentes es la vida esperada a fatiga.

El fenómeno de **fatiga** es conocido desde el siglo pasado y debido a su importancia se le ha dedicado una gran atención y esfuerzo investigador. Dicho esfuerzo se ha enfocado tanto a conocer los mecanismos que rigen el propio fenómeno como en el desarrollo de métodos de análisis para ayudar al ingeniero en el problema de diseño. La gran dificultad que presenta la predicción de la duración del proceso de crecimiento de una grieta por fatiga, debido a los numerosos parámetros que influyen en el proceso y dado que algunos de los cuales no son conocidos de forma precisa, hacen que el problema esté aún sin resolver.

Las **propiedades del material y las cargas** son las principales incertidumbres que afectan al proceso de crecimiento de grietas en fatiga. La naturaleza aleatoria de las propiedades del material hace que la vida de crecimiento de grieta de distintos elementos de un mismo material y sometido a cargas idénticas, pueda dar valores significativamente diferentes. En cuanto a las cargas que van a producirse durante la vida de los componentes o estructuras reales, rara vez podrán ser consideradas de amplitud constante, muy al contrario serán normalmente de amplitud variable, en muchas ocasiones de carácter aleatorio o semialeatorio. Este hecho hace necesaria la obtención de un registro de cargas representativo para caracterizar la evolución de las cargas. Este primer paso ya representa en sí un problema complejo, y aún resuelto, dicho registro seleccionado, aunque representativo, no será más que una muestra de todos los posibles de idénticas características estadísticas. Empleando otra historia de carga se obtendrá una vida distinta a la producida con el primer registro.

Por otra parte, los registros de carga empleados tienen normalmente una **longitud finita**, de forma que para el **análisis de la vida a fatiga** de un elemento cualquiera, ya sea mediante simulación o ensayo, se aplica repetidamente hasta que se produce el fallo. Este hecho introduce un efecto de secuencia artificial que puede producir que la vida estimada dependa de la longitud del registro empleado. Así pues, la variabilidad de la vida de crecimiento de grietas por fatiga bajo cargas de amplitud variable dependerá entre otros factores de las características del material, de las características estadísticas de la carga y de la longitud del registro empleado.



Es por tanto de gran importancia determinar, acotar y cuantificar la magnitud de estos efectos. Dicho estudio puede abordarse mediante experimentación o haciendo uso de modelos de simulación.

Las determinaciones experimentales son caras y conllevan un gran consumo de tiempo, de ahí la importancia del desarrollo de **métodos de análisis fiables**. Sin embargo, los análisis de crecimiento se hacen normalmente a partir de datos obtenidos en ensayos con carga de amplitud constante y la extrapolación del conocimiento y de los datos experimentales obtenidos de los casos reales de carga. No se trata por tanto de un problema sencillo. A esto se añade el desconocimiento real de la secuencia de aplicación de las cargas, las cuales necesitan ser definidas estadísticamente, con lo que se produce el denominado efecto de secuencia o de interacción de cargas debido a la irregularidad de las mismas.

El incremento de longitud de grieta en cada incremento de carga está condicionado por la historia previa además de por la longitud de la grieta y los valores máximo y mínimo de tensión en cada ciclo. Los análisis de vida de crecimiento mediante simulación ciclo a ciclo permiten estudiar el comportamiento de una grieta bajo cargas de amplitud variable manteniendo el efecto de secuencia y analizar la variabilidad en la vida que se produce al utilizar distintas historias de carga representativas de un mismo proceso. La mayoría de estos modelos de simulación han sido contrastados mediante ensayos con **cargas de amplitud constante**, y en algunos casos con cargas de amplitud variable.



2.2.- FUNDAMENTOS DE FRACTURA

Los factores que se encuentran con más frecuencia como generadores de fallo o como reductores del tiempo de servicio de los componentes se deben fundamentalmente a diseños defectuosos y a elecciones incorrectas de los materiales, además de los efectos que producen procesos de fabricación inadecuados, tratamientos deficientes, montajes imperfectos o condiciones de servicio diferentes a las proyectadas.

2.2.1. Análisis de fallos

El análisis de fallos en servicio tiene gran importancia, ya que permite lograr un conocimiento real de las posibilidades que presenta cada material para alcanzar determinadas aplicaciones. Analizar los fallos en servicio es muy complejo, pues en muchos casos las circunstancias por las que se producen son ajenas al componente en el que ha tenido lugar el fallo e incluso al mecanismo por el que se ha producido.

2.2.2. Clasificación de los fallos

Existe una amplia gama de clasificaciones de fallo, de manera que todos entren dentro de algún grupo y eso ayude a analizarlos correctamente. A continuación se presentan los que tienen que ver con los distintos tipos de solicitaciones mecánicas que se dan durante el tiempo en servicio y con el tipo de fractura que se observa en el componente.

2.2.2.1. Según la solicitación

Los fallos se pueden clasificar según el modo de aplicación de la carga y el tipo de solicitación que los provocan. La carga puede ser estática o variable.

- En el caso de carga estática, el componente puede encontrarse bajo tracción, compresión, torsión, cizalladura o cualquiera de las posibles combinaciones entre ellas. Las fracturas que se producen con este tipo de cargas también son estáticas, viéndose muy afectadas por la temperatura alcanzada y por el tiempo de servicio.
- En el caso de carga variable, si además ésta se repite cíclicamente, la fractura será dinámica y se medirá el número de ciclos en el que varían las cargas. Si se combinan de manera necesaria la carga, el tiempo y la temperatura, se puede llegar a producir la fluencia del material.



2.2.2.2. Según el tipo de fractura

Otra posible clasificación corresponde al tipo de fractura, que puede presentar tres órdenes de magnitud diferentes: nivel atómico, nivel microscópico y nivel macroscópico.

- A **nivel atómico**, el comportamiento del material se puede analizar mediante la teoría de dislocaciones para todos aquellos fenómenos de deformación. Desde el punto de vista del análisis de los fallos que se producen en servicio, apenas aporta algo a efectos prácticos, aunque es necesario conocer la existencia de los planos de deslizamiento y el papel que juegan en el desarrollo de la deformación plástica, como consecuencia del deslizamiento de una parte del cristal sobre otra antes de alcanzar la fractura. Los planos de deslizamiento son los de mayor densidad atómica, existiendo direcciones preferenciales de deslizamiento, que son las más compactas del plano. Si la fractura se produce a través de las fronteras de grano, la influencia que ejercen los distintos tipos de partículas precipitadas sobre ellas tiene una gran trascendencia en el proceso de fractura.

- A **nivel microscópico**, las fracturas se pueden clasificar en dos grandes grupos: transcristalinas e intercristalinas. La fractura intercristalina consiste básicamente en la descohesión entre granos a través de sus bordes; previamente a la fractura, además, los granos pueden experimentar microdeformación plástica en sus superficies. Las fracturas transcristalinas, por su parte, se pueden dividir en una serie de grupos que dependen de los distintos mecanismos de fractura o del aspecto morfológico que presenta la propia superficie de rotura que, a su vez, también depende del tipo de esfuerzos experimentados o de las características intrínsecas del material.

- Finalmente, a **nivel macroscópico** se pueden distinguir los siguientes grupos de fracturas:

Dúctil por carga estática: Este tipo de fractura implica deformación plástica por deslizamiento, produciéndose gran absorción de energía y elevado alargamiento. En función del tipo de carga puede ser de tracción, de flexión, de cizalladura o de torsión.

Frágil por carga estática: Se produce por el crecimiento de grietas en planos normales a la dirección de la carga, caracterizándose por presentar escasa deformación plástica.

Frágil por carga estática mantenida: Se distingue entre corrosión-tensión, fragilización por hidrógeno, fragilización por metal líquido y fragilización por irradiación neutrónica.

Fatiga: Se dividen: en alto y bajo número de ciclos cuando sólo se tiene en cuenta el efecto mecánico; y en fatiga-corrosión y fatiga-temperatura, cuando se combinan los esfuerzos mecánicos que tienen lugar por fatiga con la corrosión o temperatura.



2.2.3. Mecanismos de fractura

En los materiales ingenieriles se estudian básicamente dos tipos de fractura: frágil y dúctil. Esta clasificación está basada en la capacidad del material para experimentar deformación plástica, como se puede apreciar en la ilustración 2.1.

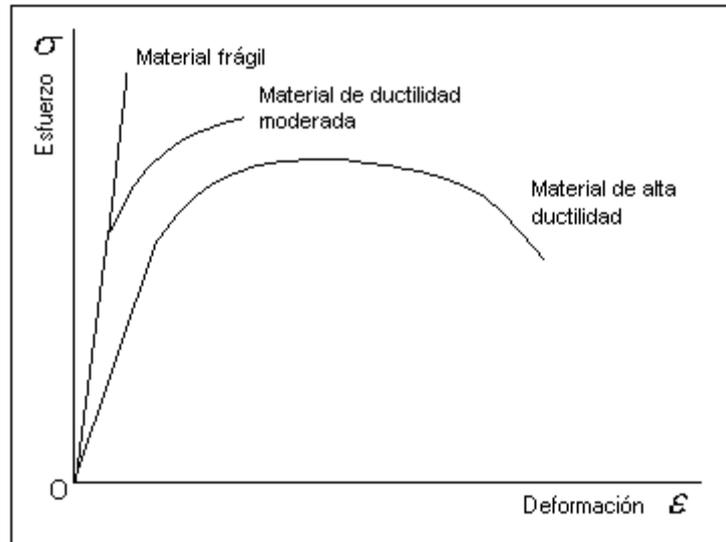


Ilustración 2. 1 Diagrama Esfuerzo-Deformación para materiales dúctiles y frágiles

A continuación se desarrollan las diferencias entre estos dos tipos de fractura.

2.2.3.1. Fractura frágil

La fractura frágil ocurre sin apreciable deformación plástica, y por propagación rápida de una grieta o fisura. La dirección del movimiento de la grieta es casi perpendicular a la dirección de la tensión aplicada y produce una superficie de fractura relativamente plana.

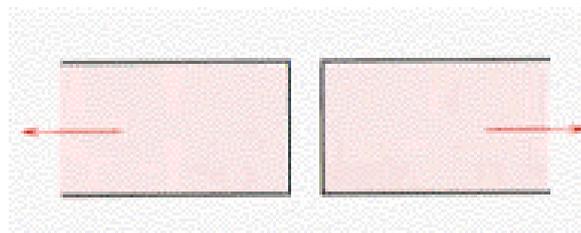


Ilustración 2. 2 Esquema de una fractura frágil sin ninguna deformación plástica



2.2.3.2. Fractura dúctil

Las superficies de fracturas dúctiles tienen sus propios rasgos tanto a nivel macroscópico como microscópico. La siguiente figura muestra esquemáticamente dos perfiles macroscópicos característicos de esta fractura.

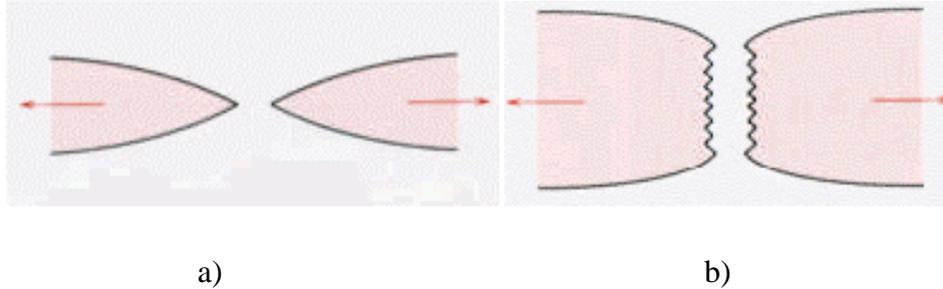


Ilustración 2. 3 Esquema de una fractura muy dúctil (a) y una moderadamente dúctil después de una cierta estricción (b)

La configuración mostrada en la ilustración 2.3 a) se encuentra en metales muy blandos, tales como oro y plomo a temperatura ambiente, y en otros metales, polímeros y vidrios inorgánicos a temperaturas elevadas. Estos materiales son muy dúctiles y se rompen cuando la estricción se reduce prácticamente a un punto, presentando una reducción de área virtualmente igual al 100%. Sin embargo, el tipo más común de perfil de fractura a tracción en los materiales dúctiles es el representado en la ilustración 2.3 b). Este tipo de fractura es precedida solo por una cantidad moderada de estricción.

2.3.- DEFECTOS Y CONCENTRACIÓN DE TENSIONES

La fractura frágil de materiales normalmente dúctiles, como los mencionados en el Capítulo 2.2, ha puesto de manifiesto la necesidad de un mejor conocimiento de la **mecánica de la fractura**.

El conocimiento adquirido permite la cuantificación de la relación entre las propiedades de los materiales, los niveles de tensión, la presencia de defectos que producen grietas y los mecanismos de propagación de éstas.

2.3.1. Concentración de tensiones

La resistencia a la fractura experimental de la mayoría de los materiales de ingeniería es normalmente entre 10 y 1000 veces menor que el valor teórico. En la década de los años veinte, A. A. Griffith propuso que esta discrepancia entre la resistencia cohesiva teórica y la experimental podía ser explicada por la presencia de grietas microscópicas.

Estos defectos afectan a la resistencia a la fractura debido a que una tensión aplicada puede ser amplificada o centrada en la punta del defecto, en un grado que depende de la orientación de la grieta y de la geometría. En estos casos la magnitud de la tensión localizada disminuye con la distancia a la punta de la grieta.

Suponiendo que la grieta tiene una forma elíptica y está orientada con su eje mayor perpendicular a la tensión aplicada σ_0 , la tensión máxima en el extremo de la grieta σ_m puede ser aproximada mediante la siguiente ecuación:

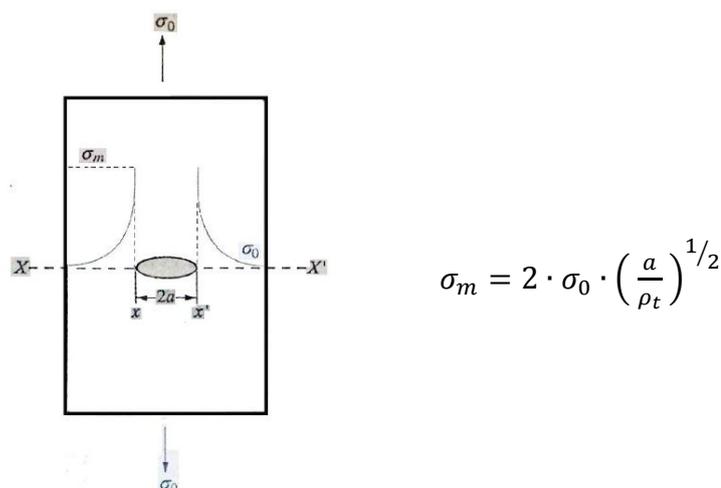


Ilustración 2.4 Localización de la tensión máxima en la grieta



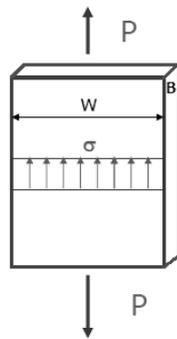
Donde ρ_t es el radio de curvatura de la punta de la grieta, y a representa la longitud de una grieta superficial, o bien la mitad de la longitud de una grieta interna.

El cociente σ_m/σ_0 se suele denominar **factor de concentración de tensiones** K_t . El factor de concentración de tensiones K_t es simplemente una medida del grado con que una tensión externa es amplificada en el extremo de una grieta pequeña.

2.4.- MECÁNICA DE LA FRACTURA

2.4.1. Criterios de diseño

En el caso del estudio de **componentes sin defectos**, el criterio convencional dice que un componente resistirá las cargas aplicadas siempre que la tensión aplicada, σ , sea menor que la resistencia del material, σ_R .

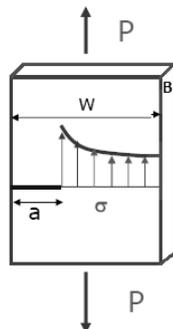


Tensión media aplicada: $\sigma = \frac{P}{W \cdot B}$

Criterio de diseño: $\sigma < \sigma_R$

Ilustración 2. 5 Criterio convencional de diseño en un componente sin defectos

Sin embargo, esta hipótesis no tiene validez en un **componente fisurado**, puesto que estos materiales fallan bajo la aplicación de cargas inferiores a la tensión de rotura del material.



Tensión media aplicada: $\sigma = \frac{P}{(W-a) \cdot B}$

Criterio de diseño: $K < K_C$

Ilustración 2. 6 Criterio convencional de diseño en un componente fisurado

Este fenómeno obliga a buscar alternativas a los criterios convencionales de diseño desarrollándose los criterios de fractura.



2.4.2. Criterios de fractura

Como se ha visto en el apartado anterior, para el caso de piezas fisuradas el estudio se centra en el criterio de fractura: $K < K_C$. A continuación se definen estos dos parámetros:

- K representa el **Factor de intensidad de tensiones**, el cual depende de las solicitaciones a las que está sometida la pieza, la geometría de la misma y su fisura, como muestra la siguiente expresión:

$$K = \beta \cdot \sigma \cdot \sqrt{\pi a}$$

Donde β es un parámetro adimensional que depende de la geometría de la pieza y de la grieta, y a es la longitud de fisura.

- Por otro lado, K_C representa la **Tenacidad de fractura del material**. Mide la resistencia de un material a la fractura frágil cuando una grieta está presente. Este valor depende del espesor de la probeta, de la temperatura y de la velocidad de sollicitación durante el ensayo.

2.4.3. Modos de fractura

La propagación de fisuras puede producirse de tres modos diferentes.

El primero de ellos, Modo I, representado en la ilustración 2.7, se denomina **modo de apertura** y se caracteriza porque los labios de la fisura se desplazan en la dirección perpendicular al plano de la fisura en sentidos opuestos.

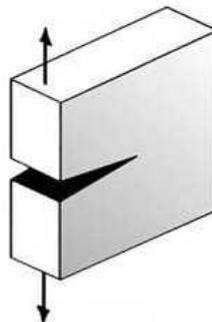


Ilustración 2.7 Modo de apertura



En el segundo modo de propagación de fisuras, **modo de deslizamiento**, los labios de la fisura se desplazan por el plano de la misma en dirección longitudinal y sentidos opuestos, tal y como se muestra en la imagen mostrada a continuación.

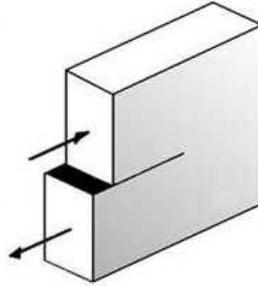


Ilustración 2. 8 Modo de deslizamiento

Por último, en el **modo de desgarro**, los labios de la fisura se desplazan por el plano de la misma en la dirección transversal y en sentidos opuestos, ilustración 2.9.

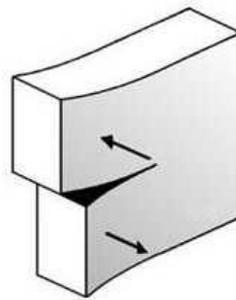


Ilustración 2. 9 Modo de desgarro

En la práctica, un cuerpo fisurado puede estar sometido a cualquiera de estos tres modos, o combinación de dos o tres de ellos, siendo el Modo I el más habitual e importante, especialmente en los sólidos frágiles, ya que una grieta en un material de esta naturaleza tiende a buscar la orientación que minimiza la tensión de corte.



3.- FATIGA EN ELEMENTOS MECÁNICOS

3.1.- FUNDAMENTOS DE FATIGA

3.2.- DIAGRAMA DE FATIGA S-N (STRESS - NUMBER OF CYCLES)

3.3.- COEFICIENTES MODIFICATIVOS DEL LÍMITE DE FATIGA

3.4- ESFUERZOS FLUCTUANTES

3.5.- DAÑO ACUMULATIVO

3.1.- FUNDAMENTOS DE FATIGA

Cuando un componente estructural se encuentra sometido a tensiones variables con el tiempo puede fracturarse a tensiones mucho menores que aquellas que podría soportar bajo la aplicación de una carga estática. Dado que los elementos de máquina están con frecuencia sometidos a este tipo de solicitaciones, y que en la práctica totalidad de los casos su efecto es más perjudicial que el de las solicitaciones estáticas, el **análisis del fenómeno de fatiga** es de importancia decisiva para el diseño mecánico.

3.1.1. Características de la rotura por fatiga

Es evidente que el origen de la rotura por fatiga se produce en un punto de concentración de tensiones en la superficie de rotura.

La apariencia de la superficie de fractura de un elemento por fatiga aporta muchas veces información sobre las condiciones de trabajo y de la rotura del mismo. Examinándola se suelen distinguir varias partes más o menos claramente diferenciadas. La ilustración 3.1 muestra un ejemplo clásico de la rotura por fatiga de un eje.

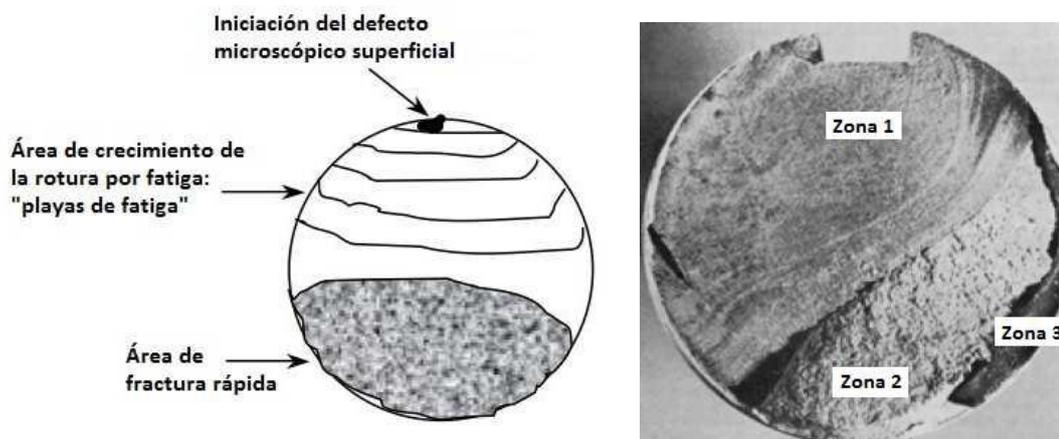


Ilustración 3.1 Zonas diferenciadas en la superficie de fractura de un eje por fatiga

En esta figura se observan tres zonas diferentes:

- Zona 1: Es la zona con más sección, corresponde a la propagación lenta de la grieta (fuente de concentración de tensiones). Suele tener un aspecto liso y a veces es posible distinguir la propagación de la grieta ciclo a ciclo (cada línea o estría de la figura) una vez rota la pieza. La mayor o menor nitidez con las que aparecen estas líneas o estrías dependen de la naturaleza del material.



- Zona 2: Corresponde al crecimiento rápido de la grieta, presentando una superficie irregular, cubre casi el resto de la sección del eje.
- Zona 3: Finalmente, la sección neta de la pieza queda tan reducida que es incapaz de resistir la carga desde un punto de vista puramente estático, produciéndose la rotura final en un ciclo de carga.

3.1.2. Estadios de fatiga

La historia de una grieta que se desarrolla en un componente sometido a fatiga tiene típicamente **tres etapas**: una etapa de iniciación, una de propagación estable y finalmente una de propagación acelerada que conduce al fallo del componente.

3.1.2.1. ESTADIO I: Iniciación

Habitualmente en la superficie se encuentran zonas con altas cargas alternadas que producen deformaciones plásticas en los granos próximos a la superficie. Esta deformación se localiza en bandas persistentes de deslizamiento.

Cuando un grano, situado en la superficie, se deforma, se genera un escalón en dicha superficie, que inmediatamente se oxida.

Una vez oxidada la superficie del escalón resulta imposible invertir la deformación en ese plano. La deformación en sentido contrario deberá acontecer en otro plano, que obviamente forma otro escalón que se oxida y suprime la deformación en este nuevo plano.

La repetición de este ciclo de deformación, oxidación y bloqueo acaba por formar protuberancias o entrantes en la superficie original del sólido que concentra tensiones. La situación se agrava y termina por aparecer una microgrieta a partir de estos defectos superficiales que se propagan a lo largo de las bandas persistentes de deslizamiento (formando 45° con la dirección de tracción).

En este estadio la microgrieta tiene gran dificultad para atravesar los bordes de grano, y a menudo, solo consigue progresar un grano y ahí se detiene. Si la carga es algo más alta o con suficiente número de ciclos, se reinicia la propagación en el grano adjunto.

3.1.2.2. ESTADIO II: Propagación estable

A medida que crece la grieta, pronto descubre que su dirección de crecimiento no es óptima y que su propagación requiere un menor trabajo si se orienta perpendicular al campo tractivo (modo I). Habitualmente la reorientación de la grieta ocurre cuando la microgrieta ha atravesado unos pocos granos en el material (Ilustración 3.2).

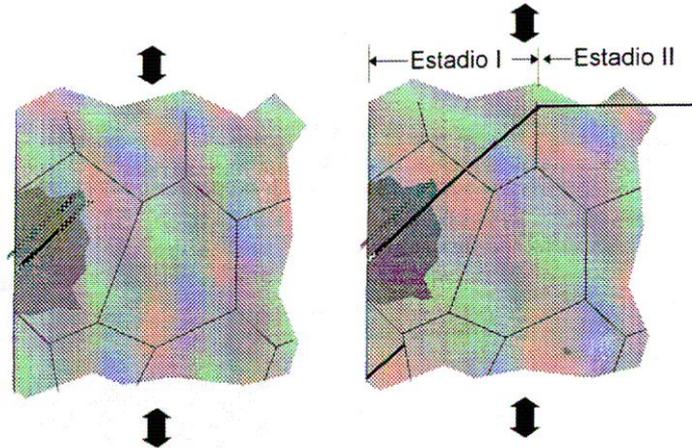


Ilustración 3. 2 Reorientación de la grieta al Modo I en el Estadio II de fatiga

A partir de este momento su propagación es estable y se ajusta a una ley potencial de intensidad de tensiones, de acuerdo a la ley empírica que propusieron *Paris y Erdogan* (1960):

$$\frac{da}{dN} = C \cdot \Delta K_I^m$$

Donde a es el tamaño de la fisura, N el número de ciclos y C y m son constantes que dependen del material y del medio ambiente. ΔK_I es el rango del factor de intensidad de tensiones, calculado como:

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

K_{max} y K_{min} son los valores máximo y mínimo respectivamente del factor de intensidad de tensiones durante un ciclo de tensión. Como se ha comentado en el capítulo anterior, dependen de la geometría de la probeta y de la longitud de la fisura.

A medida que crece el tamaño de la grieta, si las tensiones alternantes son constantes, aumenta ΔK_I y en consecuencia su velocidad de crecimiento: da/dN .



3.1.2.3. ESTADIO III: Propagación acelerada

Cuando la fisura alcanza un valor determinado conocido como tamaño crítico de fisura, la propagación se convierte en catastrófica: la pieza rompe por clivaje o por coalescencia de microcavidades.

Este último estadio de la fatiga, en general, carece de interés: la velocidad de crecimiento es tan grande que el número de ciclos consumidos en el Estadio III apenas cuenta en la vida de la pieza.

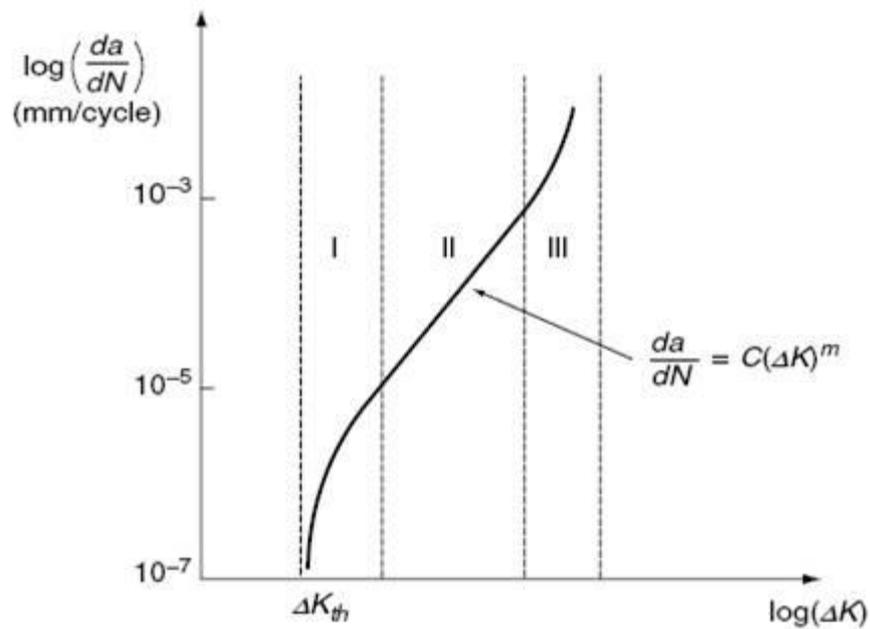


Ilustración 3. 3 Ritmo de crecimiento de grieta frente a ΔK

3.2- DIAGRAMA DE FATIGA S-N

Al principio del estudio de la rotura por fatiga de elementos mecánicos se supuso que el origen de la misma se encontraba en alguna imperfección del material (discontinuidades, oclusiones, etc.). Para poder estudiar el fenómeno de fatiga se diseñó un ensayo en el cual se sometía una probeta de sección circular a un esfuerzo de flexión fijo y se ponía a girar.

De esta forma y normalizando las características geométricas de la probeta y ambientales del laboratorio surgió el **ensayo de viga rotatoria**.

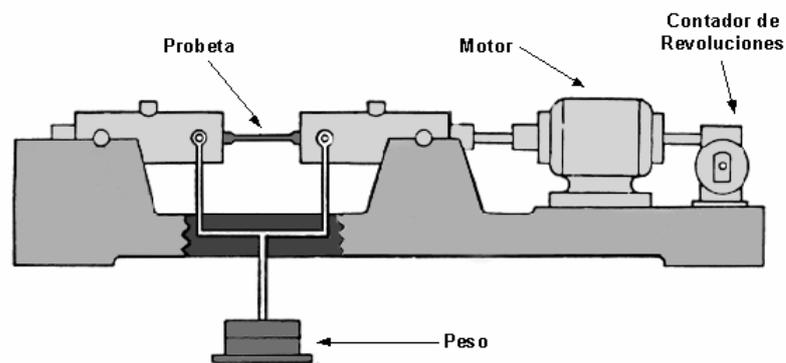


Ilustración 3. 4 Máquina empleada en el ensayo de viga rotatoria a fatiga

Realizando este ensayo múltiples veces (mínimo 8 ensayos) y modificando el esfuerzo de flexión, obtenemos el número de ciclos que dura la probeta.

La curva obtenida es la llamada curva de *Wöhler*, curva de fatiga o simplemente curva S-N, que representa la duración de la probeta, expresada en número de ciclos hasta la rotura, N , en función de la tensión aplicada.

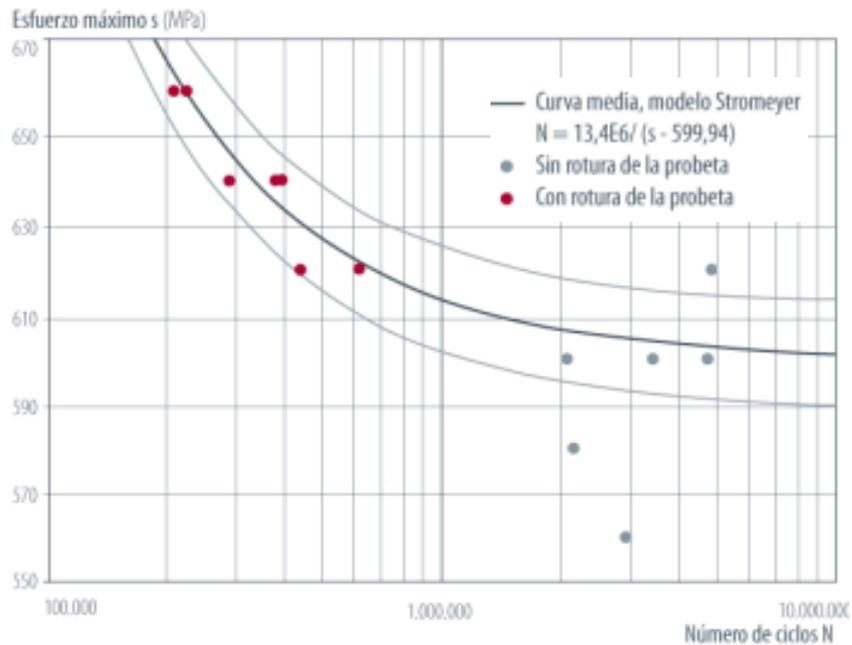


Ilustración 3. 5 Curva de Wöhler correspondiente a la calidad S700MC AM FCE

El esfuerzo que se registra en el eje de ordenadas se corresponde con la carga constante de flexión que se aplica a la probeta. Para esa carga, se anota el número de revoluciones de la viga que se requieren hasta el fallo, obteniendo así un punto del diagrama. Se continúa procediendo de la misma manera pero disminuyendo la carga aplicada a la probeta hasta conseguir la curva completa.

3.2.1. Zonas en el diagrama de fatiga

El diagrama de fatiga en los materiales férreos suele tener **tres zonas** claramente diferenciadas, como puede verse en la ilustración 3.6.

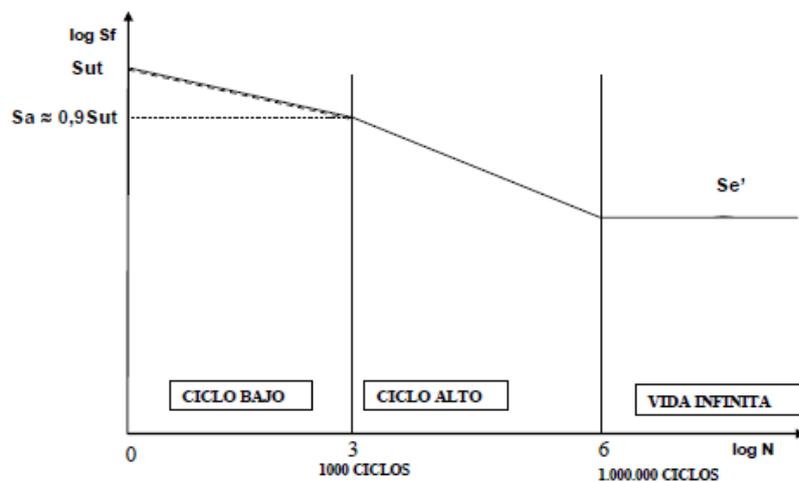


Ilustración 3. 6 Diagrama de fatiga o curva S-N



- **Zona de ciclo bajo:** Se sitúa normalmente por debajo de los 10^3 o 10^4 ciclos, dependiendo de los autores. En esta zona el material se comporta de manera muy similar a como lo hace frente a cargas estáticas, pero con una leve reducción de la resistencia.

- **Zona de ciclo alto:** Hasta 10^6 o 10^7 ciclos para los aceros, según algunos autores. Esta zona muestra una reducción mucho más brusca con la duración, al mismo tiempo se comprueba que el material se comporta de manera diferente a como lo hace frente a cargas estáticas.

- **Zona de vida infinita:** Existe un valor de la tensión por debajo del cual la duración de la probeta es infinita, es decir, no se rompe. La tensión a la que se produce este efecto se conoce como límite de fatiga de la viga rotatoria o **límite de fatiga sin corregir (S_e')**.

A lo largo de los años se ha tratado de buscar, mediante la relación de numerosos ensayos, correlaciones entre los valores de la resistencia a rotura en tracción (S_{ut}) y del límite de fatiga de la probeta rotatoria (S_e'). Dependiendo del material, se pueden admitir las siguientes aproximaciones:

- Hierros y aceros forjados:

$$S_e' = 0.5 \cdot S_{ut} \quad S_{ut} \leq 1400MPa$$

$$S_e' = 700MPa \quad S_{ut} \geq 1400MPa$$

- Aceros colados:

$$S_e' = 0.45 \cdot S_{ut} \quad S_{ut} \leq 600MPa$$

$$S_e' = 275MPa \quad S_{ut} \geq 600MPa$$



3.3.- COEFICIENTES MODIFICATIVOS DEL LÍMITE DE FATIGA

Los valores de la resistencia y el límite de fatiga comentados en el apartado anterior son válidos para las condiciones que indican los protocolos de los ensayos normalizados. Estas probetas son de reducido tamaño, cuidadosamente construidas, pulidas y montadas en la máquina de ensayos.

Además, las condiciones ambientales durante el ensayo también están controladas, se cuida con especial atención que no se introduzcan efectos de carga no deseados, como por ejemplo los debidos a vibraciones inducidas por el motor de arrastre o del soporte, etc.

Sin embargo, una pieza cualquiera de una máquina tiene un tipo de construcción y una forma de trabajo que no se parecen casi nunca a las de la probeta. Es por ello por lo que en la práctica se recurre a la utilización de **coeficientes modificativos**, empíricamente obtenidos, para adaptar o ajustar los valores del comportamiento a fatiga de las probetas a los de cada pieza.

El resultado de la aplicación de estos factores es la obtención del **límite de fatiga corregido S_e** , que se define como el valor de la tensión alternante máxima que permite conseguir una vida infinita del mismo en las condiciones de funcionamiento.

La ecuación que relaciona el límite de fatiga en el ensayo de vida rotatoria S_e' , el límite de fatiga corregido (S_e) y los factores modificativos del límite de fatiga K_i se denomina **Ecuación de Marín**.

$$S_e = \prod_i K_i \cdot S_e'$$

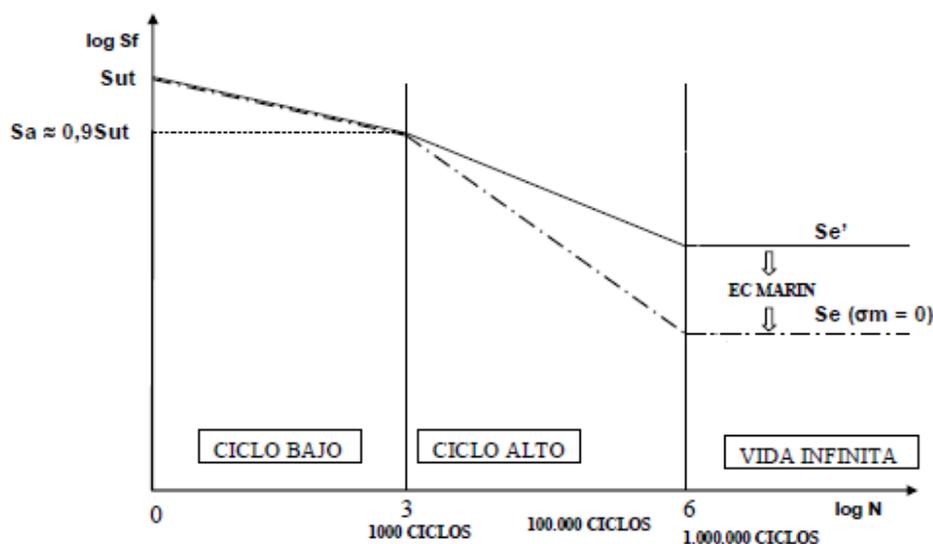


Ilustración 3. 7 Curva S-N de una pieza real sometida a tensión alternante con tensión media nula



Los coeficientes K_i (obtenidos experimentalmente) son los siguientes:

- K_a : Factor de acabado superficial
- K_b : Factor de tamaño
- K_c : Factor de confiabilidad
- K_d : Factor de temperatura
- K_e : Factor de concentración de tensiones
- K_f : Factor de efectos diversos

En numerosas ocasiones, los grupos de ingeniería con experiencia saben estimar de forma empírica un valor aceptable de estos factores de forma global, junto con un coeficiente de seguridad apropiado.

En ausencia de esa experiencia, lo más conveniente es utilizar los valores recomendados, y finalmente, en la fase de ensayo de prototipos y en la observación del comportamiento de las piezas en servicio, corroborar si la elección realizada ha sido adecuada o no.

A continuación se desarrollan cada uno de esos factores.

3.3.1. Factor de acabado superficial: K_a

La superficie de una probeta de viga rotatoria está muy pulida y además se le da un pulido final en la dirección axial para eliminar cualquier ralladura circunferencial. El factor de modificación depende de la calidad del acabado superficial y de la resistencia última del material.

La explicación de la reducción del límite de fatiga por el acabado superficial es que debido a la existencia de **rugosidad** en la superficie de la probeta se produce un fenómeno de concentración de tensiones en la misma. El valor de K_a se obtiene de la siguiente correlación:

$$K_a = a \cdot S_{ut}^b$$

Donde a y b se obtienen de la Tabla 3.1.



Acabado superficial	Coefficiente a (MPa)	Exponente b
Pulido	1	0
Acabado fino (esmerilado, rectificado,)	1.58	-0.085
Mecanizado sin acabar/estirado en frío	4.51	-0.265
Laminado en caliente	57.7	-0.718
Forjado	272	-0.995

Tabla 3. 1 Coeficientes a y b en función del acabado superficial

El factor Ka se puede obtener también directamente de la siguiente gráfica:

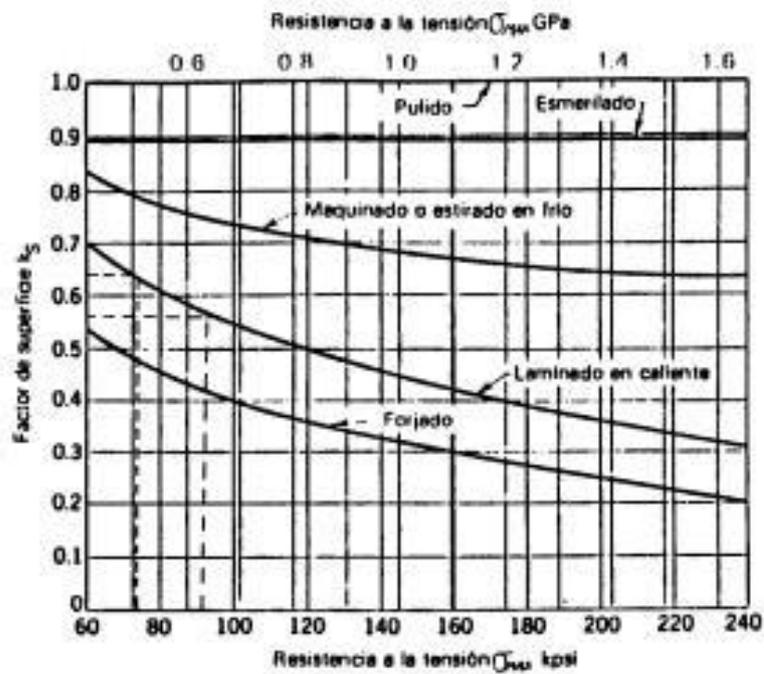


Ilustración 3. 8 Factores de modificación de acabados superficiales



3.3.2. Factor de tamaño: K_b

Los diámetros de las probetas normalizadas de los ensayos son de 7,5 y 12,5 mm. Obviamente, los ejes que se quieran estudiar tienen valores de diámetros muy diferentes, presentándose la tendencia general que, **cuanto mayor es el diámetro, menor es el límite de fatiga**.

Para el cálculo de este factor de tamaño se deben tener en cuenta las siguientes consideraciones:

a) En el caso de **carga axial**, según algunos autores $K_b=1$ para cualquier diámetro. Sin embargo para otros se tiene que:

$$K_b = 1 \quad d < 10mm$$

$$K_b = 0.6 - 0.7 \cdot d \text{ (según excentricidad)} \quad d \geq 10mm$$

b) En el caso de que la probeta esté sometida a **flexión o a torsión**, el factor de tamaño se calcula por medio de las siguientes ecuaciones, en función del diámetro:

$$K_b = \left(\frac{d}{7.62}\right)^{-0.1133} \quad 2.79 \leq d \leq 51mm$$

$$K_b = 1.189 \cdot d^{-0.097} \quad 52 \leq d \leq 250mm$$

c) Por último, puede darse el caso de que el elemento mecánico sometido a estudio **no** tenga **sección circular**, en este caso se procede a calcular el diámetro efectivo. Este **diámetro efectivo** se determina a partir del $A_{0.95}$, que se define como: el área limitada por los puntos de la sección que en algún momento están sometidos a una tensión mayor o igual que el 95% del máximo absoluto.

En el caso de una pieza con sección rectangular, este área se corresponde con la parte coloreada de la figura:



$$A_{0.95} = 0.05 \cdot h \cdot b$$



Teniendo en cuenta que el área del 95% del esfuerzo de una sección circular de diámetro d_e sometida a flexión rotatoria, viene dada por:

$$A_{0.95} = \frac{\pi}{4} [d_e^2 - (0.95 \cdot d_e)^2] = 0.0766 \cdot d_e^2$$

Igualando las dos expresiones, se obtiene el **diámetro efectivo**:

$$d_e = \sqrt{\frac{0.05}{0.076} \cdot h \cdot b} = 0.808\sqrt{h \cdot b}$$

Una vez calculado el diámetro efectivo se podría calcular el factor de tamaño con las correlaciones antes descritas.

3.3.3. Factor de confiabilidad: K_c

Como ya se ha comentado es importante considerar el carácter probabilístico de los ensayos realizados para obtener las curvas S-N, por esta razón, existe el factor modificativo de confiabilidad, que permite de forma analítica cuantificar esta **probabilidad de fallo**.

Los valores de K_c en función de la confiabilidad se presentan en la siguiente tabla:

Confiabilidad	Factor de confiabilidad K_c
0.5	1
0.9	0.897
0.95	0.868
0.99	0.814
0.999	0.753
0.9999	0.702
0.99999	0.659
0.999999	0.620
0.9999999	0.584
0.99999999	0.551
0.999999999	0.520

Tabla 3. 2 Factor de confiabilidad



3.3.4. Factor de temperatura: K_d

La temperatura modifica las **propiedades mecánicas** de los materiales, además de la resistencia a fluencia, resistencia a fatiga y resistencia última.

La obtención del K_d resulta muy complicada, se recomienda la realización de pruebas en el laboratorio para su obtención. A continuación se presentan algunas correlaciones válidas para su cálculo.

$$K_d = 1 \quad T \leq 450^{\circ}C$$

$$K_d = 1 - 5.8 \cdot 10^{-3} \cdot (T - 450) \quad 450^{\circ}C \leq 550^{\circ}C$$

3.3.5. Factor de concentración de tensiones: K_e

Resulta muy común encontrar elementos mecánicos con agujeros, ranuras, chavetas, y otra serie de **discontinuidades** que alteran la distribución del esfuerzo. La influencia que pueden llegar a tener estas discontinuidades se evalúa mediante el factor de concentración de tensiones.

Adicionalmente es importante indicar que la **naturaleza del material** influye en la necesidad de tener en cuenta este factor, diferenciando así el estudio de un material dúctil de otro frágil.

Por un lado, un material perfectamente **dúctil** bajo cargas dinámicas, a pesar de ser capaz de deformarse plásticamente, no dispone del tiempo necesario para hacerlo, y por ello es necesario considerar el efecto de la concentración de tensiones. Sin embargo, si este mismo material se encuentra sometido a cargas estáticas el efecto de la concentración de tensiones se considerará nulo.

Si el material es **frágil**, alrededor de la entalla la concentración de tensión alcanza valores muy elevados. El tipo de rotura es frágil, no va precedida de deformación plástica, por lo que es muy peligrosa. En este caso es necesario considerar el efecto de concentración de tensiones tanto bajo cargas dinámicas como estáticas.

La **evaluación del factor K_e** se realiza siguiendo los pasos que se desarrollan a continuación:



a) Cálculo de K_t (factor de concentración de tensiones teórico) por configuración geométrica. Con las siguientes gráficas a modo de ejemplo.

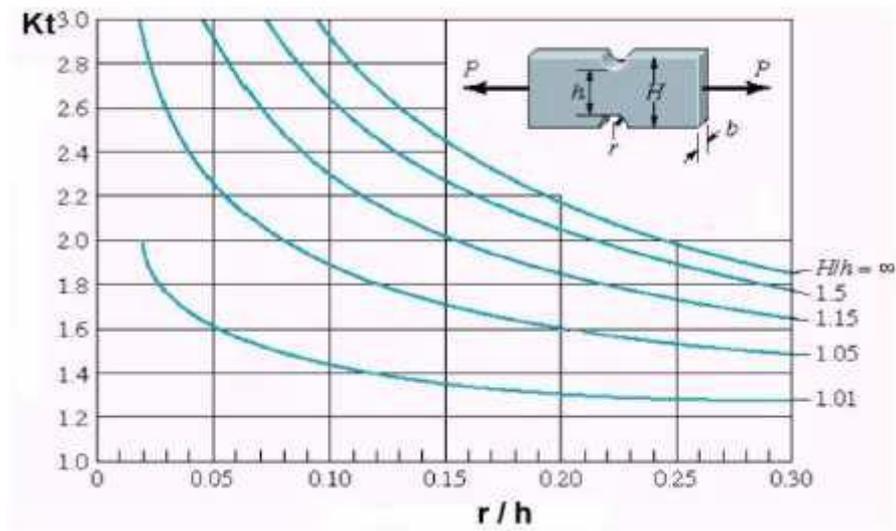


Ilustración 3. 9 Barra de sección rectangular con dos muescas sometida a tensión o compresión simple.

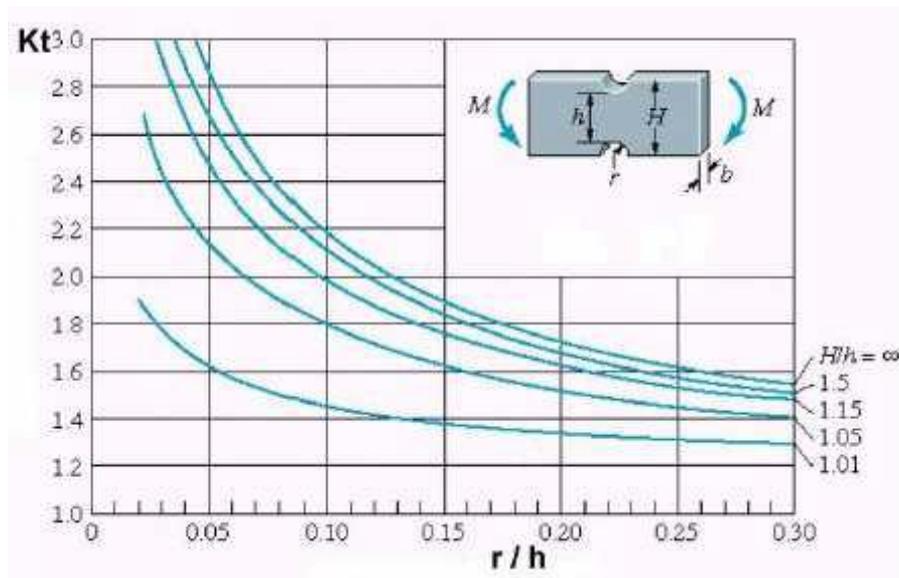


Ilustración 3. 10 Barra de sección rectangular con dos muescas sometida a flexión

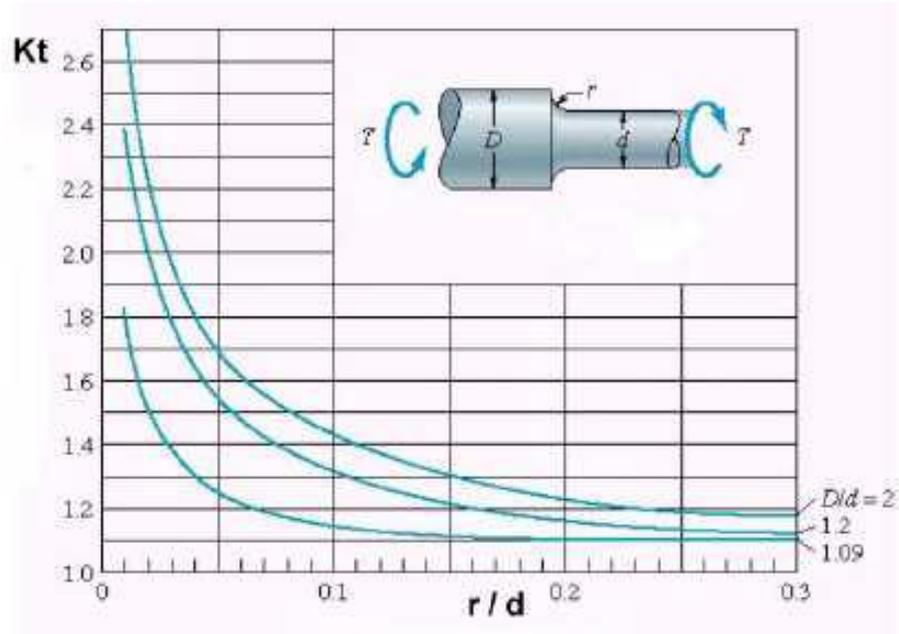


Ilustración 3. 11 Barra de sección circular con estrechamiento y entalles en torsión

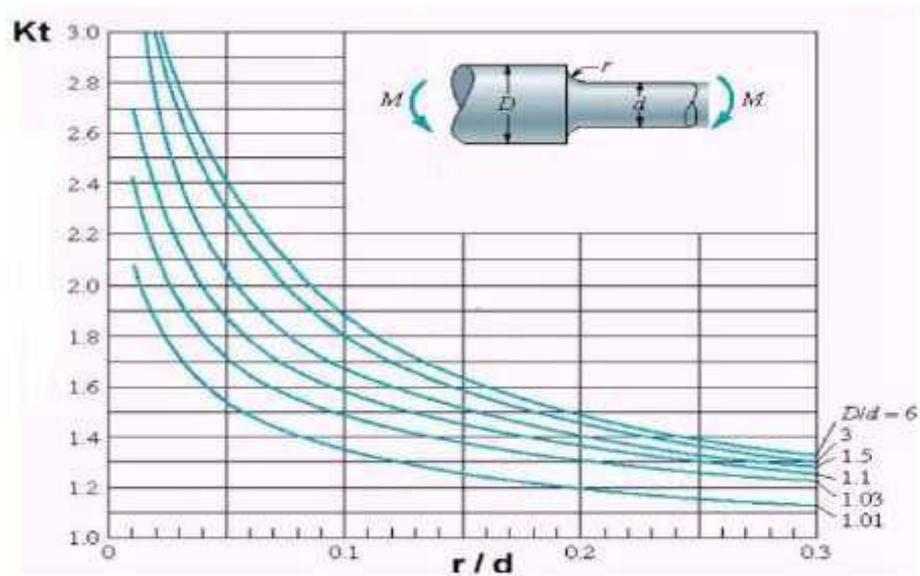


Ilustración 3. 12 Barra de sección circular con estrechamiento y entalles en flexión

Como se observa en estas gráficas, el factor K_t depende tanto de la forma geométrica del elemento (sección circular, rectangular), como del tipo de discontinuidad (agujeros transversales, muescas, estrechamientos de sección), y del tipo de esfuerzo al que se ven sometidos (tracción simple, flexión simple, torsión).



b) Especificando el material se obtiene q : **factor de sensibilidad a las ranuras**. Con ayuda de las gráficas de las ilustraciones 3.13 y 3.14, en función de la naturaleza de las cargas a las que esté sometido el elemento mecánico.

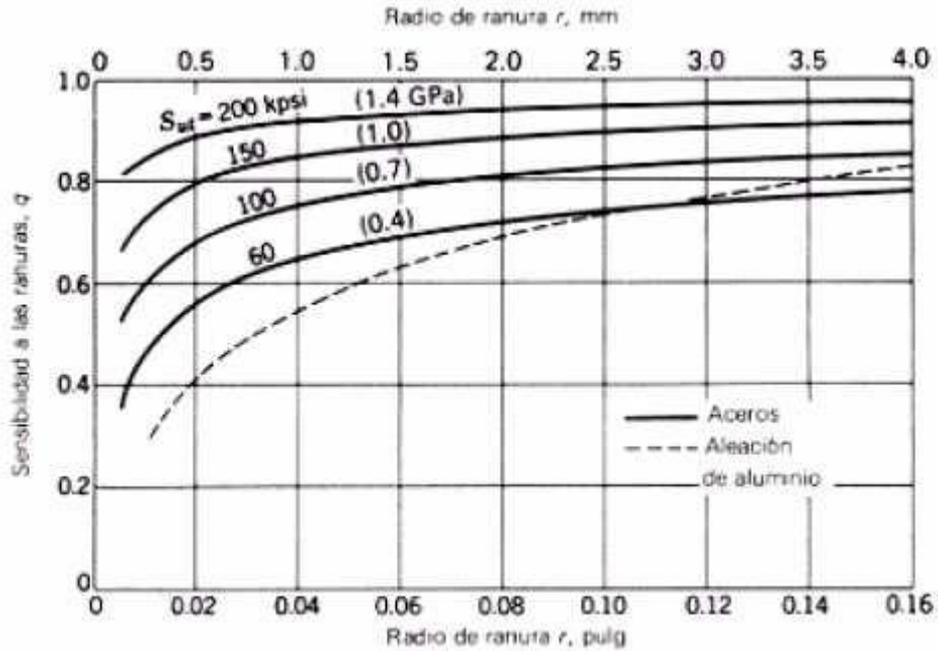


Ilustración 3. 13 Sensibilidad a las ranuras para cargas de flexión y axiales alternantes

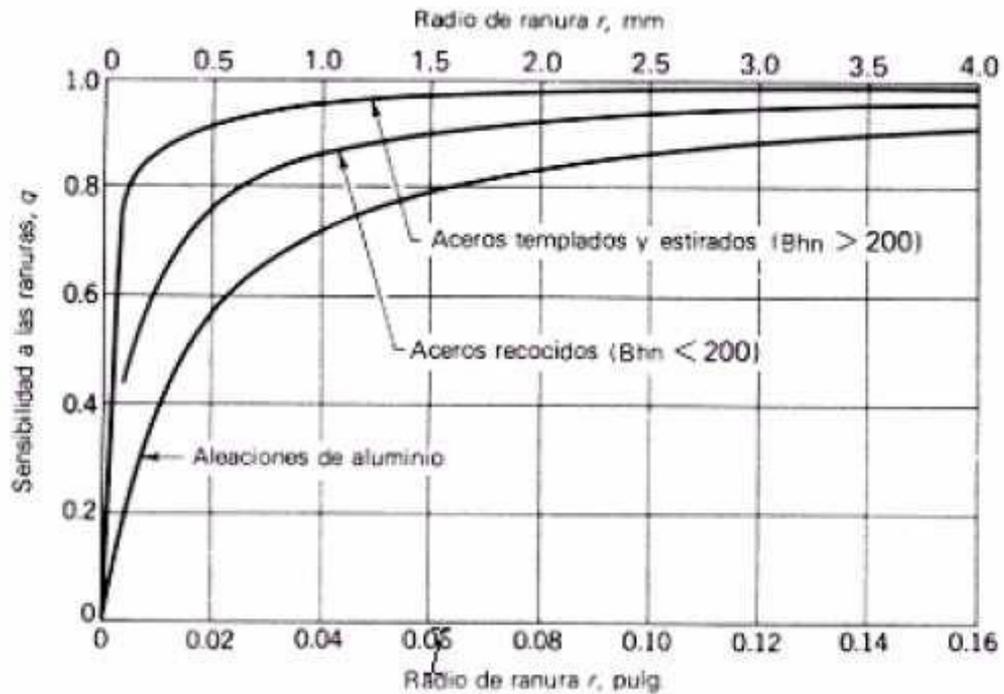


Ilustración 3. 14 Sensibilidad a las ranuras para cargas de torsión alternantes



c) Obtención de R_f : **factor de reducción de la resistencia en caso de fatiga** mediante la siguiente ecuación:

$$q = \frac{R_f - 1}{K_t - 1}$$

d) Finalmente se obtiene el factor de concentración de tensiones K_e como la inversa de R_f :

$$K_e = \frac{1}{R_f}$$

3.3.6. Factor de efectos diversos: K_f

Este factor se utiliza para modificar el límite de fatiga en función de otros aspectos no considerados anteriormente. Normalmente es necesaria la realización de experimentos para cuantificarlo. A continuación se comentan algunos de los aspectos más importantes a tener en cuenta al considerar este tipo de factor.

- Esfuerzos residuales o remanentes

Son esfuerzos que permanecen en el material en ausencia de carga, y pueden aumentar el límite de fatiga cuando son compresivos o disminuirlo cuando son tractivos. Hay operaciones como el bombardeo con perdigones o el martillado que mejoran el límite a fatiga del componente al introducir tensiones residuales de compresión.

- Características direccionales operacionales

El límite de fatiga de piezas fabricadas por estirado, laminado o forja, puede verse afectado por la direccionalidad de la operación que hace que el material se comporte de forma anisótropa. Así, la resistencia a la fatiga en dirección transversal puede llegar a ser un 10-20% inferior que en dirección longitudinal.

- Efectos del temple superficial

Debido a los diferentes valores de los límites de fatiga del núcleo de un elemento con temple superficial y de la capa templada, puede suceder que se sobrepase este valor en la zona de unión del temple al núcleo. En la ilustración 3.15 se muestra la distribución, normalmente triangular, de las tensiones de una barra sometida a flexión o torsión. La línea gruesa indica los límites de resistencia a la fatiga para la capa superficial y para el núcleo. En este caso, el límite de fatiga del núcleo gobierna el diseño, porque el esfuerzo σ o τ (según corresponda) en el radio exterior del núcleo es mayor que el límite de resistencia a la fatiga del núcleo.

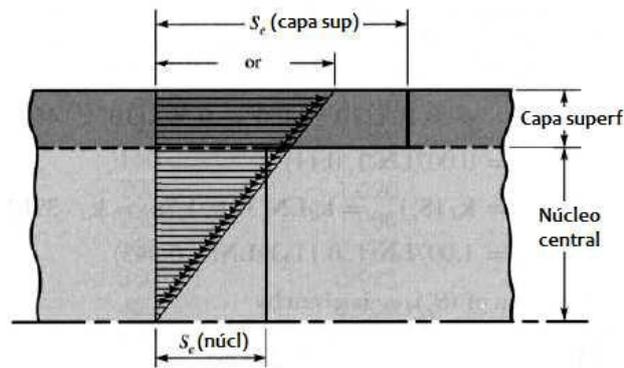


Ilustración 3. 15 Pieza con temple superficial en flexión o torsión

- Efectos de corrosión

La corrosión disminuye la resistencia a la fatiga ya que se crean puntos de concentración de esfuerzos que favorecen la creación y posterior propagación de fisuras por procesos de fatiga.

La fatiga por corrosión se ha convertido en **uno de los principales problemas en el diseño de ejes de ferrocarril**. Aunque no sólo es en este campo en el que dicho fenómeno toma importancia, sino que existen una gran cantidad de procesos en los que se ve involucrada esta forma de fatiga, sobre todo en aquellos en los que existen ambientes de trabajo agresivos, a la intemperie o bajo medios ácidos, zonas de lluvia, zonas costeras, etc.

Debido a esto, desde hace algún tiempo se está estudiando dicho fenómeno en profundidad, así como las consecuencias que acarrea, y concretamente, en el campo ferroviario, donde se ha comprobado que una gran parte de los fallos han sido producidos por el fenómeno de la corrosión. Con el crecimiento que está mostrando la alta velocidad en todo el mundo, se hace necesario controlar todos los parámetros de manera eficaz, ya que el mínimo fallo podría provocar accidentes fatales.

- Recubrimiento electrolítico

Los recubrimientos electrolíticos suelen producir disminución de los límites de fatiga. Así por ejemplo, en los procesos de cromado, niquelado o cadmiado se puede producir una reducción del límite de hasta el 50%. Sin embargo el galvanizado (recubrimiento con zinc) no afecta.

- Corrosión por apriete (*fretting*)

Este fenómeno se produce por el movimiento microscópico en la superficie de piezas mecánicas o estructuras estrechamente ajustadas, como juntas atornilladas, cojinetes, etc. La reducción en la resistencia a fatiga puede ser de hasta el 70%, y su existencia se reconoce por la presencia de cambio de color en la superficie, picadura, y eventualmente, fatiga.

3.4.- ESFUERZOS FLUCTUANTES

Los esfuerzos fluctuantes en la maquinaria a menudo adoptan la forma de un **patrón sinusoidal** debido a la naturaleza de algunas máquinas rotatorias. Es necesario conocer las fuerzas máximas y mínimas para caracterizar el patrón de la fuerza.

Siendo $F_{máx}$ la fuerza mayor y F_{min} la fuerza menor, se definen las fuerzas medias (F_m) y alternantes (F_a) como:

$$F_m = \frac{F_{max} + F_{min}}{2} \quad F_a = \left| \frac{F_{max} - F_{min}}{2} \right|$$

Las componentes del esfuerzo, a partir de las fuerzas anteriores, se definen como:

- σ_{min} = Tensión mínima
- $\sigma_{máx}$ = Tensión máxima
- σ_a = Tensión alternante, amplitud de la tensión
- σ_m = Tensión media
- σ_r = Intervalo total de tensión
- σ_s = Tensión estática o estacionaria

Algunas de las cuales, pueden verse reflejadas en la siguiente figura:

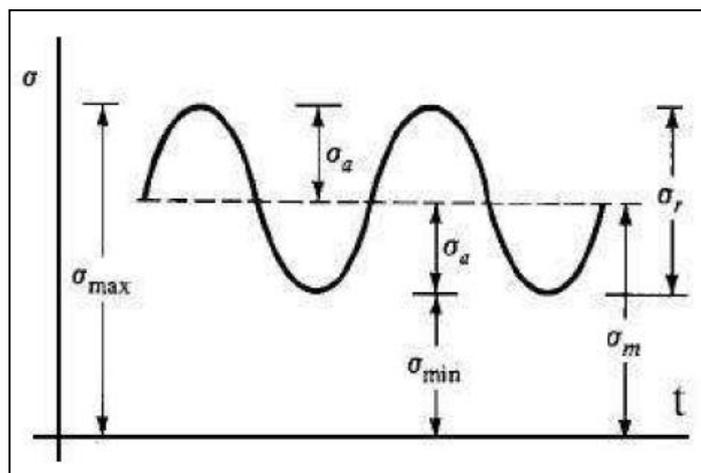


Ilustración 3. 16 Diagrama de un esfuerzo fluctuante senoidal



El procedimiento a seguir para estudiar este tipo de tensiones fluctuantes consiste en descomponer la carga en sus componentes media y alternante.

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2} \quad \sigma_a = \left| \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2} \right|$$

Se supone el estado tensional resultante como la superposición de un estado de carga constante (producido por la tensión media), y otro de carga alternante, es decir, con inversión completa (que será producido por la componente alternante).

El problema se tratará buscando una relación entre la componente alternante de tensión y la duración esperada del elemento, pero con la salvedad de que la presencia de la tensión media supondrá una disminución de los valores de la resistencia.

3.4.1. Métodos de análisis con esfuerzo medio no nulo

Muchos elementos de máquinas poseen esfuerzos y tensiones fluctuantes cuyo valor medio es distinto de cero. Éste es el caso más general y uno de los más frecuentes. En determinadas ocasiones no se puede contar con otra información experimental que no sea la correspondiente a los ensayos de flexión rotativa ($\sigma_m = 0$), en estos casos la influencia de la tensión media no nula se calcula por medio de varias relaciones empíricas que determinan el fallo en una vida determinada cuando las tensiones alternantes y medias son distintas de cero.

Los enfoques más conocidos son los criterios de *Goodman*, *Soderberg* y *Gerber*.

3.4.1.1. Criterio de *Goodman*

Según este criterio la variación de la resistencia alternante con la tensión media se describe mediante una recta que pasa por los puntos $(0, S_f)$ y $(S_{ut}, 0)$. Es decir, el valor de la componente alternante para fallo a N ciclos es S_f , y para la tensión alternante nula (carga estática), la resistencia media o valor de la tensión media para fallo es S_{ut} . De esta manera la **rotura a N ciclos** se produce cuando:

$$\frac{S_a}{S_f} + \frac{S_m}{S_{ut}} = 1$$

Este criterio constituye una más que aceptable aproximación a la realidad y presenta la gran ventaja de expresarse mediante una relación lineal, por lo que es el **más utilizado en la práctica**.

3.4.1.2. Criterio de Soderberg

Esta teoría también es lineal, y predice que, en ausencia de tensión media la rotura se produce cuando $\sigma_a = S_f$, pero que para tensión alternante nula (carga estática) y si el material es dúctil, el fallo se produce cuando $\sigma_m = S_{yt}$. Para tensiones medias, la variación sigue una recta. Así, la **condición de fallo a N ciclos** se establece como:

$$\frac{S_a}{S_f} + \frac{S_m}{S_{yt}} = 1$$

En la mayoría de los casos esta teoría arroja resultados excesivamente conservadores, por lo que se utiliza menos que la de *Goodman*.

3.4.1.3. Criterio de Gerber

Esta teoría no es lineal, y supone que la variación de σ_a con σ_m se representa mediante una parábola cuyo vértice es el punto $(0, S_f)$, su eje es el de ordenadas y pasa por el punto $(S_{ut}, 0)$. Así, la **rotura a N ciclos** se produce cuando:

$$\frac{S_a}{S_f} + \left(\frac{S_m}{S_{ut}}\right)^2 = 1$$

En la figura siguiente se pueden apreciar los distintos criterios, y las diferencias entre ellos.

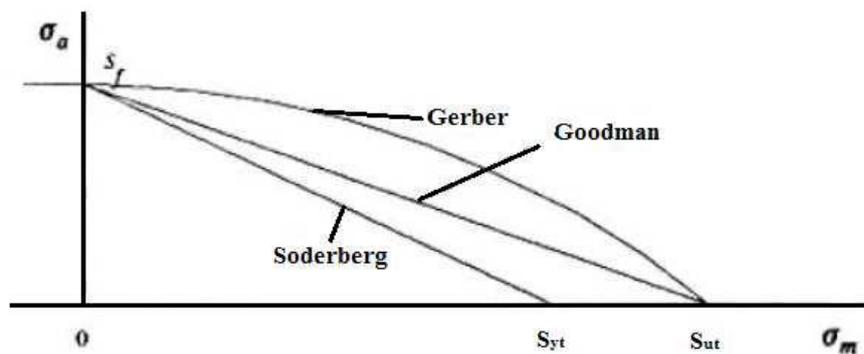


Ilustración 3. 17 Diagrama de fatiga con criterios de *Goodman*, *Soderberg* y *Gerber*

Según la figura, cuando el punto representativo del estado tensional (σ_m, σ_a) está situado por debajo de las curvas, se tiene seguridad para la duración considerada. Si está sobre la curva correspondiente, cabe esperar el fallo tras esa duración. Y por último si está por encima, el fallo se producirá antes de la duración determinada.



El criterio de *Soderberg* previene contra el **fallo por fluencia**, en el sentido de que la seguridad a fatiga conlleva seguridad a fluencia, es decir, asegura que la tensión máxima nunca superará el valor de la resistencia a fluencia. Sin embargo, esto no ocurre con las otras dos teorías.

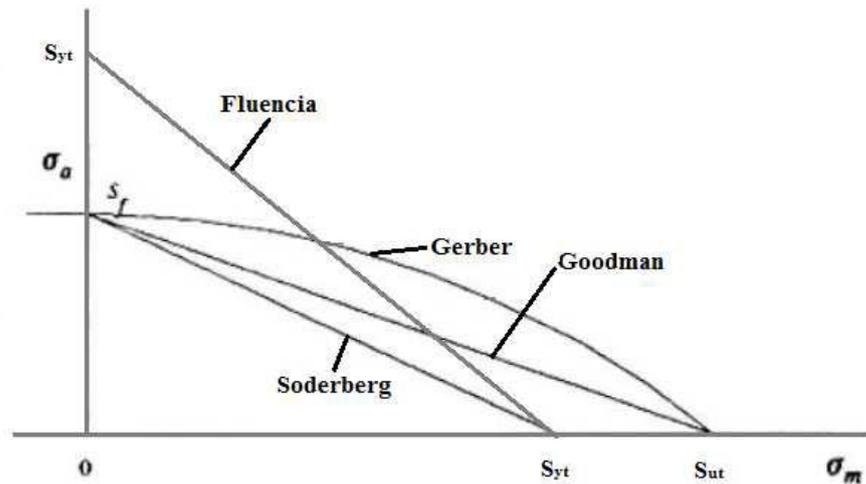


Ilustración 3. 18 Diagrama de fatiga: criterios de *Goodman*, *Soderberg*, *Gerber* y recta de fluencia

En el supuesto caso de tener tensión alternante nula y tensión media inferior a S_{ut} , pero superior a S_{yt} , según los criterios de *Goodman* y *Gerber* no se produciría la rotura, y sin embargo se habría alcanzado la fluencia.

La explicación radica en que en estos casos el material rompe por fluencia y no por fatiga.

3.4.2. Línea de carga

En la mayor parte de los sistemas mecánicos, las propias características de funcionamiento hacen que las variaciones de la tensión alternante solo puedan presentarse acompañadas de variaciones de la tensión media.

Por ejemplo, en el caso de las tensiones sufridas por el diente de un engranaje. En la zona de engrane, la base del diente está sometida a un esfuerzo de flexión, mientras que en la zona de no engrane, el diente está libre de esfuerzos. Esto implica que el diente está sometido a unos esfuerzos fluctuantes entre un valor determinado y cero, lo que a su vez quiere decir que las tensiones medias y alternantes serán igual a la mitad de la tensión máxima. En caso de existir una sobrecarga, la tensión alternante aumentará, pero también lo hará la tensión media, y en este caso, manteniéndose ambas iguales. De esta forma, no es posible un aumento de la tensión alternante sin un aumento igual de la media.

Se denomina **línea de carga** a la representación en un diagrama $\sigma_m - \sigma_a$ de los posibles estados tensionales del sistema que se analizan, cuando la carga externa experimenta variaciones, también físicamente posibles, de acuerdo con la naturaleza del sistema.

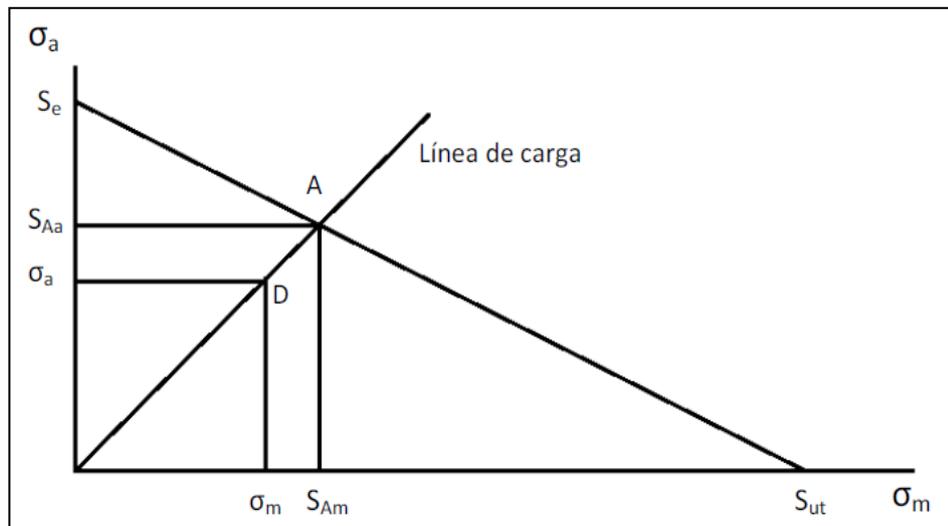


Ilustración 3. 19 Línea de carga en el diagrama de Goodman para vida infinita

El punto A representa la situación en la que se produce el fallo, en el caso de desejar vida infinita.



Si el factor de seguridad se considera como factor de aplicación de la carga, se trataría de buscar el número por el que se ha de multiplicar la carga, y por tanto, las tensiones a las que afecta, hasta que las tensiones media y alternante fuesen las correspondientes al punto límite A. Como el punto A verifica la ecuación de *Goodman* se tiene que:

$$\frac{S_{Aa}}{S_e} + \frac{S_{Am}}{S_{ut}} = 1$$

Si la carga externa se multiplica por un factor n para llegar a la situación límite, las tensiones medias y alternantes de diseño (punto D) también se multiplicarán por el mismo factor.

$$\frac{n \cdot \sigma_a}{S_e} + \frac{n \cdot \sigma_m}{S_{ut}} = 1$$

Por tanto:

$$n = \frac{1}{\frac{\sigma_a}{S_e} + \frac{\sigma_m}{S_{ut}}}$$

De esta manera queda definido el coeficiente o **factor de seguridad n** .

El procedimiento expuesto también es válido para otros criterios de fallo. Si por ejemplo, se hubiese elegido el criterio de *Gerber*, el factor de seguridad se obtendría de la ecuación:

$$\frac{n \cdot \sigma_a}{S_e} + \left(\frac{n \cdot \sigma_m}{S_{ut}} \right)^2 = 1$$

3.5.- PREDICCIÓN DE LA VIDA A FATIGA

3.5.1. Predicción de la vida a fatiga

Las técnicas de predicción de fatiga juegan un papel cada vez mayor en el **diseño de componentes en la industria**. Muchas compañías emplean técnicas predictivas desde aplicaciones en la iniciación de prototipos, hasta el empleo en verificación de productos.

Como se observa en la ilustración 3.20 primero se predice la vida en diseños preliminares y en sus rediseños. A continuación se verifican todos los componentes en laboratorio, para finalmente realizar las pruebas de sus conjuntos completos.

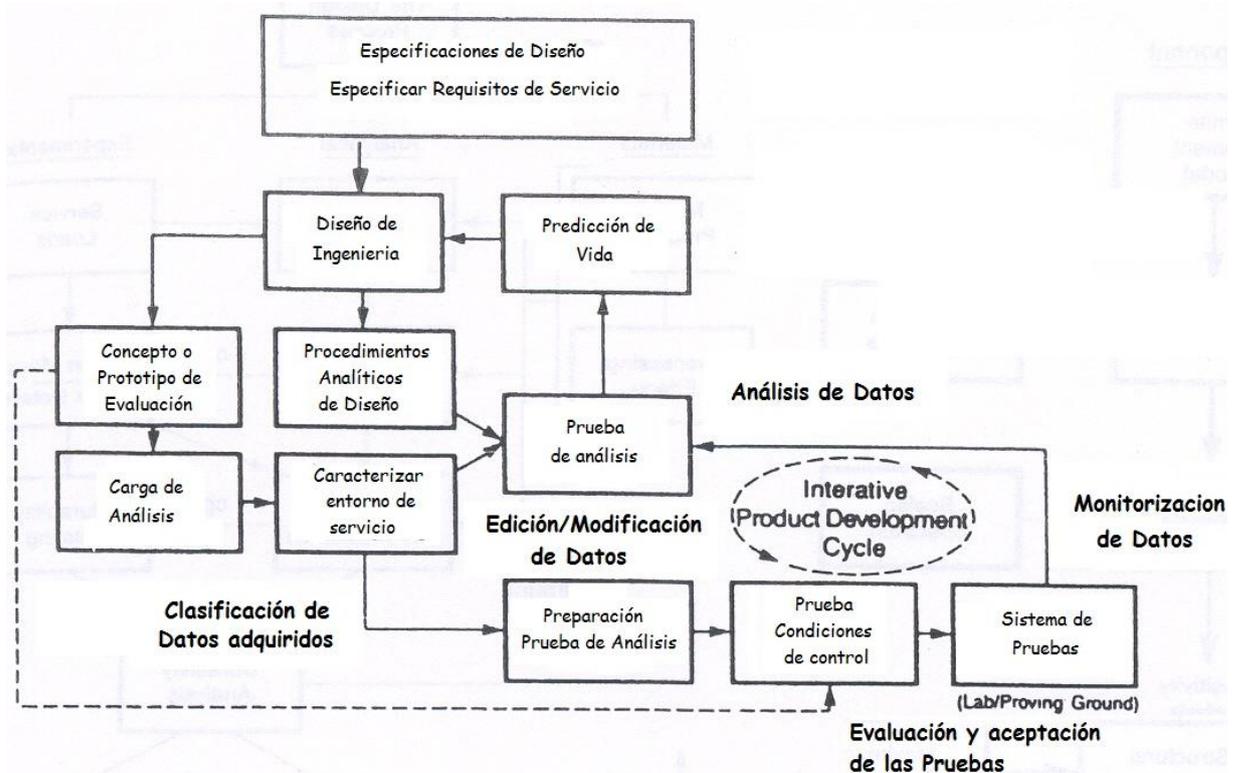


Ilustración 3. 20 Predicción de vida a fatiga. Diseño y análisis de ingeniería.

La predicción de la vida de materiales es tan necesaria como los análisis experimentales que definen la durabilidad de los componentes, con resultados geométricos mediante aplicaciones específicas.

La combinación de estudios sensibles de geometría en materiales y la experiencia adquirida en el trabajo es la mejor manera de conseguir diseños exitosos.



En las ilustraciones 3.21 y 3.22 se observa que la predicción de vida, es el objetivo de las actividades involucradas en el diseño para la durabilidad de materiales.

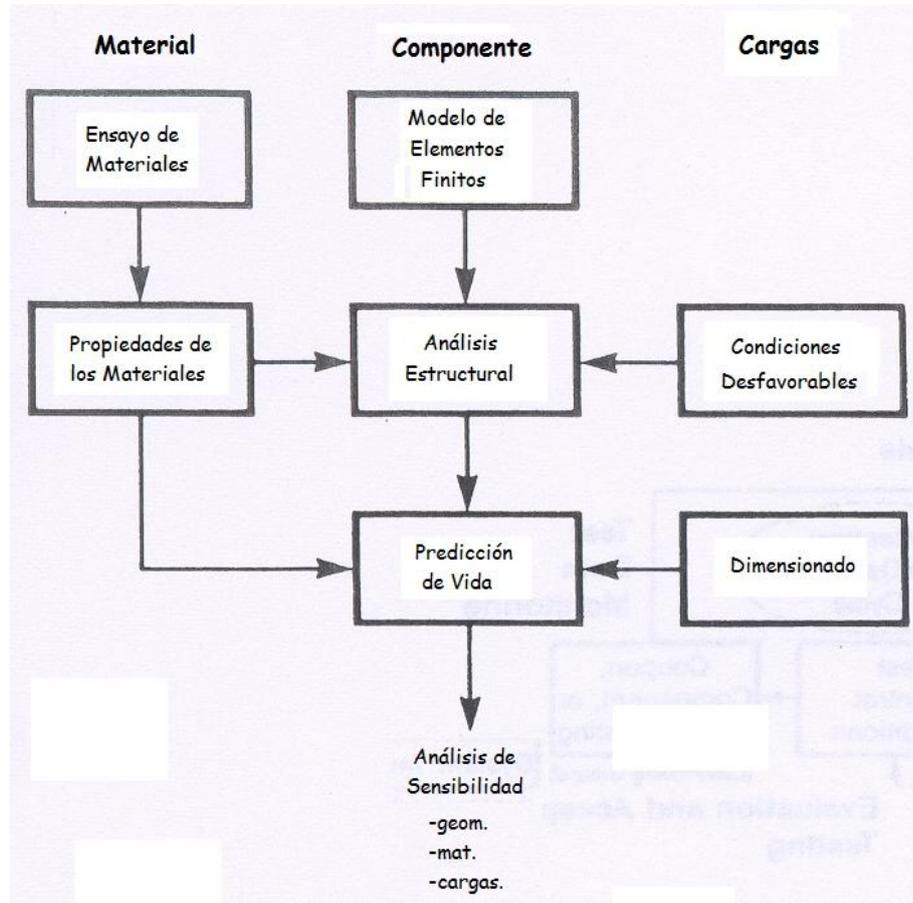


Ilustración 3. 21 Diseño analítico

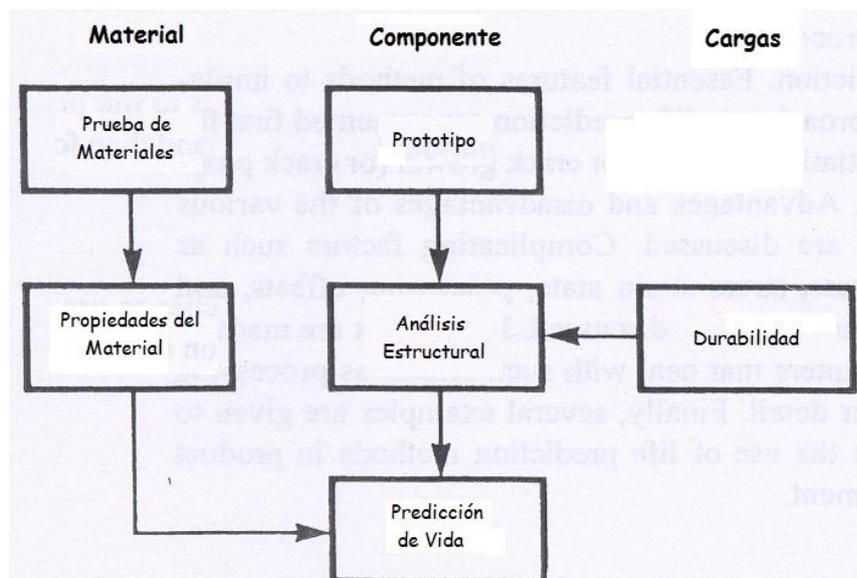


Ilustración 3. 22 Diseño experimental



4.- PRO/ENGINEER WILDFIRE 5.0

4.1.- INTRODUCCIÓN

4.2.- ENTORNO DE PRO/ENGINEER

4.3.- CAPACIDADES DE PRO/ENGINEER

4.4.- TIPOS DE FICHEROS SOPORTADOS

4.5.- PRINCIPALES VENTAJAS

4.6.- FUNCIONES Y ESPECIFICACIONES



4.1.- INTRODUCCIÓN

Pro/Engineer Wildfire 5.0 es un software de **diseño paramétrico** con potentes prestaciones integradas en diseño 3D, análisis y fabricación. Una de sus principales ventajas se encuentra en el hecho de que las aplicaciones integradas permiten desarrollar todo el proceso desde la concepción hasta la fabricación de una pieza o componente.

Pro/Engineer es un producto de CAD/CAM/CAE de PTC Corporation (Parametric Technology Corporation). Fue el primero en comercializarse como software asociativo de modelado paramétrico. La aplicación funciona bajo *Microsoft Windows* y *Unix* (todos los datos son permutables entre estas plataformas sin ser necesario algún tipo de conversión), y cuenta con las posibilidades de diseño de elementos sólidos, creación de conjuntos y proyectos, análisis de elementos finitos, NC y herramientas de funcionalidad para ingenieros mecánicos.

La familia de soluciones integradas CAD/CAM/CAE de Pro/Engineer aporta a los ingenieros y diseñadores una **ventaja distintiva**, ya que Pro/Engineer es completamente asociativo. Es decir, cualquier cambio que se efectúe en el diseño se refleja automáticamente en todos los elementos subsecuentes, sin necesidad de convertir datos.

Pro/Engineer Wildfire 5.0 ofrece amplias prestaciones en diseño y análisis con la finalidad de reducir los errores, ahorrar tiempo, y recortar costes debido al uso de distintas herramientas interconectadas entre sí.

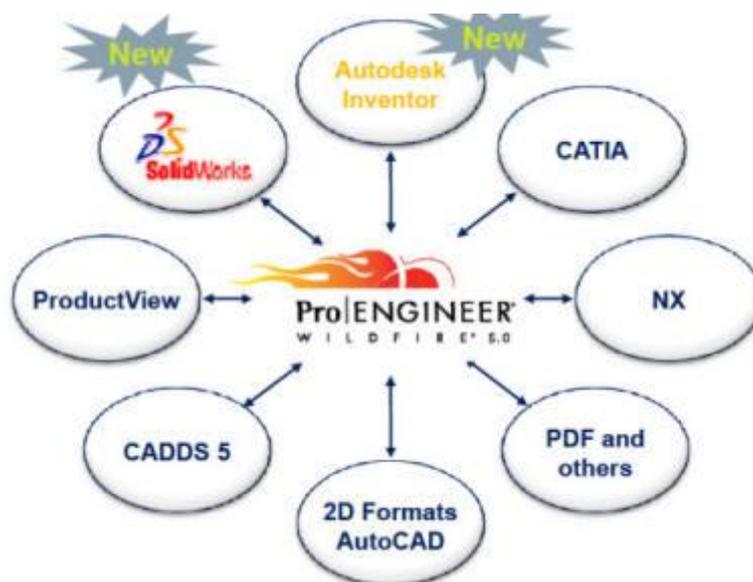


Ilustración 4. 1 Software con compatibilidades muy diversas



4.2.- ENTORNO DE PRO/ENGINEER

El entorno de trabajo de Pro/Engineer es muy completo y está diseñado de la manera más sencilla posible para ser accesible a cualquier usuario desde un primer momento.

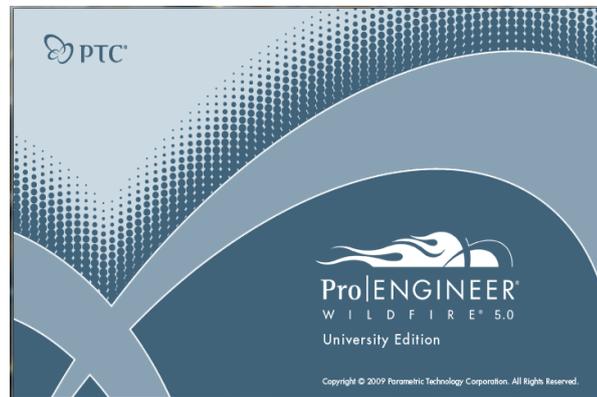


Ilustración 4. 2 Ilustración inicio sesión Pro/Engineer

En la figura que se muestra a continuación podemos observar la disposición de la pantalla de trabajo, con las distintas zonas que la componen.

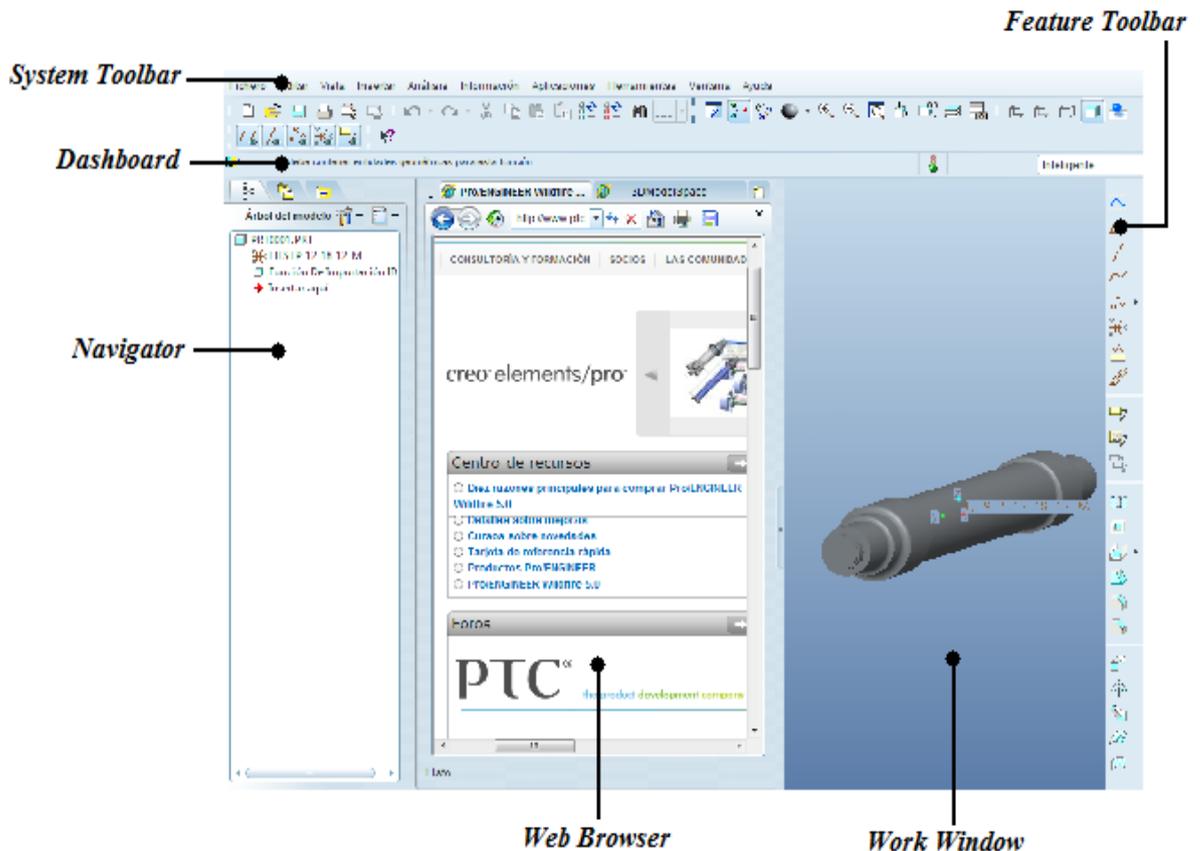


Ilustración 4. 3 Esquema disposición software Pro/Engineer



Ventana principal de trabajo: En esta ventana podemos encontrar el modelo de trabajo del programa.

Navigator: Uno de los elementos clave es el *Model Tree*, árbol del modelo o estructura del modelo activo. El tipo de información varía dependiendo de si el modelo es un conjunto *assembly* o un componente *part*. Por otro lado, mediante este elemento se puede navegar entre carpetas o abrir/cerrar archivos *Folder Browser*, controlar las distintas capas del modelo así como acceder a catálogos online.

System Toolbar: Comprende los distintos menús e iconos necesarios para interactuar sobre el modelo.

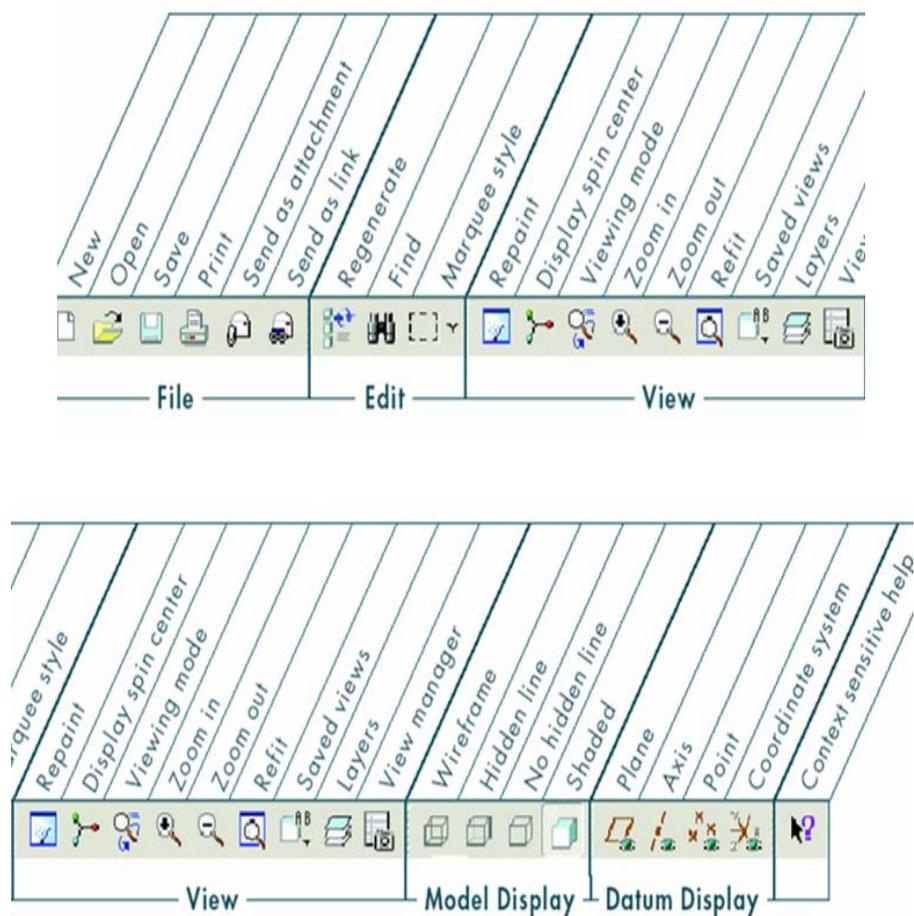


Ilustración 4. 4 System Toolbar



Feature Toolbar: Esta zona permite acceder a las funciones de construcción y edición más habituales de ProEngineer. Entre ellas podemos encontrar los comandos de extrusión, vaciado, protusión por barrido, chaflanes, etc.

Datum		Plane
		Axis
		Curve
		Sketched curve
		Point
		Coordinate system
		Analysis
Pick/Place		Hole
		Shell
		Rib
		Draft
		Round
		Chamfer
Base		Extrude
		Revolve
		Variable section sweep
		Boundary blend
		Style
Editing		Copy
		Mirror
		Move
		Merge
		Trim
		Pattern

Ilustración 4. 5 *FeatureToolbar*

DashBoard: Sirve de guía durante el proceso de creación de un modelo. Incluye entre otros el *Message Area* (el sistema suministra información sobre el estado de la operación) y el *Status Bar* (información sobre el menú/icono que se selecciona).



4.3.- CAPACIDADES DE PRO/ENGINEER

Pro/Engineer es un software que pertenece a la categoría de CAD/CAM/CAE, y sus capacidades se pueden dividir principalmente en tres: diseño, análisis y manufactura.

Diseño: Este software ofrece una amplia variedad de herramientas que hacen posible la generación de una representación digital completa del producto que está siendo diseñado.

Además de las herramientas generales de diseño, ofrece también la posibilidad de generar geometrías de otras disciplinas de diseño integradas, tales como tuberías industriales y estándares y definiciones completas de cableado. Entre las prestaciones completas de geometría también se incluyen el modelado de sólidos, chapa y conjuntos, creación de superficies técnicas y de forma libre, piezas soldadas, estructuras metálicas y mecanismos.

Análisis: Pro/Engineer dispone de herramientas capaces de realizar análisis térmicos, estáticos, dinámicos y de fatiga, junto con otras herramientas diseñadas para ayudar con el desarrollo del producto. Estas herramientas incluyen por ejemplo factores humanos, tolerancias de fabricación o flujo del molde.

Manufactura: La capacidad de manufactura de Pro/Engineer reside en las soluciones de Control Numérico y de herramientas de Pro/Engineer que permiten a los fabricantes crear herramientas, trayectorias de herramientas de CN y programas de inspección mientras se realiza el trabajo de diseño de productos. Al compartir y usar directamente los diseños de Pro/Engineer, los ingenieros de producción y de creación de herramientas participan en el proceso en una fase temprana y pueden influir en los diseños antes de su finalización.



4.4.- TIPOS DE FICHEROS SOPORTADOS

La gestión completa de un proyecto requiere el uso de diferentes módulos de Pro/Engineer, cada uno de ellos dedicado a una labor específica (modelado de sólidos, montaje de conjuntos, realización de planos 2D, etc.) Para facilitar la gestión del proyecto, los ficheros generados por los distintos módulos tienen distintas extensiones. Cuatro de los tipos de archivos más reseñables o imprescindibles de este software son los siguientes:

Assembly (*.ASM): Archivo de conjunto. Un archivo tipo conjunto puede contener uno a más archivos de tipo conjunto o tipo Pieza.

Part (*.PRT): Archivo de pieza. Un archivo de pieza está formado por un conjunto de funciones (extrusiones, cortes, agujeros, redondeos, etc.).

Drawing (*.DRW): Archivo de dibujo. Un archivo de dibujo es un plano en 2D formado por vistas provenientes de los modelos 3D citados previamente

Step (*.STP): Archivo CAD. Los archivos STEP son el formato internacional desarrollado para cubrir algunas limitaciones de las normas de conversión de datos.

Existen más tipos de archivo con posibilidad de uso en ProEngineer, como por ejemplo archivos de fabricación, formatos, informes, archivos de información, layouts, diagramas, procesos de montaje, etc.



4.5.- PRINCIPALES VENTAJAS

El paquete Pro/Engineer simplifica las complejidades del **entorno de desarrollo** de productos actual con herramientas intuitivas y fáciles de usar que funcionan conjuntamente sin dificultades para llevar a cabo el trabajo.

- Permite que los equipos trabajen simultáneamente en los mismos diseños de productos.
- Fomenta un mayor grado de reutilización de los diseños mientras se mejoran los estándares de calidad.
- Da lugar a un proceso estándar y automatizado de cambios de ingeniería que permite:
 1. Recopilar los cambios relacionados.
 2. Realizar análisis sencillos y precisos en todas las piezas afectadas.
 3. Proporcionar distribución y notificación de los cambios a los equipos de productos



4.6.- FUNCIONES Y ESPECIFICACIONES

4.6.1. Prestaciones CAD 3D de Pro/Engineer

- Permite crear rápidamente productos de gran calidad con una amplia gama de funciones básicas de modelado, creación de planos 2D y 3D, chapa, soldadura y modelado de superficies entre otros.
- Permite aumentar la calidad de los modelos, fomentar la reutilización de piezas y reducción de los errores en los modelos.
- Reduce los costes disminuyendo la proliferación de nuevos números de pieza.
- Responde a las necesidades de creación de superficies complejas.
- Permite crear formas innovadoras imposibles de obtener con otras herramientas CAD 3D de menor calidad.
- Posibilita la conexión con la información y los recursos existentes en Internet para conseguir un proceso de desarrollo de productos con un alto nivel de eficiencia.

4.6.2. Pro/Engineer *Advanced Assembly*

- Presenta la opción de compartir y gestionar datos de diseño de conjuntos con mayor eficiencia utilizando interfaces predefinidas de modelos de esqueleto.
- Define y automatiza la aplicación de reglas de diseño para que solo se creen las relaciones adecuadas en el contexto de los diseños, lo que hará que éstos puedan ser modificados y reutilizados con facilidad.
- Desarrolla pasos secuenciales exclusivos para generar modelos, vistas y listas LDM independientes en cada paso del proceso del conjunto.
- Permite proteger la propiedad intelectual con la *Shrinkwrap™ technology*.



4.6.3. Pro/Engineer *Interactive Surface Design*

- Presenta la posibilidad de utilizar esbozos de elementos 2D como referencia visual “aproximada” en la creación de los modelos 3D. Se comienza por el desarrollo de la geometría desde cero o a partir de un esbozo, de conjuntos de escaneado o de otros datos de referencia y a continuación, se desarrollan gradualmente los conceptos hasta obtener un modelo de producción.
- Incorpora la posibilidad de trabajar con una ventana de modelado única con cuatro cuadrantes que permite crear, manipular y controlar directamente las curvas, las superficies y las conexiones.
- Pueden crearse y modificarse superficies complejas arrastrando los puntos de control de las curvas sin perder la continuidad G2.

4.6.4. Pro/Engineer *Mechanism Dynamics*

- Obtiene datos precisos del análisis dinámico de muelles, levas, amortiguadores o impactos mediante la incorporación de las masas de inercia reales de los componentes y de las fuerzas que actúan sobre y entre ellos.
- Crea animaciones de mecanismos en acción y pudiéndose visualizar cómo las fuerzas dinámicas, la aceleración y la velocidad afectan al modelo del producto digital con la ayuda de flechas de vectores codificadas con colores.
- Lleva a cabo diversos tipos de análisis, entre los que se incluyen el de estado estático o estable (reposo), el dinámico (cálculo de la fuerza frente al tiempo) y el de equilibrio de fuerzas (determinación de la fuerza requerida para mantener la configuración deseada del mecanismo).

4.6.5. Pro/Engineer *Piping and Cabling*

- Creación de todos los diagramas 2D y 3D de cableado y tuberías en una única solución.
- Cálculo de las propiedades de masa y generación automática de listas de hilos, mazos aplanados y LDM personalizables.
- Evaluación de las posibilidades de mecanizado y las interferencias de las tuberías.



4.6.6. Pro/Engineer Behavioral Modeling

- Evalúa la sensibilidad del modelo para conocer los efectos de los cambios en los objetivos de diseño.
- Genera automáticamente un conjunto de soluciones viables para problemas de diseño con varios objetivos.
- Integra los resultados con el software de simulación de Pro/Engineer o con otras aplicaciones externas.

4.6.7. Sistema de prototipado rápido

Otra de las características más interesantes que posee este software, es la posibilidad de reproducir modelos y prototipos directamente a partir del modelo sólido en 3D, generando archivos en formato STL. Este formato aproxima el modelo sólido por pequeños triángulos o facetas, y el sistema de prototipado rápido genera la pieza a partir de la unión aditiva de líquidos, capa por capa, a partir de secciones transversales de la pieza obtenidas del modelo 3D.

4.6.8. Compatibilidad de los datos

- Soporte del *Kernel* para *ACIS*[™], *Parasolid*[™] y *Granite*[®].
- Compatibilidad de *Associative Topology Bus*[™] para Pro/Engineer.
- Conversores directos para CADDs y DWG de *AutoCAD*[®].
- Conversores estándar: DXF de *AutoCAD*[®], IGES, STEP, SET, VDA, ECAD, CGM, COSMOS/M, PATRAN[®] y ficheros de geometría SUPERTAB[™], SLA, JPEG, TIFF, RENDER, VRML.
- La compatibilidad con *Mathcad*, el software de cálculo de ingeniería de PTC, permite integrar las hojas de trabajo de *Mathcad* con el diseño para predecir el comportamiento y determinar los parámetros y las cotas esenciales.



4.6.9. Reparación de datos importados

- Reduce el tiempo y el esfuerzo necesario para limpiar los datos de diseños importados o antiguos.
- Contrae la geometría importada para controlar mejor las superficies con el gestor de restricciones.

4.6.10. Windchill ProjectLink

- Espacios de trabajo de proyectos en línea basados en Web y seguros donde los clientes, los proveedores y los integrantes de equipos globalmente dispersos pueden trabajar de manera conjunta en los proyectos.
- Gestión de proyectos en línea que permite hacer un seguimiento de los hitos, los elementos subsecuentes, los programas y los recursos de los proyectos.
- Almacén central para toda la información relacionada con el proyecto.
- Visualización incorporada con presentación y anotación de múltiples formatos de CAD y PDF.
- Automatización de procesos gobernada por plantillas de procesos empresariales clave como NPI y Seis Sigma.
- Diseñado para trabajar con herramientas cotidianas y familiares, como diversos paquetes CAD, *Microsoft Office* y *Microsoft Project*.



4.6.11. Windchill PDMLink

- Creación de una fuente única, segura y basada en Web de datos del producto para toda la empresa, con reasignación, revisión, gestión de la estructura, búsqueda y gestión del ciclo de vida.
- Visualización incorporada a través de *Product View Lite* para ver y anotar múltiples formatos de CAD y PDF.
- Gestión de datos robusta para Pro/Engineer, así como múltiples herramientas CAD mecánicas y eléctricas, código fuente de software y documentos.
- Gestión de cambios de vía completa y rápida lista para usar.
- Gestión de la configuración que proporciona todas las vistas requeridas de la información del producto.
- Integración robusta con ERP y otros sistemas empresariales, con el módulo opcional *Windchill Enterprise Systems Integration (ESI)*.

4.6.12. Pro/Intralink

- Proporciona una gestión de datos de Pro/Engineer completa, avanzada y fiable sobre una moderna arquitectura *Windchill*.
- Admite la ingeniería simultánea.
- Proporciona herramientas de reasignación (archivo, extracción y líneas base) y herramientas de creación de informes.
- Ofrece soporte continuado para implementaciones en varios sitios con las herramientas de replicación de Pro/Intralink.
- Como subconjunto de *Windchill PDMLink*, ofrece una ruta de ampliación a prestaciones más completas de gestión de datos y control de procesos.



5.- PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

5.1.- DESCRIPCIÓN

5.2.- SIMPLIFICACIONES A TENER EN CUENTA



5.1- DESCRIPCIÓN

El **objetivo** que se busca con este trabajo es la realización de un análisis lo más completo y preciso posible de un **eje ferroviario**. El interés por llevar a cabo dicho estudio se debe al efecto que producen las diversas cargas a las que está sometido este elemento mecánico.

Para este estudio se va a utilizar el software de diseño paramétrico **Pro/Engineer**, el cual ofrece una gran variedad de aplicaciones y simulaciones que permitirán obtener resultados con gran precisión. El funcionamiento de este programa, así como sus ventajas y detalles se han explicado en apartados anteriores.

El eje ferroviario sujeto a estudio se corresponde, por tanto, con uno de los ejes de un vagón de mercancías, es decir, con **ejes no tractores**.

De esta manera, se podrán obtener varios estudios con distintas condiciones proporcionando unos resultados precisos.

Se tendrán que reproducir las **tensiones** generadas en las zonas más críticas del eje (redondeos) contenidas en el modelo de estudio, sobre un eje aislado. Esto se precisa para poder proceder con los cálculos de fatiga, ya que el programa pide un análisis previo lineal, lo que significa que el modelo no puede incluir contactos, teniendo que eliminar por consiguiente el resto de elementos.

Los datos pertenecientes a la geometría del eje se han obtenido a partir de un plano de diseño facilitado por una empresa del sector ferroviario, reproduciendo su geometría mediante las herramientas de diseño que ofrece Pro/Engineer, como se detallará más adelante.

5.2- SIMPLIFICACIONES A TENER EN CUENTA

Se realizará por tanto, el estudio de un **eje simple**, teniendo en cuenta algunas simplificaciones, con el objetivo de analizar únicamente las **tensiones y deformaciones** en las secciones críticas del mismo, que estarán sometidas a unos mayores esfuerzos, para un posterior estudio de mejora. Estas secciones, serán en principio, los cambios de sección. Por tanto, estas simplificaciones serán:

- El **eje** de estudio no estará sometido a momentos torsores, debido a que el eje no es tractor, es decir, no dispone de coronas de transmisión, y tampoco se estudiará la dinámica de frenado con la fuerza que aplican las zapatas sobre la banda de rodadura de la rueda o sobre los discos. Las cargas que sufrirá por tanto dicho eje, en principio, serán las debidas al propio peso y a la masa máxima técnicamente admisible por eje del propio vagón. Además se considerará la precarga que la rueda y el eje efectúan en su montaje.
- Se considerará una **velocidad constante** del tren para el estudio de fatiga, por lo que no existen esfuerzos en la dirección de avance de nuestro eje. En este caso, se desprecian los efectos de aceleración y frenado, así como los desniveles que pueda presentar el terreno por el que circula dicho tren.
- Se tendrá en cuenta la simplificación de que el **coche circula en línea recta**, despreciando los efectos que se puedan originar en los tramos con presencia de curvas o desniveles de la vía así como los típicos movimientos de vaivén.
- No se considerará el efecto de la **temperatura** en el eje, teniendo constancia de que puede ser elevada debido a la transferencia de calor en los transitorios de frenado por la fricción de las zapatas sobre los discos de freno o la banda de rodadura de la rueda.
- Para simular la **distribución de la carga**, que se transmite a través de los rodamientos de la caja de grasa, se aplicará directamente sobre el eje ferroviario.

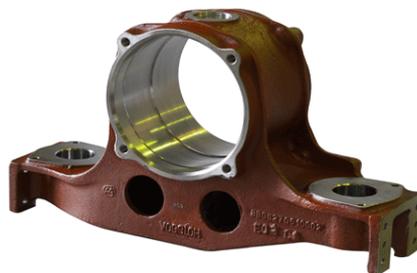


Ilustración 5. 1 Caja de grasa



- En cuanto al **apoyo de la rueda sobre la vía**, el hecho de modelar un raíl real no aporta datos relevantes al objeto de estudio que es el eje. Lo verdaderamente importante es el punto de contacto en el cual apoya dicha rueda. Como las deformaciones y esfuerzos tensionales en el raíl no son objetivos del problema, no se ha modelado un tipo de raíl.



Ilustración 5. 2 Contacto rueda y raíl

- Como las ruedas, raíles y cojinetes no son objetivos de este proyecto, no se han modelado, pero se han tenido en cuenta a la hora de introducir las diferentes cargas en el eje ferroviario.



A continuación se detalla el procedimiento en la definición de las **propiedades del material** en Pro/Engineer.

El material utilizado en este estudio será **acero al carbono templado A1N**, muy utilizado para la fabricación de ejes de ferrocarril, cuyas propiedades se detallan a continuación:

- Resistencia última a tracción = 600 MPa
- Límite elástico = 395 MPa
- Módulo de Young = 210 GPa

En la siguiente figura, se representan las **propiedades** del material:

Definición de material

Nombre: STEEL

Descripción:

Densidad: 7827.08 kg/m³

Estructural | Térmico | Miscelánea | Aspecto visual | Definido por el usuario

Simetría: Isótropo

Respuesta de tensión-deformación: Lineal

Coefficiente de Poisson: 0.27

Módulo de Young: 210000 MPa

Coef. de expansión térmica: 1.17e-05 /C

Amortiguación de mecanismos: sec/mm

Límites de material

Límite elástico en tracción *: 395 MPa

Límite de resistencia a la tracción: 600 MPa

Límite de resistencia a la compresión: kPa

* Campos obligatorios

Criterio de rotura

Energía de distorsión (Von Mises)

Fatiga

Ninguno

Aceptar Cancelar

Ilustración 5.3 Definición de las propiedades del material



Es necesario en la ventana de **Definición del material**, en el módulo **Mechanica** definir también algunas características para el análisis a fatiga:

- Tipo de material: Acero de baja aleación.
 - Acabado superficial: Granallado. Este proceso consiste en la proyección de partículas abrasivas (granalla) a gran velocidad, que al impactar con la pieza tratada, produce la eliminación de las imperfecciones. Se trata de un proceso muy utilizado en la industria ferroviaria. Según los manuales de Pro/Engineer, este proceso asegura la mínima rugosidad que indica el plano de diseño.
 - Factor de reducción de la resistencia a la fatiga: Se ha comentado en apartados anteriores de fatiga el significado de este factor y su cálculo. En siguientes apartados se calcula para este problema en particular.
- Se hará uso de la **aplicación de simetría** que proporciona el programa indicado, de tal manera que todas las situaciones a estudiar se llevarán a cabo de la mitad del conjunto únicamente. Con esto se consigue obtener resultados en un menor número de ecuaciones y por consiguiente las iteraciones a realizar, lo que se traduce en un menor tiempo.

A continuación se muestra la geometría del eje en el cual se procederá a utilizar la herramienta de simetría, que proporciona el módulo de **Mechanica**:

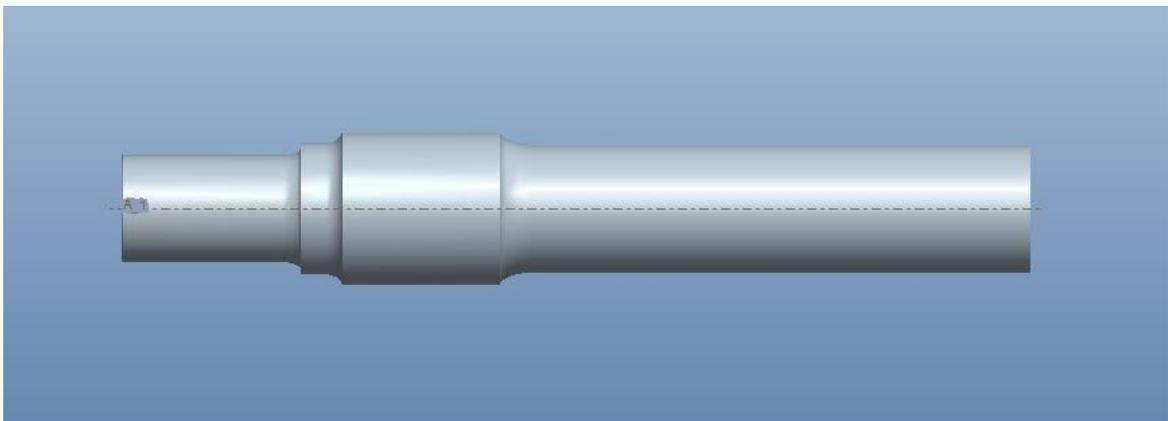


Ilustración 5. 4 Eje con simetría



6.- MODELADO DEL EJE FERROVIARIO

6.1.- INTRODUCCIÓN

6.2.- MODELADO DEL EJE SOMETIDO A ESTUDIO

6.3.- REALIZACIÓN DE FISURAS SOBRE EL EJE FERROVIARIO

6.1.- INTRODUCCIÓN

En este capítulo se explica y desarrolla el modelado de la geometría del eje ferroviario, elemento que posteriormente será sometido a distintos estudios.

En apartados sucesivos se detalla el planteamiento de los diferentes modelos planteados, así como la manera en la que intervienen los elementos que se pretenden modelar con Pro/Engineer.

Mediante la aplicación *Nuevo-Pieza*, que proporciona el programa utilizado, se creará un archivo (.prt) en el cual se modela la pieza deseada.

Los datos necesarios del eje ferroviario que se quiere estudiar, se encuentran recogidos en el plano de diseño proporcionado por la empresa ferroviaria, y facilitado por la universidad Carlos III de Madrid.

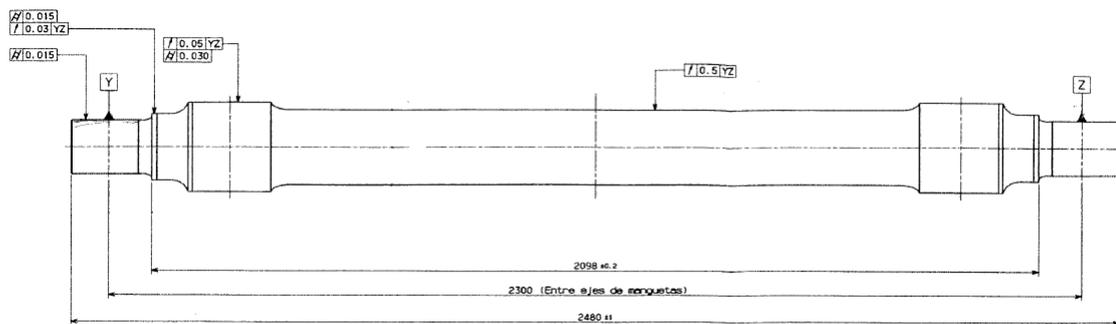


Ilustración 6. 1 Eje ferroviario

6.2.- MODELADO DEL EJE SOMETIDO A ESTUDIO

Se procede a modelar la geometría del eje detallada en el plano proporcionado por una empresa ferroviaria (ver anexo). Para ello, se realiza en diferentes pasos:

Se comienza generando el perfil de revolución con la herramienta **Revolución** que pertenece al módulo **Estándar**. A continuación se elige el plano donde se desea realizar el esbozo de la pieza y en él se dibuja la sección que se quiere revolucionar. En la siguiente figura puede apreciarse el esbozo del eje con claridad:

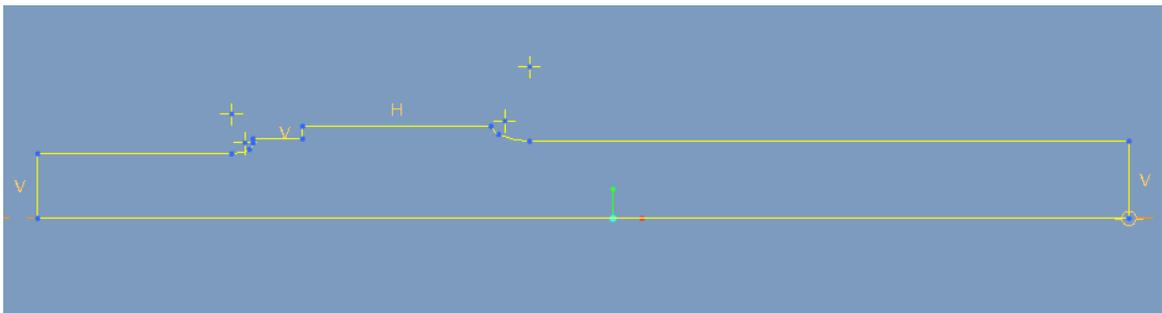


Ilustración 6. 2 Generación del perfil de revolución (sin cotas)

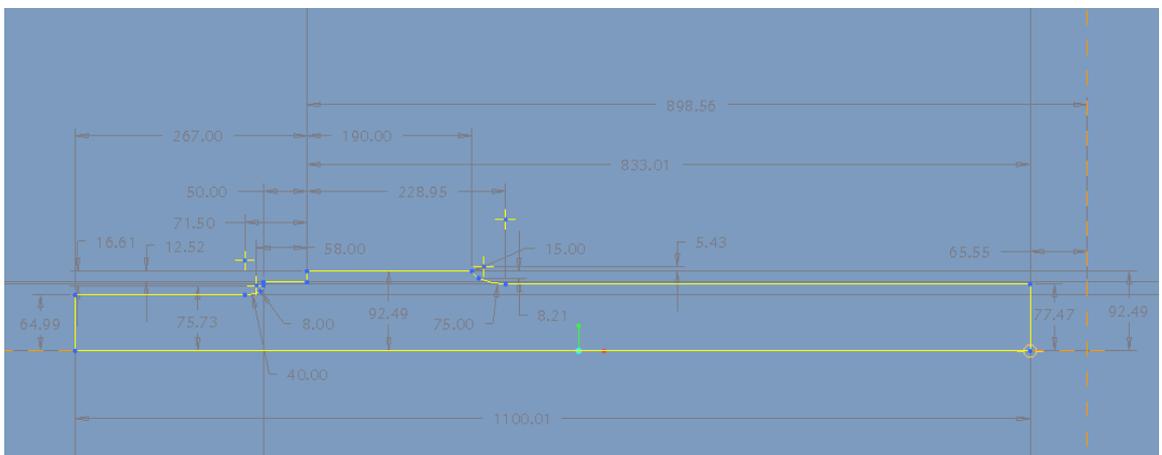


Ilustración 6. 3 Generación del perfil de revolución (con cotas)



Como se puede apreciar en la siguiente figura, es posible variar las dimensiones de las cotas de una pieza y ver estos cambios en el momento gracias a la opción de **Definición dinámica** que proporciona el programa:

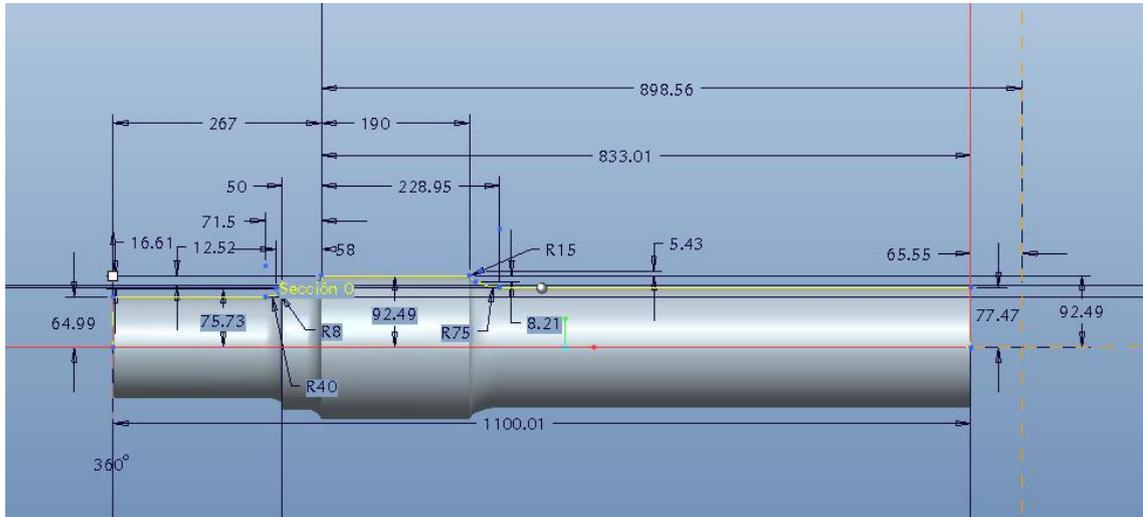


Ilustración 6. 4 Definición dinámica del eje

Una vez terminado el esbozo del eje, es necesario definir el eje de revolución del mismo, en la pestaña **Posición-Eje** que se encuentra en la parte superior de la ventana, tal y como se observa en la siguiente figura:

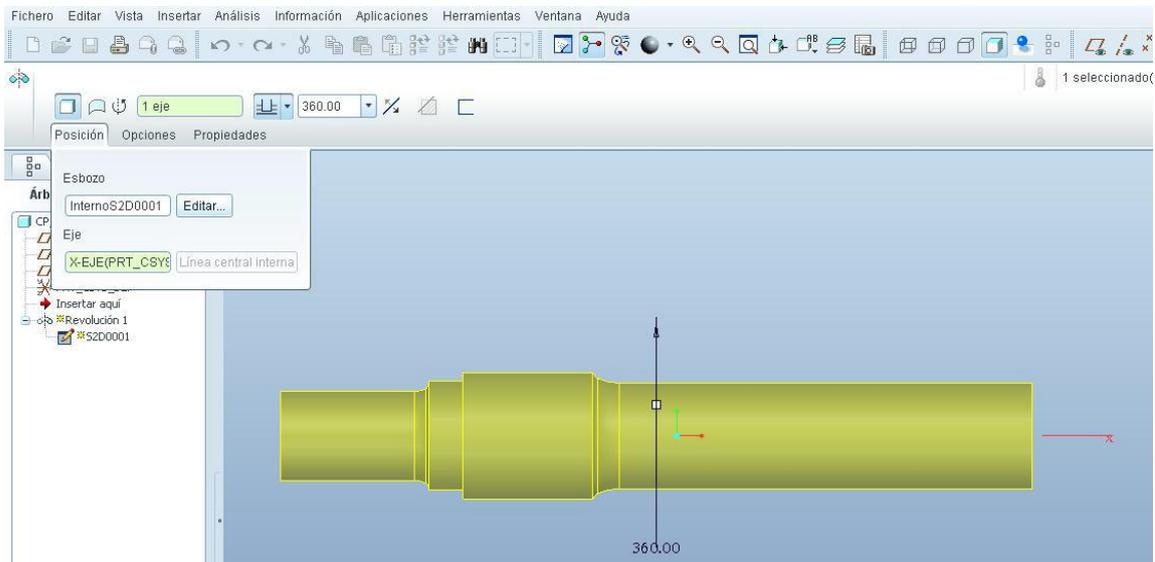


Ilustración 6. 5 Definición del eje de revolución



Por último, es necesario incluir dos redondeos y los chaflanes en los cambios bruscos de sección, evitando un posible error a la hora de dibujarlo directamente en el esbozo. Se incluyen entonces con las herramientas **Insertar- Redondeo** e **Insertar- Chaflán**. En las siguientes figuras están representados de manera clara los diferentes redondeos y chaflanes incluidos en el eje:

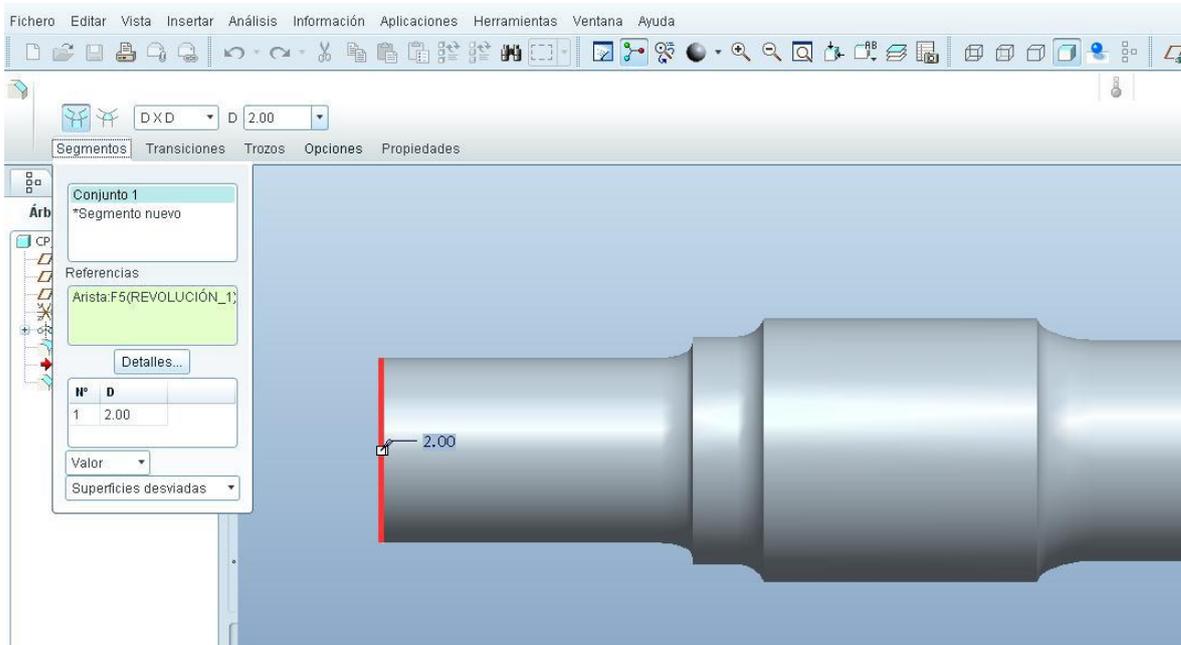


Ilustración 6. 6 Definición del chaflán

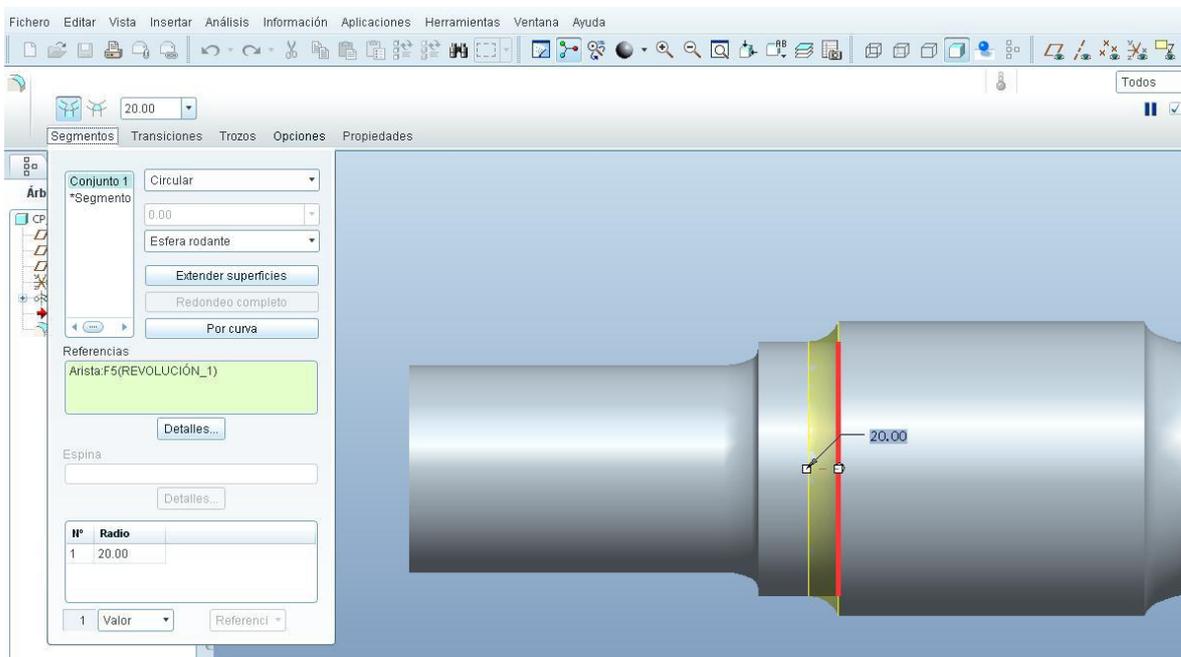


Ilustración 6. 7 Definición del redondeo



Una vez concluidos los pasos anteriores, queda así definida la geometría del eje ferroviario en el módulo *Estándar* de Pro/Engineer. De esta manera, en la siguiente figura, se puede ver el aspecto final que presenta el eje:

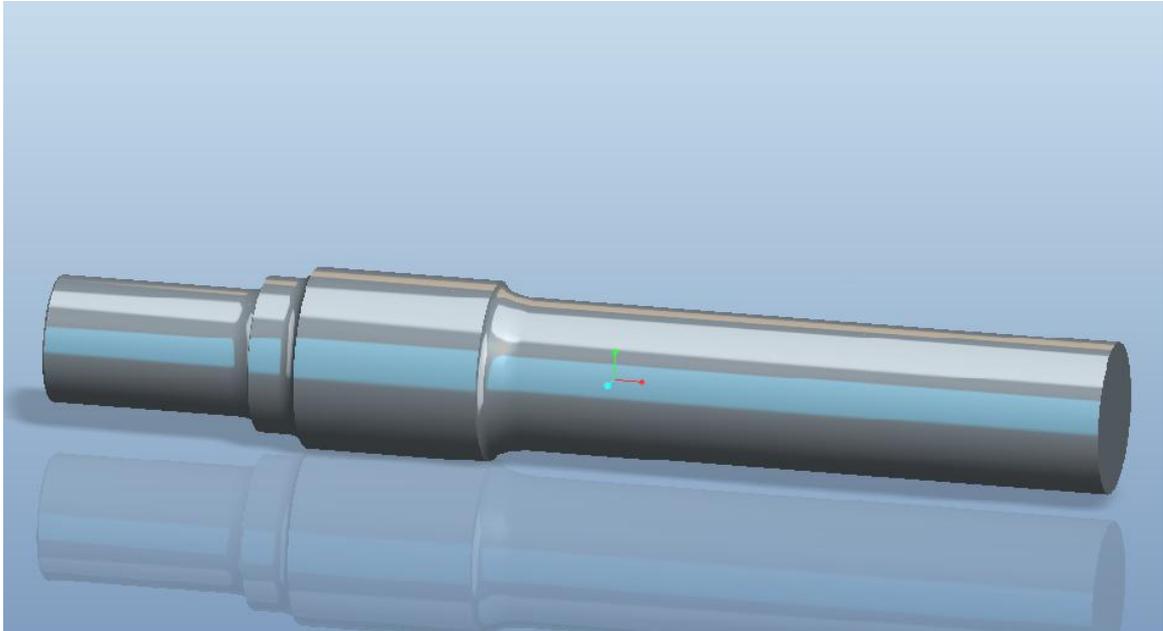


Ilustración 6. 8 Eje ferroviario modelado en Pro/Engineer

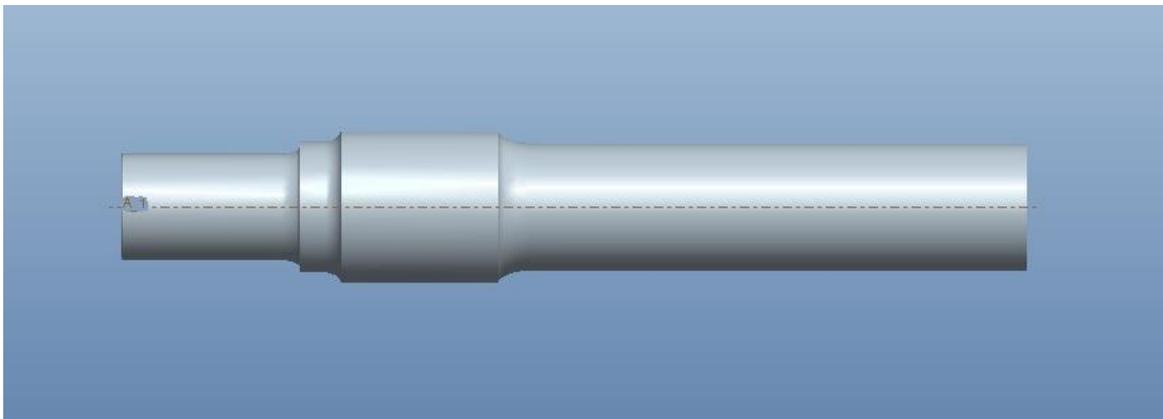


Ilustración 6. 9 Eje ferroviario modelado en Pro/Engineer (Vista frontal)



6.3.- FISURAS SOBRE EL EJE FERROVIARIO

Una vez finalizado el modelado del eje, realizamos las fisuras correspondientes sobre la zona donde iría ensamblada la rueda del ferrocarril.

Para ello, utilizamos la herramienta para planos de referencia ( Plano). Construimos un **plano de referencia** a la distancia indicada en la figura, para que coincida con el radio máximo de la zona del eje donde se ensambla la rueda del ferrocarril. De este modo facilitaremos la realización de las fisuras a lo largo del eje.

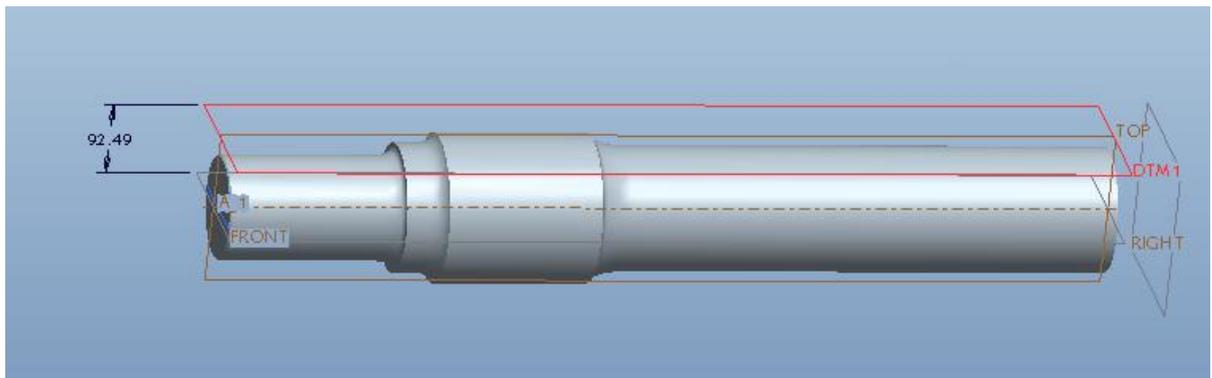


Ilustración 6. 10 Eje ferroviario modelado (con plano de referencia)

En la imagen siguiente se puede observar una **vista lateral del eje**, apreciándose el plano de referencia utilizado para facilitar la realización de una de las fisuras cúbicas a lo largo del eje ferroviario.

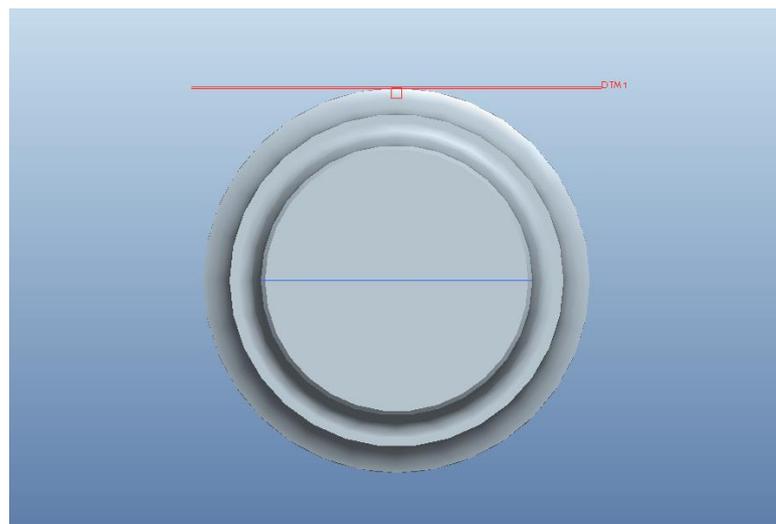


Ilustración 6. 11 Eje modelado con plano de referencia y fisura cúbica (vista lateral)

6.3.1. Modelado de fisura cúbica:

Las fisuras cúbicas realizadas en la zona donde se ensamblan las ruedas de los ferrocarriles son de dimensiones $5 \times 5 \times 5 \text{ mm}^3$.

En cada análisis se ha ido modificado la posición de la fisura para realizar distintos estudios estáticos y a fatiga, como se verá en capítulos posteriores. La primera fisura se ha realizado a una distancia de 5 mm del cambio de sección número III. Progresivamente se ha modificado la distancia de la fisura cúbica hacia el cambio de sección número II tal y como se observa en las siguientes imágenes.

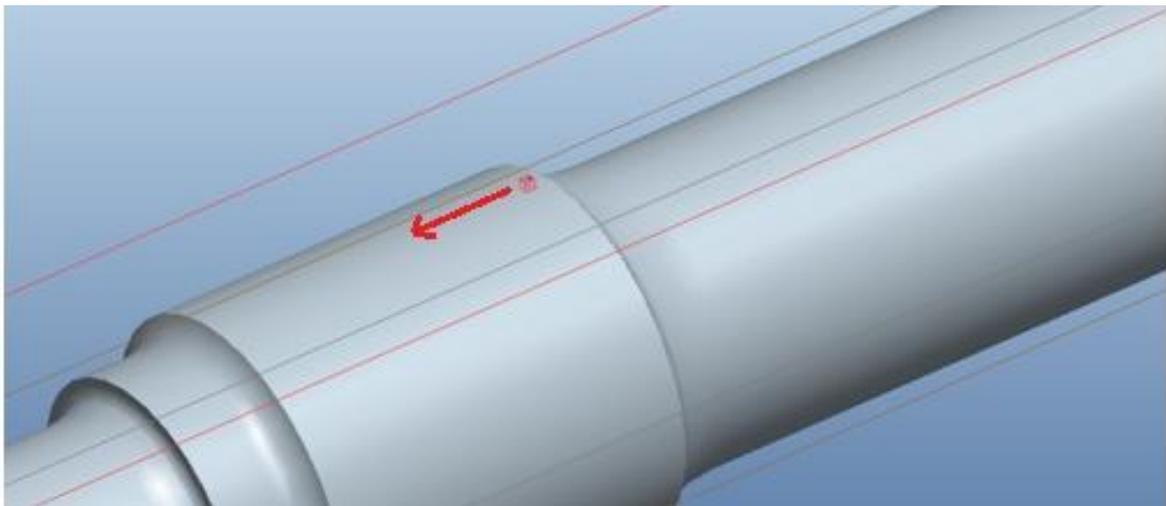


Ilustración 6.12 Inicio progresión de fisura cúbica

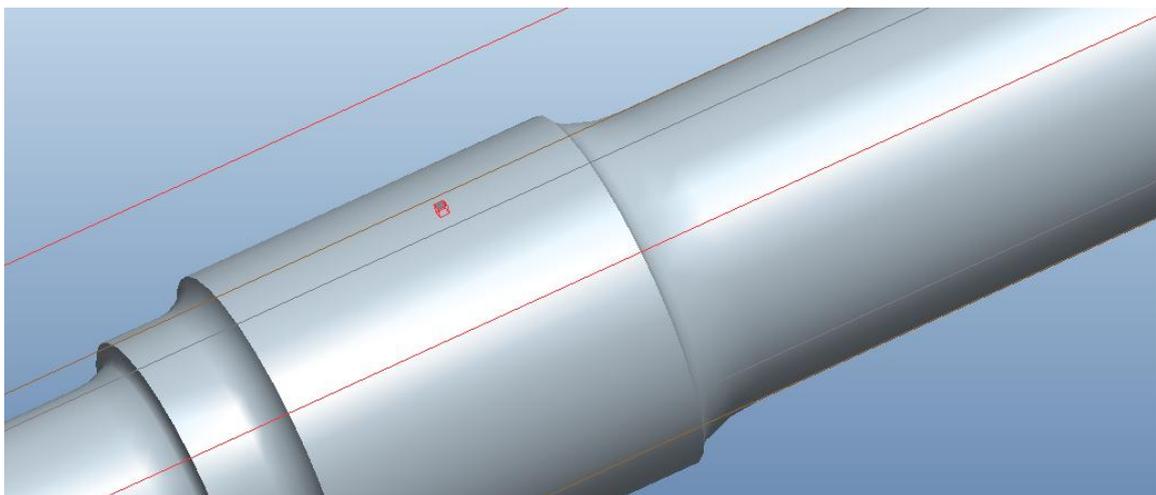


Ilustración 6.13 Fin progresión de fisura cúbica

Se trata de representar el estudio del comportamiento de un eje ante la progresión de una fisura. Para ello, en el eje ya modelado, se ha practicado una grieta por medio de una operación de **vaciado de material**, para ser exactos, una **extrusión**.



En la siguiente tabla se recogen las **dimensiones** de las distintas **fisuras cúbicas**, progresando desde el cambio de sección III hacia el cambio de sección número II. En total se han realizado once fisuras a lo largo del eje ferroviario, una para cada análisis.

Análisis	Distancia desde la sección III (mm)	Dimensión fisura (mm ³)
1	5	5x5x5
2	10	5x5x5
3	15	5x5x5
4	20	5x5x5
5	25	5x5x5
6	30	5x5x5
7	35	5x5x5
8	40	5x5x5
9	50	5x5x5
10	60	5x5x5
11	65	5x5x5

Tabla 6. 1 Dimensiones de fisuras cúbicas

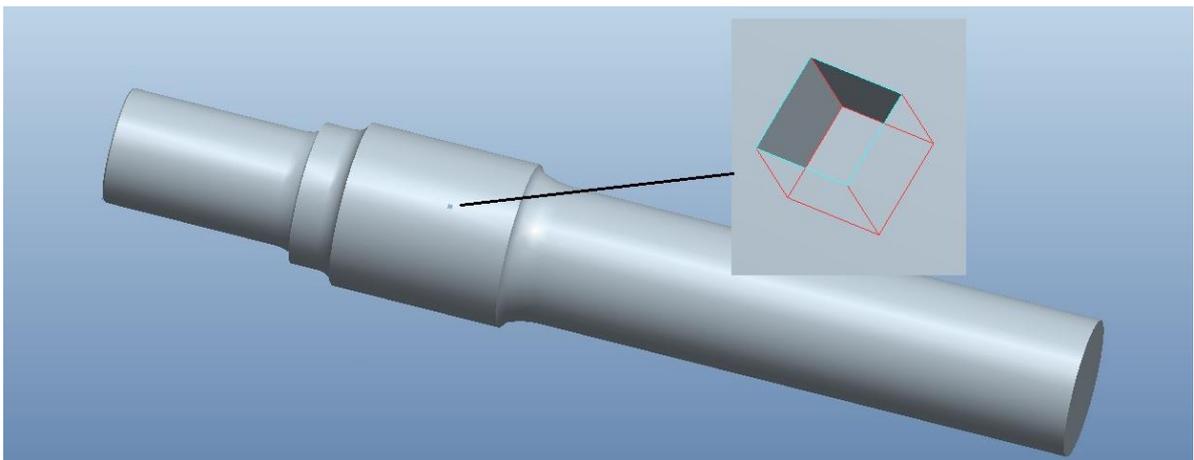


Ilustración 6. 14 Fin progresión de fisura cúbica (ampliación sobre fisura)



6.3.2. Modelado de fisura radial:

Una vez finalizados los análisis con las fisuras cúbicas, se procede a realizar los mismos análisis, pero aplicando esta vez fisuras radiales al eje ferroviario.

Para ello se han seguido los mismos pasos que en el modelo de fisura cúbica. Se ha utilizado un **plano de referencia** para facilitar la realización de las fisuras radiales. Dichas fisuras también se han realizado mediante la operación de extrusión.

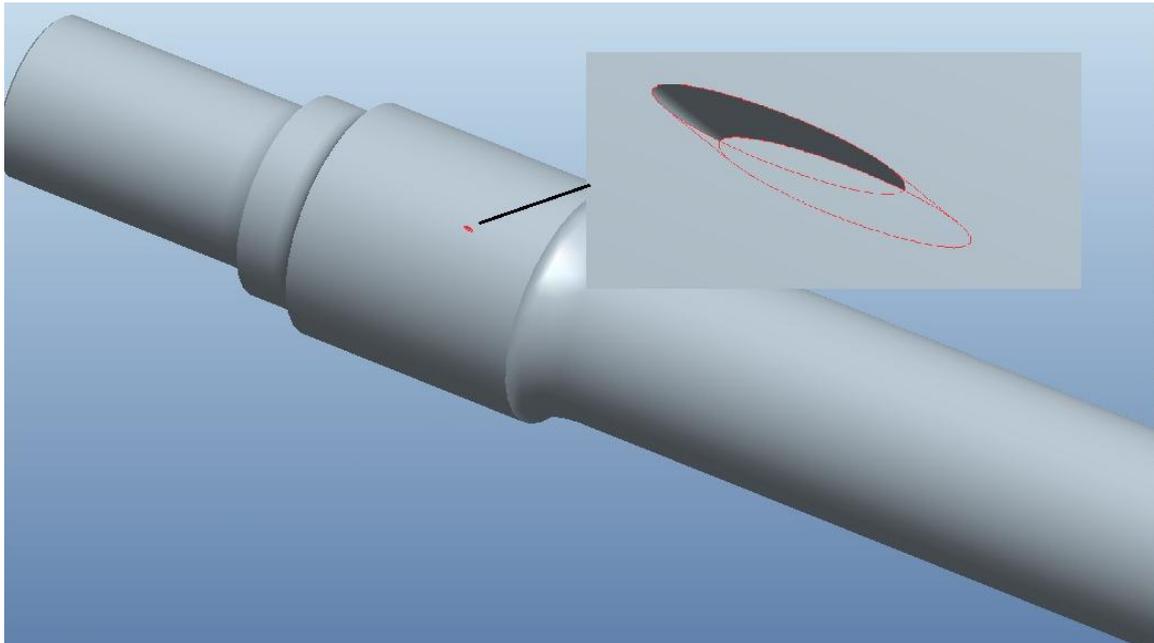


Ilustración 6. 15 Fisura radial (ampliación sobre fisura)

Las fisuras radiales no tienen las mismas dimensiones en todos los análisis ya que se han realizado para obtener los valores aproximados a las tensiones máximas obtenidas en los análisis de los ejes con fisuras cúbicas.

Para obtener los resultados más próximos se han iterado las dimensiones de las fisuras radiales, hasta obtener los resultados más cercanos a los obtenidos con las fisuras cúbicas.



Las **dimensiones** de las **fisuras radiales** y las distancias desde la sección III se recogen en la siguiente tabla:

Análisis	Distancia desde la sección III (mm)	Dimensión fisura		
		Ancho (mm)	Largo (mm)	Profundidad (mm)
1	5	1	5	5
2	11	0,6	3	5
3	15	1	5	5
4	17,5	1	10	5
5	24,5	0,8	4	5
6	30	1,2	6	5
7	36	0,6	3	5
8	40	1	5	5
9	50	1	5	5
10	60	1,4	7	5
11	70	0,6	3	5

Tabla 6. 2 Dimensiones de fisuras radiales

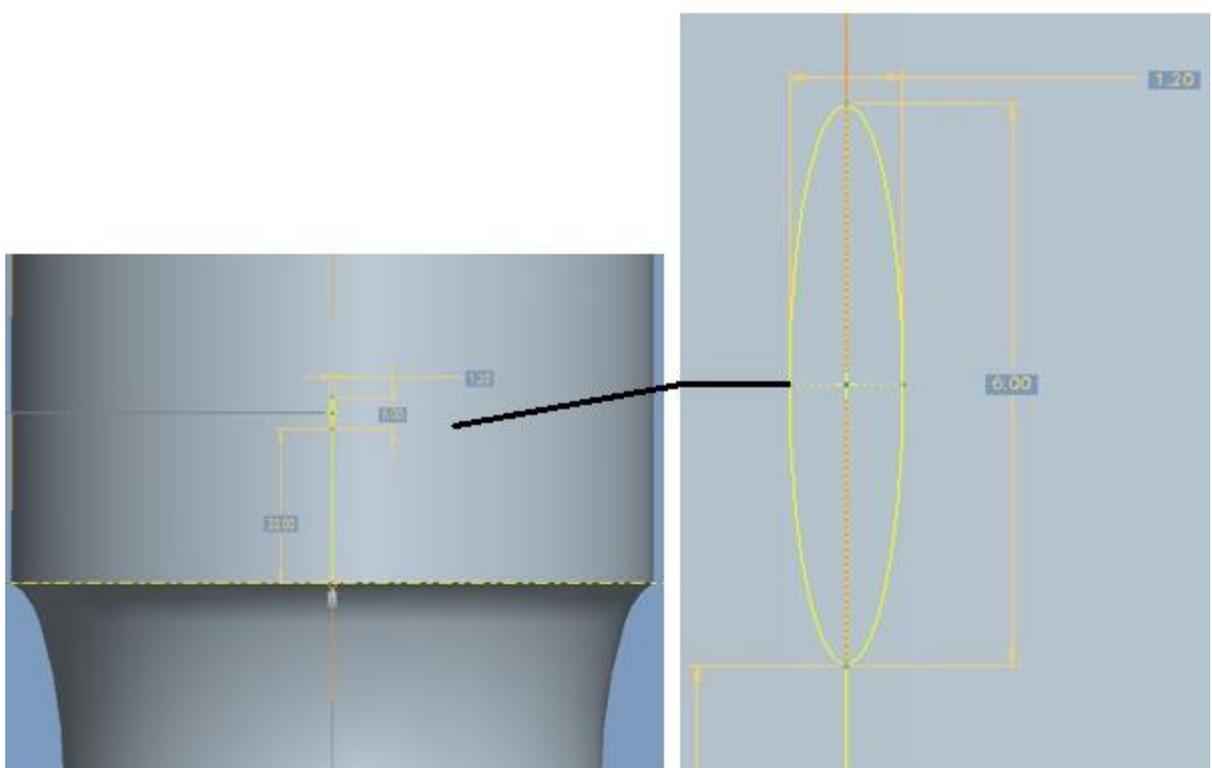


Ilustración 6. 16 Modelado de fisura radial



7.- CÁLCULOS PREVIOS

7.1.- TIPOS DE CARGA

7.2.- CARGA DE DISEÑO

7.3.- CÁLCULO DE LA PRECARGA



7.1.- TIPOS DE CARGA

Una vez definido el problema a estudiar con las diferentes simplificaciones realizadas en el mismo, se procede a explicar las **diferentes situaciones** que se han tenido en cuenta durante la realización del proyecto. Para ello, se detalla a continuación una evolución de las diversas variantes del conjunto estudiadas, así como las ventajas e inconvenientes de cada una de ellas, y sus respectivas similitudes con un modelo real del problema.

Antes de comenzar a enumerar las diferentes variantes, es importante tener en cuenta las cargas a aplicar. Se consideran **tres tipos de carga**, dependiendo de la zona del eje en la cual se aplican:

- Solicitación debida a la **masa suspendida** en la superficie del eje en la que va apoyada la caja de grasa del vehículo ferroviario.
- **Precarga** generada en el eje y la rueda debido al proceso de ensamblaje de ambos. En la realidad estos elementos se unen mediante un proceso industrial que consiste en dilatar el cubo de la rueda elevando la temperatura y por el contrario contraer el eje someténdole a bajas temperaturas lo cual implica que una vez que ambos elementos vuelven a temperatura ambiente después de haberlos colocado en la correcta posición, estos se encuentran tensionados o sometidos a una precarga.
- El **peso propio** que lo aplicará el programa una vez que estén definidos el sentido de la gravedad así como la densidad del material del que están compuestos los diversos elementos del conjunto.

Se procede a continuación a explicar cada una de las **cargas** mencionadas, teniendo en cuenta que serán comunes a todos los modelos o variantes de estudio.



7.2.- CARGA DE DISEÑO

La sollicitación debida a la masa suspendida en la superficie del eje en la que se apoya el vehículo ferroviario. Se puede considerar de dos maneras diferentes:

- Carga aplicada en toda la superficie indicada
- Carga aplicada en la mitad superior de dicha superficie

La carga aplicada por eje será de 30 Ton, por lo tanto ésta será de 15 Ton en cada extremo. Dicha carga está aplicada en la mitad superior de la superficie del eje en la que se apoyaría la caja de grasa.

El eje únicamente se encuentra sometido a compresión en su superficie superior, siendo la distribución de tensiones en la mitad inferior desconocida hasta ahora, tal y como se muestra en la figura siguiente. Por tanto, en este proyecto se va a considerar que la carga se aplica solo sobre la superficie superior del eje.

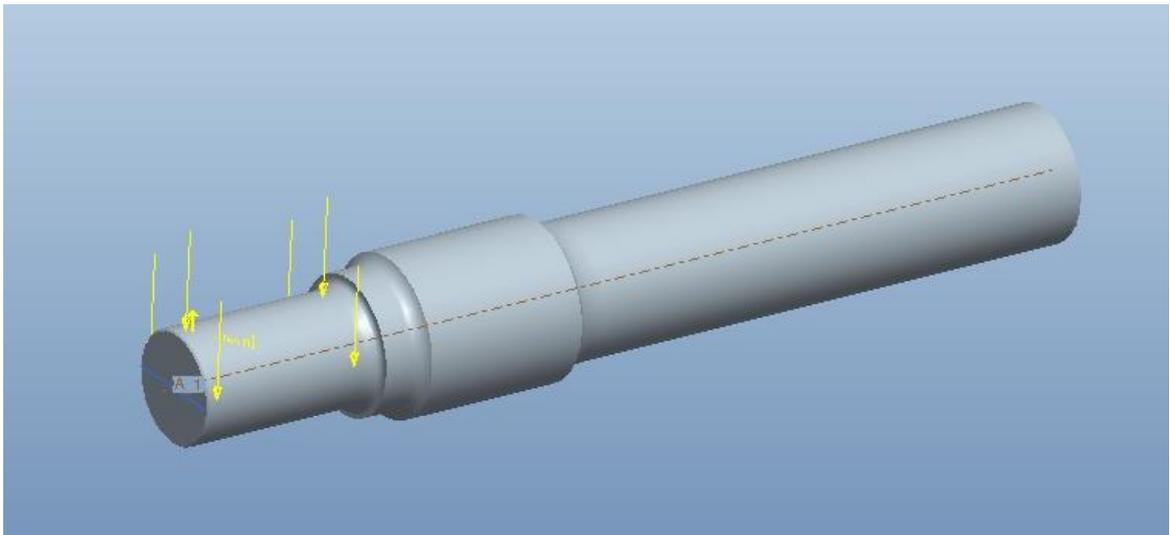


Ilustración 7. 1 Carga aplicada en la mitad superior de la superficie del eje

7.3.- CÁLCULO DE LA PRECARGA

En este caso, se pretende añadir la precarga en el eje. Esta precarga se corresponderá con la carga que se supone que la rueda aplica sobre el eje, debido al proceso de fabricación que conlleva dicha unión, en el que ambos elementos se ensamblan bajo una determinada presión y a una diferencia de temperaturas dada.

Se puede extraer de la normativa ferroviaria el valor de desplazamiento aproximado que sufre la unión eje-rueda, debido a la precarga antes mencionada. Dicho valor es del orden de 0,1 mm. Como primera aproximación, y tampoco muy alejada de la realidad, se considera que cada elemento sufre el 50% del desplazamiento antes señalado, por lo que el eje se deformará 0,05 mm al igual que la rueda. Esto es así debido al proceso de acción y reacción que ocurre entre ambos componentes.

El objetivo es encontrar la precarga en el eje, por lo que mediante la aplicación de *Mechanica* del programa Pro/Engineer, y mediante varias iteraciones, se obtendrán los valores de presión (en este caso de compresión), para los cuales se tienen estas deformaciones. Para ello, se analiza eje y rueda por separado, tal y como se explica a continuación:

- Cálculo de la precarga en el eje:

Con el objetivo de obtener únicamente la precarga en la zona del eje en la que se apoya la rueda, se ha restringido todo el eje excepto dicha superficie y las secciones contiguas. Además no se ha tenido en cuenta la acción de la gravedad, de tal manera que la distribución de tensiones en la superficie del eje analizada es uniforme.

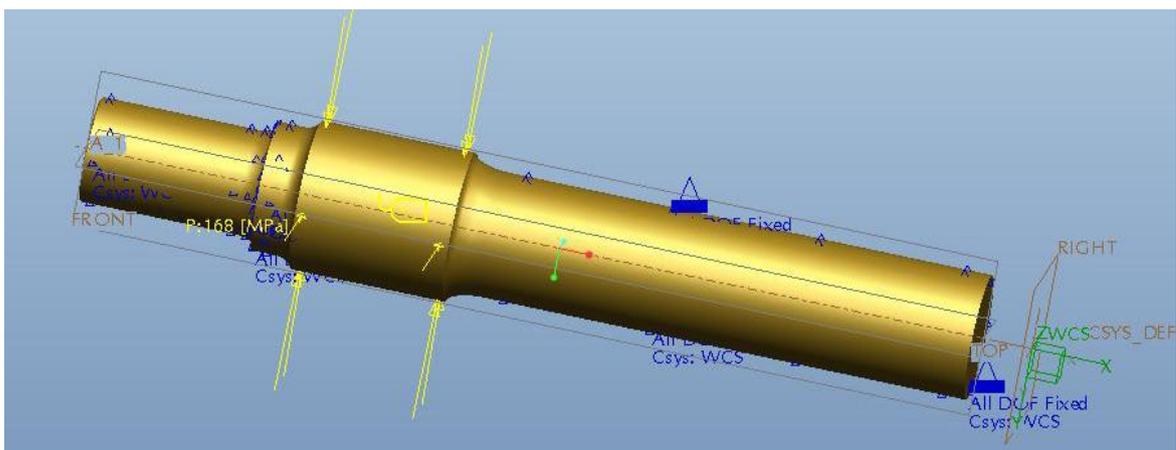


Ilustración 7. 2 Cálculo de la precarga en el eje

Resultados en desplazamientos del análisis anterior:

Una vez resuelto el análisis se obtienen un gran número de resultados. En este caso, únicamente interesan los desplazamientos sufridos por la superficie del eje analizada. En la siguiente figura se aprecia que, tras varias iteraciones, se obtiene que para una precarga de 168 MPa, dicha superficie sufre una deformación cercana a la buscada, concretamente de 0,05051 mm.

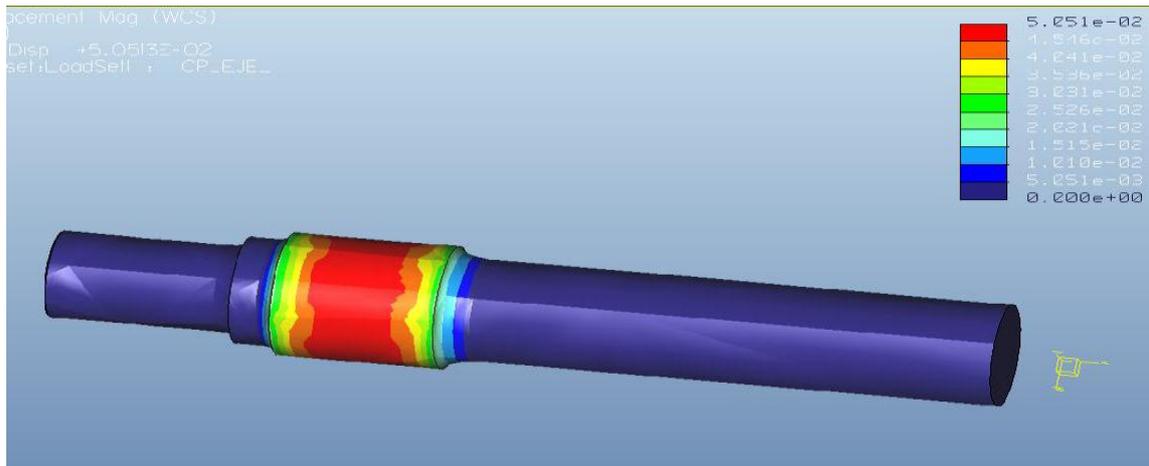


Ilustración 7. 3 Resultados de la precarga en el eje

- Cálculo de la precarga en el rueda:

Los datos obtenidos en la precarga de la rueda han sido facilitados por otros compañeros, encargados de un estudio minucioso de dicha rueda.

Para ello, han restringido únicamente la banda de rodadura de la misma y han despreciado el efecto de la gravedad en el cálculo, con el objetivo de obtener unos resultados uniformes de deformación.

Así mismo, tras varias iteraciones, se ha llegado a la siguiente solución: Para una precarga de 55 MPa de compresión, se obtiene un desplazamiento de la zona afectada de un valor de 0,04975 mm. Resultado que se aproxima en gran medida al buscado.

Se procede a continuación a obtener un único valor de precarga, tanto para el eje como para la rueda, por lo que se puede aproximar a la media entre los valores de compresión obtenidos en ambos estudios. Esto es así, tal y como se ha comentado anteriormente, gracias al efecto de acción y reacción ocasionada entre el eje y la rueda.

$$P = \frac{P_{EJE} + P_{RUEDA}}{2} = \frac{168MPa + 55MPa}{2} = 111,5MPa$$



8.- CONDICIONES DE CONTORNO DEL EJE

8.1.- INTRODUCCIÓN DE LOS ESTADOS DE CARGA

8.2.- REFINAMIENTO DE MALLA



8.1.- INTRODUCCIÓN DE LOS ESTADOS DE CARGA

El objeto de estudio del presente proyecto será el cálculo de la vida a fatiga del eje así como del factor de seguridad, y la realización de una comparativa de los resultados para diferentes dimensiones de grietas simuladas sobre la zona de contacto entre el eje y la rueda.

Para ello se ha realizado la suposición de que como las tensiones importantes que serán objeto de estudio son las referentes a los cambios de sección, se procederá a **restringir todos los movimientos** del eje en cualquier dirección, en la zona de unión con la rueda, **a excepción del giro** respecto al eje x que permitirá la rotación del eje para realizar el estudio de fatiga.

Por otro lado, se introducirá un estado de cargas tal que se tenga un estado tensional lo más similar posible al estado real del conjunto eje, rueda, caja de grasas, etc. Esto se llevará a cabo introduciendo **cargas de compresión y tracción** en diversas zonas para que la acción conjunta de los mismos produzca una distribución de tensiones que se asemeje al caso real con los demás componentes mecánicos.

Una vez ajustadas las cargas se han realizado análisis estáticos simples con refinamiento de malla en las secciones críticas, y posteriormente los correspondientes análisis a fatiga. Por último, se han repetido dichos análisis, añadiendo un refinamiento de malla en las fisuras realizadas en la zona de contacto eje-rueda.



Carga 1: carga de la masa suspendida del vehículo ferroviario de 15 toneladas en el extremo del eje.

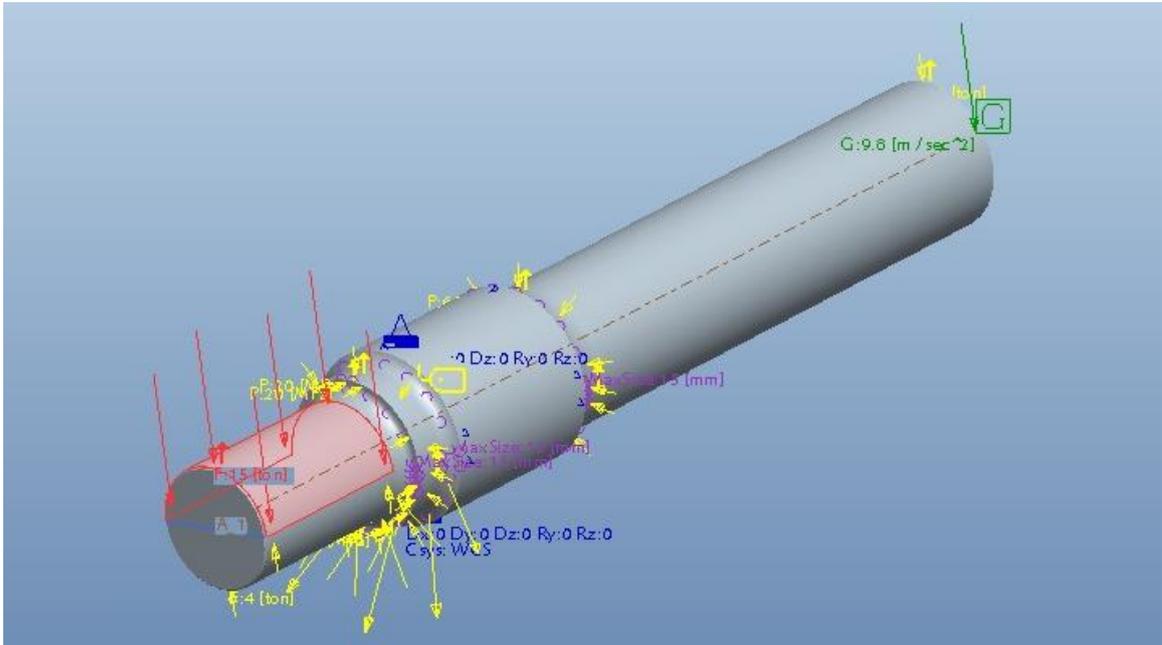


Ilustración 8.1 Carga 1

Carga 2: carga de compresión de 20 MPa en la segunda sección del eje.

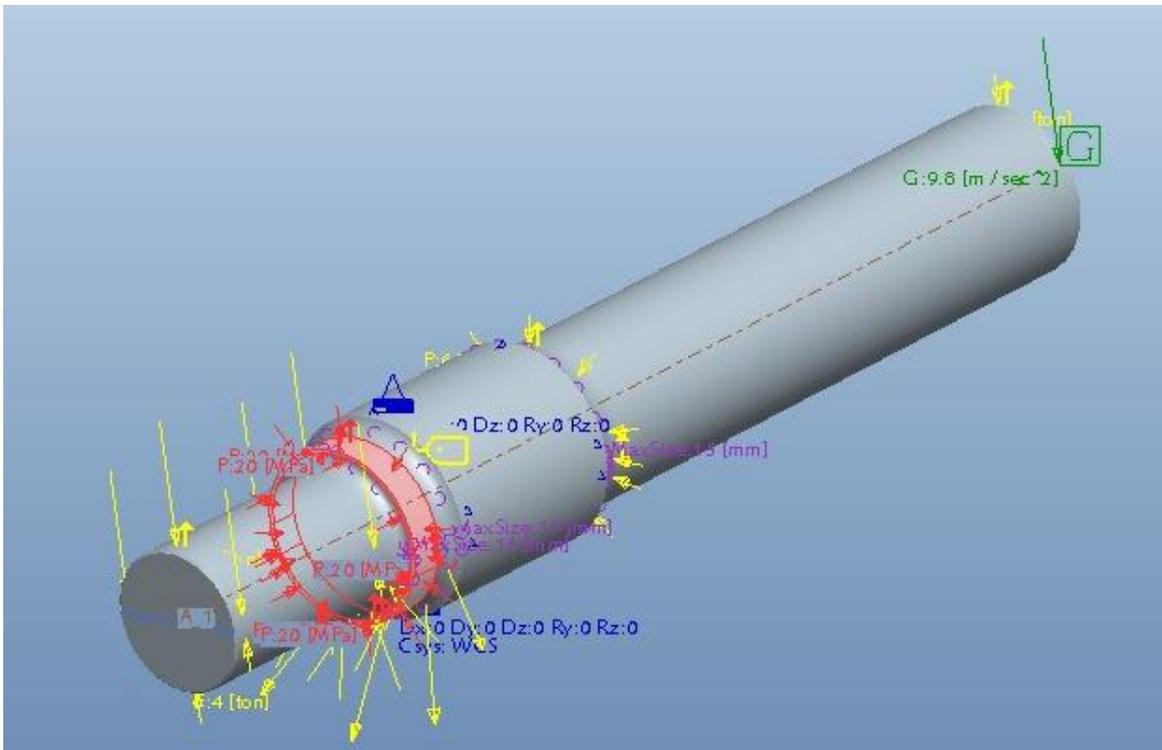


Ilustración 8.2 Carga 2



Carga 3: restricción de la zona de acople de la rueda donde únicamente se deja libre la rotación del eje.

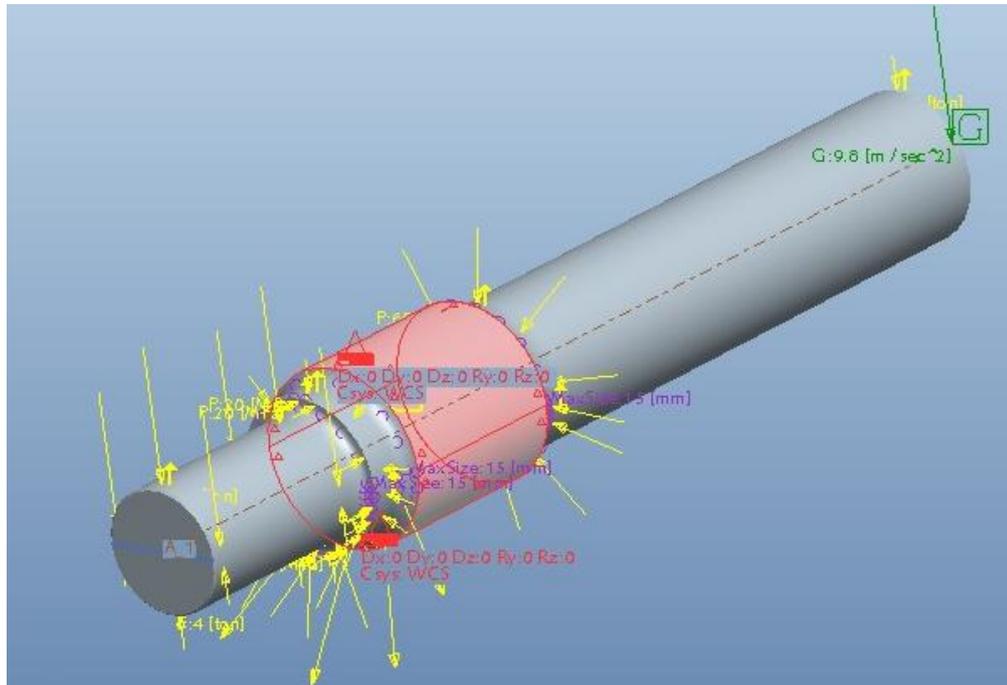


Ilustración 8.3 Carga 3

Carga 4: carga vertical de 2 toneladas en el punto central del eje (plano de simetría).

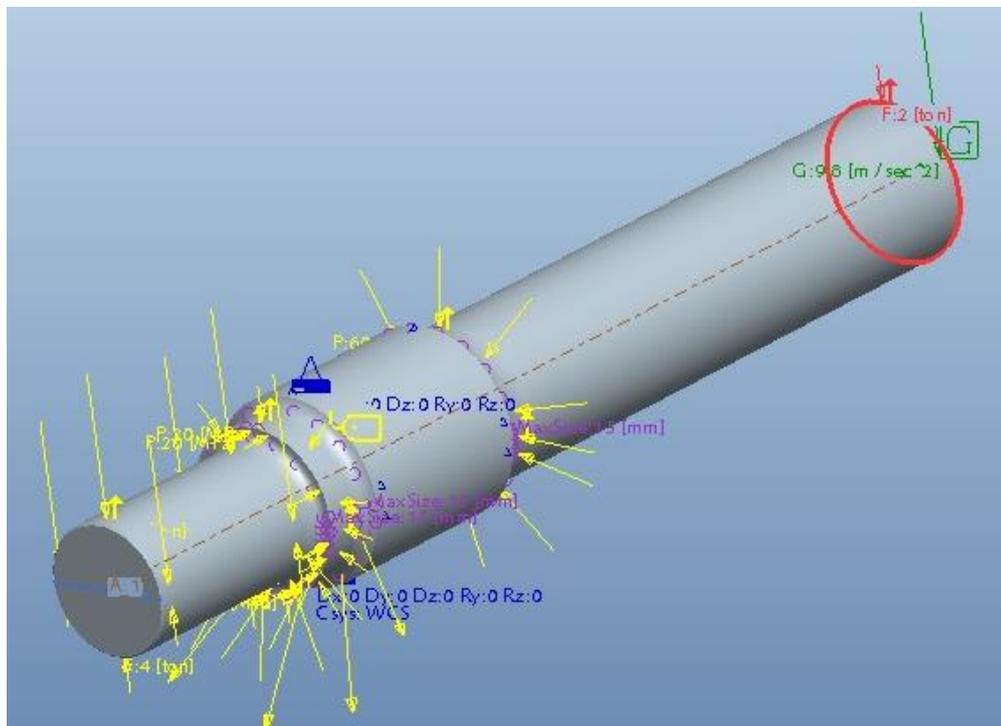


Ilustración 8.4 Carga 4



Carga 5: carga de compensación de esfuerzos en la zona inferior del extremo del eje, de valor 4 toneladas en compresión.

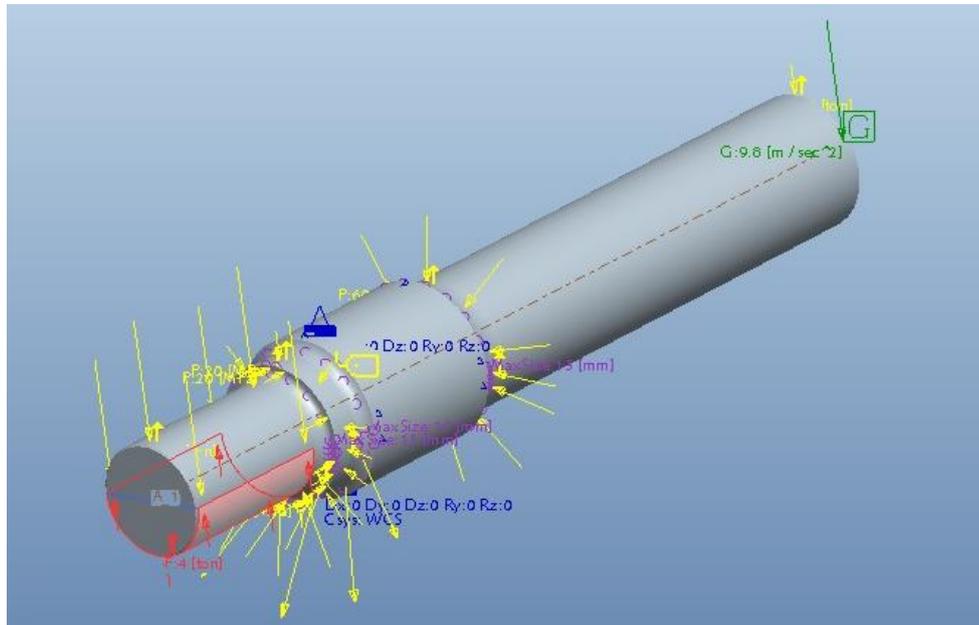


Ilustración 8. 5 Carga 5

Carga 6: carga de compensación de esfuerzos en el primer cambio de sección para incrementar el valor de las tensiones en dicha zona, de 70 MPa.

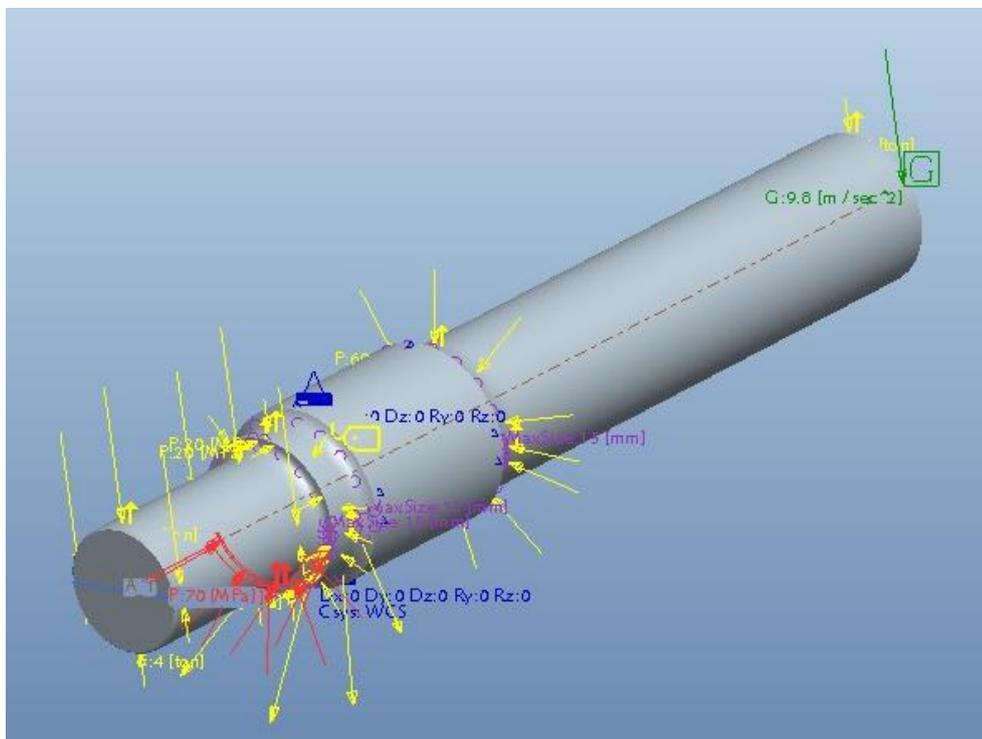


Ilustración 8. 6 Carga 6



Carga 7: carga de compensación de esfuerzos en la mitad inferior del segundo cambio de sección de 110 MPa en tracción, con el fin de aliviar los elevados valores de tensión que se producen en dicha zona.

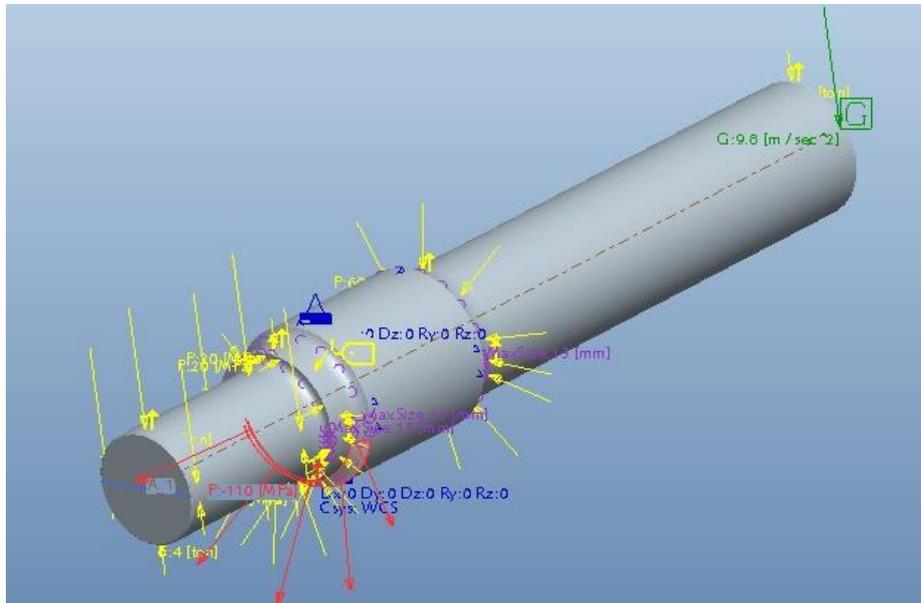


Ilustración 8. 7 Carga 7

Carga 8: carga de compresión de 60 MPa en el tercer cambio de sección con el fin de simular junto con la carga 4 las tensiones en el tercer cambio de sección, ya que al estar en la zona del acople de la rueda restringida, no se transmiten los esfuerzos de las demás cargas.

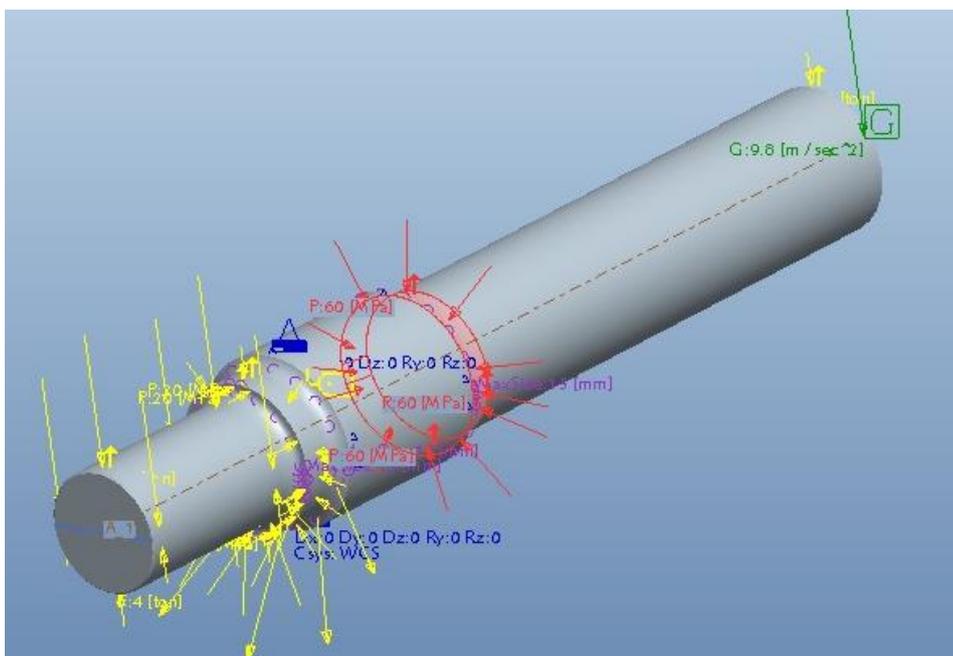


Ilustración 8. 8 Carga 8



Peso propio: también se tiene en cuenta la acción del peso propio del eje.

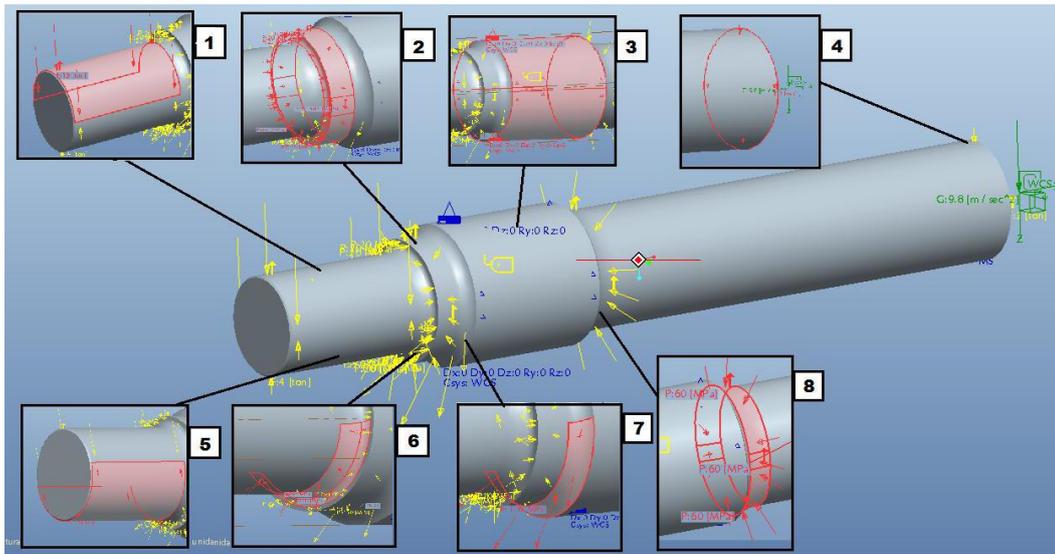


Ilustración 8.9 Resumen estado de cargas ajustado del eje

Carga 1: carga de la masa suspendida del vehículo ferroviario de 15 toneladas en el extremo del eje.

Carga 2: carga de compresión de 20MPa en la segunda sección del eje.

Carga 3: restricción de la zona de acople de la rueda donde únicamente se deja libre la rotación del eje.

Carga 4: carga vertical de 2 toneladas en el punto central del eje (plano de simetría).

Carga 5: carga de compensación de esfuerzos en la zona inferior del extremo del eje, de valor 4 toneladas en compresión.

Carga 6: carga de compensación de esfuerzos en el primer cambio de sección para incrementar el valor de las tensiones en dicha zona, de 70MPa.

Carga 7: carga de compensación de esfuerzos en la mitad inferior del segundo cambio de sección de 110MPa en tracción, con el fin de aliviar los elevados valores de tensión que se producen en dicha zona.

Carga 8: carga de compresión de 60MPa en el tercer cambio de sección con el fin de simular junto con la carga 4 las tensiones en el tercer cambio de sección, ya que al estar en la zona del acople de la rueda restringida, no se transmiten los esfuerzos de las demás cargas.

Peso propio: también se tiene en cuenta la acción del peso propio del eje.

8.2.- REFINAMIENTO DE MALLA

Una vez introducidas todas las cargas de compresión y tracción, teniendo un estado tensional del eje junto con el resto de componentes lo más similar al real, se ha procedido a realizar un refinamiento de malla en las secciones críticas.

Para llevar a cabo el proceso de refinado de la malla en las secciones críticas, se ha actuado de la siguiente manera:

Se selecciona en la barra de herramientas superior el icono *AutoGEM* y a continuación se selecciona *Control*. Se abre una nueva ventana y en ella se selecciona el máximo tamaño del elemento y las superficies del modelo que se desea refinar. Para el caso estudiado, se ha seleccionado un tamaño del elemento de 15 mm como se observa en la siguiente ilustración:

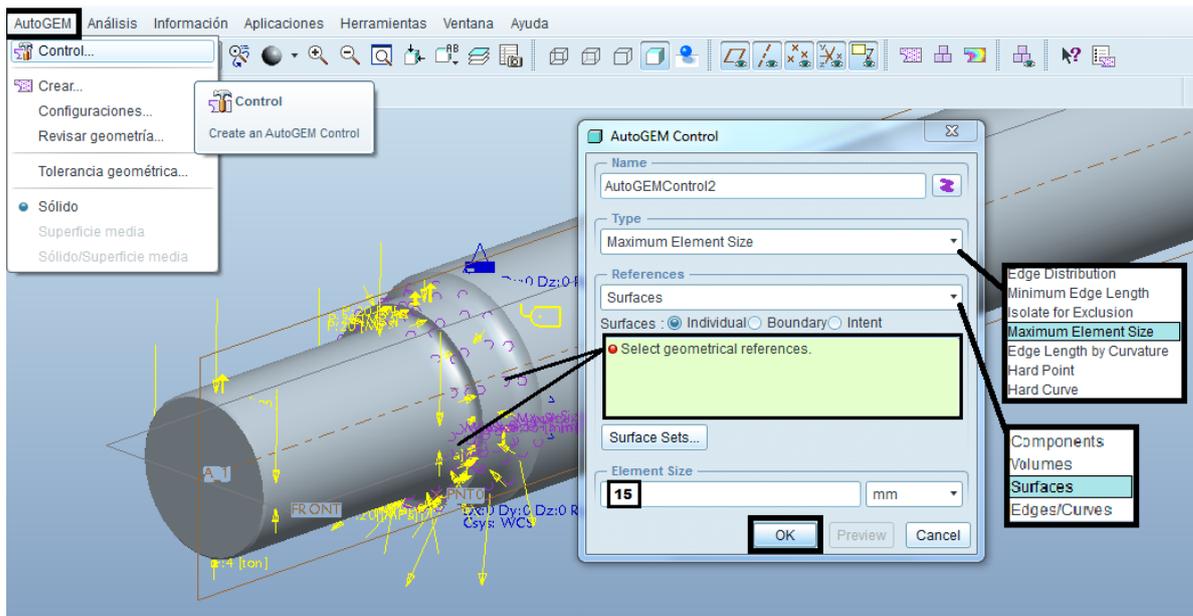


Ilustración 8. 10 Ventana de refinado de malla



En la siguiente figura se muestra el semieje a estudiar, con las condiciones de contorno que se han explicado anteriormente:

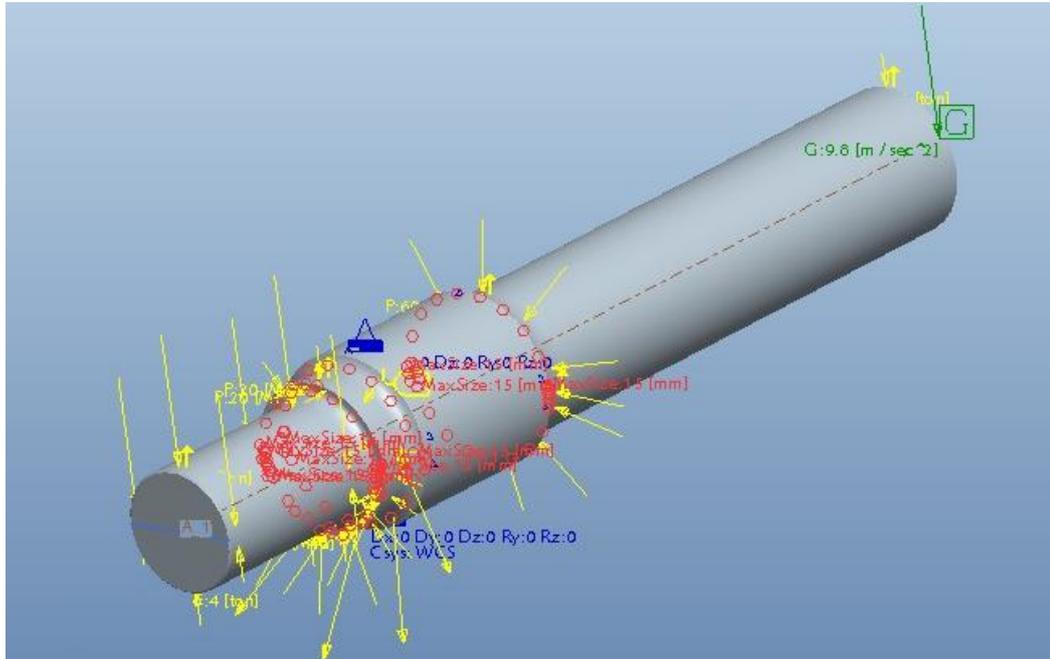


Ilustración 8. 11 Refinamiento de malla en cambio de sección

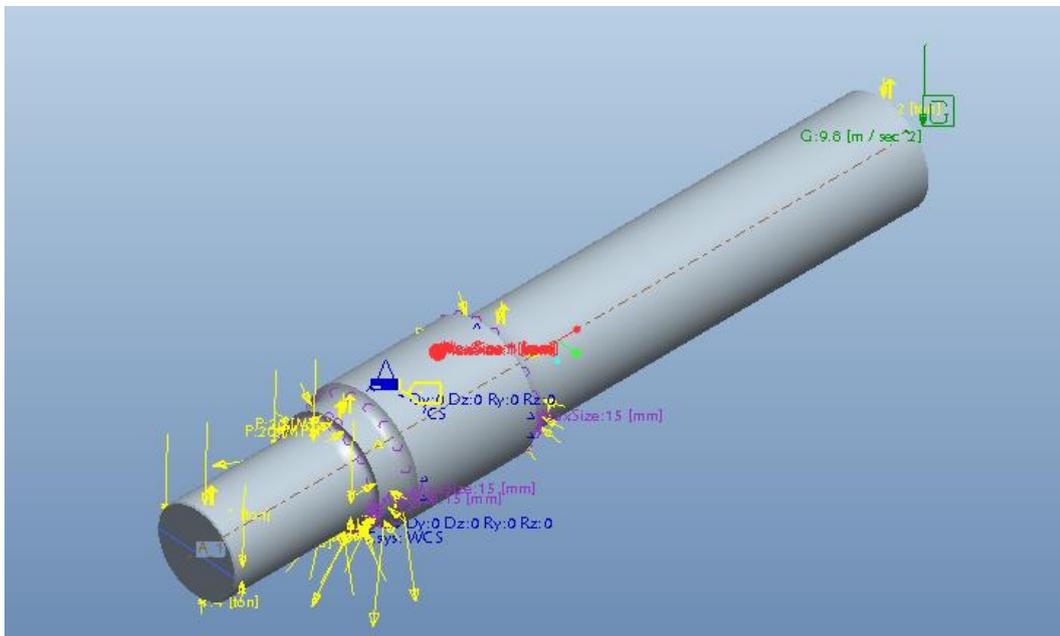


Ilustración 8. 12 Refinamiento de malla en la fisura

Una vez aplicadas las cargas mencionadas y realizado el refinamiento de malla en los cambios de sección, podemos proceder a realizar los correspondientes análisis de estática y fatiga desarrollados en el capítulo siguiente.



9.- CONFIGURACIÓN DE LOS ANÁLISIS

9.1.- CONFIGURACIÓN DE LOS ANÁLISIS ESTÁTICOS

9.2.- CONFIGURACIÓN DE LOS ANALISIS A FATIGA

9.3.- ANÁLISIS A FATIGA DEL EJE SEGÚN LA NORMA “EN 13261”



9.1.- CONFIGURACIÓN DE LOS ANÁLISIS ESTÁTICOS

Una vez definidas las condiciones de contorno, se ha de configurar el análisis a ejecutar sobre el modelo. Antes de realizar análisis a fatiga, es necesario realizar análisis estáticos previos. Los pasos a seguir para configurar dichos análisis se muestran a continuación:

- Se accede a la aplicación *Mechanica*.
- Se presiona sobre *Mechanica Analyses/Studies*:



- A continuación sobre la ventana se selecciona en *file* el tipo de análisis estático *New Static*.

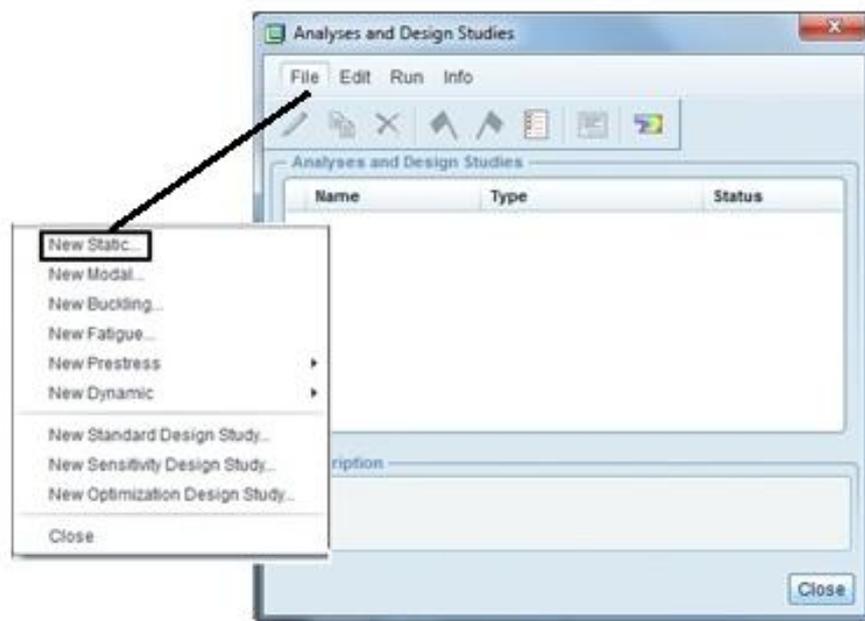


Ilustración 9. 1 Ventana de selección del tipo de análisis



- Una vez seleccionado el análisis estático, se despliega una nueva ventana que se muestra a continuación en la cual se debe nombrar el tipo de análisis y se deben seleccionar los campos marcados:

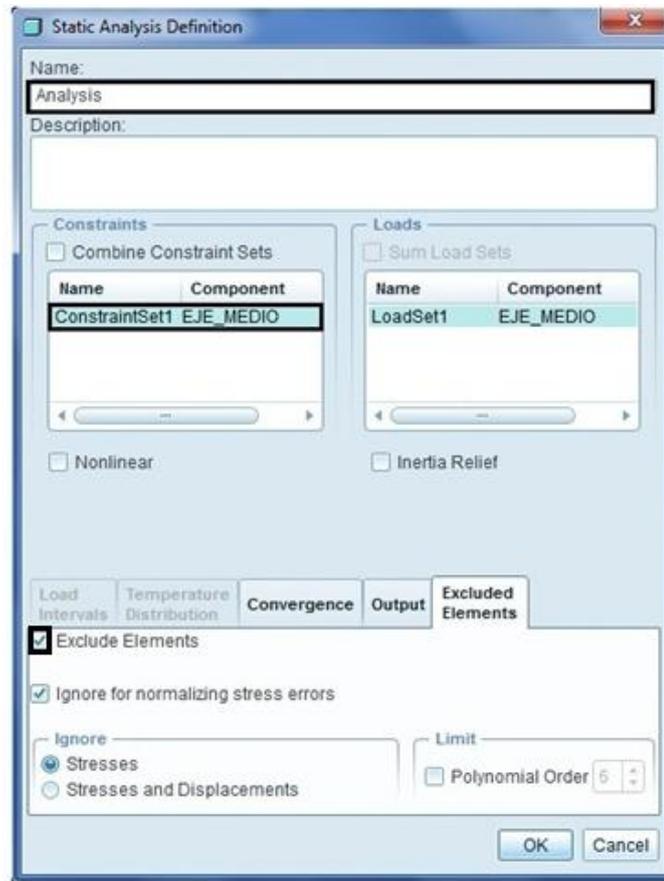


Ilustración 9.2 Ventana de selección del tipo de análisis

- Una vez introducidas todas las variables, se procede a arrancar el análisis, para ello se pulsa el icono de la bandera verde y aparecerá en la ventana el análisis y el estado del mismo. Si el estado *Status* aparece como **Running** quiere decir que el análisis está en proceso de cálculo, y cuando éste termine aparecerá como completo **Completed**. Si se desea ver el estado del análisis o el sumario de los resultados más importantes se puede abrir una nueva ventana pulsando el icono de **Display study status**.

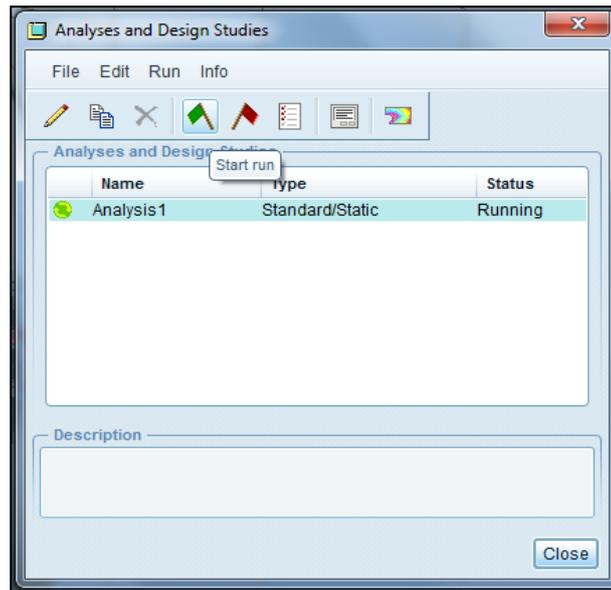


Ilustración 9.3 Ventana del estado del análisis

- Si se ha resuelto el análisis adecuadamente, a continuación se puede proceder a la visualización de los resultados obtenidos, para ello se pulsa en la barra de herramientas superior el icono de **Aplicaciones** y a continuación el de **Resultados de Mechanica**. Se despliega una nueva ventana en la que se selecciona el icono de resultados mostrado en la siguiente figura, y posteriormente se selecciona el análisis deseado en pulsando abrir.

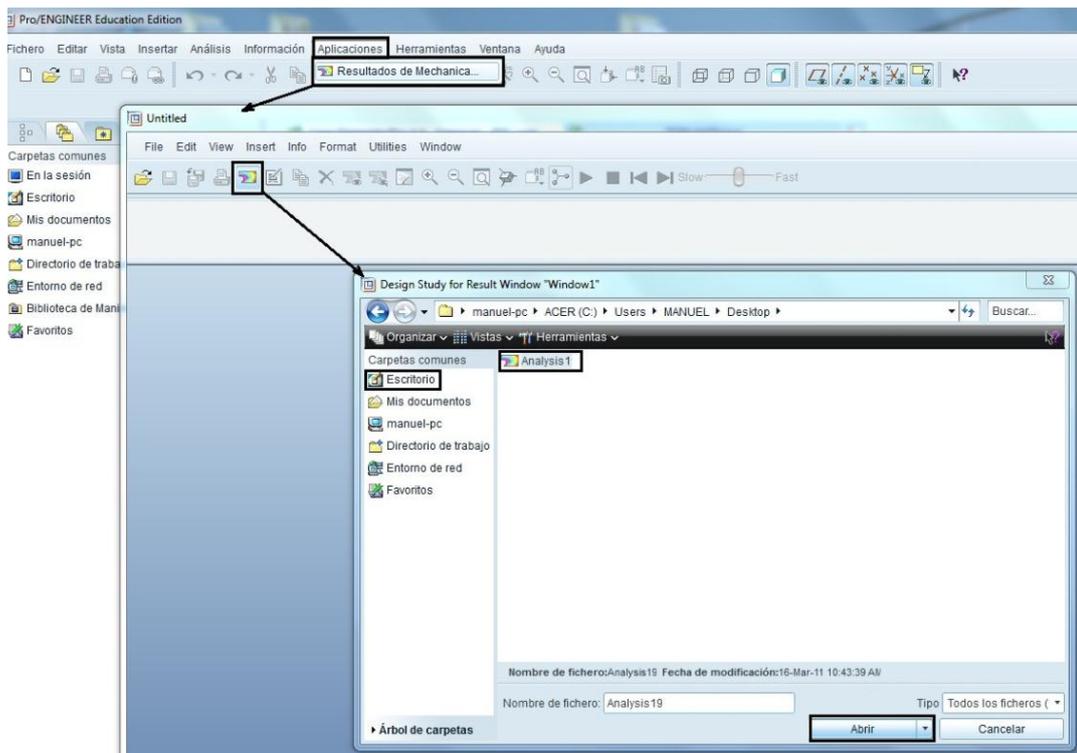


Ilustración 9.4 Resultados de Mechanica



- A continuación aparece una nueva ventana en la cual se selecciona el icono **Quantity** para determinar el tipo de resultado que se quiere visualizar; como pueden ser las deformaciones, los desplazamientos, la tensión según el criterio de plastificación del material elegido, o la energía de deformación entre otros.
- De la misma manera, dentro de la magnitud seleccionada se puede escoger el tipo de unidad en la que se quiere representar el estudio, que condicionará el valor numérico de la escala de valores que se representa junto a las imágenes del modelo. Del mismo modo se puede seleccionar una de las tres dimensiones (X, Y, Z) y obtener una solución en un plano concreto o simplemente un valor global del resultado en todas las direcciones.

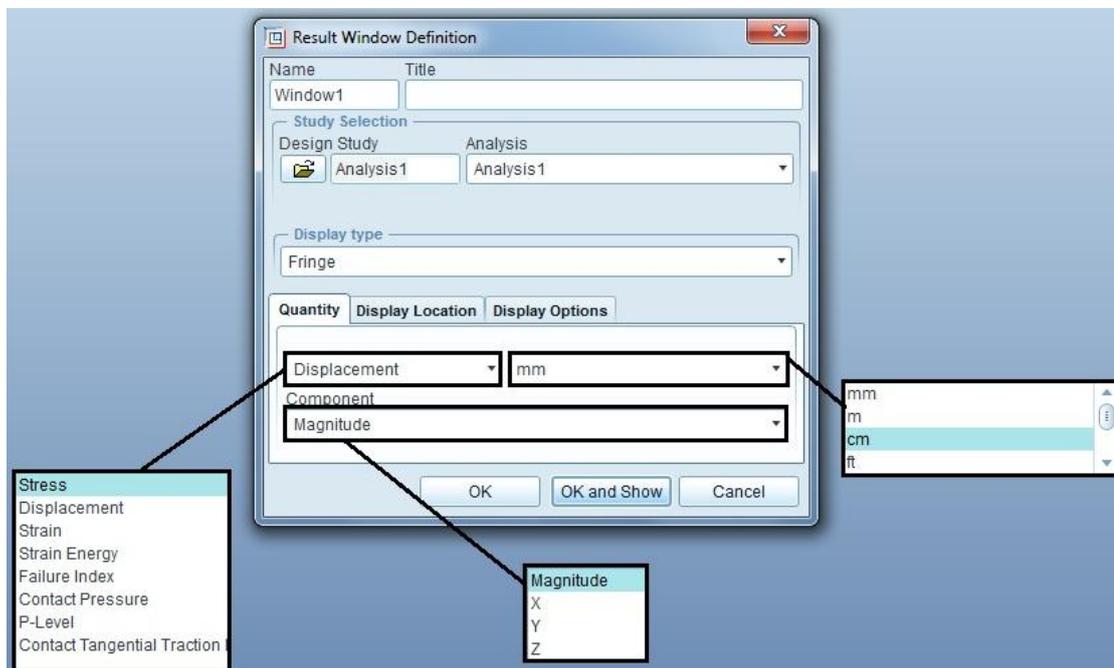


Ilustración 9. 5 Ventana de resolución de resultados

- A continuación se mostrarán los resultados alcanzados y como apunte, cabe señalar, que **hay resultados que no aparecen representados debido al diagrama de colores**. Esto puede ser debido a la toma de un amplio rango de valores.



Para solucionar este problema es conveniente ajustar la escala en torno a los valores estimados y aplicar, al mismo tiempo, un mayor número de rangos a la leyenda de colores que representan dichos resultados.

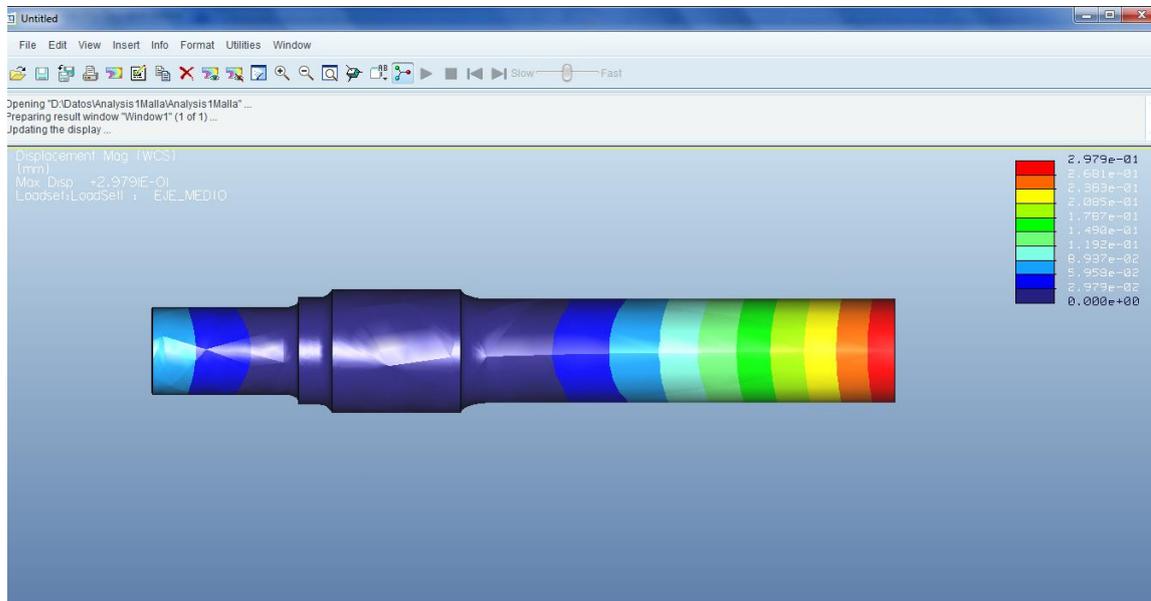


Ilustración 9. 6 Resultados del análisis sin ajuste de escala

Este hecho se ha de tener especialmente en cuenta ya que puede llevar a confusión e interpretar de forma errónea los resultados aportados por el *Solver*. En el estudio realizado, es frecuente que ocurra esto; por lo que se ha recurrido a modificar los intervalos para reducir la escala de los valores y aportar una leyenda de **15 términos** en lugar de 9.

Para acceder a modificar la leyenda, dentro de la ventana de resultados, se pulsa el icono de *Format* y a continuación el de *Legend*, acto seguido se abre la ventana de leyenda y se pueden cambiar los valores anteriormente mencionados y aumentar el número de niveles.

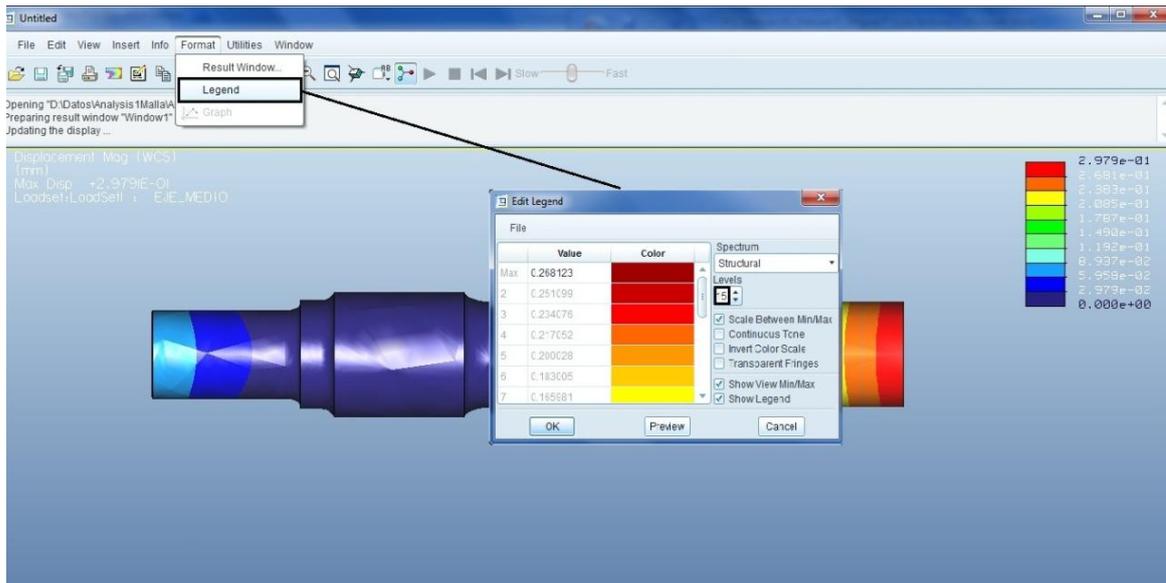


Ilustración 9.7 Edición de la leyenda

Se muestra ahora en la siguiente ilustración como queda modificada la figura anterior, cambiando dichos parámetros, ofreciendo una mejor representación de los resultados y una mejor acotación de entre máximos y mínimos.

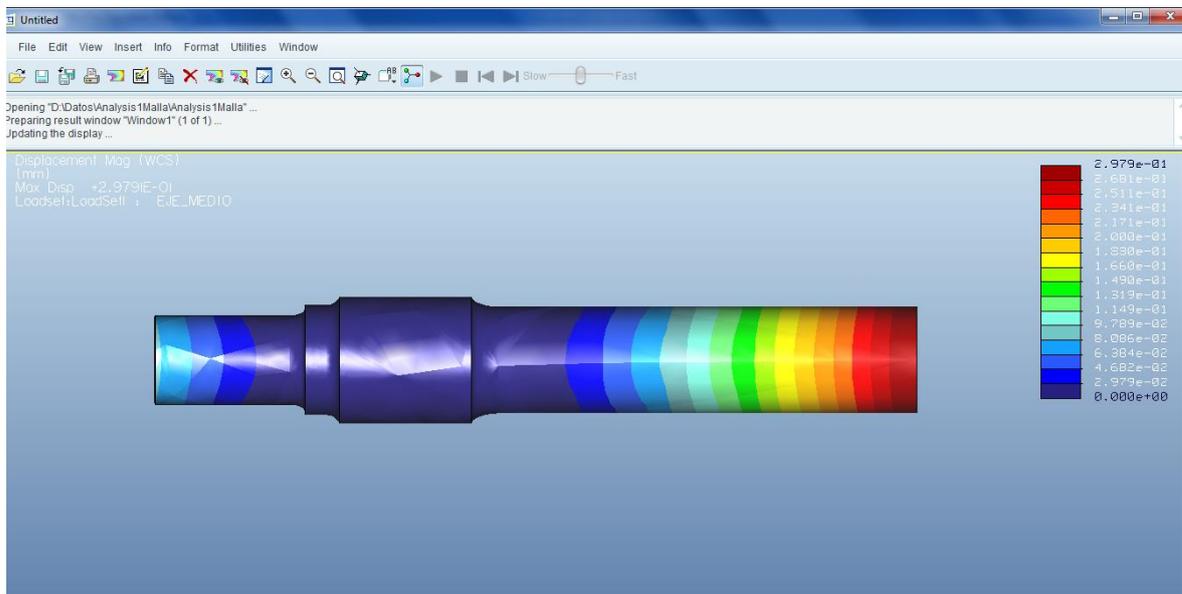


Ilustración 9.8 Resultados del análisis con ajuste de escala

9.2.- CONFIGURACIÓN DEL ANÁLISIS A FATIGA

A continuación se procede a estudiar el **eje a fatiga**. Antes de nada es necesario especificar el número de **secciones críticas** que posee dicho eje y el nombre que se le asignará a cada una de ellas, como se indica en la siguiente figura:

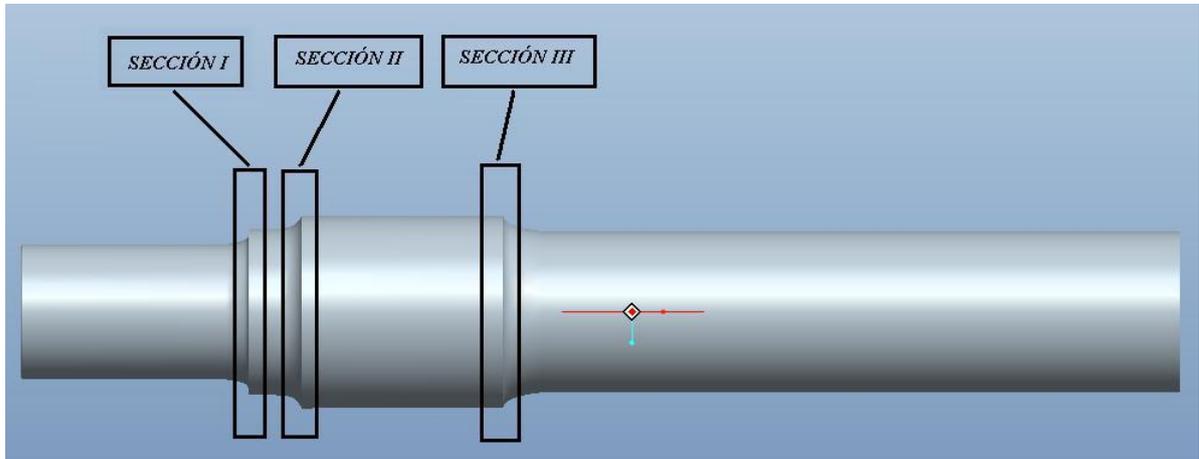


Ilustración 9. 9 Definición de las secciones críticas

Una vez definidas las secciones críticas, se llevará a cabo el cálculo del **factor de concentraciones teórico** (K_t) a partir de la gráfica siguiente, extraída del apartado de fatiga anteriormente explicado:

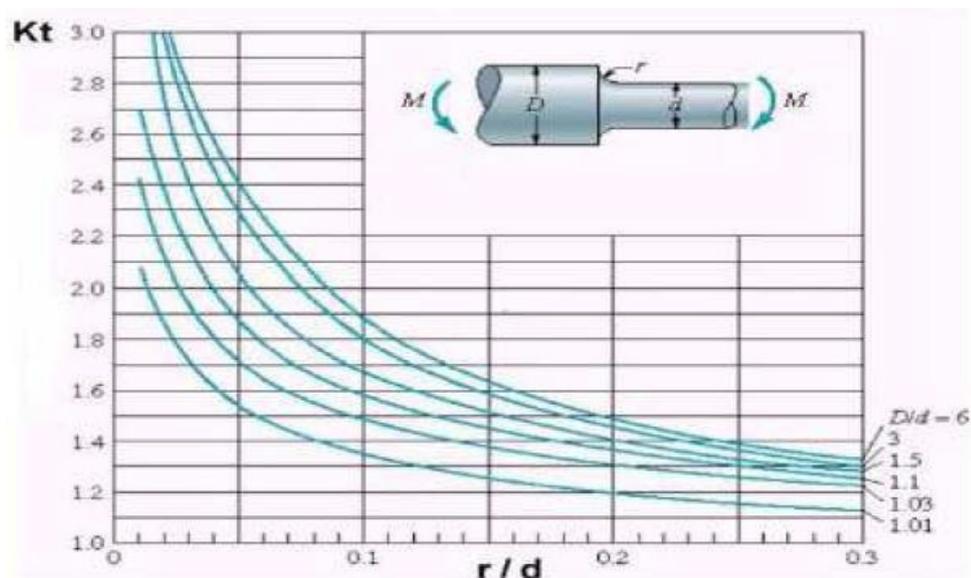


Ilustración 9. 10 Barra de sección circular con estrechamiento y entalles en flexión



Sección I:

$$\frac{r_1}{d} = \frac{8}{130} = 0,0615; \frac{D}{d} = \frac{160}{130} = 1,23 \rightarrow K_{T1} = 1,82$$

Sección II:

$$\frac{r_2}{d} = \frac{20}{160} = 0,125; \frac{D}{d} = \frac{185}{160} = 1,156 \rightarrow K_{T2} = 1,50$$

Sección III:

$$\frac{r_3}{d} = \frac{15}{155} = 0,096; \frac{D}{d} = \frac{185}{155} = 1,19 \rightarrow K_{T3} = 1,60$$

A continuación, se calcula el **factor de sensibilidad a las ranuras** (q) representado en la gráfica de la figura siguiente, con los valores de la tensión última a tracción y el radio de las ranuras.

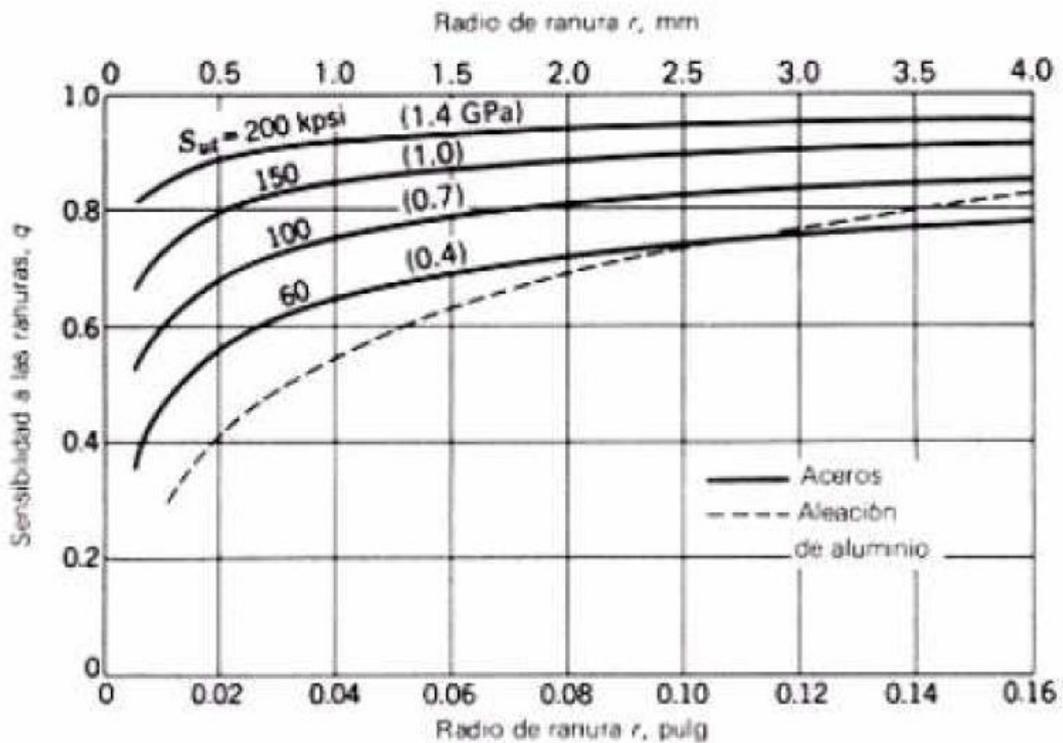


Ilustración 9. 11 Sensibilidad a las ranuras para cargas de flexión y axiales alternantes



El factor de sensibilidad a las ranuras es el mismo para las tres secciones debido a que el radio en la sección es mayor a 4mm en los tres casos. Por tanto, se tiene:

$$\left. \begin{array}{l} r_1 = 8mm \\ r_2 = 20mm ; S_{ut} = 600MPa \\ r_3 = 15mm \end{array} \right\} q = 0,82$$

Seguidamente, se calcula el **factor de la resistencia a fatiga** para las tres secciones, mediante la ecuación siguiente: $\mathfrak{R}_f = q \cdot (K_{Ti} - 1) + 1$

$$\mathfrak{R}_{f1} = 0,82 \cdot (1,82 - 1) + 1 = 1,672$$

$$\mathfrak{R}_{f2} = 0,82 \cdot (1,50 - 1) + 1 = 1,410$$

$$\mathfrak{R}_{f3} = 0,82 \cdot (1,60 - 1) + 1 = 1,492$$

Puesto que el factor de concentración de tensiones K_e , se calcula como la inversa de \mathfrak{R}_f , y el factor de reducción de la resistencia a la fatiga se calcula a su vez como la inversa de K_e , se tiene que el **factor necesario para el análisis a fatiga** en Pro/Engineer es \mathfrak{R}_f con lo que:

$$K_{rfI} = 1.672$$

$$K_{rfII} = 1.410$$

$$K_{rfIII} = 1.492$$

Tras estas explicaciones, la pantalla de **Definición del material** es la que se muestra en la siguiente figura:



Definición de material

Nombre: STEEL

Descripción:

Densidad: 7827.08 kg/m³

Estructural | Térmico | Miscelánea | Aspecto visual | Definido por el usuario

Simetría: Isótropo

Respuesta de tensión-deformación: Lineal

Coeficiente de Poisson: 0.27

Módulo de Young: 210000 MPa

Coef. de expansión térmica: 1.17e-05 /C

Amortiguación de mecanismos: sec/mm

Límites de material

Límite elástico en tracción *: 395 MPa

Límite de resistencia a la tracción *: 600 MPa

Límite de resistencia a la compresión: kPa

* Campos obligatorios

Criterio de rotura

Energía de distorsión (Von Mises)

Fatiga

UML (Ley uniforme de materiales)

Tipo de material: Aceros de baja aleación

Acabado superficial: Granallado

Factor de reducción de la resistencia a la fatiga: []

Aceptar Cancelar

$K_{\sigma I} = 1.672$

$K_{\sigma II} = 1.41$

$K_{\sigma III} = 1.492$

Ilustración 9. 12 Ventana de *Definición del material* para el problema

Como ya se ha comentado a lo largo de este trabajo, aspectos tales como el tamaño, el tratamiento superficial, o la presencia de muescas o cambios de sección afectan al límite de fatiga de un componente. Para tener en cuenta estos efectos, *Mecánica* cuenta con el **factor de reducción de la resistencia a la fatiga K_{rf}** , que se define como la inversa del factor de concentración de tensiones, K_e .

$$K_{rf} = \frac{1}{K_e}$$



Los demás factores se cuantifican en diversas partes del programa. Por ejemplo, en el caso **del factor de confiabilidad K_c** , viene definido por defecto como 90%. Esto significa que el 90% de las pruebas realizadas bajo las mismas condiciones de modelo definidas, tendrán vidas superiores a la que el programa predice. Si se deseara, se puede modificar este valor.

Tampoco se incluye directamente el **factor de acabado superficial K_a** , ya que éste se define en las propiedades del material, con lo que el factor va incluido en esa definición.

Límites de material	
Límite elástico en tracción	<input type="text"/>
Límite de resistencia a la tracción *	<input type="text"/>
Límite de resistencia a la compresión	<input type="text"/>
* Campos obligatorios	
Criterio de rotura	
Ninguno	<input type="text"/>
Fatiga	
UML (Ley uniforme de materiales)	<input type="text"/>
Tipo de material	<input type="text"/>
Acabado superficial	<input type="text"/>
Factor de reducción de la resistencia a la fatiga	<input type="text"/>

Ilustración 9. 13 Definición de parámetros necesarios para los análisis de fatiga

En cuanto al **factor de tamaño** y el de **temperatura**, el primero se tiene en cuenta en la simulación directamente al reconocer el programa la geometría de la pieza, y para el segundo hay una opción para *Insertar / Carga de Temperatura*, donde se incluiría el efecto de la temperatura en el análisis.



9.3.- ANÁLISIS A FATIGA DEL EJE. NORMA EN 13261

Una vez realizado el análisis de esfuerzos del eje, se procede a simular el análisis a fatiga según la **norma EN 13261**. En este caso las características y los parámetros que se han elegido son los siguientes:

- Vida deseada: Se considerará un valor de ciclos de vida para el eje. Según la norma EN 13261, las probetas de ensayo a fatiga deben **soportar 10^7** ciclos sin que aparezcan fisuras en su superficie. Por esto, se considerará como vida orientativa 10^7 ciclos en este análisis.
- Tipo de carga: Se simula una **carga alternante pura** con los valores detallados en el análisis estático. Para ello solo es necesario indicar en el tipo de carga *Peak - Peak*, y por defecto los factores de carga mínima y carga máxima son -1 y +1 respectivamente.
- *Plotting grid*: Se define el **mayor grado de detalle** para el análisis dando un valor de 10, como se ha comentado anteriormente.
- Análisis previo: Como se indicó con anterioridad, es útil marcar la casilla *Use static analysis results from previous design study* para **reducir el tiempo** de simulación.

En la siguiente figura, se muestra el cuadro de diálogo en el cual se introducen las propiedades del análisis a fatiga antes mencionadas:

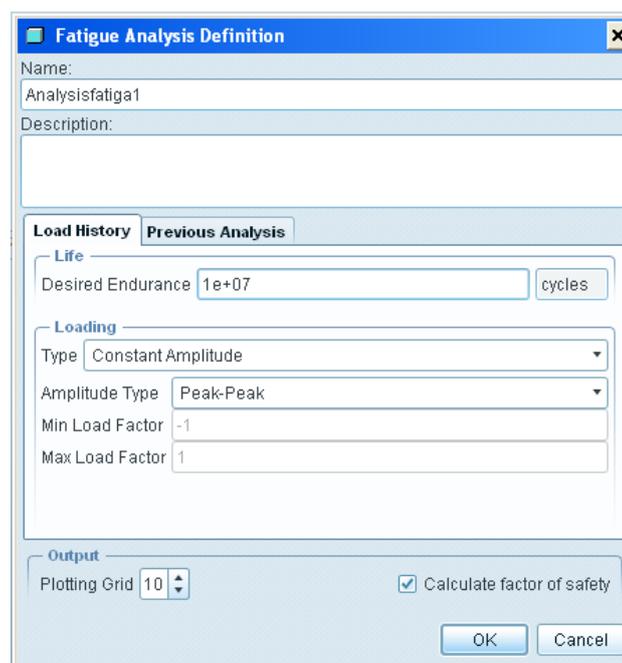


Ilustración 9. 14 Definición de las propiedades del análisis a fatiga

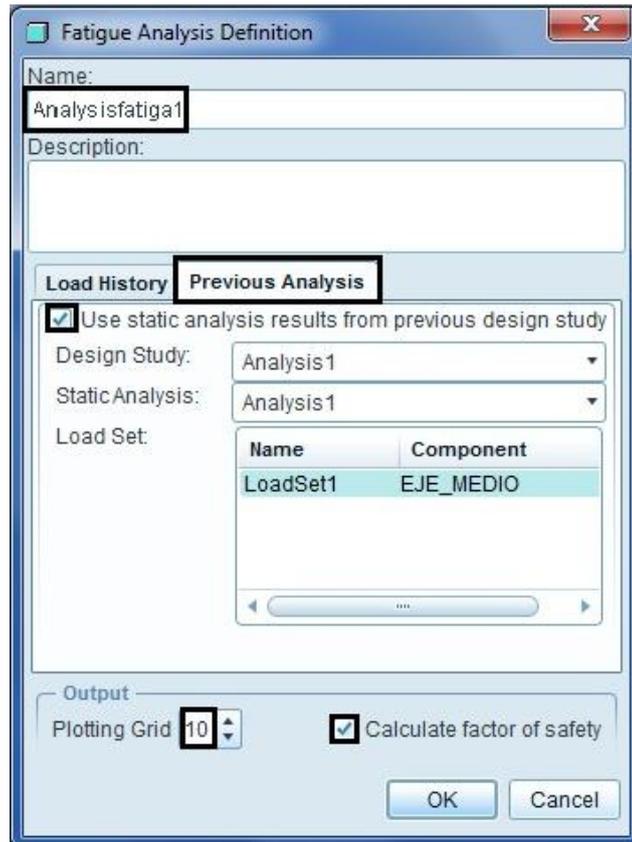


Ilustración 9. 15 Selección del análisis estático previo

Los resultados obtenidos del análisis a fatiga bajo carga de amplitud constante se representan a continuación, teniendo en cuenta la vida a fatiga y el factor de seguridad del eje en cada una de las secciones estudiadas. Los resultados más importantes obtenidos son los siguientes:

- **Vida a fatiga:**

El valor de vida a fatiga hace referencia al **exponente con base 10** que representa el **número de ciclos** que aguantaría la sección sometida a estudio. Este valor se obtiene directamente de la leyenda, o para más precisión mediante la aplicación *Dynamic Query*, la cual ofrece el valor exacto del exponente en cada punto.



- **Factor de seguridad:**

Por su parte, la relación existente entre la tensión de fluencia del material y la tensión admisible de trabajo se denomina **coeficiente de seguridad**. Por tanto, como ya se ha indicado, se tendrán en cuenta los mínimos valores de factor de seguridad presentes en cada sección. Para ello se utilizará también la aplicación *Dynamic Query*.

Si se ha activado la casilla correspondiente, el módulo de *Mechanica* calcula el factor de seguridad del modelo. Si la vida a fatiga calculada para el componente es mayor que la vida deseada introducida por el usuario, el software lleva a cabo un cálculo para determinar el factor de seguridad permisible para la carga definida.

Dicho factor representa el grado en que la amplitud de la carga puede aumentarse sin poner en peligro la vida en servicio. En este caso, la vida a fatiga deseada se estimó como $1e+07$ ciclos.

- **Confianza de vida:**

El programa presenta también el parámetro que representa la relación entre la vida calculada y la vida deseada o estimada. Debido al carácter estadístico de la fatiga, cuanto mayor es esta confianza, más ciclos de vida tendrá el eje. Se muestra por defecto este resultado mediante una **leyenda de tres colores**, con valores de 1, 2 y 3 respectivamente. Valores menores que la unidad indican el fallo del componente, por el contrario valores cercanos a tres reflejan una confianza adecuada para alcanzar la vida deseada. Este valor es más intuitivo, y muestra que la zona del cambio de sección fallaría antes de alcanzar la vida deseada por estar en color rojo.



10.- RESULTADOS

10.1- INTRODUCCIÓN

10.2- FISURA CÚBICA CON REF. DE MALLA A. ESTÁTICO

10.3- FISURA CÚBICA CON REFINAMIENTO DE MALLA. FATIGA

10.4- FISURA RADIAL CON REF. DE MALLA A. ESTÁTICO

10.5- FISURA RADIAL CON REFINAMIENTO DE MALLA. FATIGA



10.1- INTRODUCCIÓN

A continuación se representan los **resultados obtenidos en los análisis estáticos y a fatiga** aplicados al eje fisurado.

Se representa el estudio del comportamiento de un eje ante la progresión de una fisura. Para ello, en el eje ya modelado, se ha practicado una grieta por medio de una operación de vaciado de material, para ser exactos, una extrusión, tal y como se ha visto en el capítulo correspondiente de modelado.

Dichas fisuras se han ubicado en la sección donde van ensambladas las ruedas en el eje ferroviario.

Los primeros resultados gráficos corresponden a fisuras de forma cúbica realizadas sobre el eje, cuya progresión se desarrolla desde la sección crítica III, hacia la sección crítica II, tal y como se observa en las siguientes imágenes:

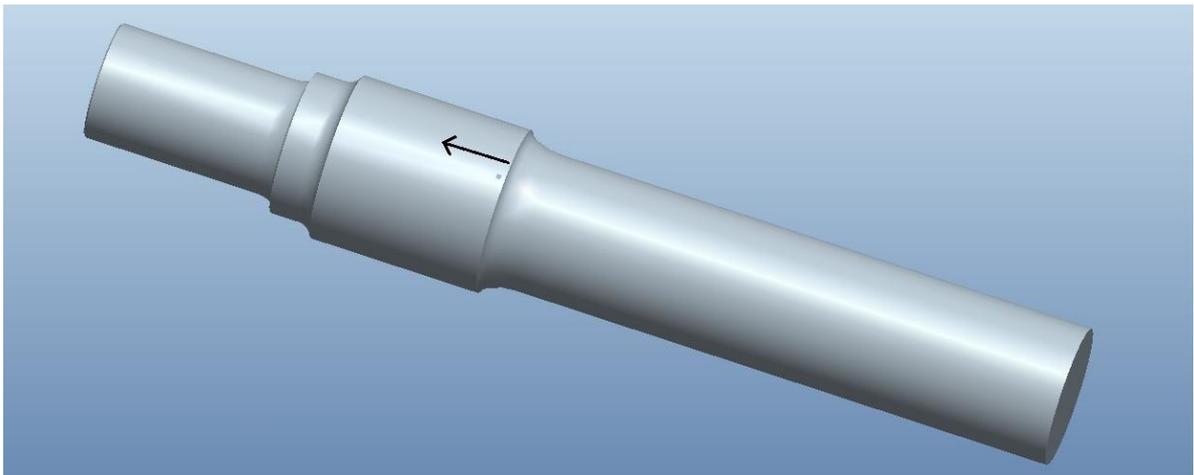


Ilustración 10. 1 Inicio de la progresión de la fisura cúbica

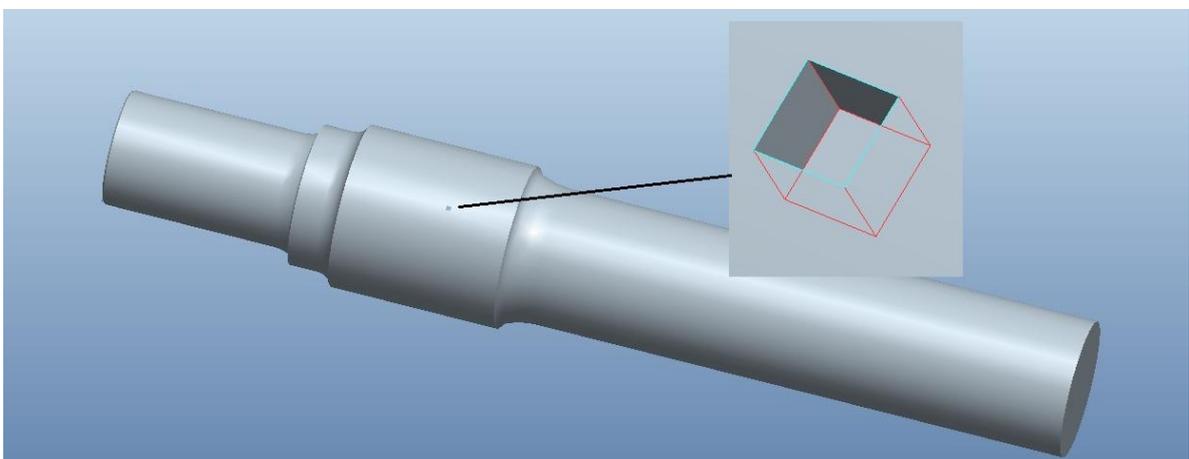


Ilustración 10. 2 Fin de la progresión de la fisura cúbica



10.2- FISURA CÚBICA CON REFINAMIENTO DE MALLA. A. ESTÁTICO

En este apartado se muestran los gráficos obtenidos tras los **análisis estáticos**, de los distintos ejes con **fisuras cúbicas**, y **refinamiento de malla** en la fisura realizada. La ubicación y tamaño de las fisuras cúbicas se recoge en la siguiente tabla:

Análisis	Distancia desde la sección III (mm)	Dimensión fisura (mm ³)
1	5	5x5x5
2	10	5x5x5
3	15	5x5x5
4	20	5x5x5
5	25	5x5x5
6	30	5x5x5
7	35	5x5x5
8	40	5x5x5
9	50	5x5x5
10	60	5x5x5
11	65	5x5x5

Tabla 10. 1 Ubicación y dimensión. Fisuras cúbicas

La progresión de las fisuras se ha desarrollado desde la sección crítica III, hacia la sección crítica II, tal y como se ha indicado en el apartado anterior.

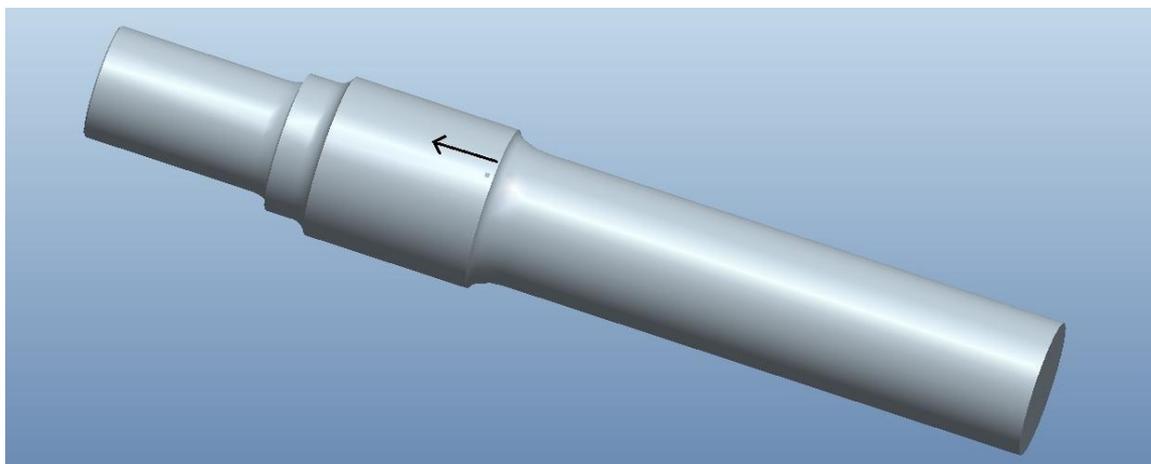


Ilustración 10. 3 Inicio progresión fisura cúbica



El análisis nº 1 corresponde con la **fisura cúbica** más próxima a la sección III, mientras que el análisis 11 corresponde con la fisura cúbica más alejada a la sección crítica III (más próxima a sección II).

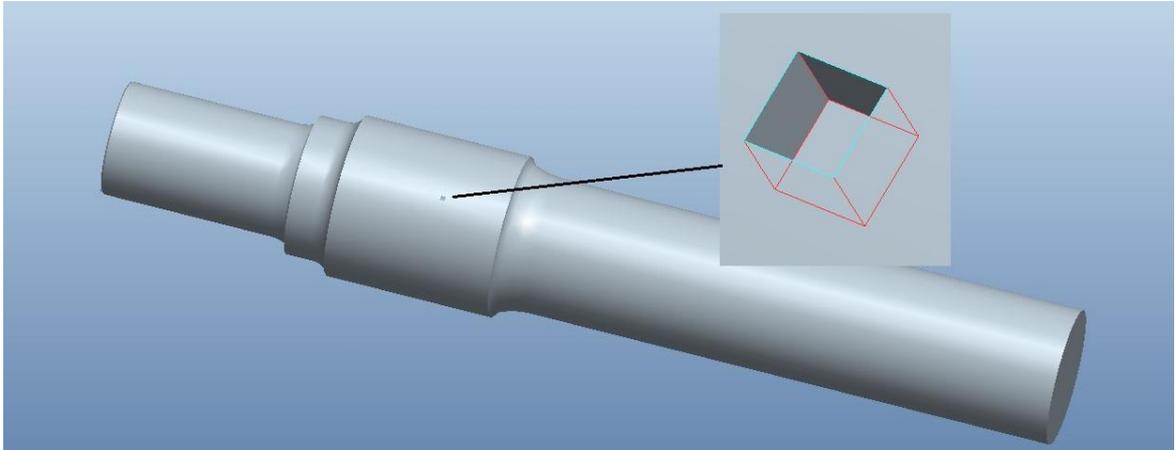


Ilustración 10. 4 Fin de la progresión de la fisura cúbica



10.2.1. Eje con fisura cúbica y refinamiento de malla n° 1

Este análisis estático del eje se ha realizado con una **fisura cúbica** de dimensiones **5x5x5 mm³**, ubicada a **5 mm** de la sección crítica número III. Los datos obtenidos se muestran en las siguientes imágenes.

Desplazamiento:

Los resultados de los desplazamientos registrados en *Mechanica* indican cómo el eje se deforma bajo las condiciones de contorno aplicadas, diferenciándose por colores en función de la cantidad desplazada, tal y como se muestra en la siguiente figura:

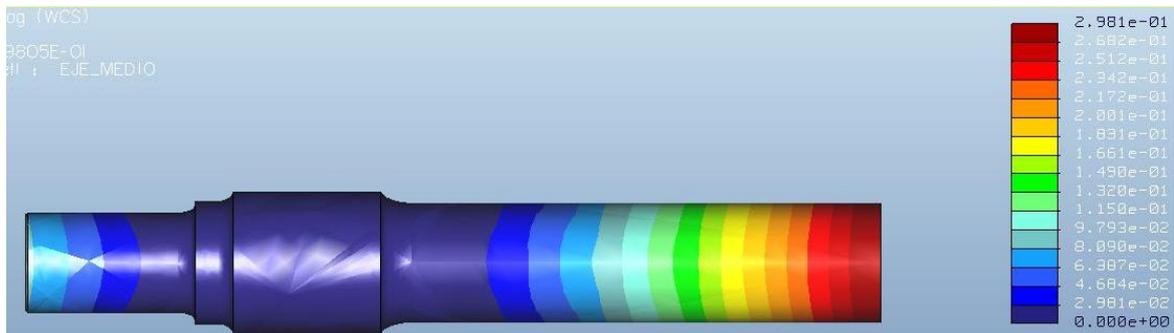


Ilustración 10. 5 Desplazamiento del eje con fisura cúbica n°1

El desplazamiento máximo, de valor 0,2981 mm, se produce en el punto medio del eje (extremo del eje medio).

Tensión:

La tensión máxima, de valor 702,2 MPa, se produce en la sección crítica II, tal y como se observa en las imágenes anteriores. La tensión máxima en la fisura cúbica es de 79,33 MPa.



Ilustración 10. 6 Tensión del eje con fisura cúbica n°1

10.2.2. Eje con fisura cúbica y refinamiento de malla n° 2

Este análisis estático del eje se ha realizado con una **fisura cúbica** de dimensiones **5x5x5 mm³**, ubicada a **10 mm** de la sección crítica número III. Los datos obtenidos se muestran en las siguientes imágenes.

Desplazamiento:

Los resultados de los desplazamientos registrados en *Mechanica* indican cómo el eje se deforma bajo las condiciones de contorno aplicadas, diferenciándose por colores en función de la cantidad desplazada, tal y como se muestra en la siguiente figura:

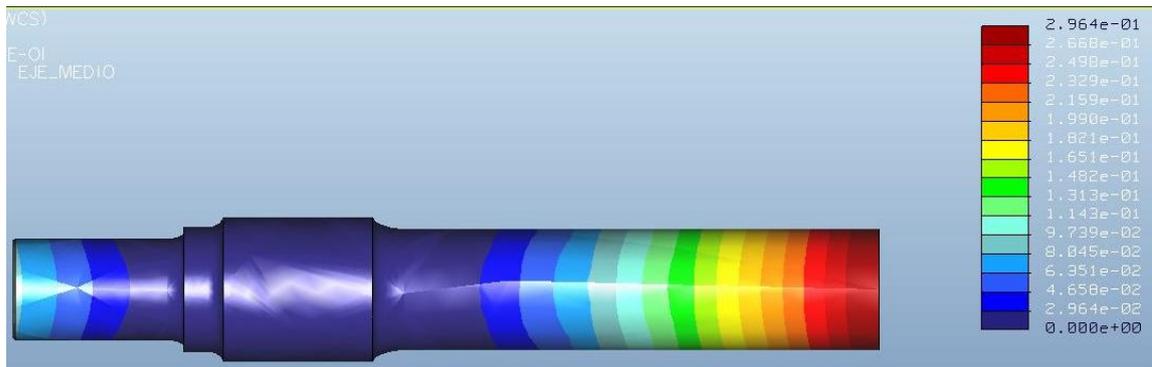


Ilustración 10. 7 Desplazamiento del eje con fisura cúbica n°2

El desplazamiento máximo, de valor 0,2964 mm, se produce en el punto medio del eje (extremo del eje medio).

Tensión:

La tensión máxima, de valor 693,2 MPa, se produce en la sección crítica II, tal y como se observa en las imágenes anteriores. La tensión máxima en la fisura cúbica es de 64,06 MPa.

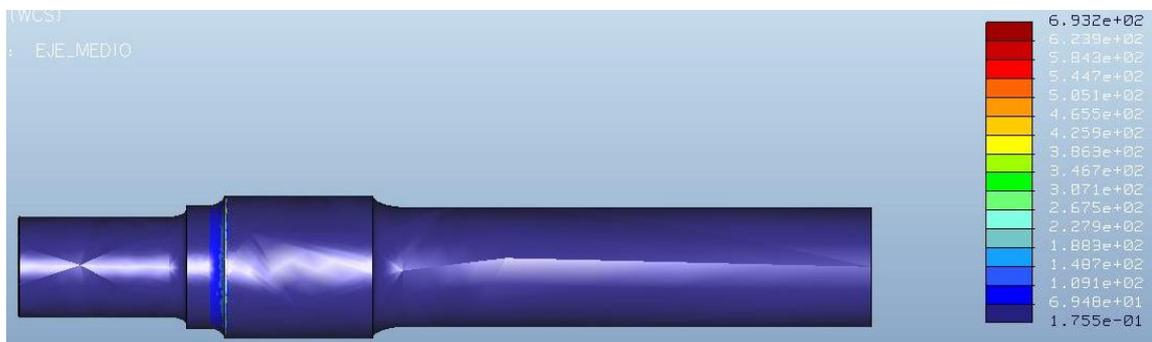


Ilustración 10. 8 Tensión del eje con fisura cúbica n°2

10.2.3. Eje con fisura cúbica y refinamiento de malla n° 3

Este análisis estático del eje se ha realizado con una **fisura cúbica** de dimensiones **5x5x5 mm³**, ubicada a **15 mm** de la sección crítica número III. Los datos obtenidos se muestran en las siguientes imágenes.

Desplazamiento:

Los resultados de los desplazamientos registrados en *Mechanica* indican cómo el eje se deforma bajo las condiciones de contorno aplicadas, diferenciándose por colores en función de la cantidad desplazada, tal y como se muestra en la siguiente figura:

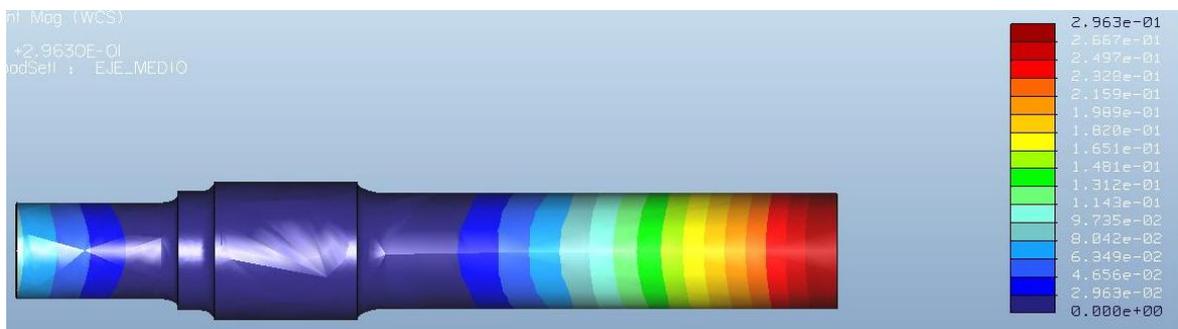


Ilustración 10. 9 Desplazamiento del eje con fisura cúbica n°3

El desplazamiento máximo, de valor 0,2963 mm, se produce en el punto medio del eje (extremo del eje medio).

Tensión:

La tensión máxima, de valor 726,9 MPa, se produce en la sección crítica II, tal y como se observa en las imágenes anteriores. La tensión máxima en la fisura cúbica es de 57,33 MPa.



Ilustración 10. 10 Tensión del eje con fisura cúbica n°3

10.2.4. Eje con fisura cúbica y refinamiento de malla n° 4

Este análisis estático del eje se ha realizado con una **fisura cúbica** de dimensiones **5x5x5 mm³**, ubicada a **20 mm** de la sección crítica número III. Los datos obtenidos se muestran en las siguientes imágenes.

Desplazamiento:

Los resultados de los desplazamientos registrados en *Mechanica* indican cómo el eje se deforma bajo las condiciones de contorno aplicadas, diferenciándose por colores en función de la cantidad desplazada, tal y como se muestra en la siguiente figura:

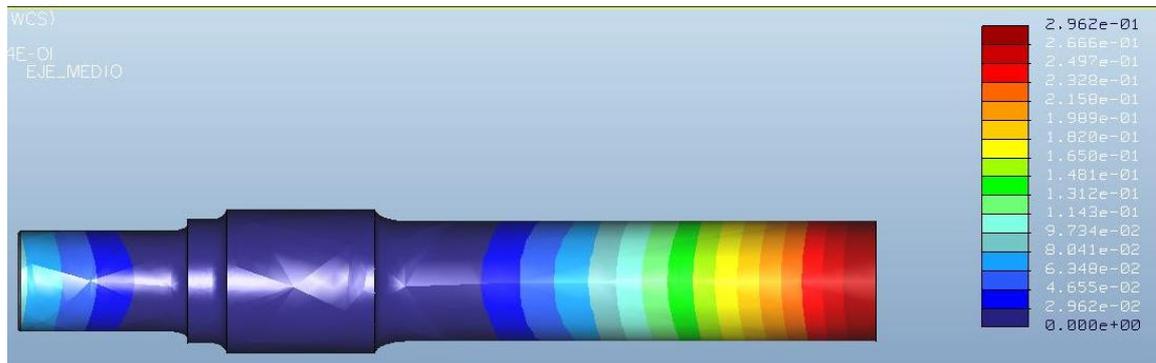


Ilustración 10.11 Desplazamiento del eje con fisura cúbica n°4

El desplazamiento máximo, de valor 0,2962 mm, se produce en el punto medio del eje (extremo del eje medio).

Tensión:

La tensión máxima, de valor 633,7 MPa, se produce en la sección crítica II, tal y como se observa en las imágenes anteriores. La tensión máxima en la fisura cúbica es de 42,7 MPa.



Ilustración 10.12 Tensión del eje con fisura cúbica n°4



10.2.5. Eje con fisura cúbica y refinamiento de malla n° 5

Este análisis estático del eje se ha realizado con una **fisura cúbica** de dimensiones **5x5x5 mm³**, ubicada a **25 mm** de la sección crítica número III. Los datos obtenidos se muestran en las siguientes imágenes.

Desplazamiento:

Los resultados de los desplazamientos registrados en **Mechanica** indican cómo el eje se deforma bajo las condiciones de contorno aplicadas, diferenciándose por colores en función de la cantidad desplazada, tal y como se muestra en la siguiente figura:

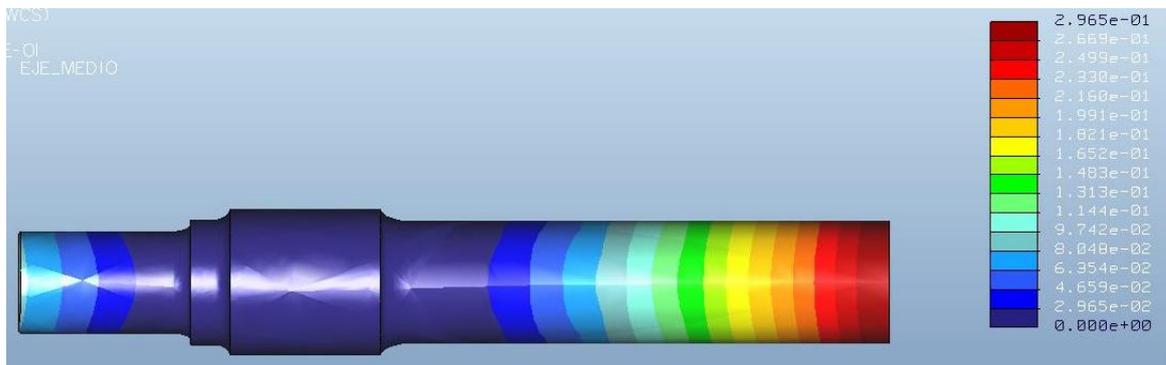


Ilustración 10.13 Desplazamiento del eje con fisura cúbica n°5

El desplazamiento máximo, de valor 0,2965 mm, se produce en el punto medio del eje (extremo del eje medio).

Tensión:

La tensión máxima, de valor 726,1 MPa, se produce en la sección crítica II, tal y como se observa en las imágenes anteriores. La tensión máxima en la fisura cúbica es de 32,2 MPa.

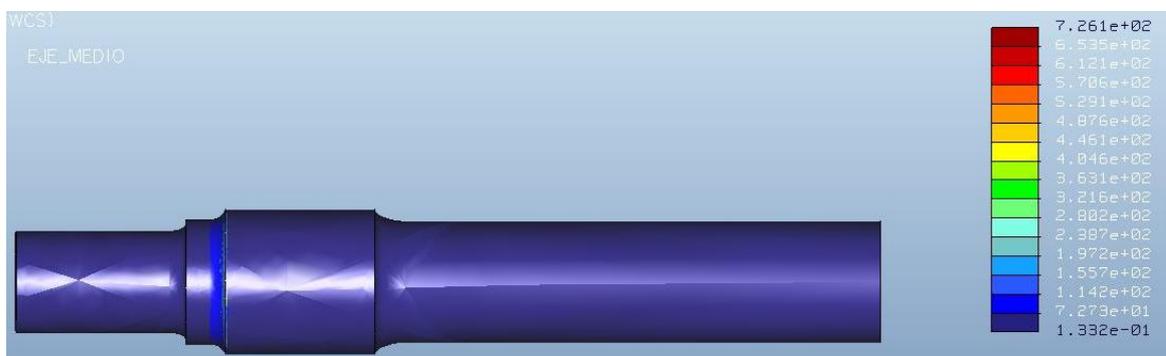


Ilustración 10.14 Tensión del eje con fisura cúbica n°5



10.2.6. Eje con fisura cúbica y refinamiento de malla n° 6

Este análisis estático del eje se ha realizado con una **fisura cúbica** de dimensiones **5x5x5 mm³**, ubicada a **30 mm** de la sección crítica número III. Los datos obtenidos se muestran en las siguientes imágenes.

Desplazamiento:

Los resultados de los desplazamientos registrados en *Mechanica* indican cómo el eje se deforma bajo las condiciones de contorno aplicadas, diferenciándose por colores en función de la cantidad desplazada, tal y como se muestra en la siguiente figura:

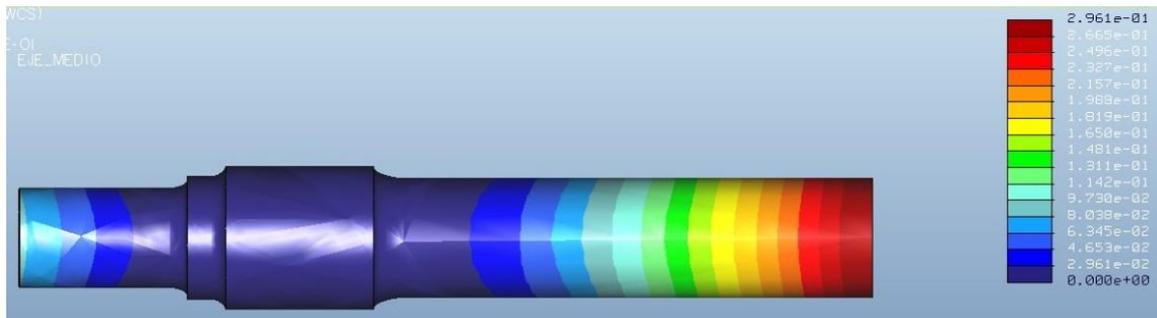


Ilustración 10. 15 Desplazamiento del eje con fisura cúbica n°6

El desplazamiento máximo, de valor 0,2961 mm, se produce en el punto medio del eje (extremo del eje medio).

Tensión:



Ilustración 10. 16 Tensión del eje con fisura cúbica n°6

La tensión máxima, de valor 758,0 MPa, se produce en la sección crítica II, tal y como se observa en las imágenes anteriores. La tensión máxima en la fisura cúbica es de 28,21 MPa.



10.2.7. Eje con fisura cúbica y refinamiento de malla n° 7

Este análisis estático del eje se ha realizado con una **fisura cúbica** de dimensiones **5x5x5 mm³**, ubicada a **35 mm** de la sección crítica número III. Los datos obtenidos se muestran en las siguientes imágenes.

Desplazamiento:

Los resultados de los desplazamientos registrados en *Mechanica* indican cómo el eje se deforma bajo las condiciones de contorno aplicadas, diferenciándose por colores en función de la cantidad desplazada, tal y como se muestra en la siguiente figura:

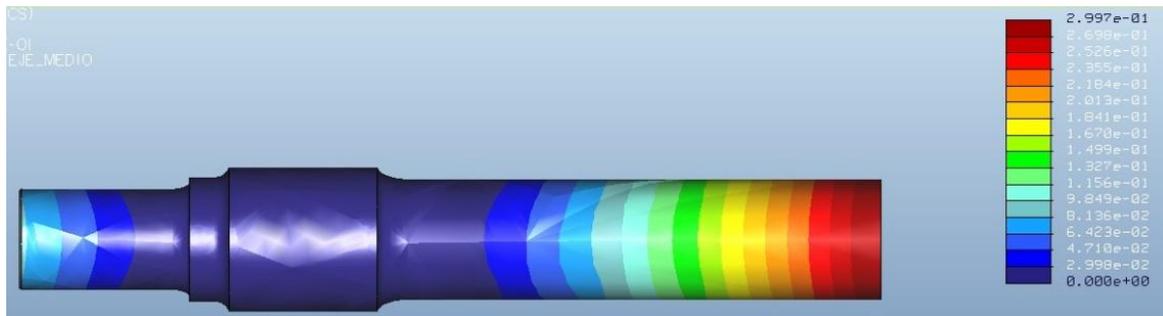


Ilustración 10. 17 Desplazamiento del eje con fisura cúbica n°7

El desplazamiento máximo, de valor 0,2997 mm, se produce en el punto medio del eje (extremo del eje medio).

Tensión:

La tensión máxima, de valor 801,9 MPa, se produce en la sección crítica II, tal y como se observa en las imágenes anteriores. La tensión máxima en la fisura cúbica es de 21,17 MPa.



Ilustración 10. 18 Tensión del eje con fisura cúbica n°7



10.2.8. Eje con fisura cúbica y refinamiento de malla n° 8

Este análisis estático del eje se ha realizado con una **fisura cúbica** de dimensiones **5x5x5 mm³**, ubicada a **40 mm** de la sección crítica número III. Los datos obtenidos se muestran en las siguientes imágenes.

Desplazamiento:

Los resultados de los desplazamientos registrados en *Mechanica* indican cómo el eje se deforma bajo las condiciones de contorno aplicadas, diferenciándose por colores en función de la cantidad desplazada, tal y como se muestra en la siguiente figura:



Ilustración 10. 19 Desplazamiento del eje con fisura cúbica n°8

El desplazamiento máximo, de valor 0,2962 mm, se produce en el punto medio del eje (extremo del eje medio).

Tensión:

La tensión máxima, de valor 688,8 MPa, se produce en la sección crítica II, tal y como se observa en las imágenes anteriores. La tensión máxima en la fisura cúbica es de 19,99 MPa.



Ilustración 10. 20 Tensión del eje con fisura cúbica n°8



10.2.9. Eje con fisura cúbica y refinamiento de malla n° 9

Este análisis estático del eje se ha realizado con una **fisura cúbica** de dimensiones **5x5x5 mm³**, ubicada a **50 mm** de la sección crítica número III. Los datos obtenidos se muestran en las siguientes imágenes.

Desplazamiento:

Los resultados de los desplazamientos registrados en *Mechanica* indican cómo el eje se deforma bajo las condiciones de contorno aplicadas, diferenciándose por colores en función de la cantidad desplazada, tal y como se muestra en la siguiente figura:

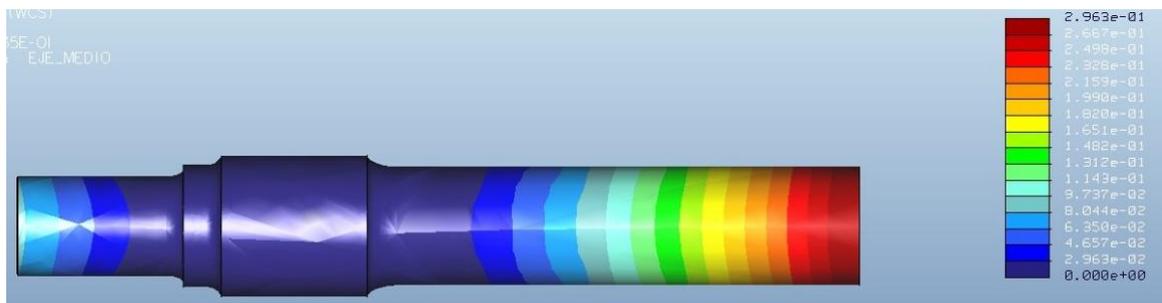


Ilustración 10. 21 Desplazamiento del eje con fisura cúbica n°9

El desplazamiento máximo, de valor 0,2963 mm, se produce en el punto medio del eje (extremo del eje medio).

Tensión:

La tensión máxima, de valor 668,1 MPa, se produce en la sección crítica II, tal y como se observa en las imágenes anteriores. La tensión máxima en la fisura cúbica es de 12,25 MPa.

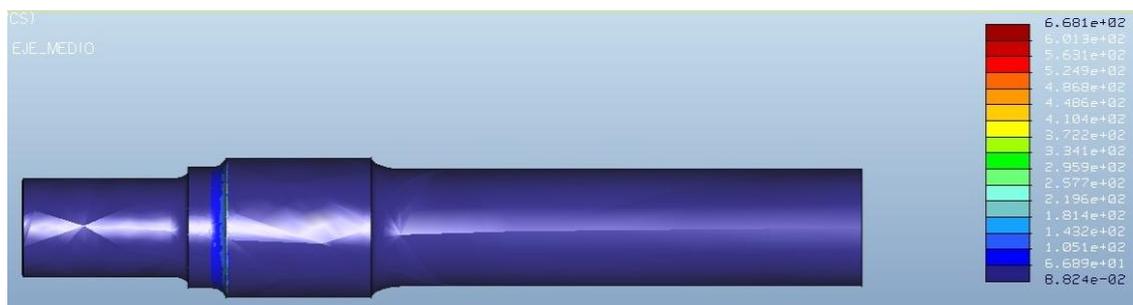


Ilustración 10. 22 Tensión del eje con fisura cúbica n°9

10.2.10. Eje con fisura cúbica y refinamiento de malla n° 10

Este análisis estático del eje se ha realizado con una **fisura cúbica** de dimensiones **5x5x5 mm³**, ubicada a **60 mm** de la sección crítica número III. Los datos obtenidos se muestran en las siguientes imágenes.

Desplazamiento:

Los resultados de los desplazamientos registrados en *Mechanica* indican cómo el eje se deforma bajo las condiciones de contorno aplicadas, diferenciándose por colores en función de la cantidad desplazada, tal y como se muestra en la siguiente figura:

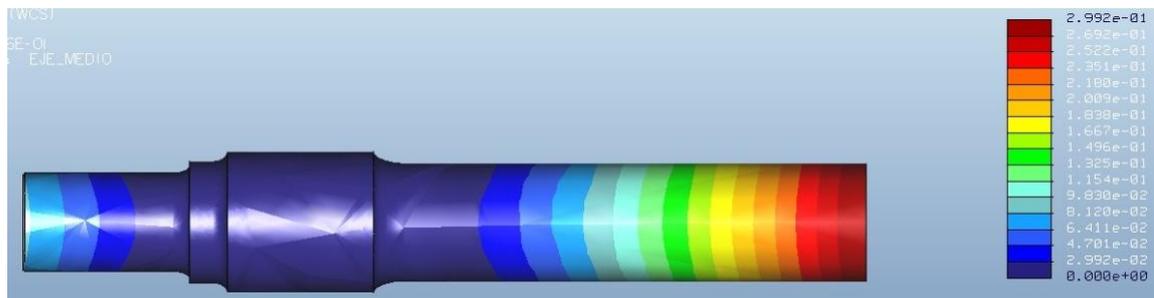


Ilustración 10. 23 Desplazamiento del eje con fisura cúbica n°10

El desplazamiento máximo, de valor 0,2992 mm, se produce en el punto medio del eje (extremo del eje medio).

Tensión:

La tensión máxima, de valor 806,6 MPa, se produce en la sección crítica II, tal y como se observa en las imágenes anteriores. La tensión máxima en la fisura cúbica es de 9,89 MPa.

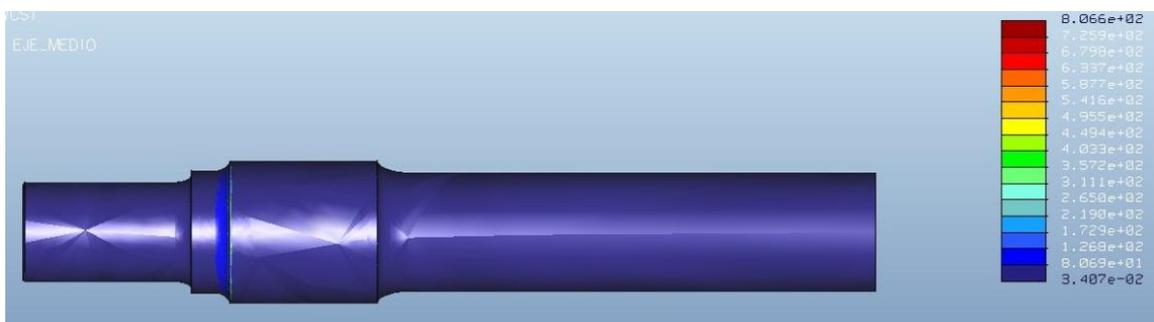


Ilustración 10. 24 Tensión del eje con fisura cúbica n°10



10.2.11. Eje con fisura cúbica y refinamiento de malla n° 11

Este análisis estático del eje se ha realizado con una **fisura cúbica** de dimensiones **5x5x5 mm³**, ubicada a **65 mm** de la sección crítica número III. Los datos obtenidos se muestran en las siguientes imágenes.

Desplazamiento:

Los resultados de los desplazamientos registrados en *Mechanica* indican cómo el eje se deforma bajo las condiciones de contorno aplicadas, diferenciándose por colores en función de la cantidad desplazada, tal y como se muestra en la siguiente figura:

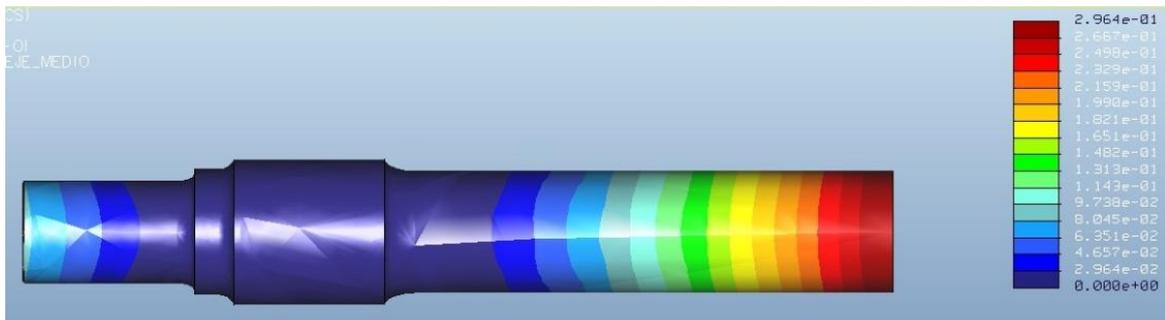


Ilustración 10. 25 Desplazamiento del eje con fisura cúbica n°11

El desplazamiento máximo, de valor 0,2964 mm, se produce en el punto medio del eje (extremo del eje medio).

Tensión:

La tensión máxima, de valor 712,4 MPa, se produce en la sección crítica II, tal y como se observa en las imágenes anteriores. La tensión máxima en la fisura cúbica es de 6,26 MPa.

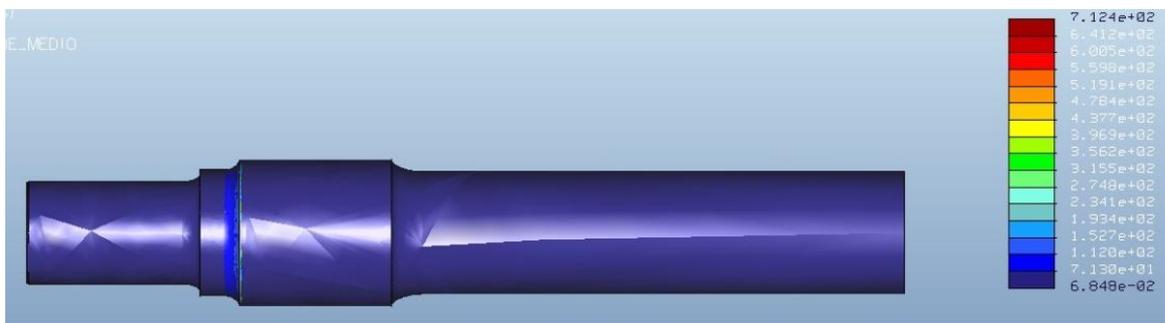


Ilustración 10. 26 Tensión del eje con fisura cúbica n°11



10.3- FISURA CÚBICA CON REFINAMIENTO DE MALLA. FATIGA

En este apartado se muestran los gráficos obtenidos tras los **análisis a fatiga**, de los distintos ejes con **fisuras cúbicas**, y **refinamiento de malla** en la fisura realizada. La ubicación y tamaño de las fisuras cúbicas se recoge en la siguiente tabla:

Análisis	Distancia desde la sección III (mm)	Dimensión fisura (mm ³)
1	5	5x5x5
2	10	5x5x5
3	15	5x5x5
4	20	5x5x5
5	25	5x5x5
6	30	5x5x5
7	35	5x5x5
8	40	5x5x5
9	50	5x5x5
10	60	5x5x5
11	65	5x5x5

Tabla 10. 2 Ubicación y dimensión. Fisuras cúbicas

La progresión de las fisuras se ha desarrollado desde la sección crítica III, hacia la sección crítica II, tal y como se ha indicado en el apartado anterior.

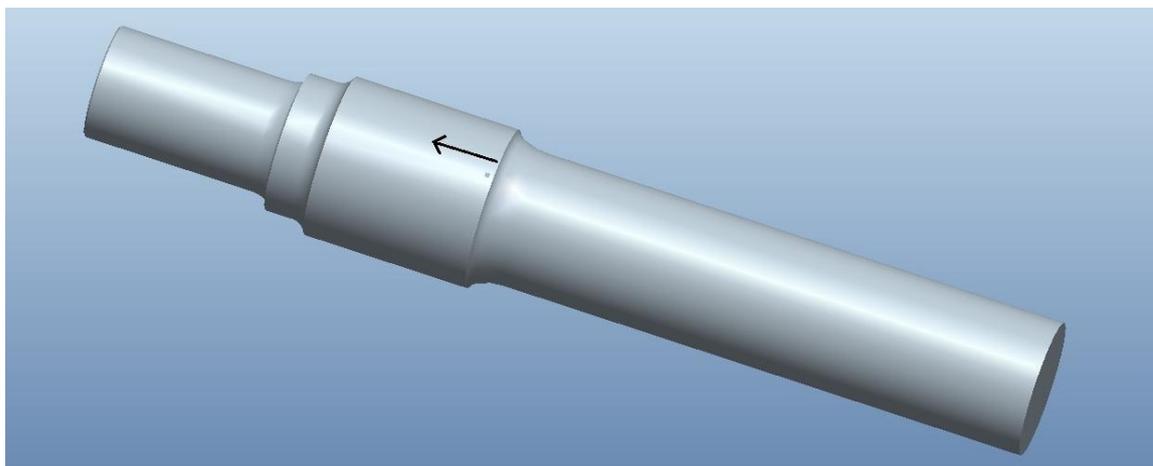


Ilustración 10. 27 Inicio de la progresión de la fisura cúbica



El análisis nº 1 se corresponde con la **fisura cúbica** más próxima a la sección III, mientras que el análisis 11 se corresponde con la fisura cúbica más alejada a la sección crítica III (más próxima a la sección II)

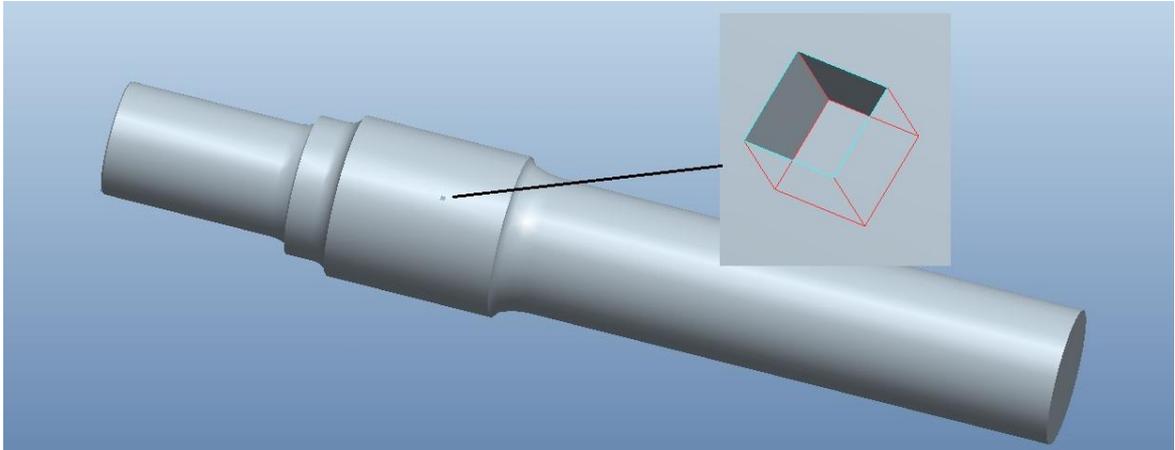


Ilustración 10. 28 Fin de la progresión de la fisura cúbica



10.3.1. Eje con fisura cúbica y refinamiento de malla n° 1

Este análisis del eje a fatiga se ha realizado con una **fisura cúbica** de dimensiones **5x5x5 mm³**, ubicada a **5 mm** de la sección crítica número III. Los datos obtenidos se muestran en las siguientes imágenes.

Log Damage (Logaritmo del daño):

La proporción entre ciclos de fatiga acumulados y el número total de ciclos a fallo. Un valor mayor que la unidad indica fallo. Al igual que el logaritmo de la vida, se expresa en órdenes logarítmicos. La relación entre Log Life y Log Damage puede ser expresada como ($Log Life = - Log Damage$).

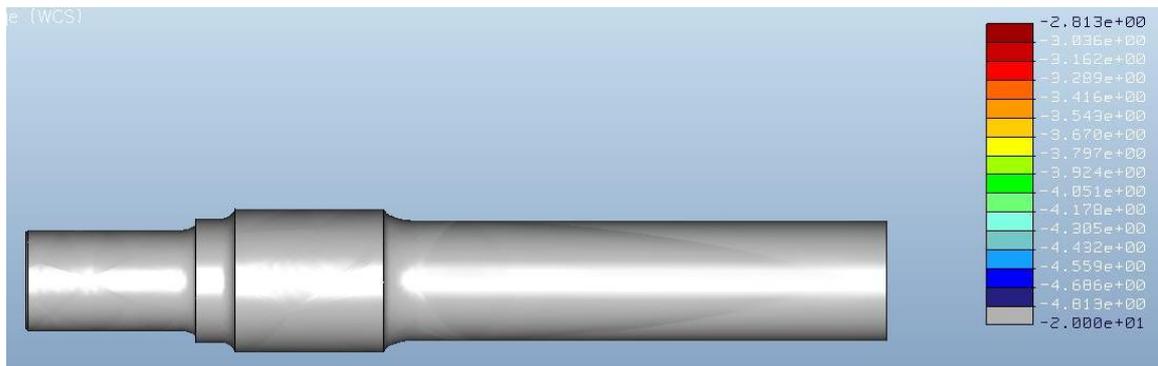


Ilustración 10. 29 Log damage eje con fisura cúbica n°1

Log Life (Logaritmo de la vida):

El número estimado de ciclos hasta que el modelo parte. La relación entre Log Life y Log Damage puede ser expresada como ($Log Life = - Log Damage$).

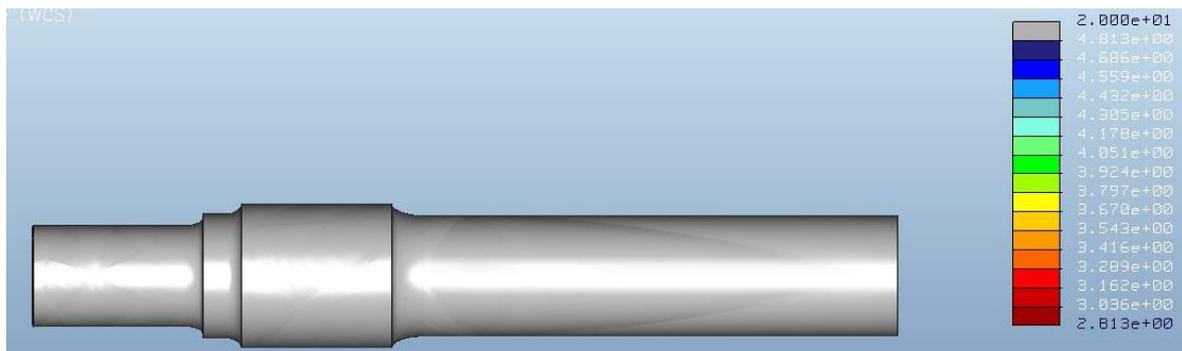


Ilustración 10. 30 Log life eje con fisura cúbica n°1

Como se puede observar el número de ciclos es superior a 10^7 en todo el eje. En la zona de las **fisuras cúbicas** realizadas, la vida deseada también es superior a 10^7 ciclos, por lo que los ejes con las fisuras cúbicas mencionadas cumplen la norma EN 1326.



Confidence of life (confianza en la vida):

Confidence of life representa la proporción entre la vida calculada y la vida de diseño objetivo.

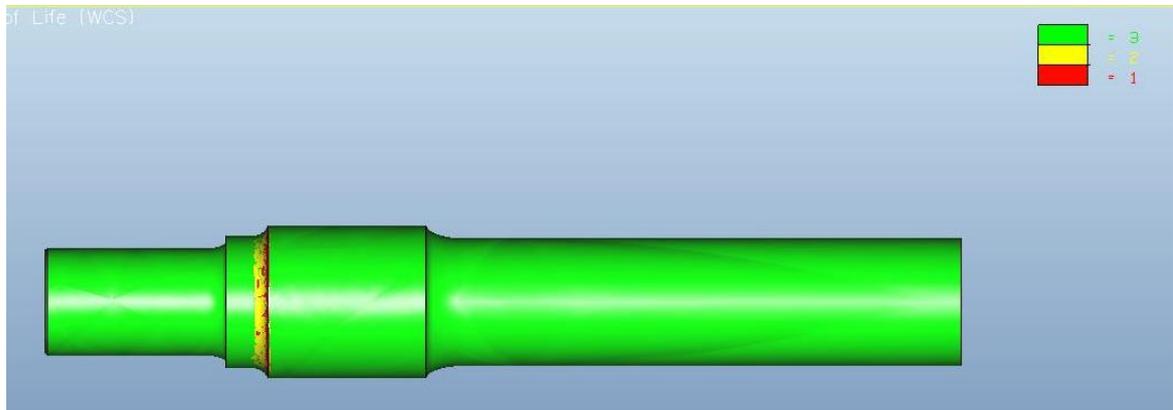


Ilustración 10. 31 *Confidence of life* eje fisura cúbica n°1

Factor of safety (factor de seguridad):

Representa el factor de seguridad permisible sobre la carga de entrada. Cuando la vida a fatiga calculada para el modelo es mayor que la vida de diseño objetivo el software proporciona un cálculo para determinar un factor de seguridad permisible sobre la carga de entrada. Esto representa el grado según el cual la amplitud de la carga puede ser aumentada sin comprometer la vida de diseño objetivo.

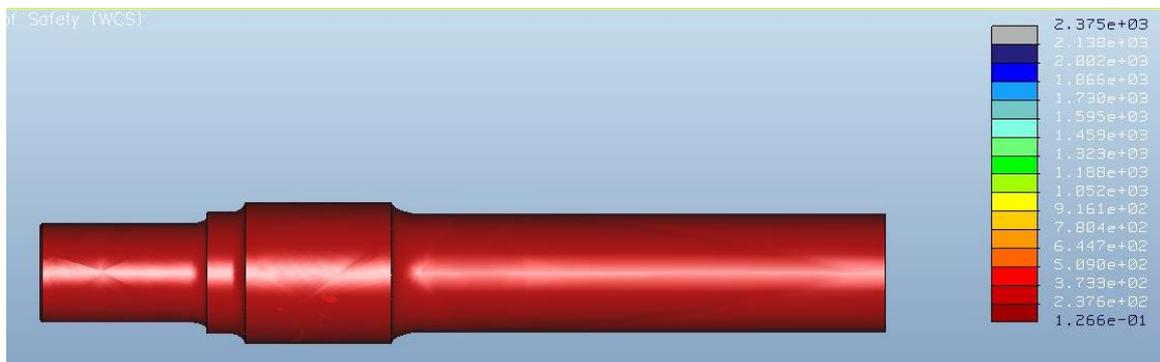


Ilustración 10. 32 *Factor of safety* eje fisura cúbica n°1



10.3.2. Eje con fisura cúbica y refinamiento de malla nº 2

Este análisis del eje a fatiga se ha realizado con una **fisura cúbica** de dimensiones **5x5x5 mm³**, ubicada a **10 mm** de la sección crítica número III. Los datos obtenidos se muestran en las siguientes imágenes.

Log Damage (Logaritmo del daño):

La proporción entre ciclos de fatiga acumulados y el número total de ciclos a fallo. Un valor mayor que la unidad indica fallo. Al igual que el logaritmo de la vida, se expresa en órdenes logarítmicos. La relación entre *Log Life* y *Log Damage* puede ser expresada como ($Log Life = - Log Damage$).

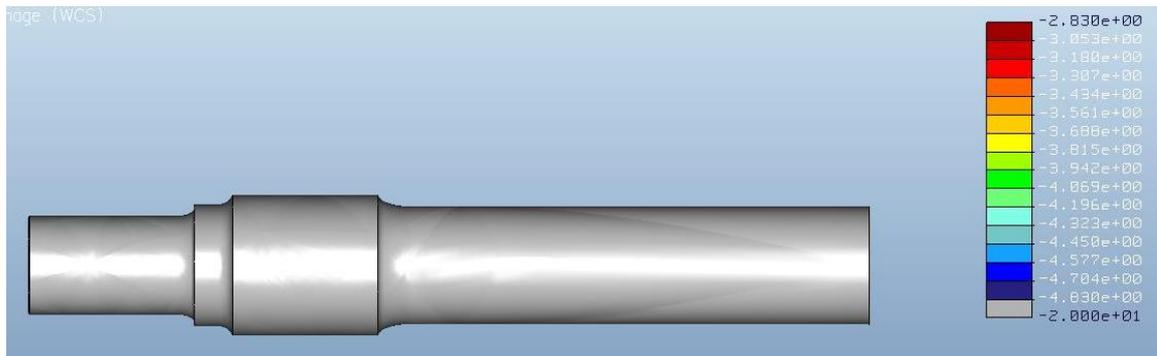


Ilustración 10. 33 Log damage eje con fisura cúbica nº2

Log Life (Logaritmo de la vida):

El número estimado de ciclos hasta que el modelo parte. La relación entre *Log Life* y *Log Damage* puede ser expresada como ($Log Life = - Log Damage$).

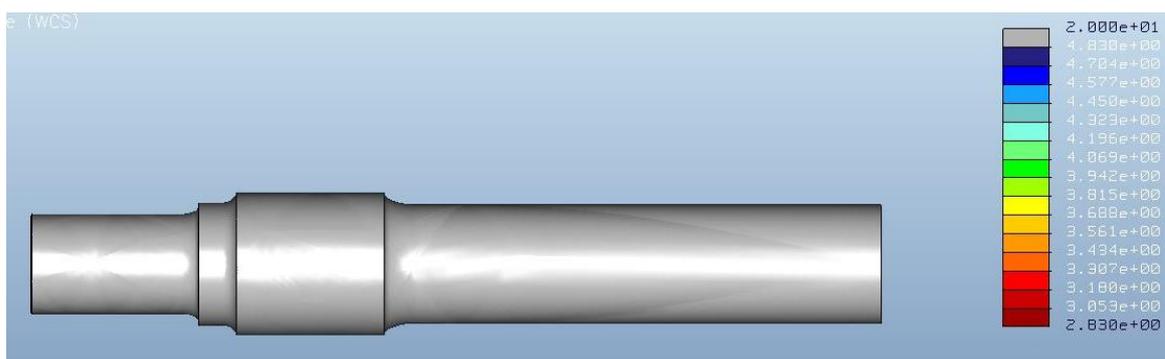


Ilustración 10. 34 Log life eje con fisura cúbica nº2

Como se puede observar el número de ciclos es superior a 10^7 en todo el eje. En la zona de las **fisuras cúbicas** realizadas, la vida deseada también es superior a 10^7 ciclos, por lo que los ejes con las fisuras cúbicas mencionadas cumplen la norma EN 1326.



Confidence of life (confianza en la vida):

Confidence of life representa la proporción entre la vida calculada y la vida de diseño objetivo.

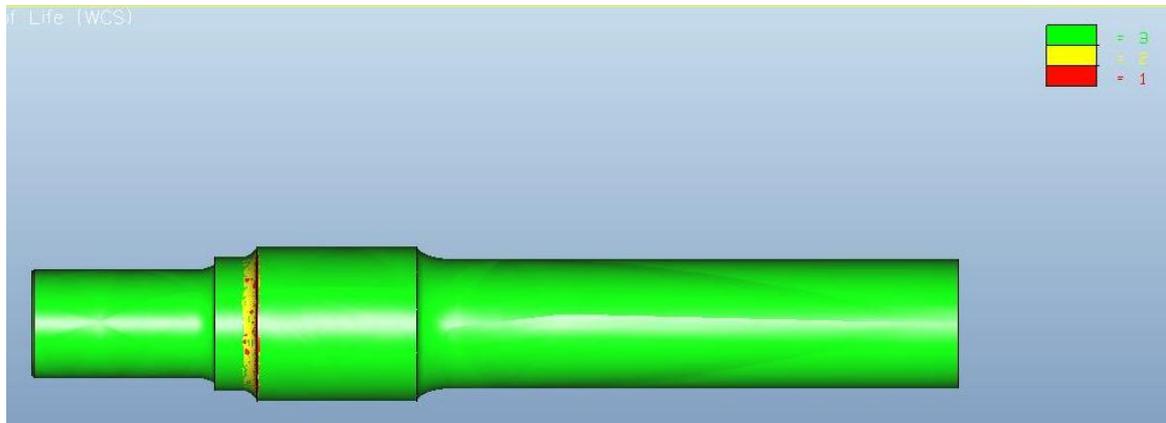


Ilustración 10. 35 *Confidence of life* eje fisura cúbica n°2

Factor of safety (factor de seguridad):

Representa el factor de seguridad permisible sobre la carga de entrada. Cuando la vida a fatiga calculada para el modelo es mayor que la vida de diseño objetivo el software proporciona un cálculo para determinar un factor de seguridad permisible sobre la carga de entrada. Esto representa el grado según el cual la amplitud de la carga puede ser aumentada sin comprometer la vida de diseño objetivo.

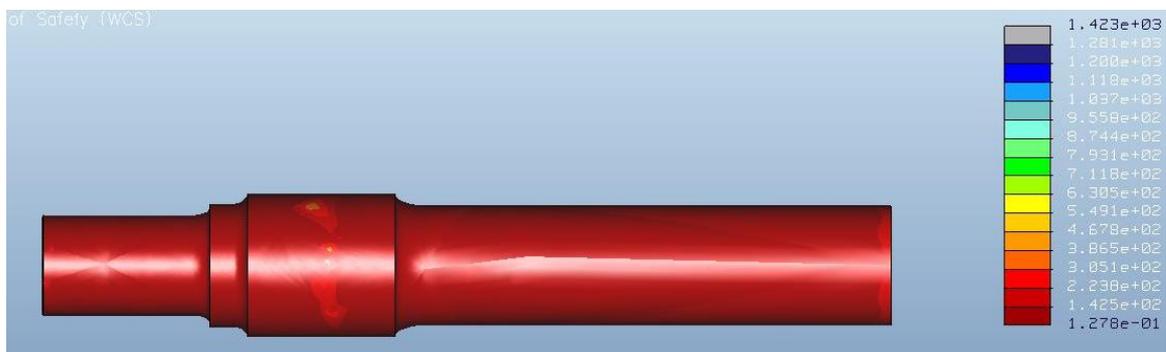


Ilustración 10. 36 *Factor of safety* eje fisura cúbica n°2



10.3.3. Eje con fisura cúbica y refinamiento de malla n° 3

Este análisis del eje a fatiga se ha realizado con una **fisura cúbica** de dimensiones **5x5x5 mm³**, ubicada a **15 mm** de la sección crítica número III. Los datos obtenidos se muestran en las siguientes imágenes.

Log Damage (Logaritmo del daño):

La proporción entre ciclos de fatiga acumulados y el número total de ciclos a fallo. Un valor mayor que la unidad indica fallo. Al igual que el logaritmo de la vida, se expresa en órdenes logarítmicos. La relación entre *Log Life* y *Log Damage* puede ser expresada como ($Log Life = - Log Damage$).

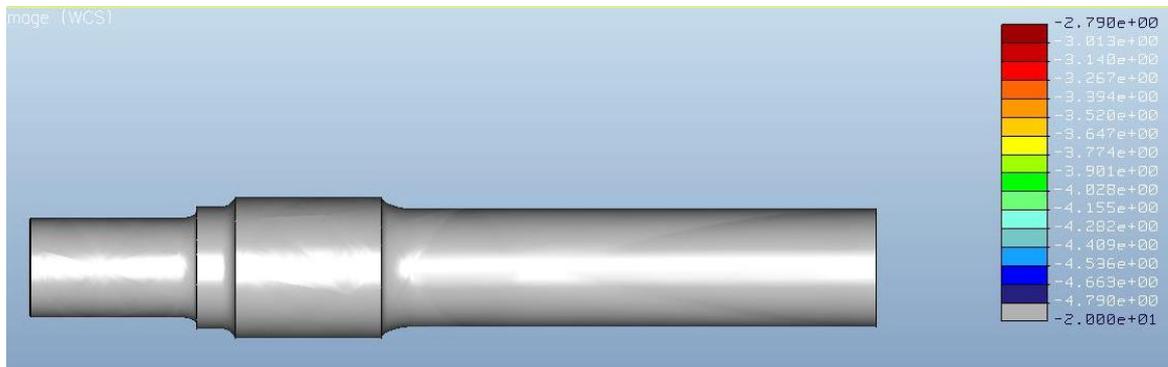


Ilustración 10. 37 Log damage eje con fisura cúbica n°3

Log Life (Logaritmo de la vida):

El número estimado de ciclos hasta que el modelo parte. La relación entre *Log Life* y *Log Damage* puede ser expresada como ($Log Life = - Log Damage$).

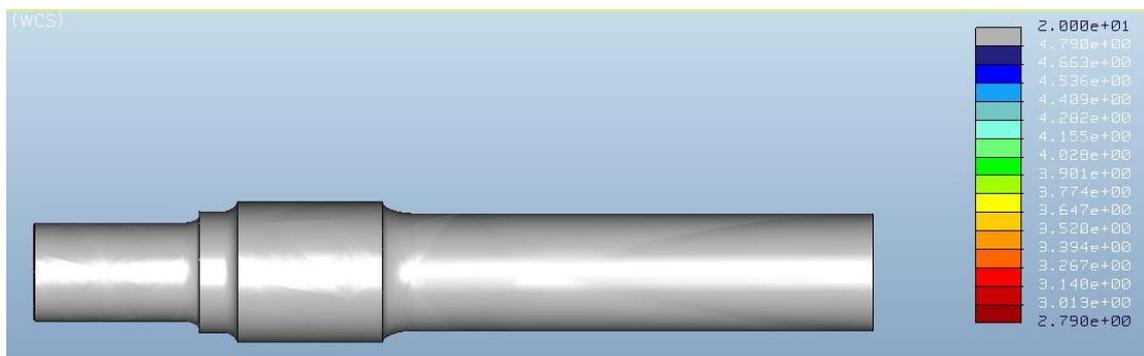


Ilustración 10. 38 Log life eje con fisura cúbica n°3

Como se puede observar el número de ciclos es superior a 10^7 en todo el eje. En la zona de las **fisuras cúbicas** realizadas, la vida deseada también es superior a 10^7 ciclos, por lo que los ejes con las fisuras cúbicas mencionadas cumplen la norma EN 1326.



Confidence of life (confianza en la vida):

Confidence of life representa la proporción entre la vida calculada y la vida de diseño objetivo.

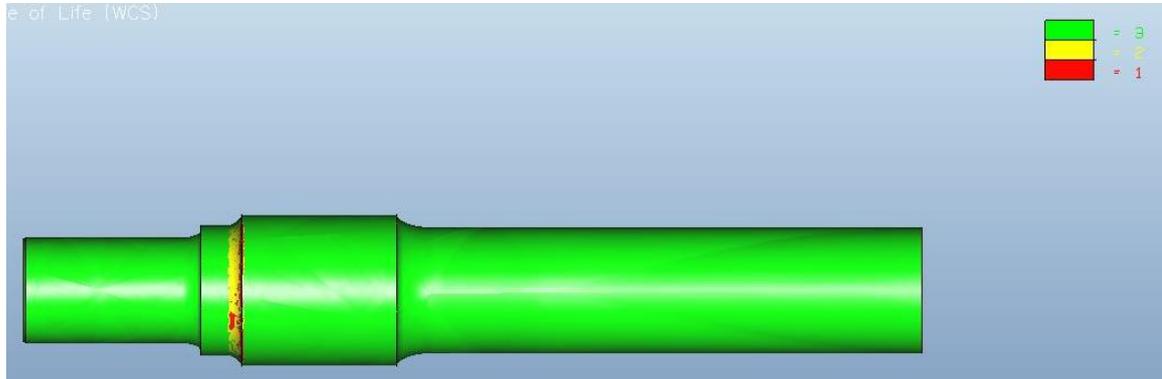


Ilustración 10. 39 *Confidence of life* eje fisura cúbica n°3

Factor of safety (factor de seguridad):

Representa el factor de seguridad permisible sobre la carga de entrada. Cuando la vida a fatiga calculada para el modelo es mayor que la vida de diseño objetivo el software proporciona un cálculo para determinar un factor de seguridad permisible sobre la carga de entrada. Esto representa el grado según el cual la amplitud de la carga puede ser aumentada sin comprometer la vida de diseño objetivo.

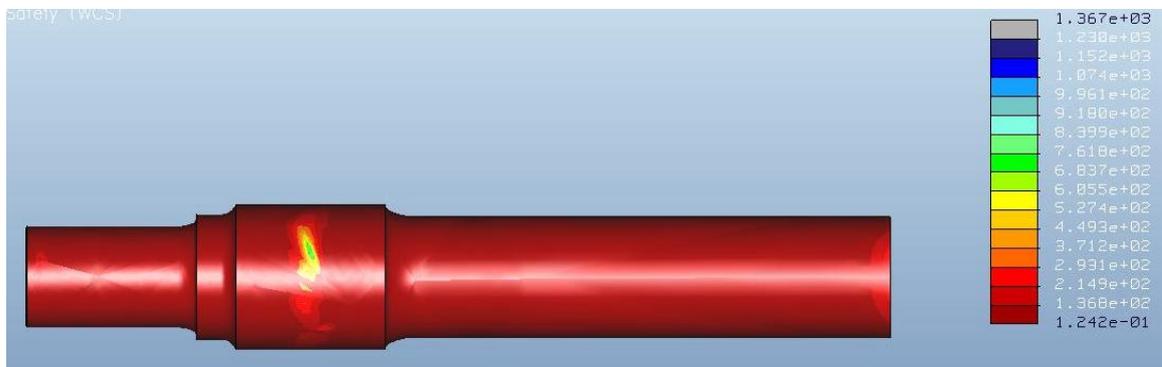


Ilustración 10. 40 *Factor of safety* eje fisura cúbica n°3



10.3.4. Eje con fisura cúbica y refinamiento de malla n° 4

Este análisis del eje a fatiga se ha realizado con una **fisura cúbica** de dimensiones **5x5x5 mm³**, ubicada a **20 mm** de la sección crítica número III. Los datos obtenidos se muestran en las siguientes imágenes.

Log Damage (Logaritmo del daño):

La proporción entre ciclos de fatiga acumulados y el número total de ciclos a fallo. Un valor mayor que la unidad indica fallo. Al igual que el logaritmo de la vida, se expresa en órdenes logarítmicos. La relación entre *Log Life* y *Log Damage* puede ser expresada como ($Log Life = - Log Damage$).

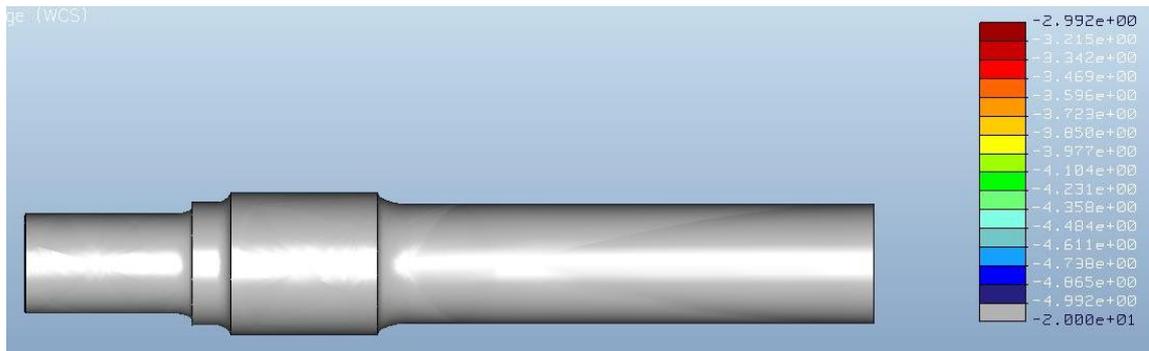


Ilustración 10. 41 Log damage eje con fisura cúbica n°4

Log Life (Logaritmo de la vida):

El número estimado de ciclos hasta que el modelo parte. La relación entre *Log Life* y *Log Damage* puede ser expresada como ($Log Life = - Log Damage$).

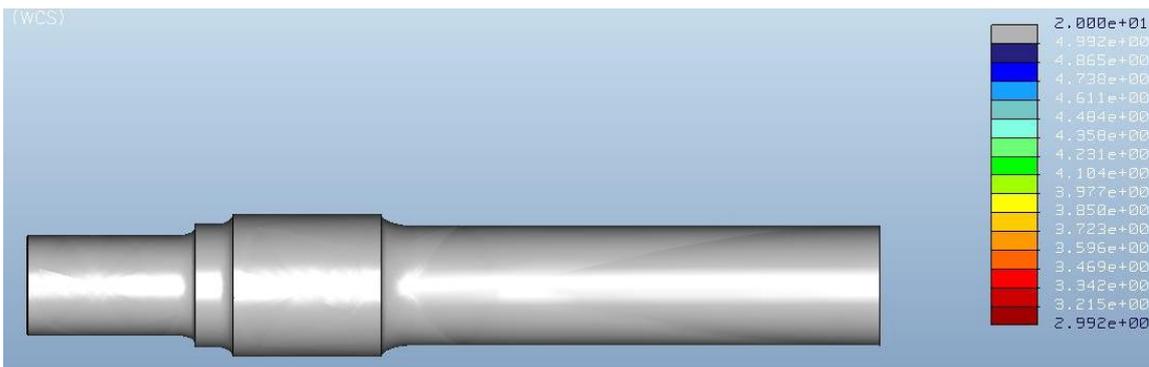


Ilustración 10. 42 Log life eje con fisura cúbica n°4

Como se puede observar el número de ciclos es superior a 10^7 en todo el eje. En la zona de las **fisuras cúbicas** realizadas, la vida deseada también es superior a 10^7 ciclos, por lo que los ejes con las fisuras cúbicas mencionadas cumplen la norma EN 1326.



Confidence of life (confianza en la vida):

Confidence of life representa la proporción entre la vida calculada y la vida de diseño objetivo.

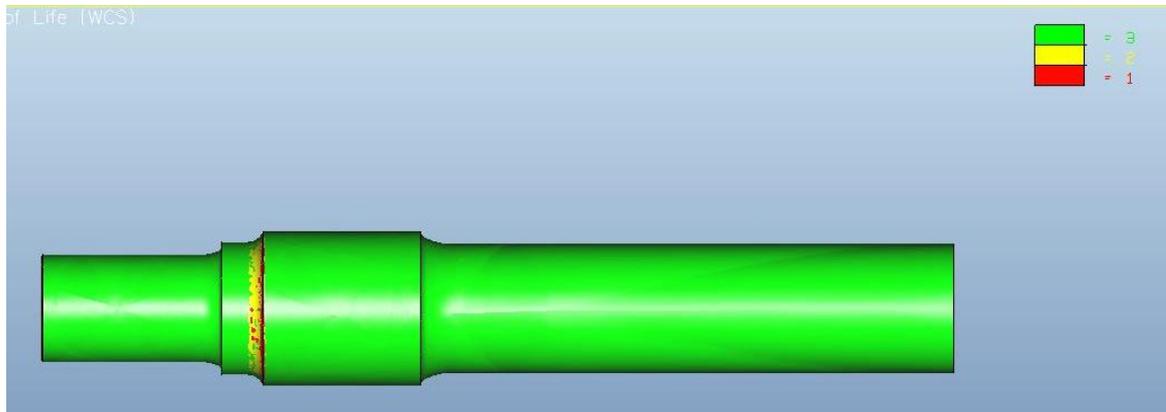


Ilustración 10. 43 *Confidence of life* eje fisura cúbica nº4

Factor of safety (factor de seguridad):

Representa el factor de seguridad permisible sobre la carga de entrada. Cuando la vida a fatiga calculada para el modelo es mayor que la vida de diseño objetivo el software proporciona un cálculo para determinar un factor de seguridad permisible sobre la carga de entrada. Esto representa el grado según el cual la amplitud de la carga puede ser aumentada sin comprometer la vida de diseño objetivo.

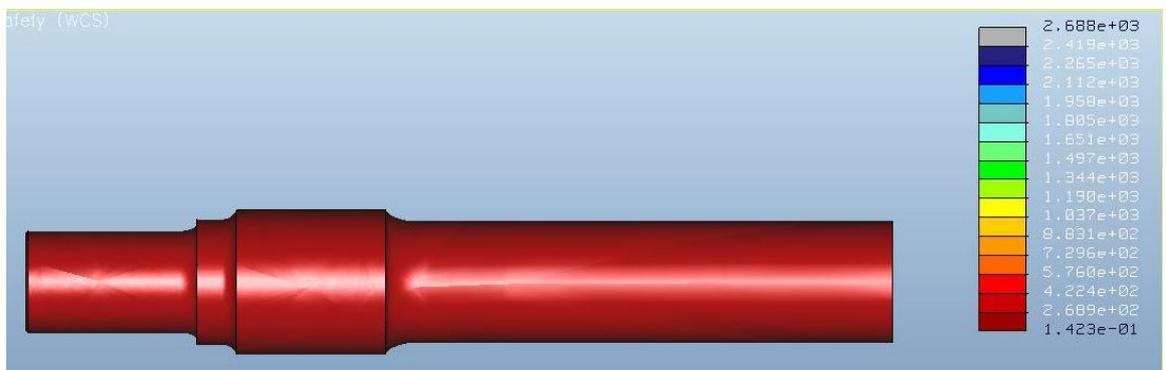


Ilustración 10. 44 *Factor of safety* eje fisura cúbica nº4



10.3.5. Eje con fisura cúbica y refinamiento de malla n° 5

Este análisis del eje a fatiga se ha realizado con una **fisura cúbica** de dimensiones **5x5x5 mm³**, ubicada a **25 mm** de la sección crítica número III. Los datos obtenidos se muestran en las siguientes imágenes.

Log Damage (Logaritmo del daño):

La proporción entre ciclos de fatiga acumulados y el número total de ciclos a fallo. Un valor mayor que la unidad indica fallo. Al igual que el logaritmo de la vida, se expresa en órdenes logarítmicos. La relación entre *Log Life* y *Log Damage* puede ser expresada como ($Log Life = - Log Damage$).

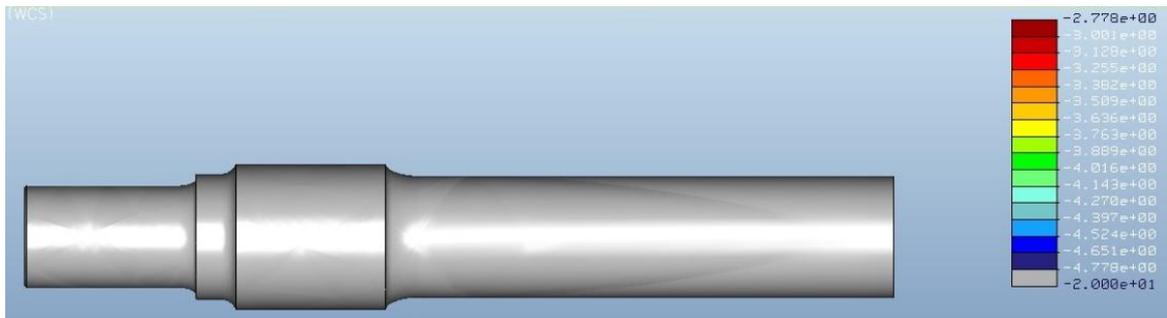


Ilustración 10. 45 Log damage eje con fisura cúbica n°5

Log Life (Logaritmo de la vida):

El número estimado de ciclos hasta que el modelo parte. La relación entre *Log Life* y *Log Damage* puede ser expresada como ($Log Life = - Log Damage$).

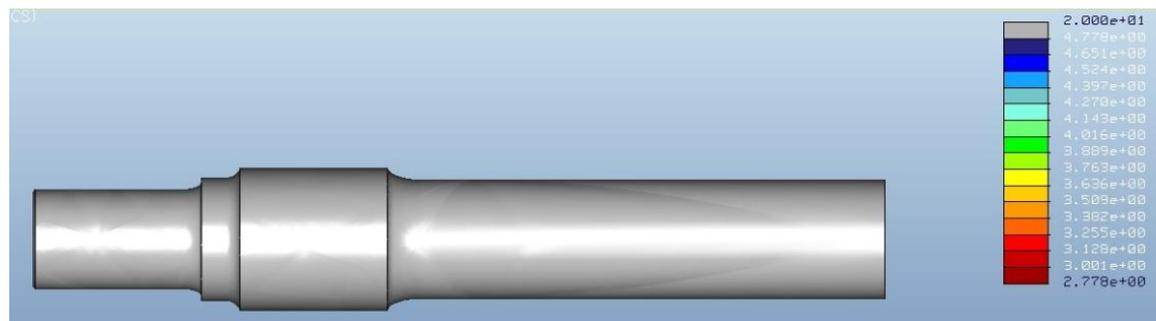


Ilustración 10. 46 Log life eje con fisura cúbica n°5

Como se puede observar el número de ciclos es superior a 10^7 en todo el eje. En la zona de las **fisuras cúbicas** realizadas, la vida deseada también es superior a 10^7 ciclos, por lo que los ejes con las fisuras cúbicas mencionadas cumplen la norma EN 1326.



Confidence of life (confianza en la vida):

Confidence of life representa la proporción entre la vida calculada y la vida de diseño objetivo.

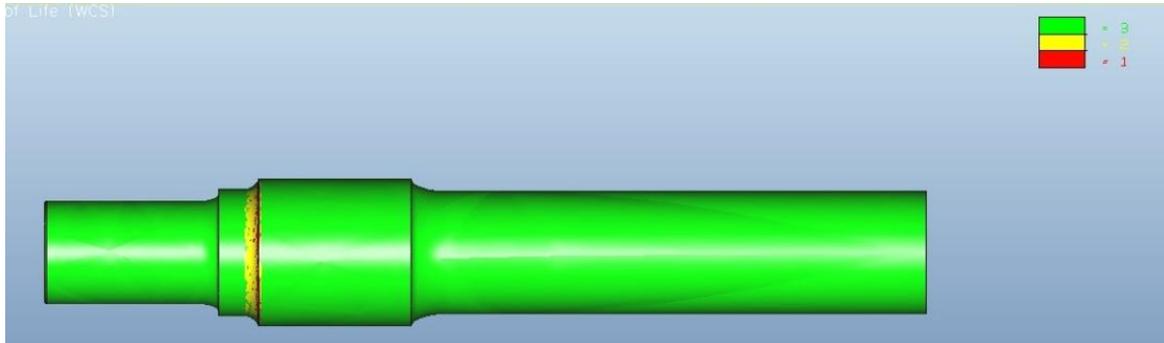


Ilustración 10. 47 *Confidence of life* eje fisura cúbica n°5

Factor of safety (factor de seguridad):

Representa el factor de seguridad permisible sobre la carga de entrada. Cuando la vida a fatiga calculada para el modelo es mayor que la vida de diseño objetivo el software proporciona un cálculo para determinar un factor de seguridad permisible sobre la carga de entrada. Esto representa el grado según el cual la amplitud de la carga puede ser aumentada sin comprometer la vida de diseño objetivo.

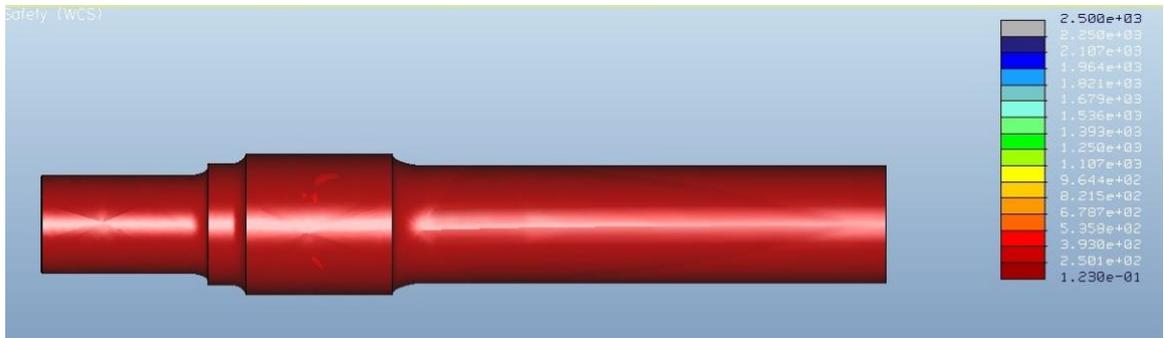


Ilustración 10. 48 *Factor of safety* eje fisura cúbica n°5



10.3.6. Eje con fisura cúbica y refinamiento de malla nº 6

Este análisis del eje a fatiga se ha realizado con una **fisura cúbica** de dimensiones **5x5x5 mm³**, ubicada a **30 mm** de la sección crítica número III. Los datos obtenidos se muestran en las siguientes imágenes.

Log Damage (Logaritmo del daño):

La proporción entre ciclos de fatiga acumulados y el número total de ciclos a fallo. Un valor mayor que la unidad indica fallo. Al igual que el logaritmo de la vida, se expresa en órdenes logarítmicos. La relación entre *Log Life* y *Log Damage* puede ser expresada como ($Log Life = - Log Damage$).

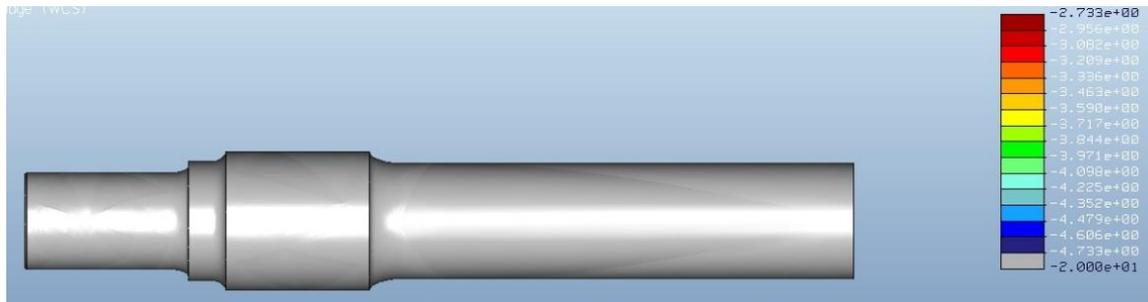


Ilustración 10. 49 Log damage eje con fisura cúbica nº6

Log Life (Logaritmo de la vida):

El número estimado de ciclos hasta que el modelo parte. La relación entre *Log Life* y *Log Damage* puede ser expresada como ($Log Life = - Log Damage$).



Ilustración 10. 50 Log life eje con fisura cúbica nº6

Como se puede observar el número de ciclos es superior a 10^7 en todo el eje. En la zona de las **fisuras cúbicas** realizadas, la vida deseada también es superior a 10^7 ciclos, por lo que los ejes con las fisuras cúbicas mencionadas cumplen la norma EN 1326.



Confidence of life (confianza en la vida):

Confidence of life representa la proporción entre la vida calculada y la vida de diseño objetivo.

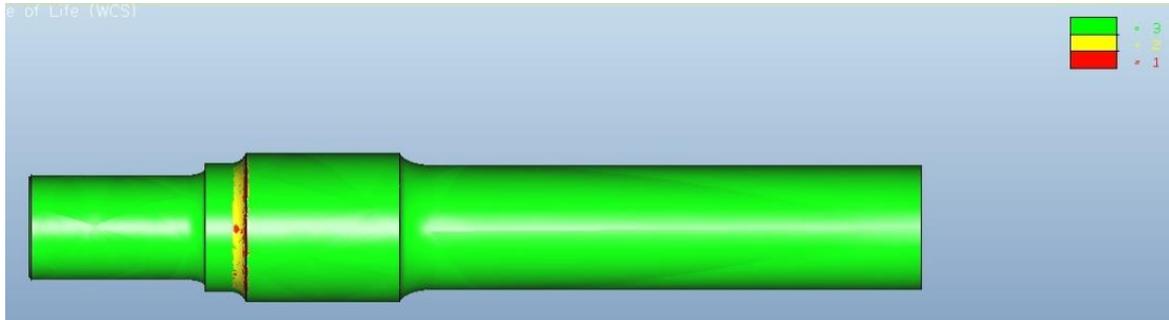


Ilustración 10. 51 *Confidence of life* eje fisura cúbica nº6

Factor of safety (factor de seguridad):

Representa el factor de seguridad permisible sobre la carga de entrada. Cuando la vida a fatiga calculada para el modelo es mayor que la vida de diseño objetivo el software proporciona un cálculo para determinar un factor de seguridad permisible sobre la carga de entrada. Esto representa el grado según el cual la amplitud de la carga puede ser aumentada sin comprometer la vida de diseño objetivo.

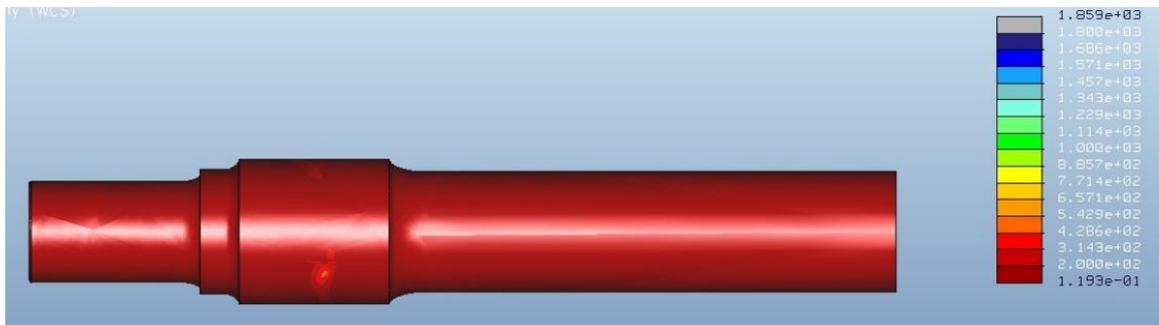


Ilustración 10. 52 *Factor of safety* eje fisura cúbica nº6



10.3.7. Eje con fisura cúbica y refinamiento de malla n° 7

Este análisis del eje a fatiga se ha realizado con una **fisura cúbica** de dimensiones **5x5x5 mm³**, ubicada a **35 mm** de la sección crítica número III. Los datos obtenidos se muestran en las siguientes imágenes.

Log Damage (Logaritmo del daño):

La proporción entre ciclos de fatiga acumulados y el número total de ciclos a fallo. Un valor mayor que la unidad indica fallo. Al igual que el logaritmo de la vida, se expresa en órdenes logarítmicos. La relación entre *Log Life* y *Log Damage* puede ser expresada como ($Log Life = - Log Damage$).

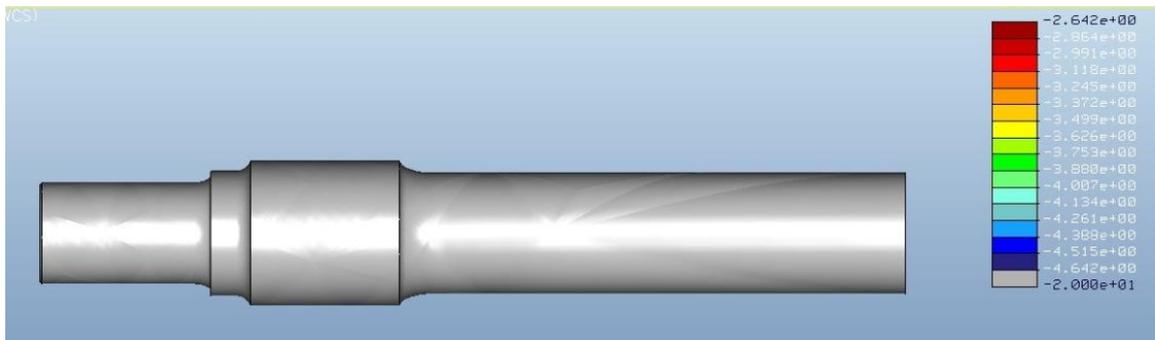


Ilustración 10. 53 Log damage eje con fisura cúbica n°7

Log Life (Logaritmo de la vida):

El número estimado de ciclos hasta que el modelo parte. La relación entre *Log Life* y *Log Damage* puede ser expresada como ($Log Life = - Log Damage$).

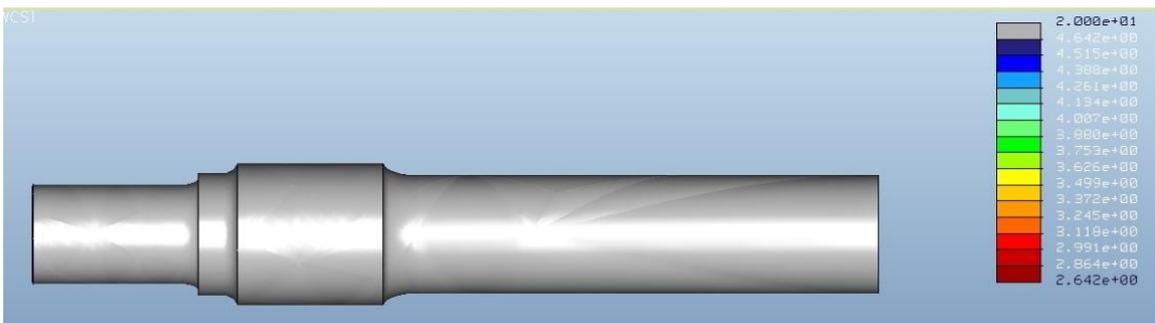


Ilustración 10. 54 Log life eje con fisura cúbica n°7

Como se puede observar el número de ciclos es superior a 10^7 en todo el eje. En la zona de las **fisuras cúbicas** realizadas, la vida deseada también es superior a 10^7 ciclos, por lo que los ejes con las fisuras cúbicas mencionadas cumplen la norma EN 1326.



Confidence of life (confianza en la vida):

Confidence of life representa la proporción entre la vida calculada y la vida de diseño objetivo.

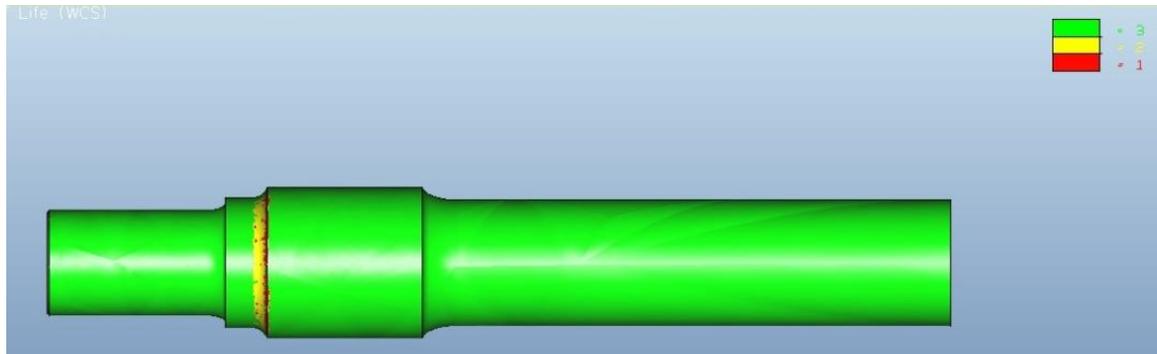


Ilustración 10. 55 *Confidence of life* eje fisura cúbica nº7

Factor of safety (factor de seguridad):

Representa el factor de seguridad permisible sobre la carga de entrada. Cuando la vida a fatiga calculada para el modelo es mayor que la vida de diseño objetivo el software proporciona un cálculo para determinar un factor de seguridad permisible sobre la carga de entrada. Esto representa el grado según el cual la amplitud de la carga puede ser aumentada sin comprometer la vida de diseño objetivo.



Ilustración 10. 56 *Factor of safety* eje fisura cúbica nº7



10.3.8. Eje con fisura cúbica y refinamiento de malla nº 8

Este análisis del eje a fatiga se ha realizado con una **fisura cúbica** de dimensiones **5x5x5 mm³**, ubicada a **40 mm** de la sección crítica número III. Los datos obtenidos se muestran en las siguientes imágenes.

Log Damage (Logaritmo del daño):

La proporción entre ciclos de fatiga acumulados y el número total de ciclos a fallo. Un valor mayor que la unidad indica fallo. Al igual que el logaritmo de la vida, se expresa en órdenes logarítmicos. La relación entre *Log Life* y *Log Damage* puede ser expresada como ($Log Life = - Log Damage$).

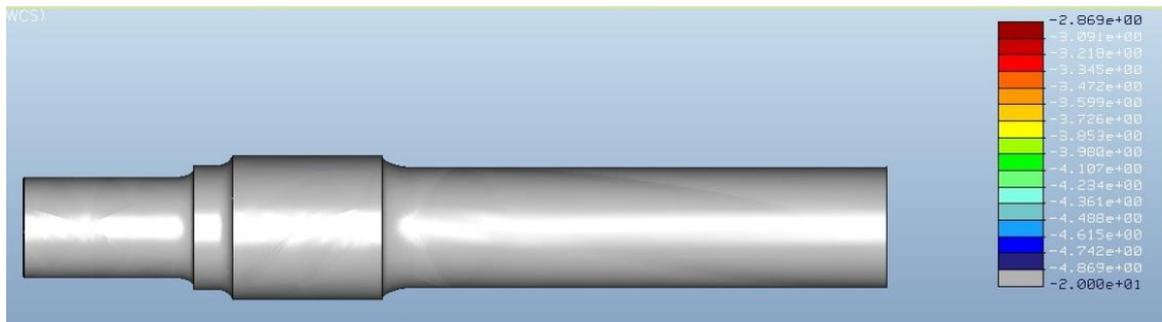


Ilustración 10. 57 Log damage eje con fisura cúbica nº8

Log Life (Logaritmo de la vida):

El número estimado de ciclos hasta que el modelo parte. La relación entre *Log Life* y *Log Damage* puede ser expresada como ($Log Life = - Log Damage$).

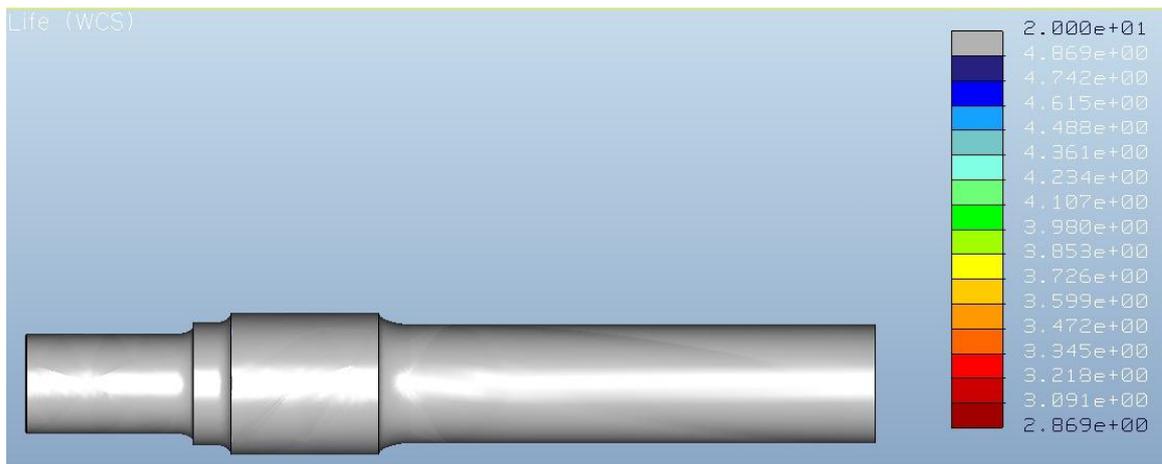


Ilustración 10. 58 Log life eje con fisura cúbica nº8

Como se puede observar el número de ciclos es superior a 10^7 en todo el eje. En la zona de las **fisuras cúbicas** realizadas, la vida deseada también es superior a 10^7 ciclos, por lo que los ejes con las fisuras cúbicas mencionadas cumplen la norma EN 1326.



Confidence of life (confianza en la vida):

Confidence of life representa la proporción entre la vida calculada y la vida de diseño objetivo.

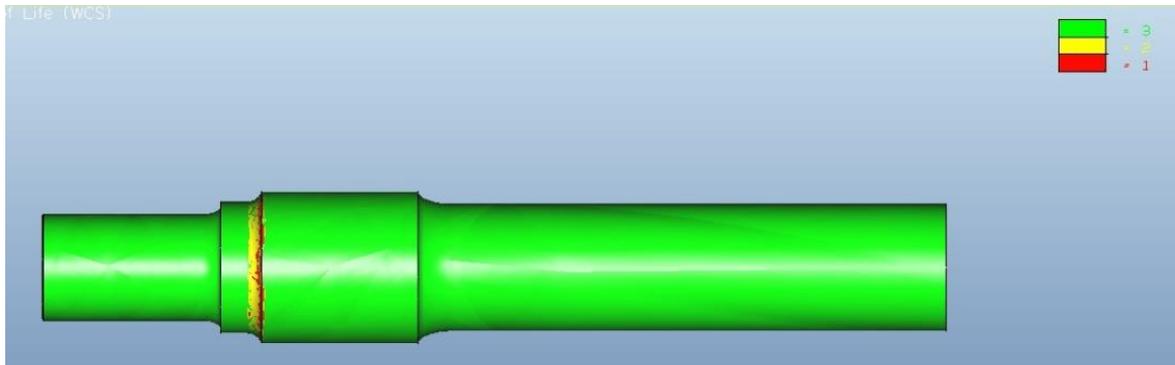


Ilustración 10. 59 *Confidence of life* eje fisura cúbica n°8

Factor of safety (factor de seguridad):

Representa el factor de seguridad permisible sobre la carga de entrada. Cuando la vida a fatiga calculada para el modelo es mayor que la vida de diseño objetivo el software proporciona un cálculo para determinar un factor de seguridad permisible sobre la carga de entrada. Esto representa el grado según el cual la amplitud de la carga puede ser aumentada sin comprometer la vida de diseño objetivo.

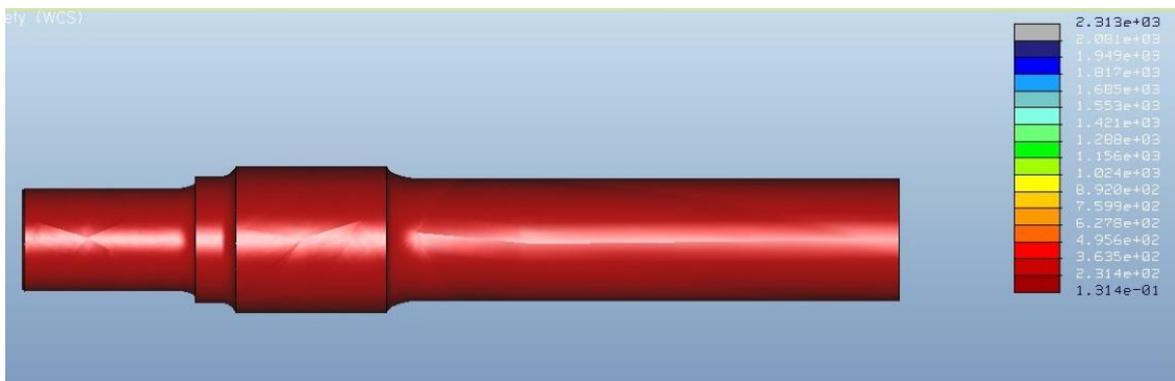


Ilustración 10. 60 *Factor of safety* eje fisura cúbica n°8



10.3.9. Eje con fisura cúbica y refinamiento de malla n° 9

Este análisis del eje a fatiga se ha realizado con una **fisura cúbica** de dimensiones **5x5x5 mm³**, ubicada a **50 mm** de la sección crítica número III. Los datos obtenidos se muestran en las siguientes imágenes.

Log Damage (Logaritmo del daño):

La proporción entre ciclos de fatiga acumulados y el número total de ciclos a fallo. Un valor mayor que la unidad indica fallo. Al igual que el logaritmo de la vida, se expresa en órdenes logarítmicos. La relación entre *Log Life* y *Log Damage* puede ser expresada como ($Log Life = - Log Damage$).



Ilustración 10. 61 Log damage eje con fisura cúbica n°9

Log Life (Logaritmo de la vida):

El número estimado de ciclos hasta que el modelo parte. La relación entre *Log Life* y *Log Damage* puede ser expresada como ($Log Life = - Log Damage$).



Ilustración 10. 62 Log life eje con fisura cúbica n°9

Como se puede observar el número de ciclos es superior a 10^7 en todo el eje. En la zona de las **fisuras cúbicas** realizadas, la vida deseada también es superior a 10^7 ciclos, por lo que los ejes con las fisuras cúbicas mencionadas cumplen la norma EN 1326.



Confidence of life (confianza en la vida):

Confidence of life representa la proporción entre la vida calculada y la vida de diseño objetivo.

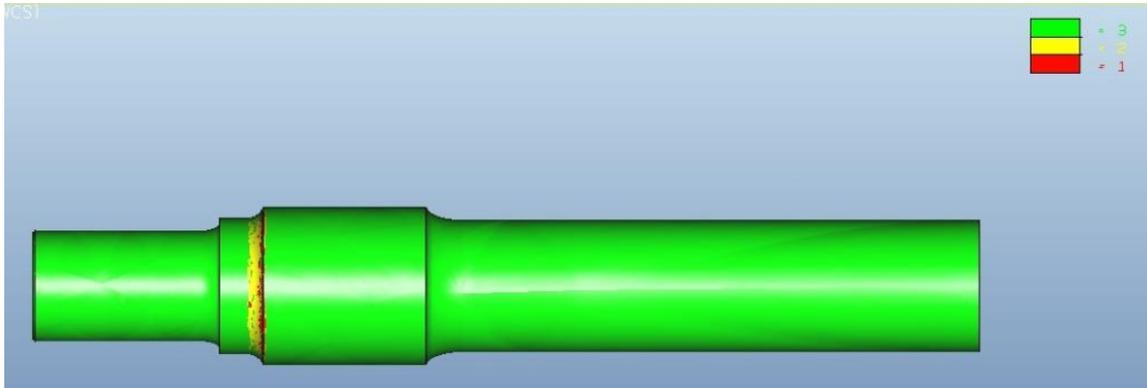


Ilustración 10. 63 *Confidence of life* eje fisura cúbica n°9

Factor of safety (factor de seguridad):

Representa el factor de seguridad permisible sobre la carga de entrada. Cuando la vida a fatiga calculada para el modelo es mayor que la vida de diseño objetivo el software proporciona un cálculo para determinar un factor de seguridad permisible sobre la carga de entrada. Esto representa el grado según el cual la amplitud de la carga puede ser aumentada sin comprometer la vida de diseño objetivo.



Ilustración 10. 64 *Factor of safety* eje fisura cúbica n°9



10.3.10. Eje con fisura cúbica y refinamiento de malla n° 10

Este análisis del eje a fatiga se ha realizado con una **fisura cúbica** de dimensiones **5x5x5 mm³**, ubicada a **60 mm** de la sección crítica número III. Los datos obtenidos se muestran en las siguientes imágenes.

Log Damage (Logaritmo del daño):

La proporción entre ciclos de fatiga acumulados y el número total de ciclos a fallo. Un valor mayor que la unidad indica fallo. Al igual que el logaritmo de la vida, se expresa en órdenes logarítmicos. La relación entre *Log Life* y *Log Damage* puede ser expresada como ($Log Life = - Log Damage$).

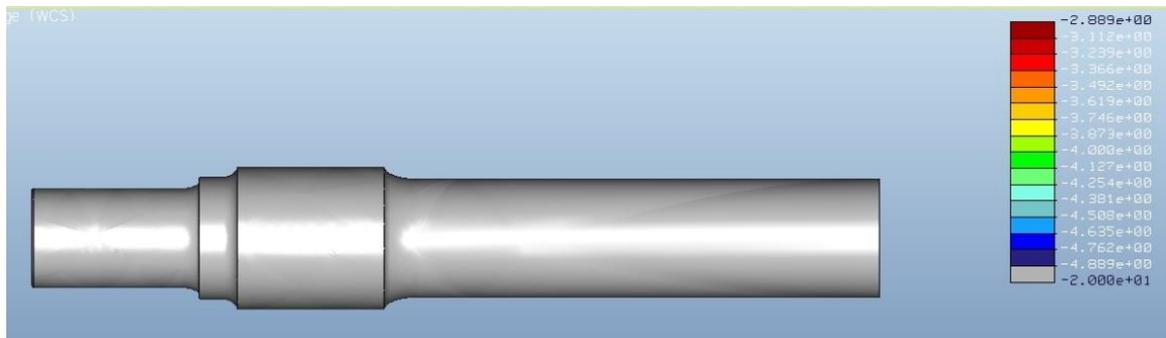


Ilustración 10. 65 Log damage eje con fisura cúbica n°10

Log Life (Logaritmo de la vida):

El número estimado de ciclos hasta que el modelo parte. La relación entre *Log Life* y *Log Damage* puede ser expresada como ($Log Life = - Log Damage$).

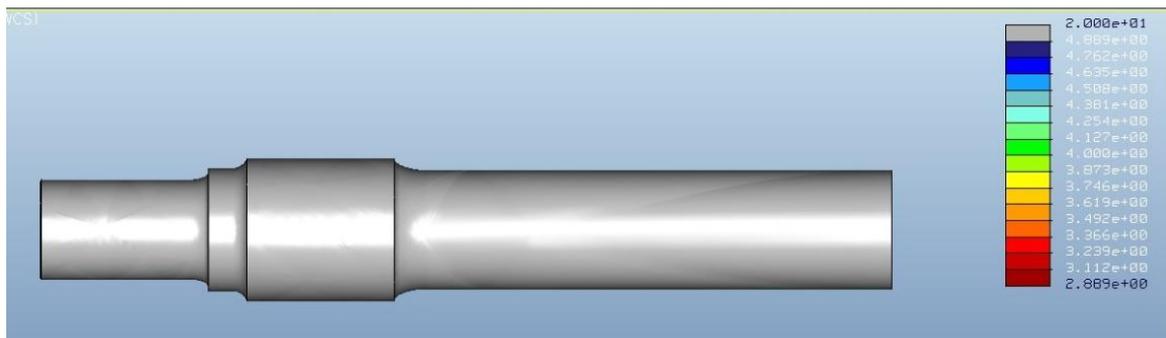


Ilustración 10. 66 Log life eje con fisura cúbica n°10

Como se puede observar el número de ciclos es superior a 10^7 en todo el eje. En la zona de las **fisuras cúbicas** realizadas, la vida deseada también es superior a 10^7 ciclos, por lo que los ejes con las fisuras cúbicas mencionadas cumplen la norma EN 1326.



Confidence of life (confianza en la vida):

Confidence of life representa la proporción entre la vida calculada y la vida de diseño objetivo.

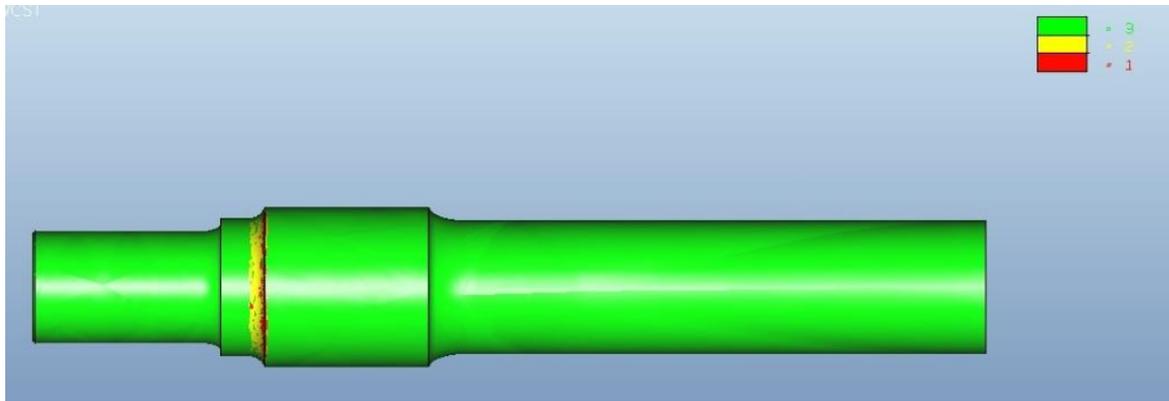


Ilustración 10. 67 *Confidence of life* eje fisura cúbica n°10

Factor of safety (factor de seguridad):

Representa el factor de seguridad permisible sobre la carga de entrada. Cuando la vida a fatiga calculada para el modelo es mayor que la vida de diseño objetivo el software proporciona un cálculo para determinar un factor de seguridad permisible sobre la carga de entrada. Esto representa el grado según el cual la amplitud de la carga puede ser aumentada sin comprometer la vida de diseño objetivo.



Ilustración 10. 68 *Factor of safety* eje fisura cúbica n°10



10.3.11. Eje con fisura cúbica y refinamiento de malla n° 11

Este análisis del eje a fatiga se ha realizado con una **fisura cúbica** de dimensiones **5x5x5 mm³**, ubicada a **65 mm** de la sección crítica número III. Los datos obtenidos se muestran en las siguientes imágenes.

Log Damage (Logaritmo del daño):

La proporción entre ciclos de fatiga acumulados y el número total de ciclos a fallo. Un valor mayor que la unidad indica fallo. Al igual que el logaritmo de la vida, se expresa en órdenes logarítmicos. La relación entre *Log Life* y *Log Damage* puede ser expresada como ($Log Life = - Log Damage$).

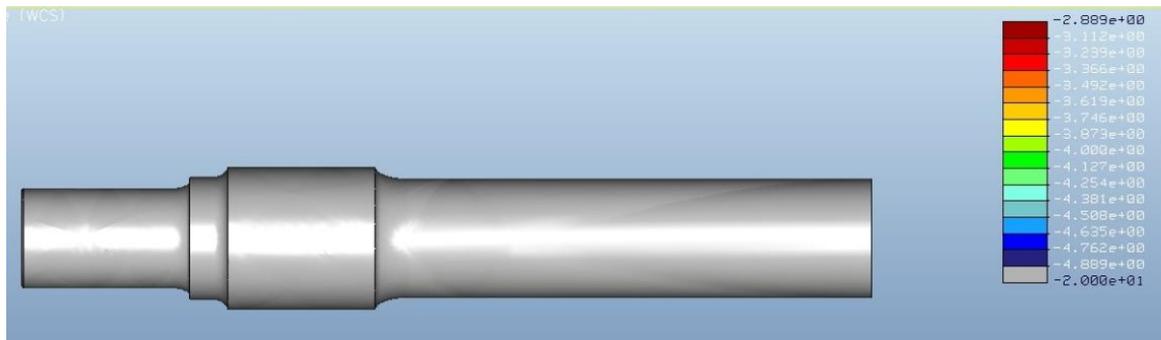


Ilustración 10. 69 Log damage eje con fisura cúbica n°11

Log Life (Logaritmo de la vida):

El número estimado de ciclos hasta que el modelo parte. La relación entre *Log Life* y *Log Damage* puede ser expresada como ($Log Life = - Log Damage$).

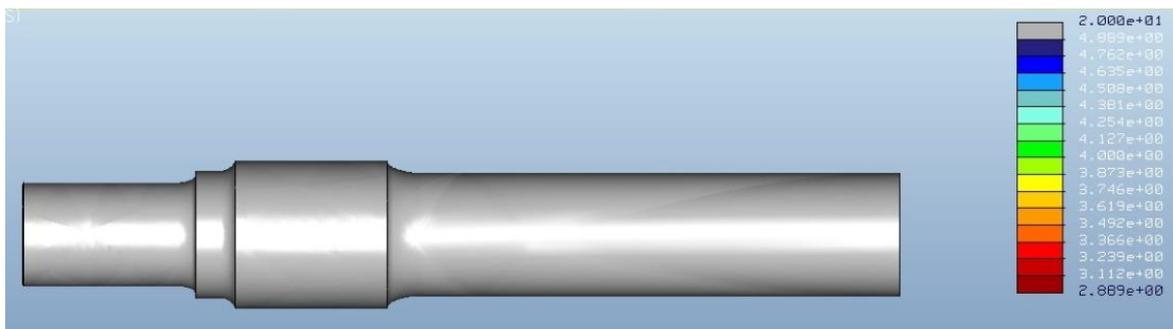


Ilustración 10. 70 Log life eje con fisura cúbica n°11

Como se puede observar el número de ciclos es superior a 10^7 en todo el eje. En la zona de las **fisuras cúbicas** realizadas, la vida deseada también es superior a 10^7 ciclos, por lo que los ejes con las fisuras cúbicas mencionadas cumplen la norma EN 1326.



Confidence of life (confianza en la vida):

Confidence of life representa la proporción entre la vida calculada y la vida de diseño objetivo.

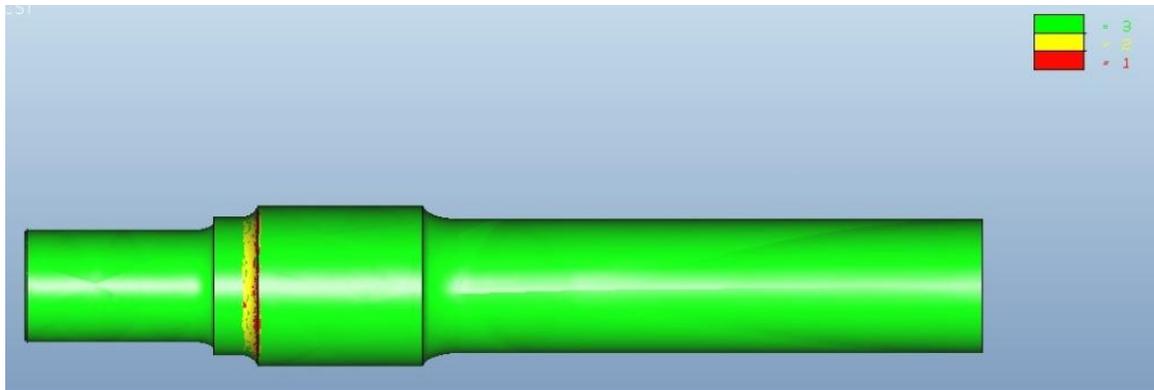


Ilustración 10. 71 *Confidence of life* eje fisura cúbica n°11

Factor of safety (factor de seguridad):

Representa el factor de seguridad permisible sobre la carga de entrada. Cuando la vida a fatiga calculada para el modelo es mayor que la vida de diseño objetivo el software proporciona un cálculo para determinar un factor de seguridad permisible sobre la carga de entrada. Esto representa el grado según el cual la amplitud de la carga puede ser aumentada sin comprometer la vida de diseño objetivo.



Ilustración 10. 72 *Factor of safety* eje fisura cúbica n°11



10.4- FISURA RADIAL CON REFINAMIENTO DE MALLA A. ESTÁTICO

En este apartado se muestran los gráficos obtenidos tras los **análisis estáticos**, de los distintos ejes con **fisuras radiales**, y **refinamiento de malla** en la fisura realizada. La ubicación y tamaño de las fisuras cúbicas se recoge en la siguiente tabla:

Análisis	Distancia desde la sección III (mm)	Dimensión fisura		
		Ancho (mm)	Largo (mm)	Profundidad (mm)
1	5	1	5	5
2	11	0,6	3	5
3	15	1	5	5
4	17,5	1	10	5
5	24,5	0,8	4	5
6	30	1,2	6	5
7	36	0,6	3	5
8	40	1	5	5
9	50	1	5	5
10	60	1,4	7	5
11	70	0,6	3	5

Tabla 10. 3 Ubicación y dimensión. Fisuras radiales

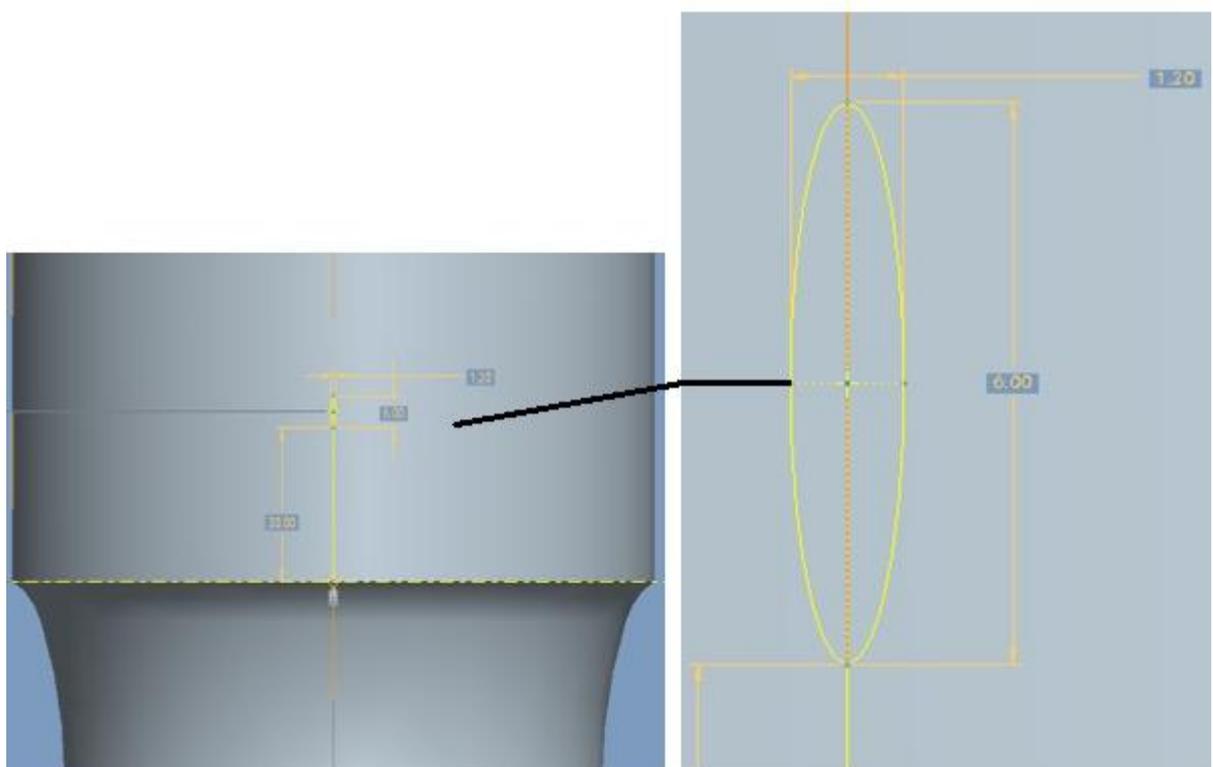


Ilustración 10. 73 Fisura radial



El análisis n° 1 se corresponde con la **fisura radial** más próxima a la sección III, mientras que el análisis 11 corresponde con la fisura radial más alejada a la sección crítica III (más próxima a sección II).

Una vez obtenidos los resultados correspondientes a las fisuras cúbicas se han repetido los análisis, pero esta vez con fisuras radiales. La progresión de las fisuras se desarrolla igualmente desde la sección crítica III hacia la sección crítica II, tal y como se observa a continuación:

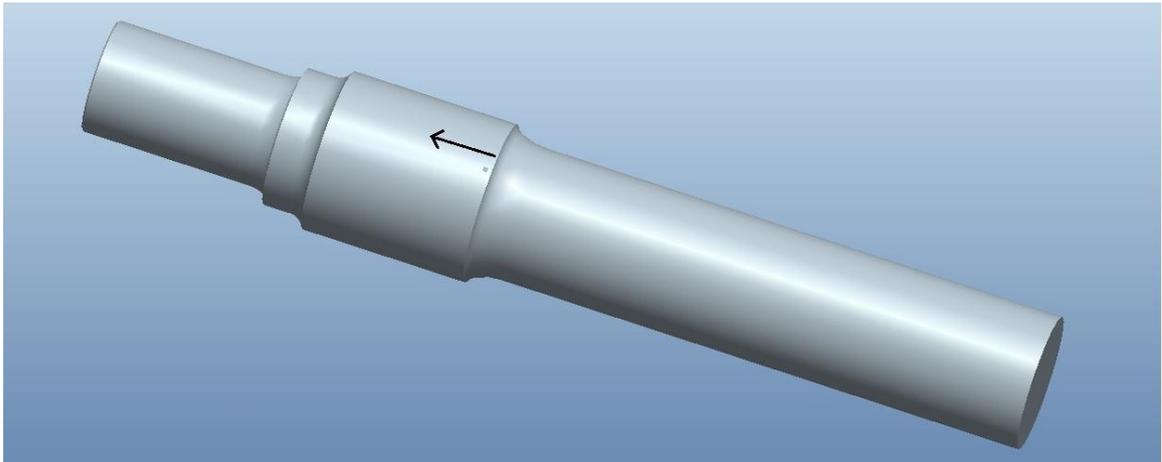


Ilustración 10. 74 Inicio de la progresión de la fisura radial

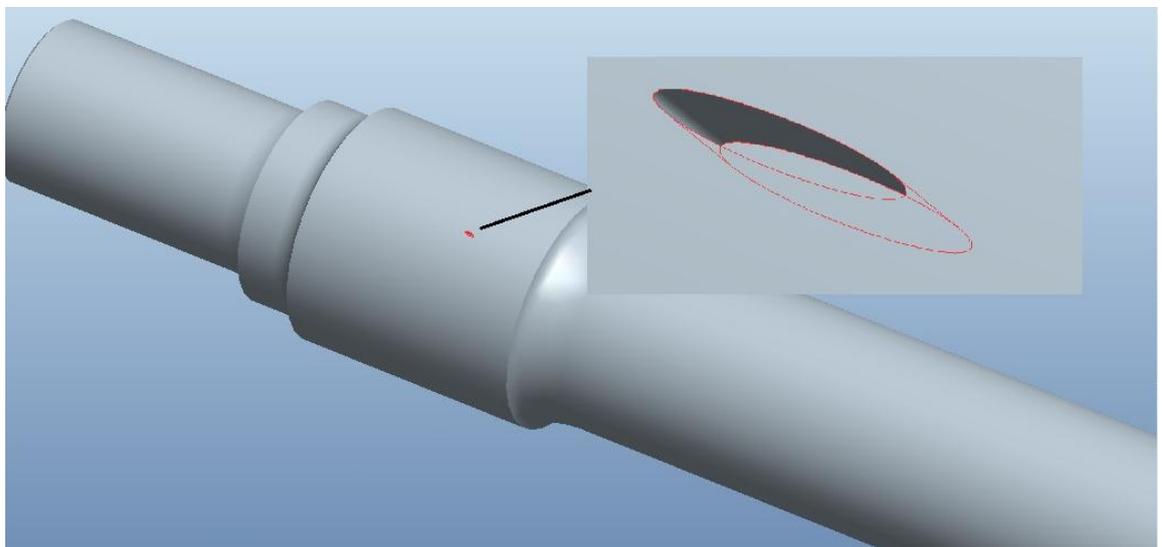


Ilustración 10. 75 Fin de la progresión de la fisura radial



10.4.1. Eje con fisura radial y refinamiento de malla n° 1

Este análisis estático del eje se ha realizado con una **fisura radial** de dimensiones **1x5x5 mm³** (ancho x largo x profundidad), ubicada a **5 mm** de la sección crítica número III. Los datos obtenidos se muestran en las siguientes imágenes.

Desplazamiento:

Los resultados de los desplazamientos registrados en *Mechanica* indican cómo el eje se deforma bajo las condiciones de contorno aplicadas, diferenciándose por colores en función de la cantidad desplazada, tal y como se muestra en la siguiente figura:

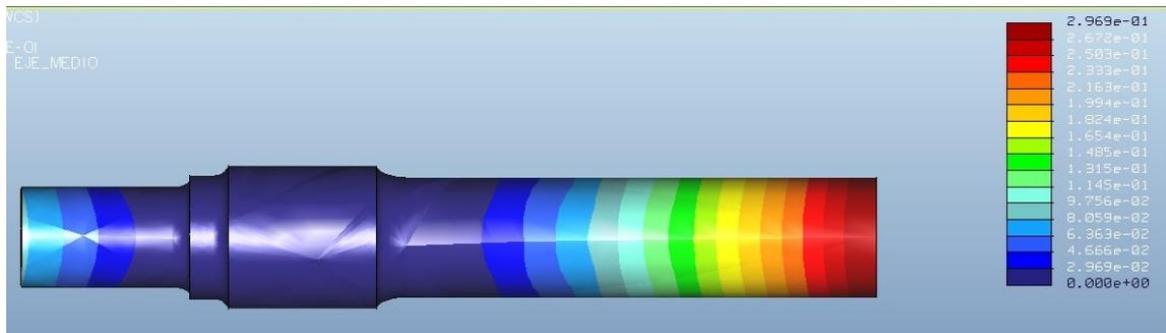


Ilustración 10. 76 Desplazamiento del eje con fisura radial n°1

El desplazamiento máximo, de valor 0,2969 mm, se produce en el punto medio del eje (extremo del eje medio).

Tensión:

La tensión máxima, de valor 711,8 MPa, se produce en la sección crítica II, tal y como se observa en las imágenes anteriores. La tensión máxima en la fisura cúbica es de 40,3 MPa.

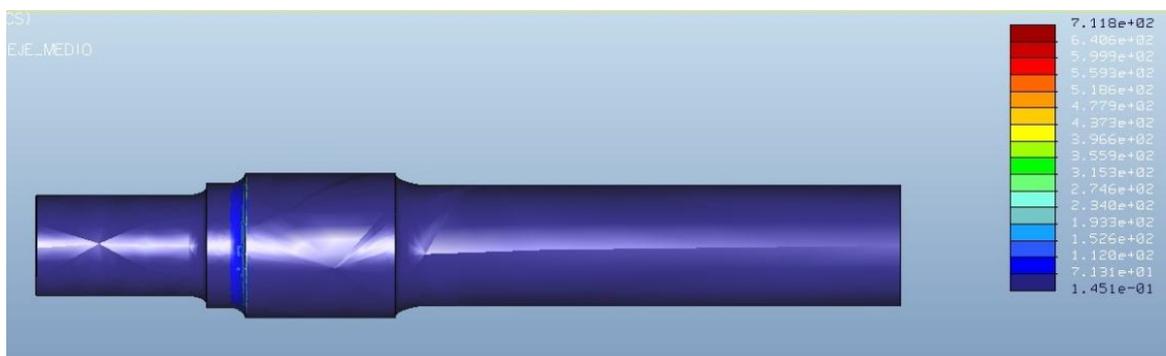


Ilustración 10. 77 Tensión del eje con fisura radial n°1



10.4.2. Eje con fisura radial y refinamiento de malla n° 2

Este análisis estático del eje se ha realizado con una **fisura radial** de dimensiones **0,6x3x5 mm³** (ancho x largo x profundidad), ubicada a **11 mm** de la sección crítica número III. Los datos obtenidos se muestran en las siguientes imágenes.

Desplazamiento:

Los resultados de los desplazamientos registrados en *Mechanica* indican cómo el eje se deforma bajo las condiciones de contorno aplicadas, diferenciándose por colores en función de la cantidad desplazada, tal y como se muestra en la siguiente figura:

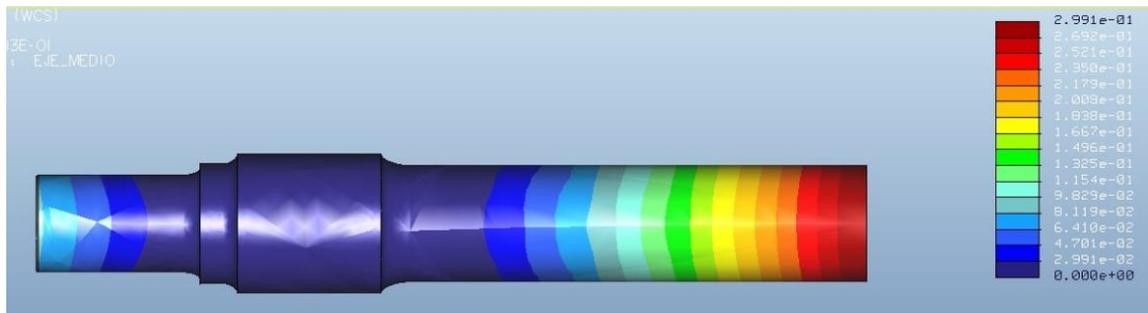


Ilustración 10. 78 Desplazamiento del eje con fisura radial n°2

El desplazamiento máximo, de valor 0,2991 mm, se produce en el punto medio del eje (extremo del eje medio).

Tensión:

La tensión máxima, de valor 667,2 MPa, se produce en la sección crítica II, tal y como se observa en las imágenes anteriores. La tensión máxima en la fisura cúbica es de 26,63 MPa.

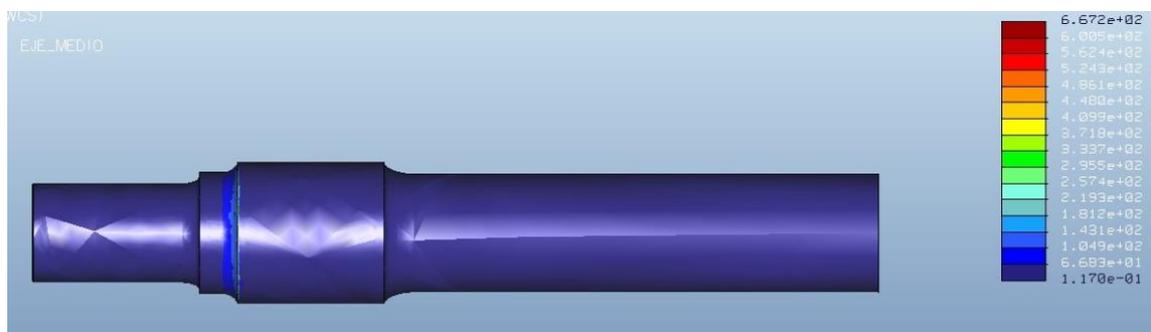


Ilustración 10. 79 Tensión del eje con fisura radial n°2



10.4.3. Eje con fisura radial y refinamiento de malla n° 3

Este análisis estático del eje se ha realizado con una **fisura radial** de dimensiones **1x5x5 mm³** (ancho x largo x profundidad), ubicada a **15 mm** de la sección crítica número III. Los datos obtenidos se muestran en las siguientes imágenes.

Desplazamiento:

Los resultados de los desplazamientos registrados en *Mechanica* indican cómo el eje se deforma bajo las condiciones de contorno aplicadas, diferenciándose por colores en función de la cantidad desplazada, tal y como se muestra en la siguiente figura:

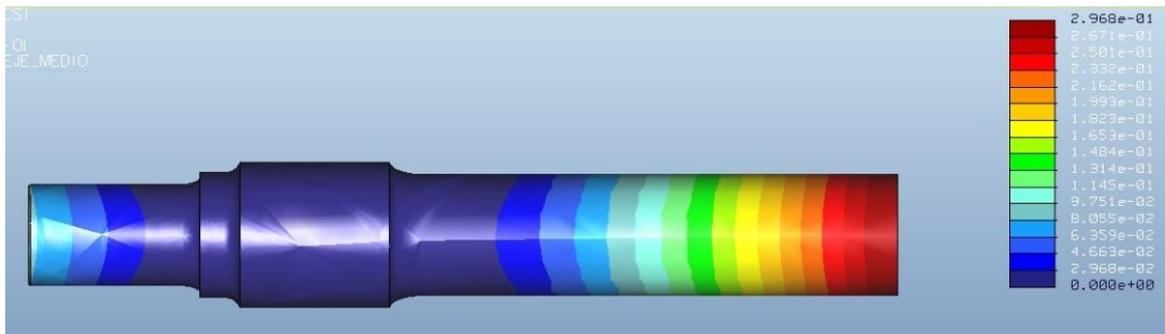


Ilustración 10. 80 Desplazamiento del eje con fisura radial n°3

El desplazamiento máximo, de valor 0,2968 mm, se produce en el punto medio del eje (extremo del eje medio).

Tensión:

La tensión máxima, de valor 741,7 MPa, se produce en la sección crítica II, tal y como se observa en las imágenes anteriores. La tensión máxima en la fisura cúbica es de 24,56 MPa.



Ilustración 10. 81 Tensión del eje con fisura radial n°3



10.4.4. Eje con fisura radial y refinamiento de malla n° 4

Este análisis estático del eje se ha realizado con una **fisura radial** de dimensiones **1x10x5 mm³** (ancho x largo x profundidad), ubicada a **17,5 mm** de la sección crítica número III. Los datos obtenidos se muestran en las siguientes imágenes.

Desplazamiento:

Los resultados de los desplazamientos registrados en *Mechanica* indican cómo el eje se deforma bajo las condiciones de contorno aplicadas, diferenciándose por colores en función de la cantidad desplazada, tal y como se muestra en la siguiente figura:

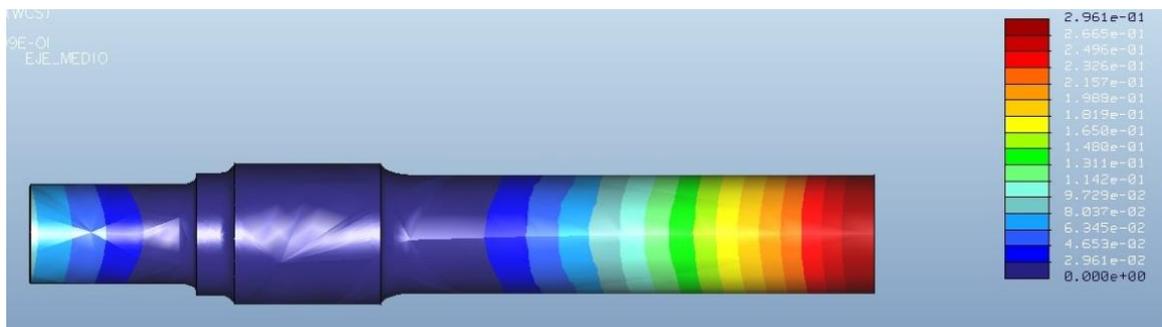


Ilustración 10. 82 Desplazamiento del eje con fisura radial n°4

El desplazamiento máximo, de valor 0,2961 mm, se produce en el punto medio del eje (extremo del eje medio).

Tensión:

La tensión máxima, de valor 746,9 MPa, se produce en la sección crítica II, tal y como se observa en las imágenes anteriores. La tensión máxima en la fisura cúbica es de 19,46 MPa.

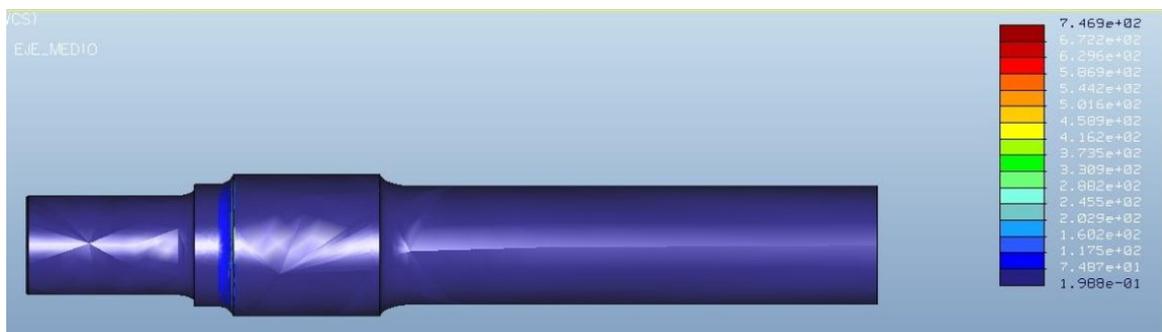


Ilustración 10. 83 Tensión del eje con fisura radial n°4



10.4.5. Eje con fisura radial y refinamiento de malla n° 5

Este análisis estático del eje se ha realizado con una **fisura radial** de dimensiones **0,8x4x5 mm³** (ancho x largo x profundidad), ubicada a **24,5 mm** de la sección crítica número III. Los datos obtenidos se muestran en las siguientes imágenes.

Desplazamiento:

Los resultados de los desplazamientos registrados en *Mechanica* indican cómo el eje se deforma bajo las condiciones de contorno aplicadas, diferenciándose por colores en función de la cantidad desplazada, tal y como se muestra en la siguiente figura:

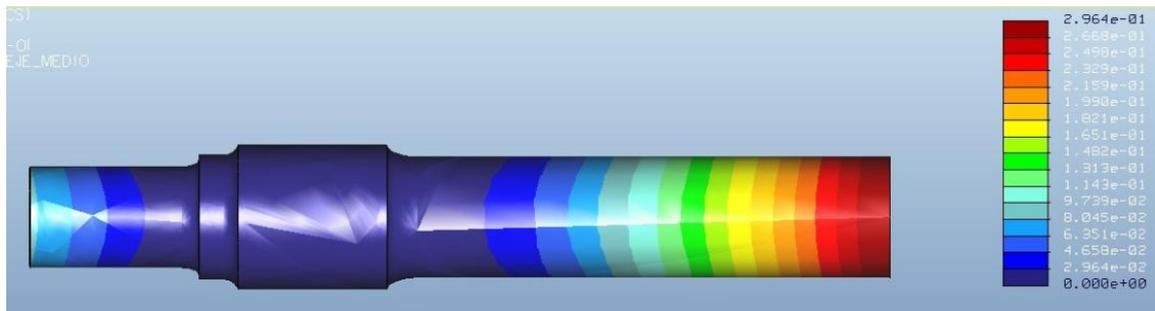


Ilustración 10. 84 Desplazamiento del eje con fisura radial n°5

El desplazamiento máximo, de valor 0,2964 mm, se produce en el punto medio del eje (extremo del eje medio).

Tensión:

La tensión máxima, de valor 765,5 MPa, se produce en la sección crítica II, tal y como se observa en las imágenes anteriores. La tensión máxima en la fisura cúbica es de 15,75 MPa.

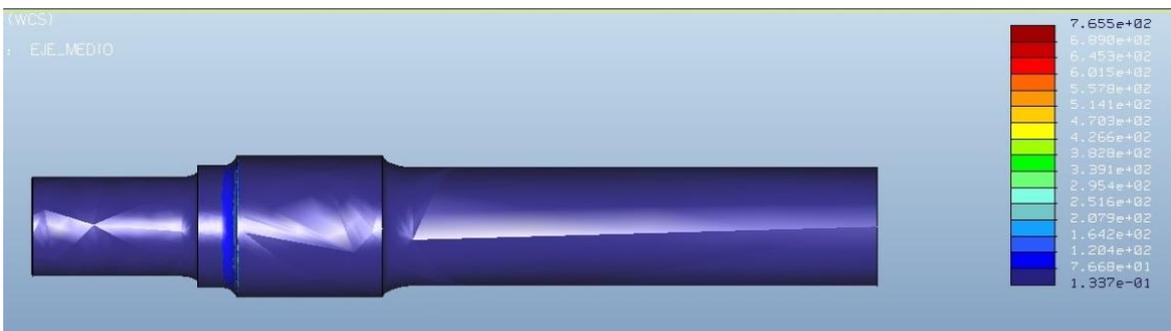


Ilustración 10. 85 Tensión del eje con fisura radial n°5



10.4.6. Eje con fisura radial y refinamiento de malla n° 6

Este análisis estático del eje se ha realizado con una **fisura radial** de dimensiones **1,2x6x5 mm³** (ancho x largo x profundidad), ubicada a **30 mm** de la sección crítica número III. Los datos obtenidos se muestran en las siguientes imágenes.

Desplazamiento:

Los resultados de los desplazamientos registrados en *Mechanica* indican cómo el eje se deforma bajo las condiciones de contorno aplicadas, diferenciándose por colores en función de la cantidad desplazada, tal y como se muestra en la siguiente figura:

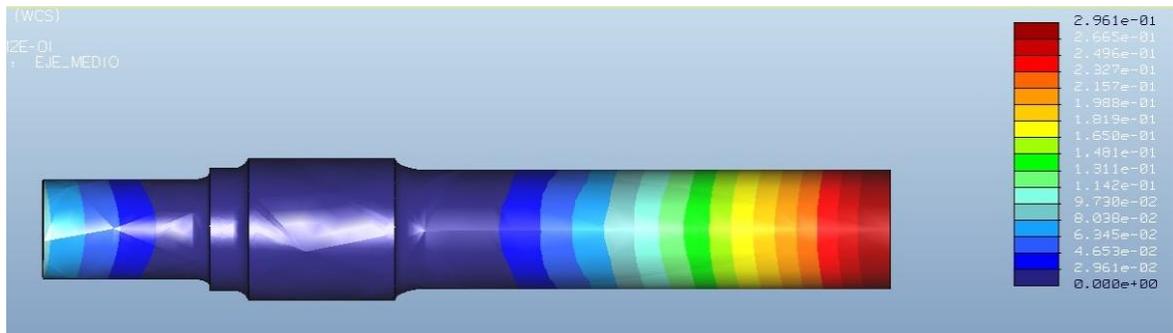


Ilustración 10. 86 Desplazamiento del eje con fisura radial n°6

El desplazamiento máximo, de valor 0,2961 mm, se produce en el punto medio del eje (extremo del eje medio).

Tensión:

La tensión máxima, de valor 833,0 MPa, se produce en la sección crítica II, tal y como se observa en las imágenes anteriores. La tensión máxima en la fisura cúbica es de 13,38 MPa.



Ilustración 10. 87 Tensión del eje con fisura radial n°6



10.4.7. Eje con fisura radial y refinamiento de malla n° 7

Este análisis estático del eje se ha realizado con una **fisura radial** de dimensiones **0,6x3x5 mm³** (ancho x largo x profundidad), ubicada a **36 mm** de la sección crítica número III. Los datos obtenidos se muestran en las siguientes imágenes.

Desplazamiento:

Los resultados de los desplazamientos registrados en *Mechanica* indican cómo el eje se deforma bajo las condiciones de contorno aplicadas, diferenciándose por colores en función de la cantidad desplazada, tal y como se muestra en la siguiente figura:

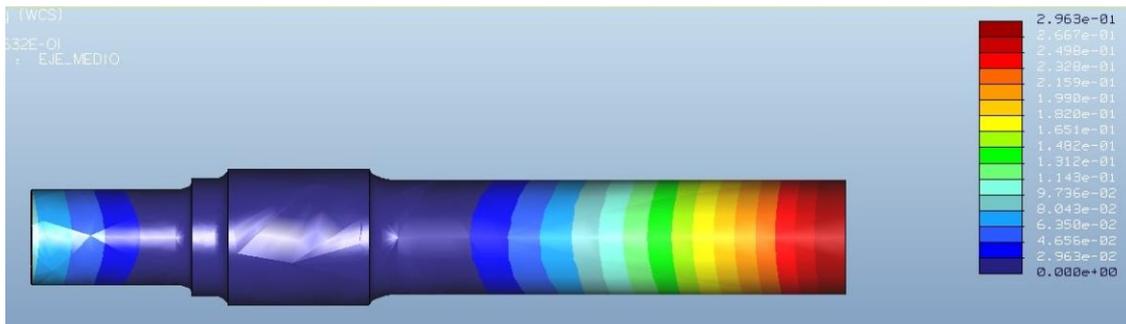


Ilustración 10. 88 Desplazamiento del eje con fisura radial n°7

El desplazamiento máximo, de valor 0,2963 mm, se produce en el punto medio del eje (extremo del eje medio).

Tensión:



Ilustración 10. 89 Tensión del eje con fisura radial n°7

La tensión máxima, de valor 717,4 MPa, se produce en la sección crítica II, tal y como se observa en las imágenes anteriores. La tensión máxima en la fisura cúbica es de 9,496 MPa.

10.4.8. Eje con fisura radial y refinamiento de malla n° 8

Este análisis estático del eje se ha realizado con una **fisura radial** de dimensiones **1x5x5 mm³** (ancho x largo x profundidad), ubicada a **40 mm** de la sección crítica número III. Los datos obtenidos se muestran en las siguientes imágenes.

Desplazamiento:

Los resultados de los desplazamientos registrados en *Mechanica* indican cómo el eje se deforma bajo las condiciones de contorno aplicadas, diferenciándose por colores en función de la cantidad desplazada, tal y como se muestra en la siguiente figura:

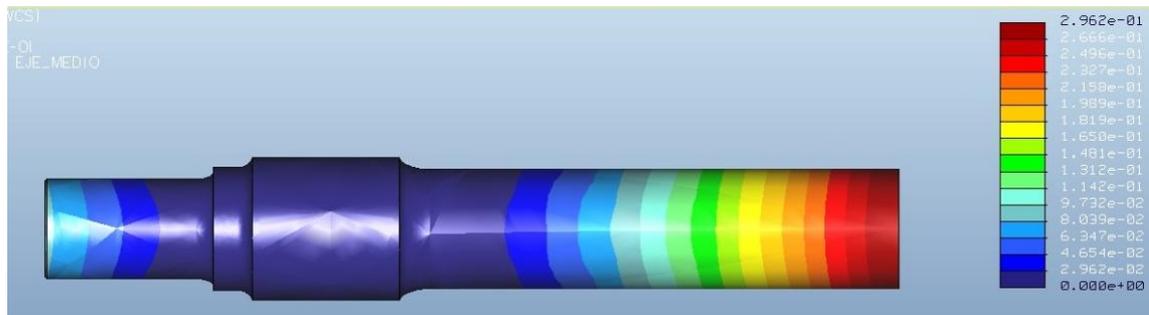


Ilustración 10.90 Desplazamiento del eje con fisura radial n°8

El desplazamiento máximo, de valor 0,2962 mm, se produce en el punto medio del eje (extremo del eje medio).

Tensión:

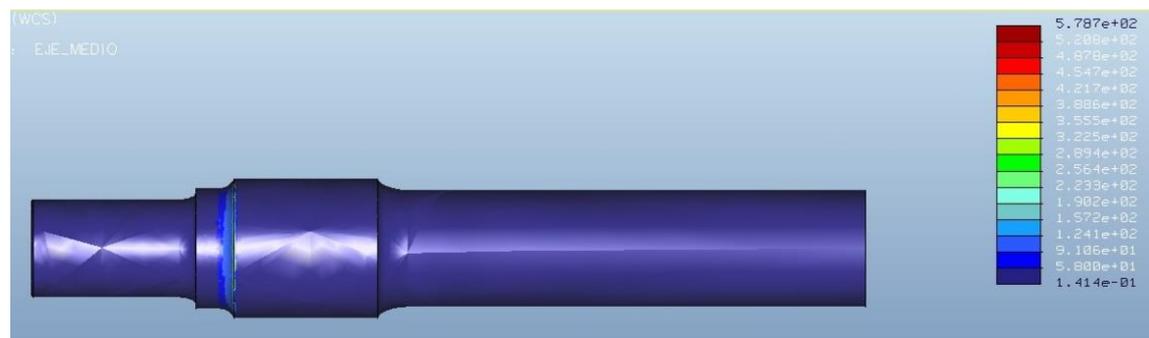


Ilustración 10.91 Tensión del eje con fisura radial n°8

La tensión máxima, de valor 578,7 MPa, se produce en la sección crítica II, tal y como se observa en las imágenes anteriores. La tensión máxima en la fisura cúbica es de 10,14 MPa.



10.4.9. Eje con fisura radial y refinamiento de malla n° 9

Este análisis estático del eje se ha realizado con una **fisura radial** de dimensiones **1x5x5 mm³** (ancho x largo x profundidad), ubicada a **50 mm** de la sección crítica número III. Los datos obtenidos se muestran en las siguientes imágenes.

Desplazamiento:

Los resultados de los desplazamientos registrados en *Mechanica* indican cómo el eje se deforma bajo las condiciones de contorno aplicadas, diferenciándose por colores en función de la cantidad desplazada, tal y como se muestra en la siguiente figura:

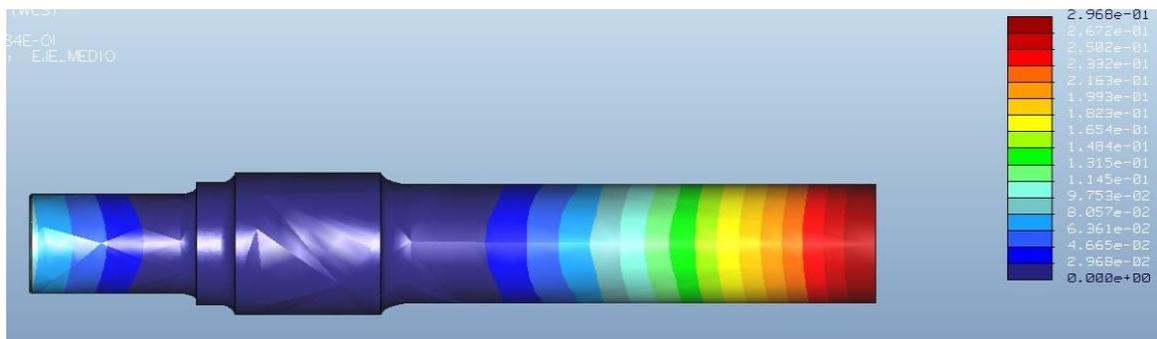


Ilustración 10.92 Desplazamiento del eje con fisura radial n°9

El desplazamiento máximo, de valor 0,2968 mm, se produce en el punto medio del eje (extremo del eje medio).

Tensión:

La tensión máxima, de valor 727,5 MPa, se produce en la sección crítica II, tal y como se observa en las imágenes anteriores. La tensión máxima en la fisura cúbica es de 10,9 MPa.



Ilustración 10.93 Tensión del eje con fisura radial n°9

10.4.10. Eje con fisura radial y refinamiento de malla n° 10

Este análisis estático del eje se ha realizado con una **fisura radial** de dimensiones **1,4x7x5 mm³** (ancho x largo x profundidad), ubicada a **60 mm** de la sección crítica número III. Los datos obtenidos se muestran en las siguientes imágenes.

Desplazamiento:

Los resultados de los desplazamientos registrados en *Mechanica* indican cómo el eje se deforma bajo las condiciones de contorno aplicadas, diferenciándose por colores en función de la cantidad desplazada, tal y como se muestra en la siguiente figura:

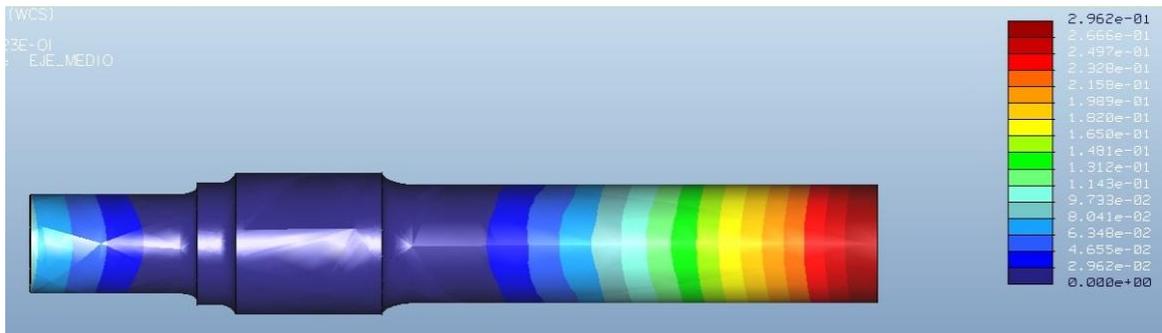


Ilustración 10. 94 Desplazamiento del eje con fisura radial n°10

El desplazamiento máximo, de valor 0,2962 mm, se produce en el punto medio del eje (extremo del eje medio).

Tensión:

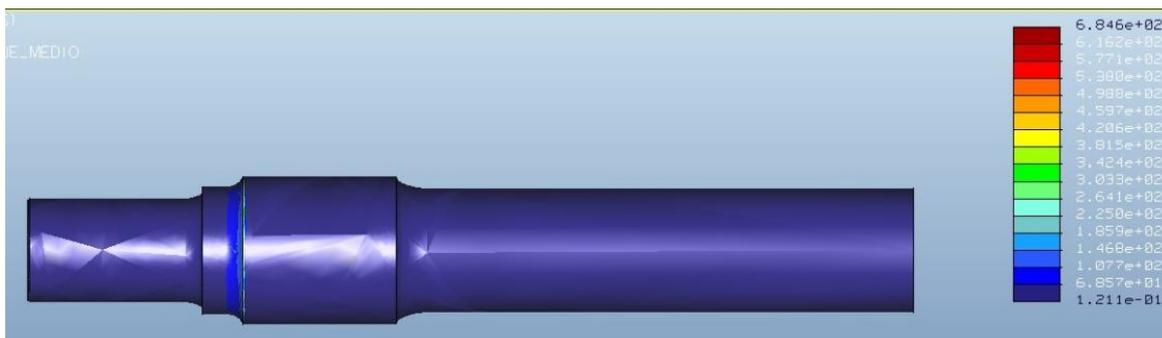


Ilustración 10. 95 Tensión del eje con fisura radial n°10

La tensión máxima, de valor 684,6 MPa, se produce en la sección crítica II, tal y como se observa en las imágenes anteriores. La tensión máxima en la fisura cúbica es de 4,86 MPa.



10.4.11. Eje con fisura radial y refinamiento de malla n° 11

Este análisis estático del eje se ha realizado con una **fisura radial** de dimensiones **0,6x3x5 mm³** (ancho x largo x profundidad), ubicada a **70 mm** de la sección crítica número III. Los datos obtenidos se muestran en las siguientes imágenes.

Desplazamiento:

Los resultados de los desplazamientos registrados en *Mechanica* indican cómo el eje se deforma bajo las condiciones de contorno aplicadas, diferenciándose por colores en función de la cantidad desplazada, tal y como se muestra en la siguiente figura:

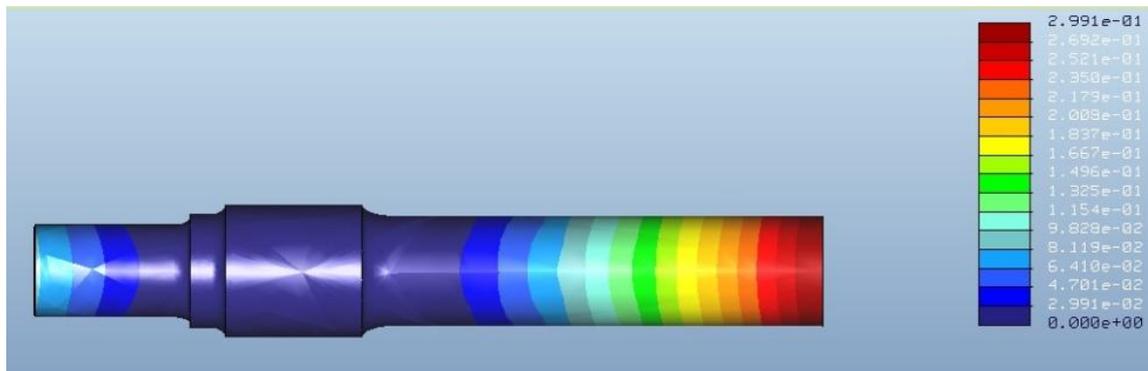


Ilustración 10. 96 Desplazamiento del eje con fisura radial n°11

El desplazamiento máximo, de valor 0,2961 mm, se produce en el punto medio del eje (extremo del eje medio).

Tensión:

La tensión máxima, de valor 750,7 MPa, se produce en la sección crítica II, tal y como se observa en las imágenes anteriores. La tensión máxima en la fisura cúbica es de 3,155 MPa.



Ilustración 10. 97 Tensión del eje con fisura radial n°11



10.5- FISURA RADIAL CON REFINAMIENTO DE MALLA. FATIGA

En este apartado se muestran los gráficos obtenidos tras los análisis a fatiga, de los distintos ejes con **fisuras radiales**, y **refinamiento de malla** en la fisura realizada. La ubicación y tamaño de las fisuras cúbicas se recoge en la tabla 10.4.

Análisis	Distancia desde la sección III (mm)	Dimensión fisura		
		Ancho (mm)	Largo (mm)	Profundidad (mm)
1	5	1	5	5
2	11	0,6	3	5
3	15	1	5	5
4	17,5	1	10	5
5	24,5	0,8	4	5
6	30	1,2	6	5
7	36	0,6	3	5
8	40	1	5	5
9	50	1	5	5
10	60	1,4	7	5
11	70	0,6	3	5

Tabla 10. 4 Ubicación y dimensión. Fisuras radiales

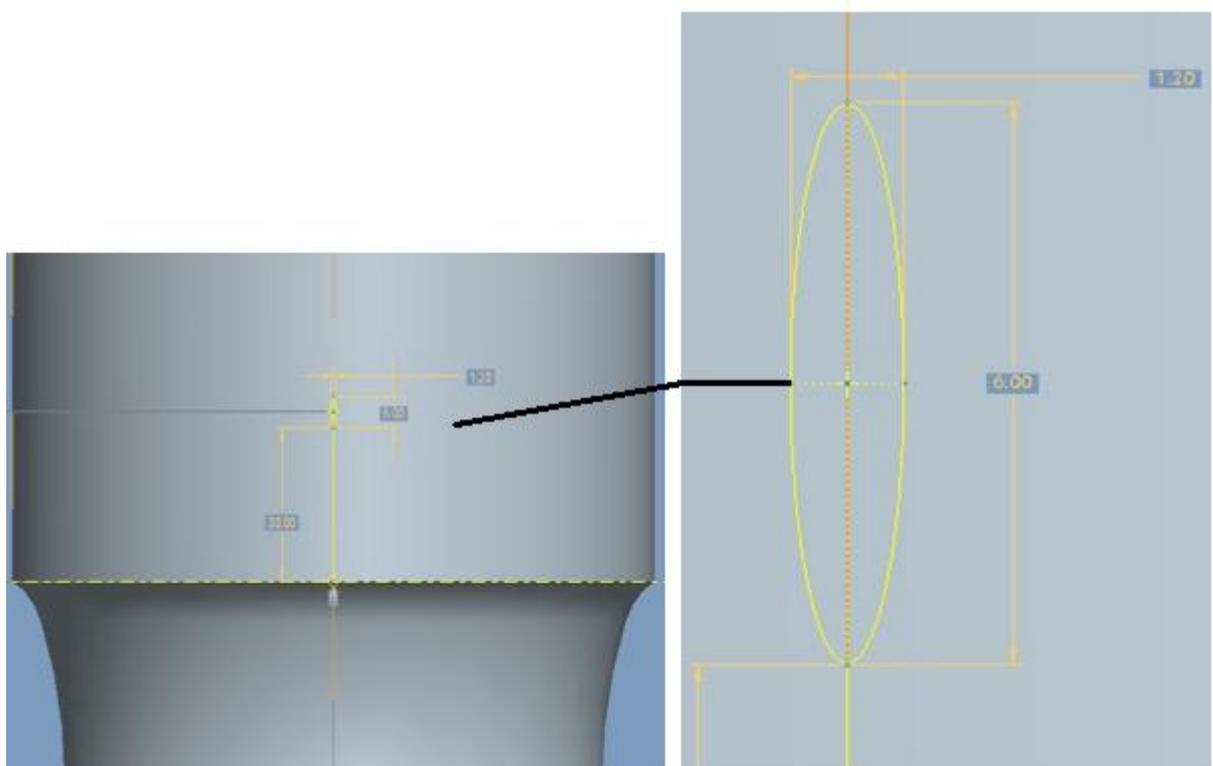


Ilustración 10. 98 Fisura radial



El análisis n° 1 se corresponde con la **fisura radial** más próxima a la sección III, mientras que el análisis 11 se corresponde con la fisura radial más alejada a la sección crítica III (más próxima a la sección II).

Una vez obtenidos los resultados correspondientes a las fisuras cúbicas se han repetido los análisis, pero esta vez con fisuras radiales. La progresión de las fisuras se desarrolla igualmente desde la sección crítica III hacia la sección crítica II, tal y como se observa a continuación:

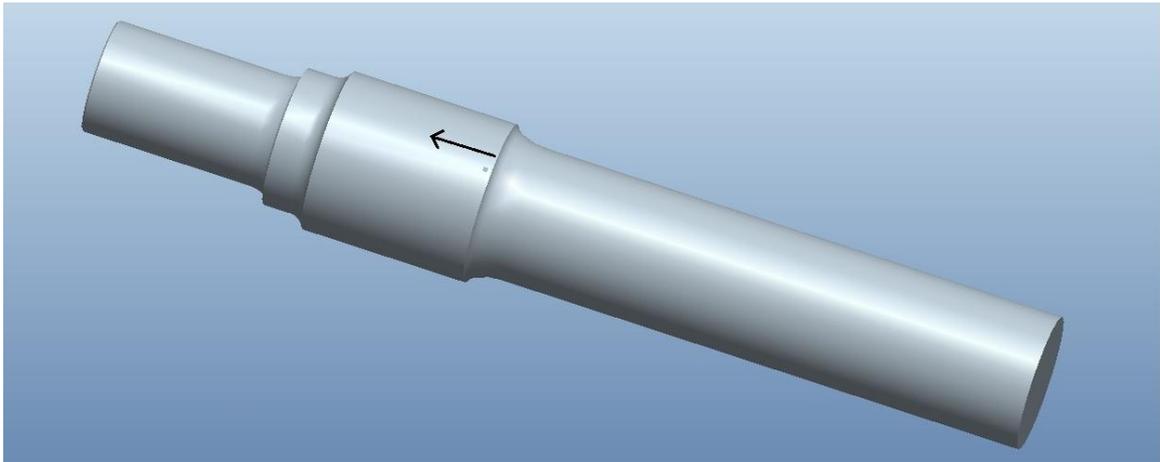


Ilustración 10. 99 Inicio de la progresión de la fisura radial

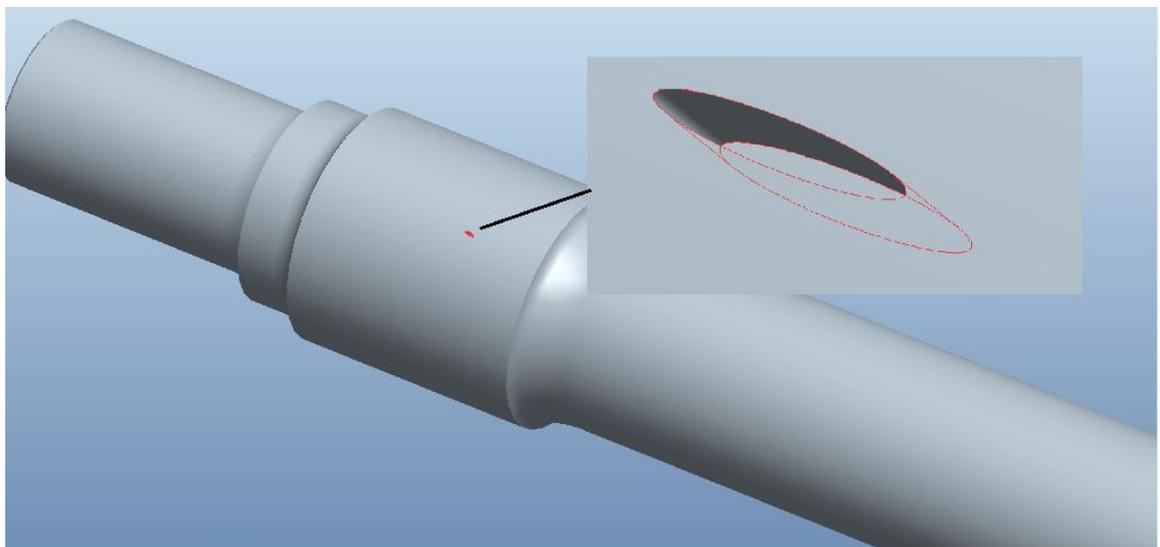


Ilustración 10. 100 Fin de la progresión de la fisura radial



10.5.1. Eje con fisura radial y refinamiento de malla n° 1

Este análisis del eje a fatiga se ha realizado con una **fisura radial** de dimensiones **1x5x5 mm³** (ancho x largo x profundidad), ubicada a **5 mm** de la sección crítica número III. Los datos obtenidos se muestran en las siguientes imágenes.

Log Damage (Logaritmo del daño):

La proporción entre ciclos de fatiga acumulados y el número total de ciclos a fallo. Un valor mayor que la unidad indica fallo. Al igual que el logaritmo de la vida, se expresa en órdenes logarítmicos. La relación entre *Log Life* y *Log Damage* puede ser expresada como ($Log Life = - Log Damage$).

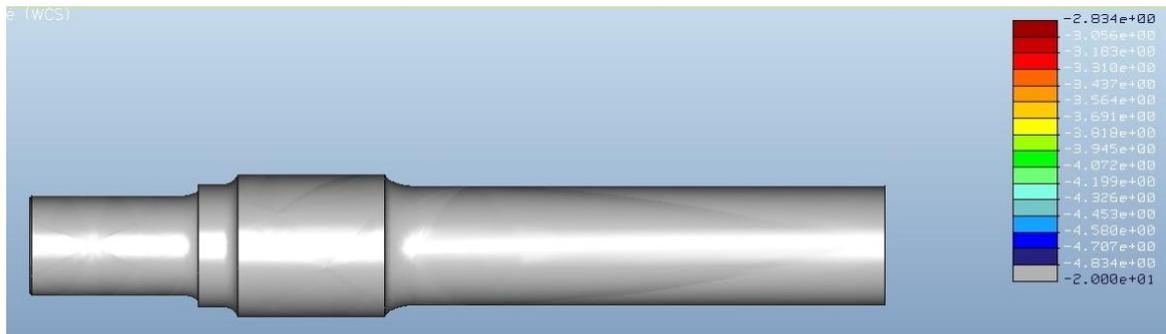


Ilustración 10. 101 Log damage eje con fisura radial n°1

Log Life (Logaritmo de la vida):

El número estimado de ciclos hasta que el modelo parte. La relación entre *Log Life* y *Log Damage* puede ser expresada como ($Log Life = - Log Damage$).

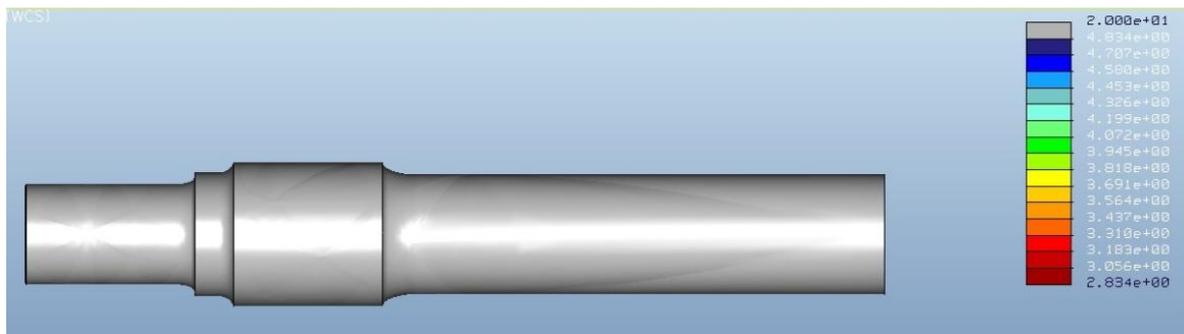


Ilustración 10. 102 Log life eje con fisura radial n°1

Como se puede observar el número de ciclos es superior a 10^7 en todo el eje. En la zona de las **fisuras radiales** realizadas, la vida deseada también es superior a 10^7 ciclos, por lo que los ejes con las fisuras mencionadas cumplen la norma EN 1326.



Confidence of life (confianza en la vida):

Confidence of life representa la proporción entre la vida calculada y la vida de diseño objetivo.

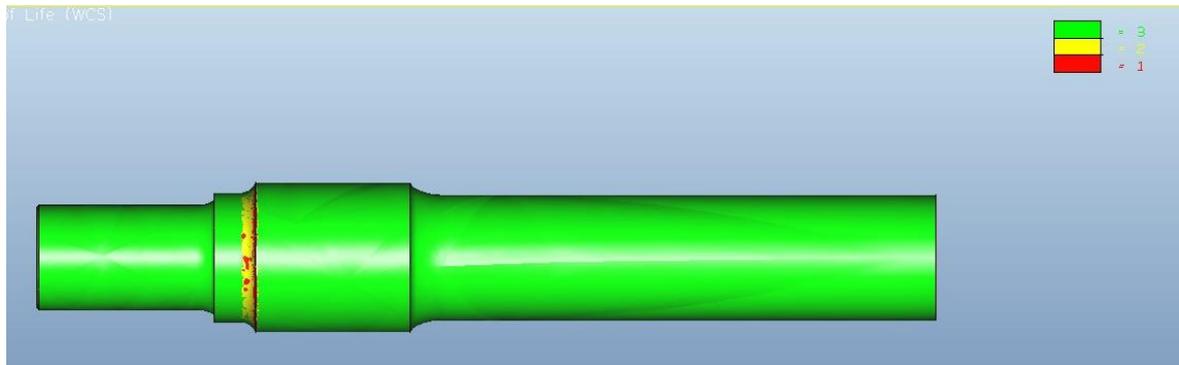


Ilustración 10. 103 *Confidence of life* eje fisura radial n°1

Factor of safety (factor de seguridad):

Representa el factor de seguridad permisible sobre la carga de entrada. Cuando la vida a fatiga calculada para el modelo es mayor que la vida de diseño objetivo el software proporciona un cálculo para determinar un factor de seguridad permisible sobre la carga de entrada. Esto representa el grado según el cual la amplitud de la carga puede ser aumentada sin comprometer la vida de diseño objetivo.

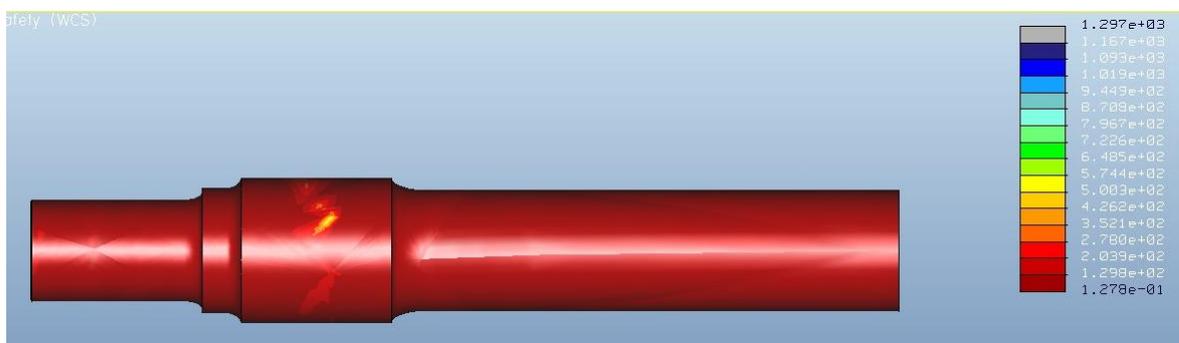


Ilustración 10. 104 *Factor of safety* eje fisura radial n°1



10.5.2. Eje con fisura radial y refinamiento de malla n° 2

Este análisis del eje a fatiga se ha realizado con una **fisura radial** de dimensiones **0,6x3x5 mm³** (ancho x largo x profundidad), ubicada a **11 mm** de la sección crítica número III. Los datos obtenidos se muestran en las siguientes imágenes.

Log Damage (Logaritmo del daño):

La proporción entre ciclos de fatiga acumulados y el número total de ciclos a fallo. Un valor mayor que la unidad indica fallo. Al igual que el logaritmo de la vida, se expresa en órdenes logarítmicos. La relación entre *Log Life* y *Log Damage* puede ser expresada como ($Log Life = - Log Damage$).

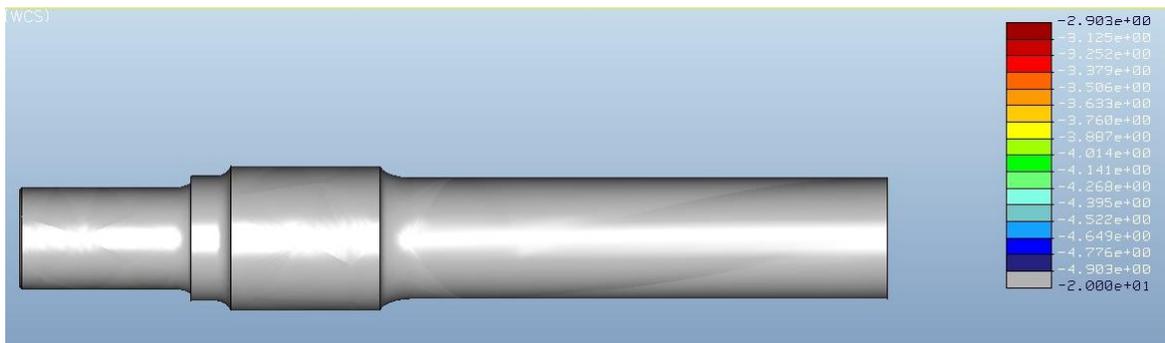


Ilustración 10. 105 Log damage eje con fisura radial n°2

Log Life (Logaritmo de la vida):

El número estimado de ciclos hasta que el modelo parte. La relación entre *Log Life* y *Log Damage* puede ser expresada como ($Log Life = - Log Damage$).

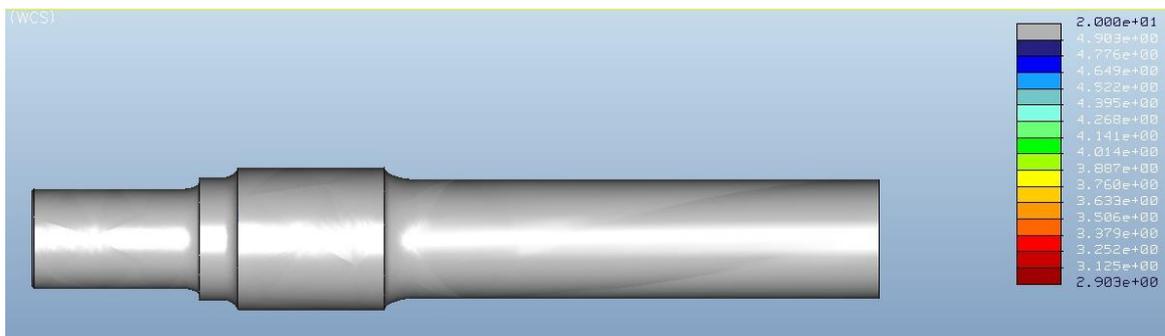


Ilustración 10. 106 Log life eje con fisura radial n°2

Como se puede observar el número de ciclos es superior a 10^7 en todo el eje. En la zona de las **fisuras radiales** realizadas, la vida deseada también es superior a 10^7 ciclos, por lo que los ejes con las fisuras mencionadas cumplen la norma EN 1326.



Confidence of life (confianza en la vida):

Confidence of life representa la proporción entre la vida calculada y la vida de diseño objetivo.

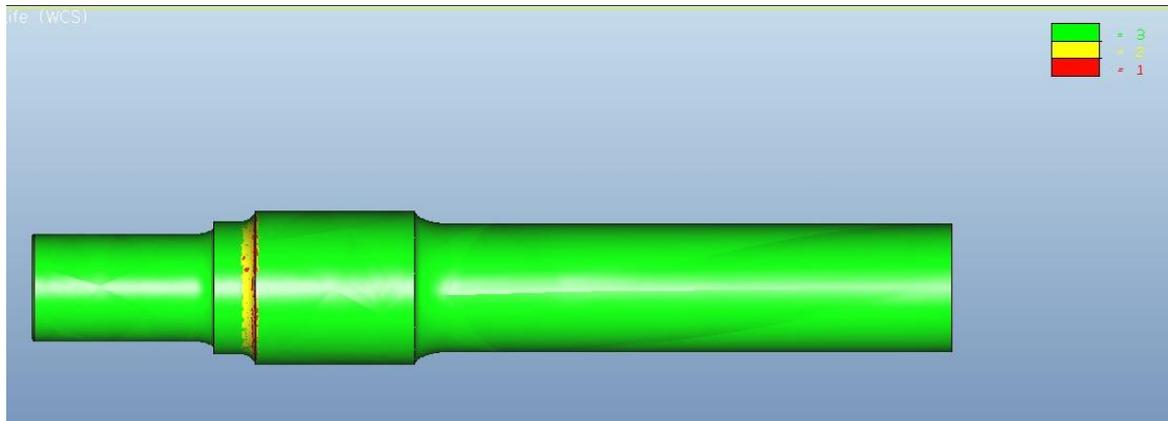


Ilustración 10. 107 *Confidence of life* eje fisura radial n°2

Factor of safety (factor de seguridad):

Representa el factor de seguridad permisible sobre la carga de entrada. Cuando la vida a fatiga calculada para el modelo es mayor que la vida de diseño objetivo el software proporciona un cálculo para determinar un factor de seguridad permisible sobre la carga de entrada. Esto representa el grado según el cual la amplitud de la carga puede ser aumentada sin comprometer la vida de diseño objetivo.



Ilustración 10. 108 *Factor of safety* eje fisura radial n°2



10.5.3. Eje con fisura radial y refinamiento de malla n° 3

Este análisis del eje a fatiga se ha realizado con una **fisura radial** de dimensiones **1x5x5 mm³** (ancho x largo x profundidad), ubicada a **15 mm** de la sección crítica número III. Los datos obtenidos se muestran en las siguientes imágenes.

Log Damage (Logaritmo del daño):

La proporción entre ciclos de fatiga acumulados y el número total de ciclos a fallo. Un valor mayor que la unidad indica fallo. Al igual que el logaritmo de la vida, se expresa en órdenes logarítmicos. La relación entre *Log Life* y *Log Damage* puede ser expresada como ($Log Life = - Log Damage$).

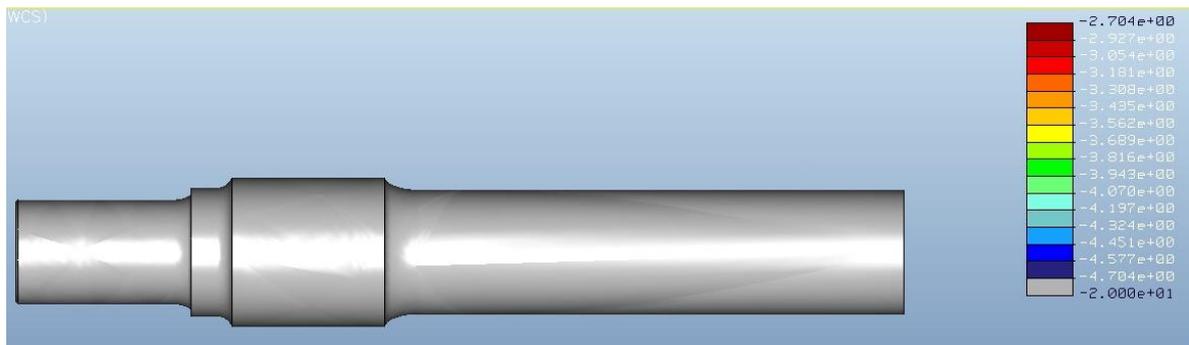


Ilustración 10. 109 Log damage eje con fisura radial n°3

Log Life (Logaritmo de la vida):

El número estimado de ciclos hasta que el modelo parte. La relación entre *Log Life* y *Log Damage* puede ser expresada como ($Log Life = - Log Damage$).

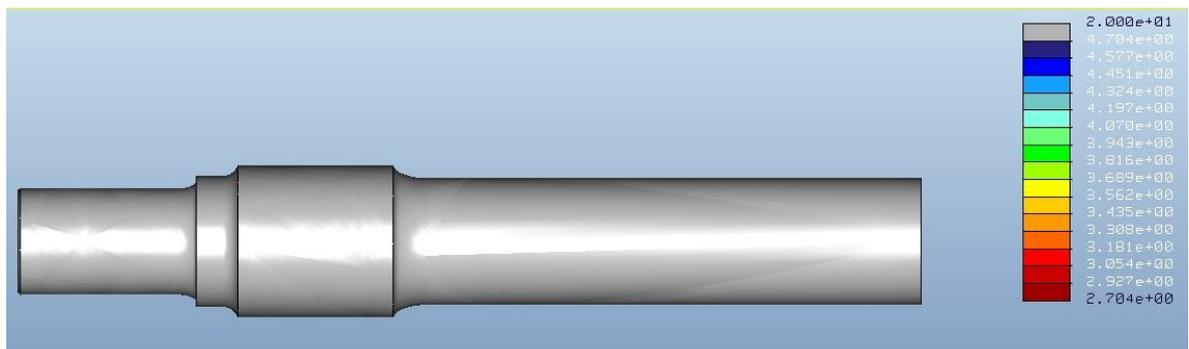


Ilustración 10. 110 Log life eje con fisura radial n°3

Como se puede observar el número de ciclos es superior a 10^7 en todo el eje. En la zona de las **fisuras radiales** realizadas, la vida deseada también es superior a 10^7 ciclos, por lo que los ejes con las fisuras mencionadas cumplen la norma EN 1326.



Confidence of life (confianza en la vida):

Confidence of life representa la proporción entre la vida calculada y la vida de diseño objetivo.

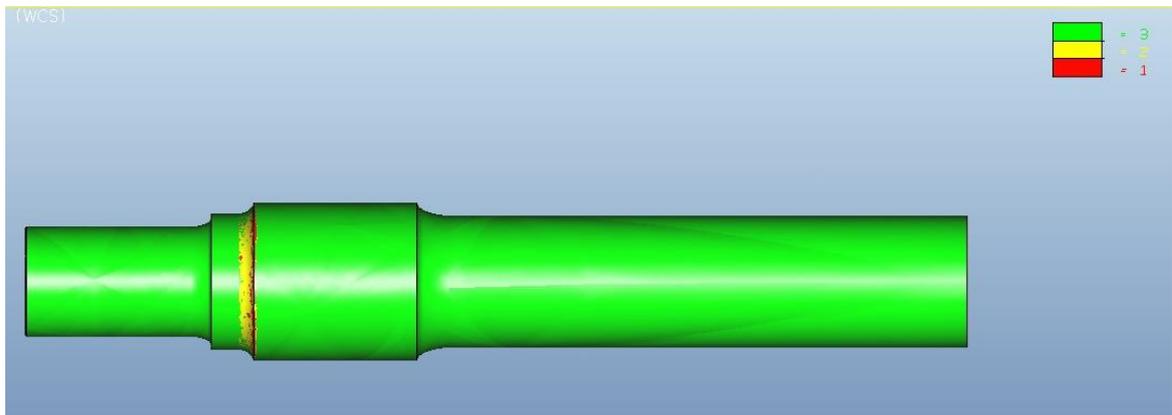


Ilustración 10. 111 *Confidence of life* eje fisura radial nº3

Factor of safety (factor de seguridad):

Representa el factor de seguridad permisible sobre la carga de entrada. Cuando la vida a fatiga calculada para el modelo es mayor que la vida de diseño objetivo el software proporciona un cálculo para determinar un factor de seguridad permisible sobre la carga de entrada. Esto representa el grado según el cual la amplitud de la carga puede ser aumentada sin comprometer la vida de diseño objetivo.



Ilustración 10. 112 *Factor of safety* eje fisura radial nº3



10.5.4. Eje con fisura radial y refinamiento de malla n° 4

Este análisis del eje a fatiga se ha realizado con una **fisura radial** de dimensiones **1x10x5 mm³** (ancho x largo x profundidad), ubicada a **17,5 mm** de la sección crítica número III. Los datos obtenidos se muestran en las siguientes imágenes.

Log Damage (Logaritmo del daño):

La proporción entre ciclos de fatiga acumulados y el número total de ciclos a fallo. Un valor mayor que la unidad indica fallo. Al igual que el logaritmo de la vida, se expresa en órdenes logarítmicos. La relación entre *Log Life* y *Log Damage* puede ser expresada como ($\text{Log Life} = - \text{Log Damage}$).

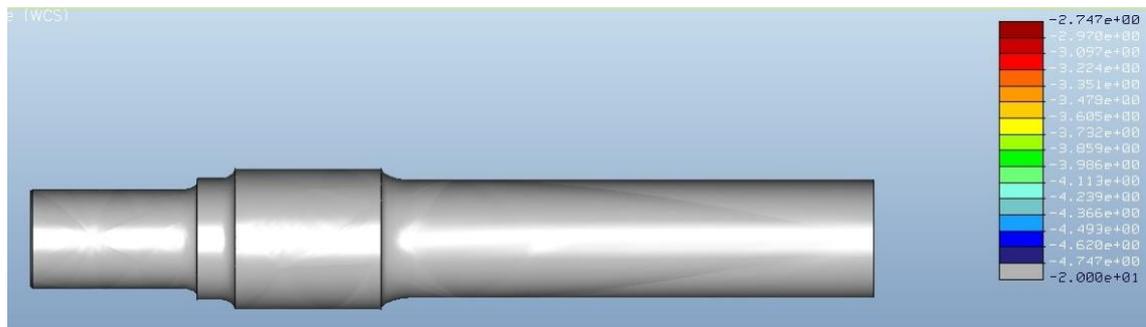


Ilustración 10. 113 Log damage eje con fisura radial n°4

Log Life (Logaritmo de la vida):

El número estimado de ciclos hasta que el modelo parte. La relación entre *Log Life* y *Log Damage* puede ser expresada como ($\text{Log Life} = - \text{Log Damage}$).

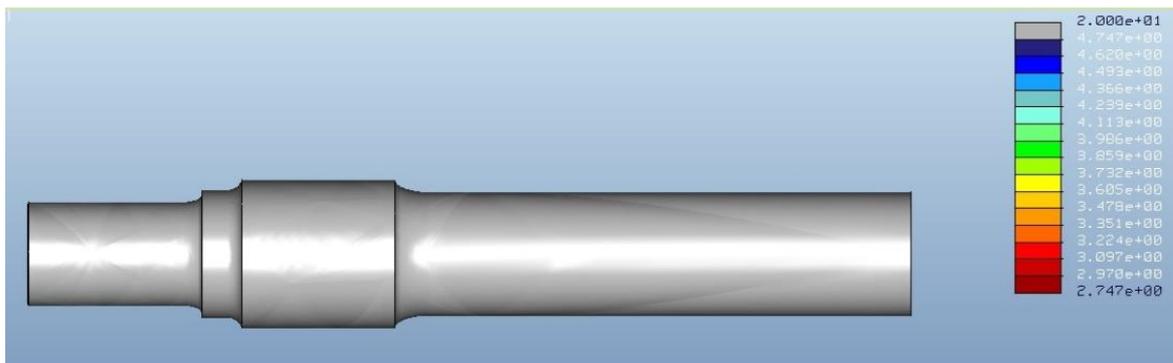


Ilustración 10. 114 Log life eje con fisura radial n°4

Como se puede observar el número de ciclos es superior a 10^7 en todo el eje. En la zona de las **fisuras radiales** realizadas, la vida deseada también es superior a 10^7 ciclos, por lo que los ejes con las fisuras mencionadas cumplen la norma EN 1326.



Confidence of life (confianza en la vida):

Confidence of life representa la proporción entre la vida calculada y la vida de diseño objetivo.

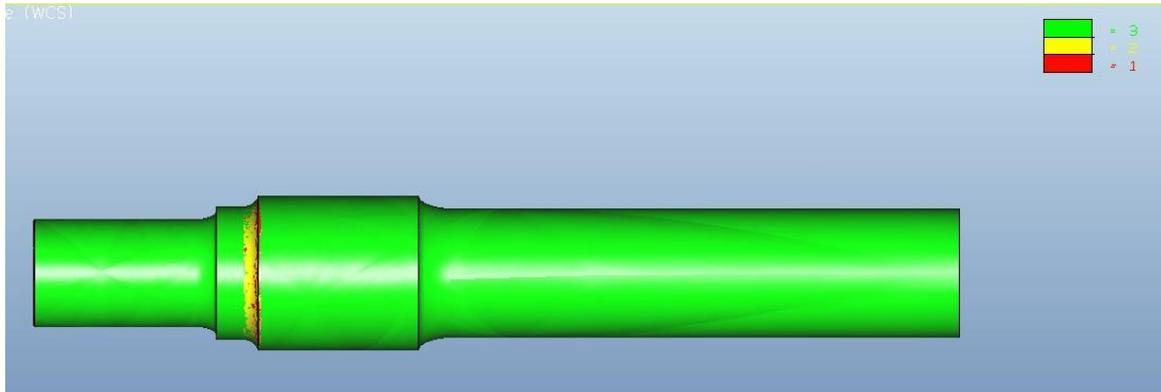


Ilustración 10. 115 *Confidence of life* eje fisura radial nº4

Factor of safety (factor de seguridad):

Representa el factor de seguridad permisible sobre la carga de entrada. Cuando la vida a fatiga calculada para el modelo es mayor que la vida de diseño objetivo el software proporciona un cálculo para determinar un factor de seguridad permisible sobre la carga de entrada. Esto representa el grado según el cual la amplitud de la carga puede ser aumentada sin comprometer la vida de diseño objetivo.



Ilustración 10. 116 *Factor of safety* eje fisura radial nº4



10.5.5. Eje con fisura radial y refinamiento de malla n° 5

Este análisis del eje a fatiga se ha realizado con una **fisura radial** de dimensiones **0,8x4x5 mm³** (ancho x largo x profundidad), ubicada a **24,5 mm** de la sección crítica número III. Los datos obtenidos se muestran en las siguientes imágenes.

Log Damage (Logaritmo del daño):

La proporción entre ciclos de fatiga acumulados y el número total de ciclos a fallo. Un valor mayor que la unidad indica fallo. Al igual que el logaritmo de la vida, se expresa en órdenes logarítmicos. La relación entre *Log Life* y *Log Damage* puede ser expresada como ($Log Life = - Log Damage$).

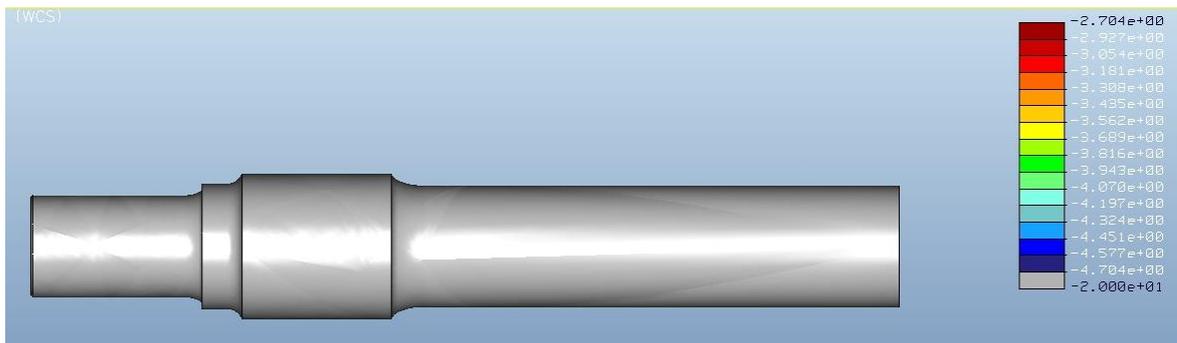


Ilustración 10. 117 Log damage eje con fisura radial n°5

Log Life (Logaritmo de la vida):

El número estimado de ciclos hasta que el modelo parte. La relación entre *Log Life* y *Log Damage* puede ser expresada como ($Log Life = - Log Damage$).

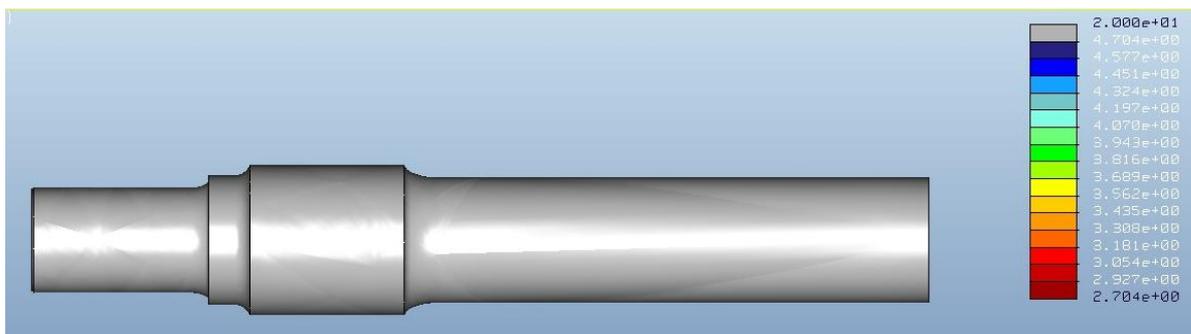


Ilustración 10. 118 Log life eje con fisura radial n°5

Como se puede observar el número de ciclos es superior a 10^7 en todo el eje. En la zona de las **fisuras radiales** realizadas, la vida deseada también es superior a 10^7 ciclos, por lo que los ejes con las fisuras mencionadas cumplen la norma EN 1326.



Confidence of life (confianza en la vida):

Confidence of life representa la proporción entre la vida calculada y la vida de diseño objetivo.

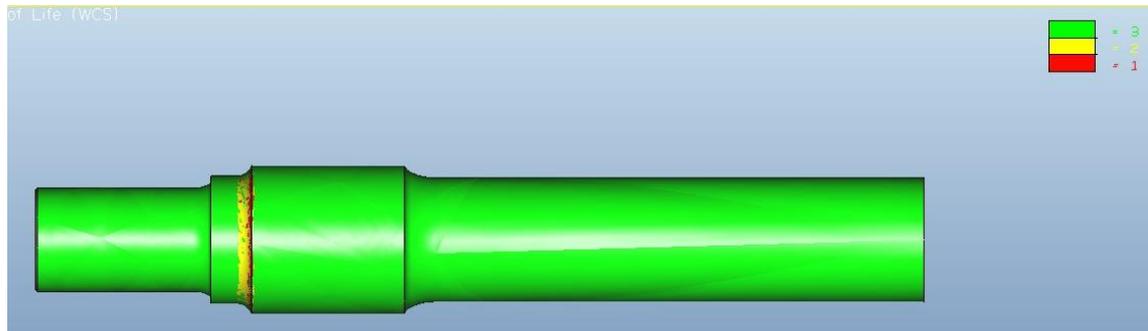


Ilustración 10. 119 *Confidence of life* eje fisura radial n°5

Factor of safety (factor de seguridad):

Representa el factor de seguridad permisible sobre la carga de entrada. Cuando la vida a fatiga calculada para el modelo es mayor que la vida de diseño objetivo el software proporciona un cálculo para determinar un factor de seguridad permisible sobre la carga de entrada. Esto representa el grado según el cual la amplitud de la carga puede ser aumentada sin comprometer la vida de diseño objetivo.

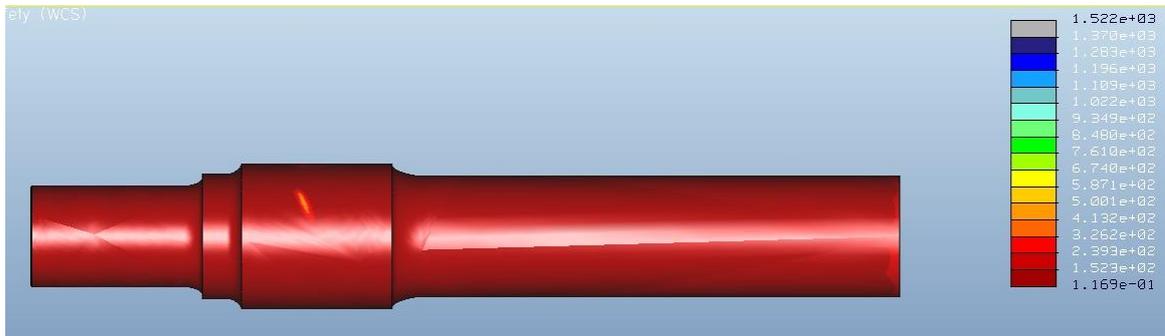


Ilustración 10. 120 *Factor of safety* eje fisura radial n°5



10.5.6. Eje con fisura radial y refinamiento de malla nº 6

Este análisis del eje a fatiga se ha realizado con una **fisura radial** de dimensiones **1,2x6x5 mm³** (ancho x largo x profundidad), ubicada a **30 mm** de la sección crítica número III. Los datos obtenidos se muestran en las siguientes imágenes.

Log Damage (Logaritmo del daño):

La proporción entre ciclos de fatiga acumulados y el número total de ciclos a fallo. Un valor mayor que la unidad indica fallo. Al igual que el logaritmo de la vida, se expresa en órdenes logarítmicos. La relación entre *Log Life* y *Log Damage* puede ser expresada como ($Log Life = - Log Damage$).

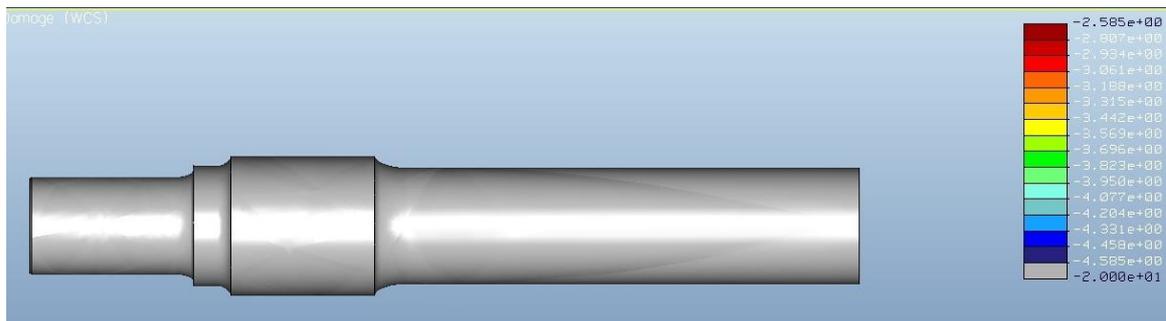


Ilustración 10. 121 Log damage eje con fisura radial nº6

Log Life (Logaritmo de la vida):

El número estimado de ciclos hasta que el modelo parte. La relación entre *Log Life* y *Log Damage* puede ser expresada como ($Log Life = - Log Damage$).

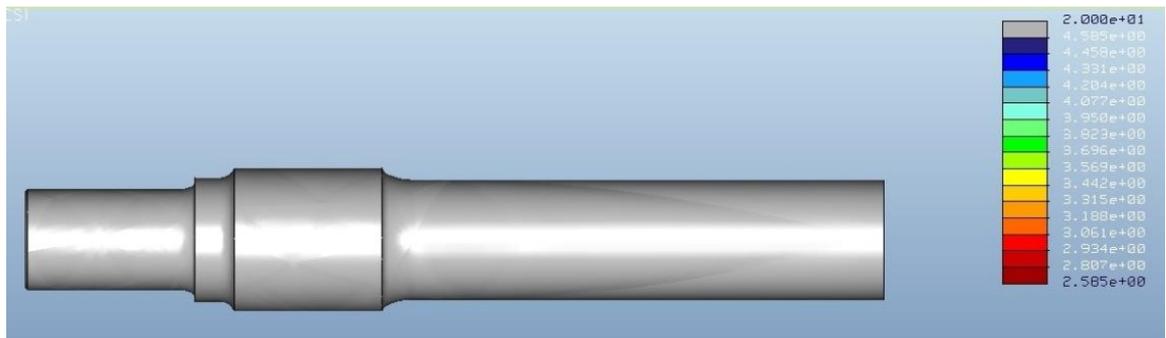


Ilustración 10. 122 Log life eje con fisura radial nº6

Como se puede observar el número de ciclos es superior a 10^7 en todo el eje. En la zona de las **fisuras radiales** realizadas, la vida deseada también es superior a 10^7 ciclos, por lo que los ejes con las fisuras mencionadas cumplen la norma EN 1326.



Confidence of life (confianza en la vida):

Confidence of life representa la proporción entre la vida calculada y la vida de diseño objetivo.

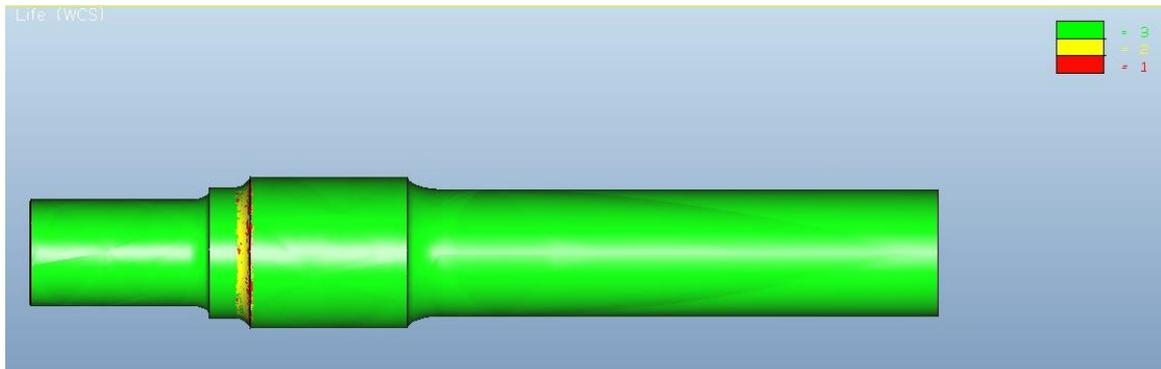


Ilustración 10. 123 *Confidence of life* eje fisura radial n°6

Factor of safety (factor de seguridad):

Representa el factor de seguridad permisible sobre la carga de entrada. Cuando la vida a fatiga calculada para el modelo es mayor que la vida de diseño objetivo el software proporciona un cálculo para determinar un factor de seguridad permisible sobre la carga de entrada. Esto representa el grado según el cual la amplitud de la carga puede ser aumentada sin comprometer la vida de diseño objetivo.



Ilustración 10. 124 *Factor of safety* eje fisura radial n°6



10.5.7. Eje con fisura radial y refinamiento de malla n° 7

Este análisis del eje a fatiga se ha realizado con una **fisura radial** de dimensiones **0,6x3x5 mm³** (ancho x largo x profundidad), ubicada a **36 mm** de la sección crítica número III. Los datos obtenidos se muestran en las siguientes imágenes.

Log Damage (Logaritmo del daño):

La proporción entre ciclos de fatiga acumulados y el número total de ciclos a fallo. Un valor mayor que la unidad indica fallo. Al igual que el logaritmo de la vida, se expresa en órdenes logarítmicos. La relación entre *Log Life* y *Log Damage* puede ser expresada como ($Log Life = - Log Damage$).

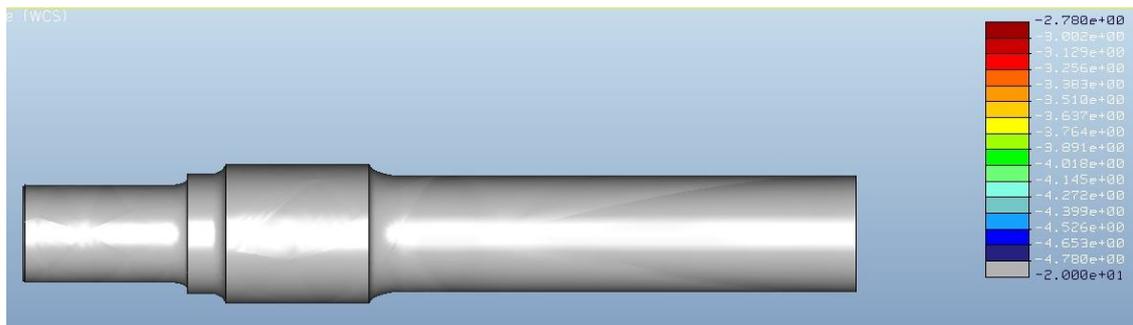


Ilustración 10. 125 Log damage eje con fisura radial n°7

Log Life (Logaritmo de la vida):

El número estimado de ciclos hasta que el modelo parte. La relación entre *Log Life* y *Log Damage* puede ser expresada como ($Log Life = - Log Damage$).

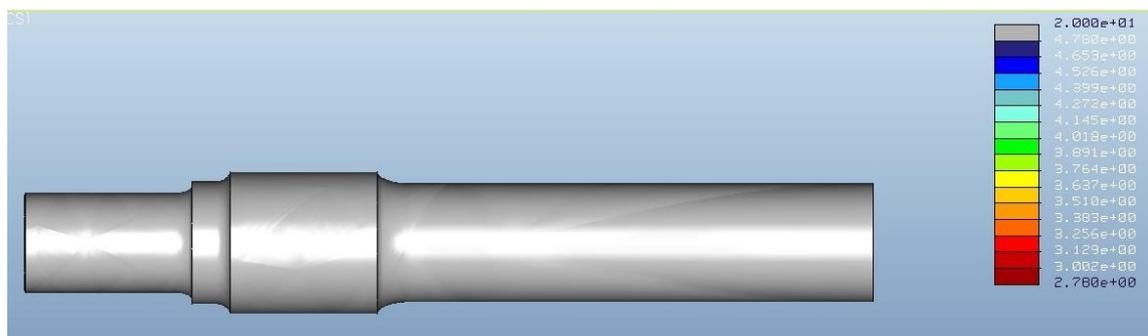


Ilustración 10. 126 Log life eje con fisura radial n°7

Como se puede observar el número de ciclos es superior a 10^7 en todo el eje. En la zona de las **fisuras radiales** realizadas, la vida deseada también es superior a 10^7 ciclos, por lo que los ejes con las fisuras mencionadas cumplen la norma EN 1326.



Confidence of life (confianza en la vida):

Confidence of life representa la proporción entre la vida calculada y la vida de diseño objetivo.

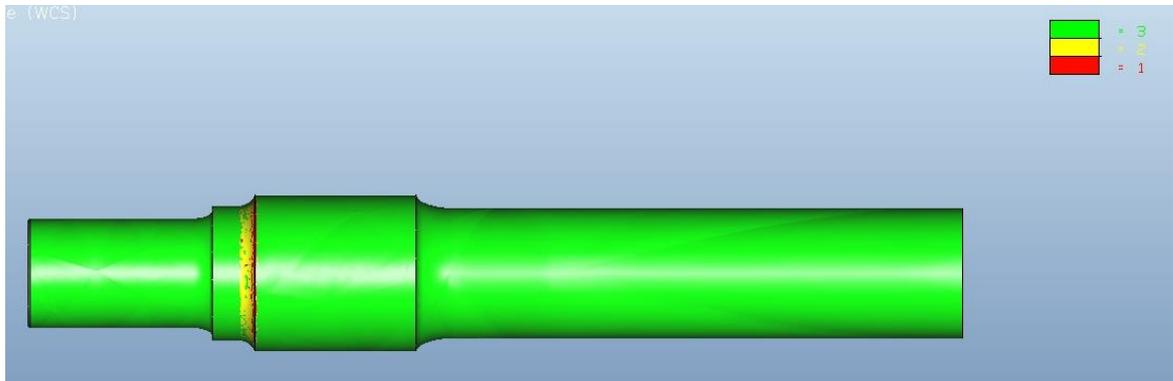


Ilustración 10. 127 Confidence of life eje fisura radial nº7

Factor of safety (factor de seguridad):

Representa el factor de seguridad permisible sobre la carga de entrada. Cuando la vida a fatiga calculada para el modelo es mayor que la vida de diseño objetivo el software proporciona un cálculo para determinar un factor de seguridad permisible sobre la carga de entrada. Esto representa el grado según el cual la amplitud de la carga puede ser aumentada sin comprometer la vida de diseño objetivo.



Ilustración 10. 128 Factor of safety eje fisura radial nº7



10.5.8. Eje con fisura radial y refinamiento de malla n° 8

Este análisis del eje a fatiga se ha realizado con una **fisura radial** de dimensiones **1x5x5 mm³** (ancho x largo x profundidad), ubicada a **40 mm** de la sección crítica número III. Los datos obtenidos se muestran en las siguientes imágenes.

Log Damage (Logaritmo del daño):

La proporción entre ciclos de fatiga acumulados y el número total de ciclos a fallo. Un valor mayor que la unidad indica fallo. Al igual que el logaritmo de la vida, se expresa en órdenes logarítmicos. La relación entre *Log Life* y *Log Damage* puede ser expresada como ($Log Life = - Log Damage$).

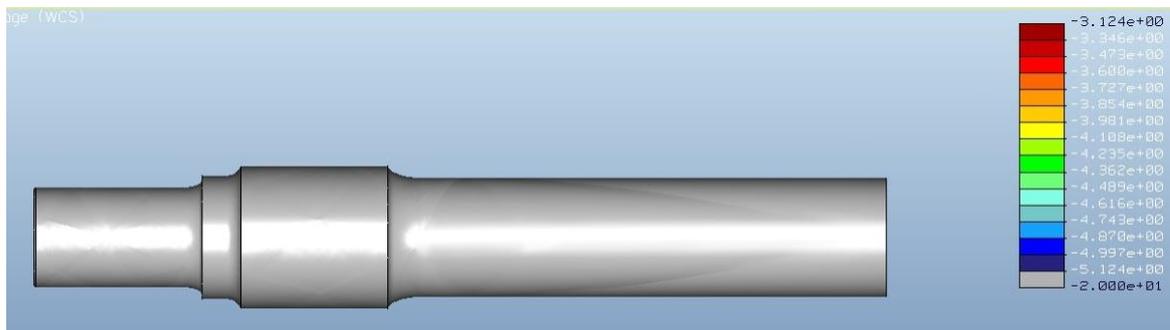


Ilustración 10. 129 Log damage eje con fisura radial n°8

Log Life (Logaritmo de la vida):

El número estimado de ciclos hasta que el modelo parte. La relación entre *Log Life* y *Log Damage* puede ser expresada como ($Log Life = - Log Damage$).

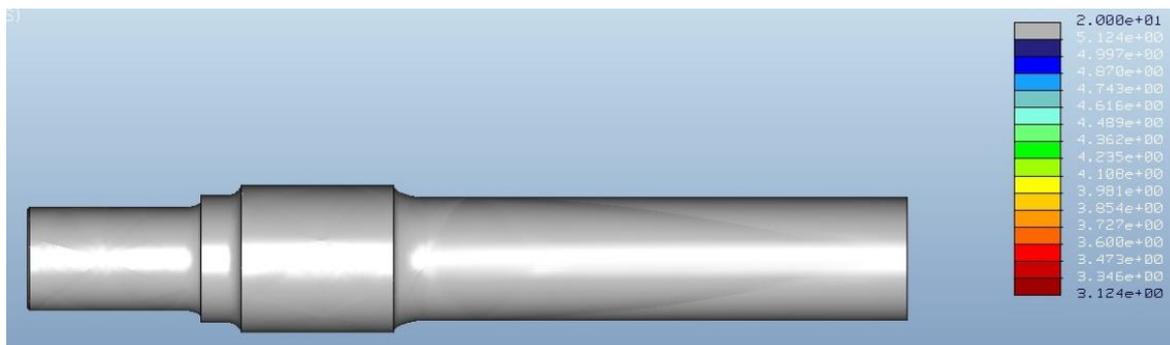


Ilustración 10. 130 Log life eje con fisura radial n°8

Como se puede observar el número de ciclos es superior a 10^7 en todo el eje. En la zona de las **fisuras radiales** realizadas, la vida deseada también es superior a 10^7 ciclos, por lo que los ejes con las fisuras mencionadas cumplen la norma EN 1326.



Confidence of life (confianza en la vida):

Confidence of life representa la proporción entre la vida calculada y la vida de diseño objetivo.

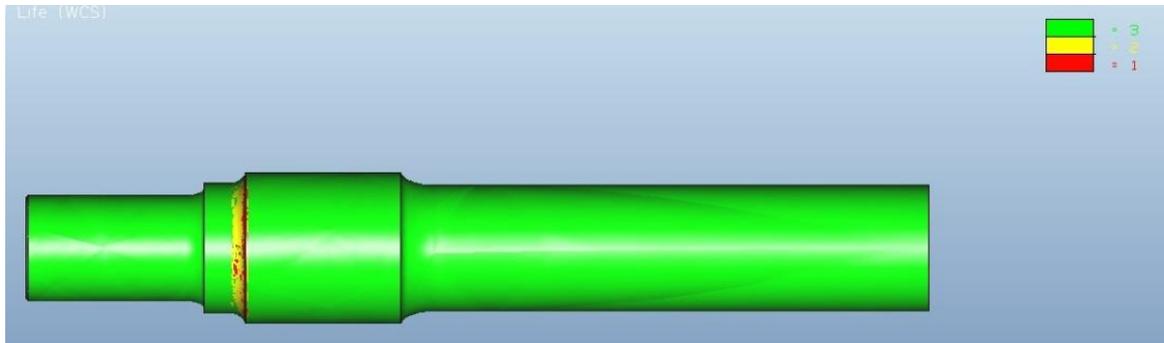


Ilustración 10. 131 *Confidence of life* eje fisura radial nº8

Factor of safety (factor de seguridad):

Representa el factor de seguridad permisible sobre la carga de entrada. Cuando la vida a fatiga calculada para el modelo es mayor que la vida de diseño objetivo el software proporciona un cálculo para determinar un factor de seguridad permisible sobre la carga de entrada. Esto representa el grado según el cual la amplitud de la carga puede ser aumentada sin comprometer la vida de diseño objetivo.



Ilustración 10. 132 *Factor of safety* eje fisura radial nº8



10.5.9. Eje con fisura radial y refinamiento de malla n° 9

Este análisis del eje a fatiga se ha realizado con una **fisura radial** de dimensiones **1x5x5 mm³** (ancho x largo x profundidad), ubicada a **50 mm** de la sección crítica número III. Los datos obtenidos se muestran en las siguientes imágenes.

Log Damage (Logaritmo del daño):

La proporción entre ciclos de fatiga acumulados y el número total de ciclos a fallo. Un valor mayor que la unidad indica fallo. Al igual que el logaritmo de la vida, se expresa en órdenes logarítmicos. La relación entre *Log Life* y *Log Damage* puede ser expresada como ($Log Life = - Log Damage$).

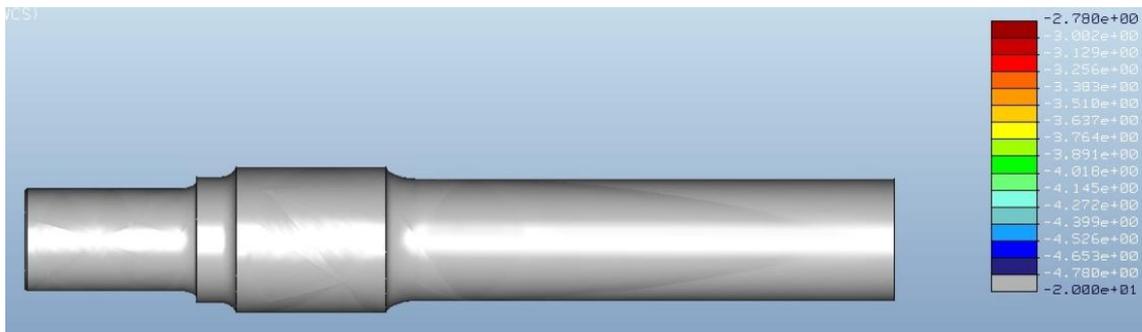


Ilustración 10. 133 Log damage eje con fisura radial n°9

Log Life (Logaritmo de la vida):

El número estimado de ciclos hasta que el modelo parte. La relación entre *Log Life* y *Log Damage* puede ser expresada como ($Log Life = - Log Damage$).

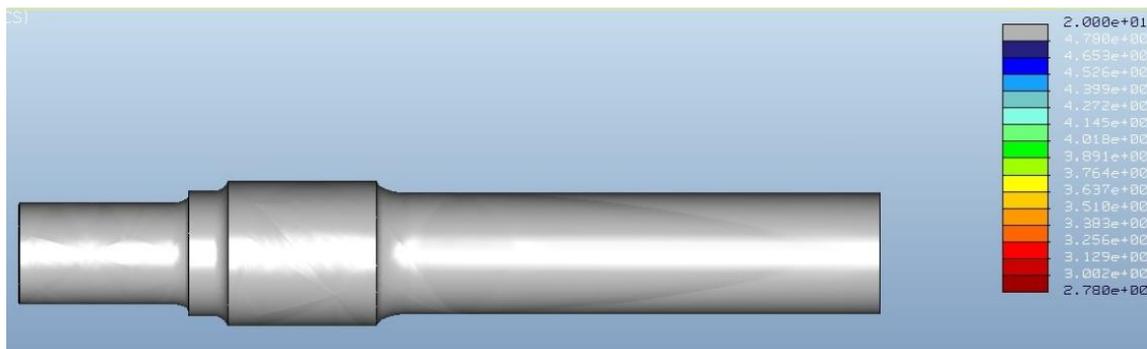


Ilustración 10. 134 Log life eje con fisura radial n°9

Como se puede observar el número de ciclos es superior a 10^7 en todo el eje. En la zona de las **fisuras radiales** realizadas, la vida deseada también es superior a 10^7 ciclos, por lo que los ejes con las fisuras mencionadas cumplen la norma EN 1326.



Confidence of life (confianza en la vida):

Confidence of life representa la proporción entre la vida calculada y la vida de diseño objetivo.

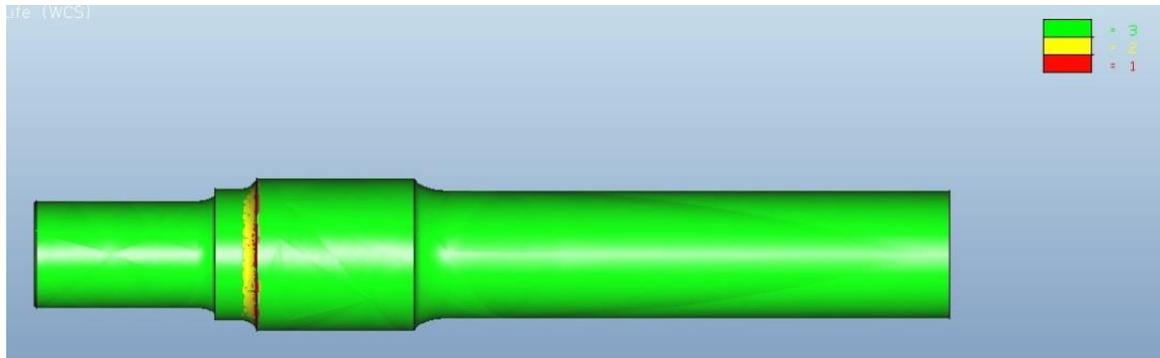


Ilustración 10. 135 Confidence of life eje fisura radial n°9

Factor of safety (factor de seguridad):

Representa el factor de seguridad permisible sobre la carga de entrada. Cuando la vida a fatiga calculada para el modelo es mayor que la vida de diseño objetivo el software proporciona un cálculo para determinar un factor de seguridad permisible sobre la carga de entrada. Esto representa el grado según el cual la amplitud de la carga puede ser aumentada sin comprometer la vida de diseño objetivo.



Ilustración 10. 136 Factor of safety eje fisura radial n°9



10.5.10. Eje con fisura radial y refinamiento de malla n° 10

Este análisis del eje a fatiga se ha realizado con una **fisura radial** de dimensiones **1,4x7x5 mm³** (ancho x largo x profundidad), ubicada a **60 mm** de la sección crítica número III. Los datos obtenidos se muestran en las siguientes imágenes.

Log Damage (Logaritmo del daño):

La proporción entre ciclos de fatiga acumulados y el número total de ciclos a fallo. Un valor mayor que la unidad indica fallo. Al igual que el logaritmo de la vida, se expresa en órdenes logarítmicos. La relación entre *Log Life* y *Log Damage* puede ser expresada como ($Log Life = - Log Damage$).

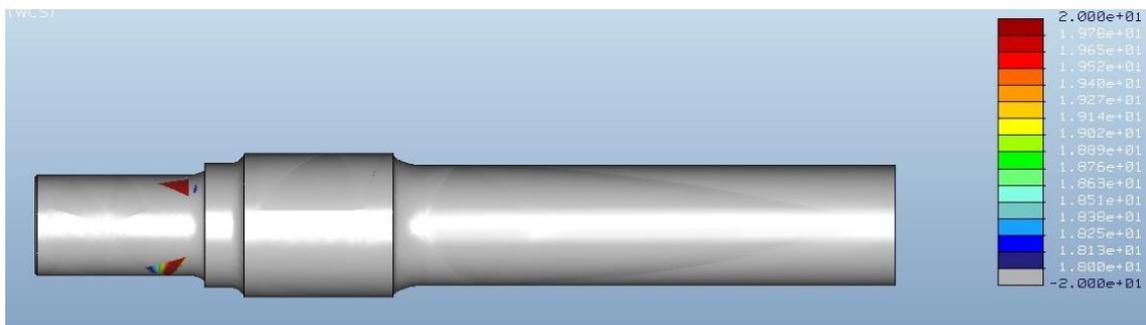


Ilustración 10. 137 Log damage eje con fisura radial n°10

Log Life (Logaritmo de la vida):

El número estimado de ciclos hasta que el modelo parte. La relación entre *Log Life* y *Log Damage* puede ser expresada como ($Log Life = - Log Damage$).

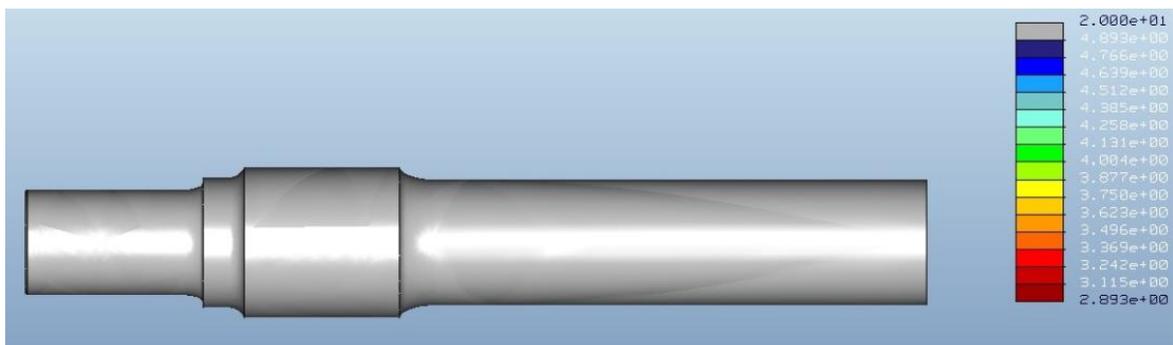


Ilustración 10. 138 Log life eje con fisura radial n°10

Como se puede observar el número de ciclos es superior a 10^7 en todo el eje. En la zona de las **fisuras radiales** realizadas, la vida deseada también es superior a 10^7 ciclos, por lo que los ejes con las fisuras mencionadas cumplen la norma EN 1326.



Confidence of life (confianza en la vida):

Confidence of life representa la proporción entre la vida calculada y la vida de diseño objetivo.

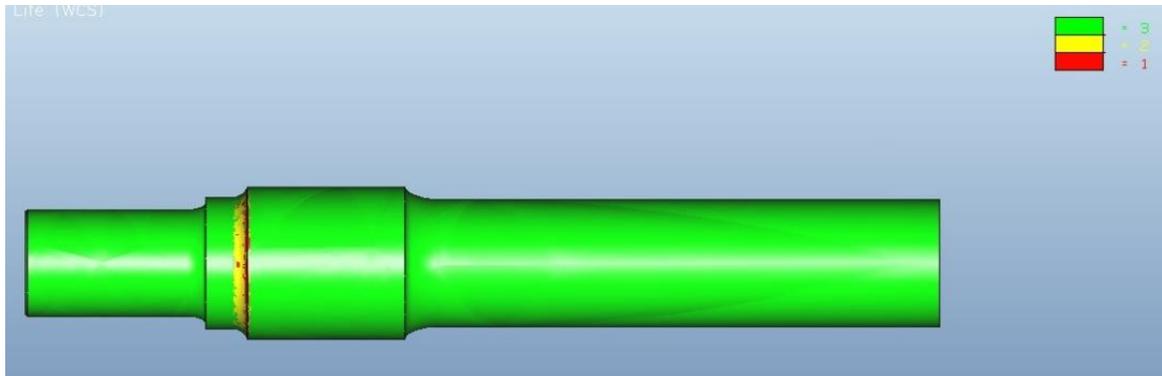


Ilustración 10. 139 *Confidence of life* eje fisura radial n°10

Factor of safety (factor de seguridad):

Representa el factor de seguridad permisible sobre la carga de entrada. Cuando la vida a fatiga calculada para el modelo es mayor que la vida de diseño objetivo el software proporciona un cálculo para determinar un factor de seguridad permisible sobre la carga de entrada. Esto representa el grado según el cual la amplitud de la carga puede ser aumentada sin comprometer la vida de diseño objetivo.



Ilustración 10. 140 *Factor of safety* eje fisura radial n°10



10.5.11. Eje con fisura radial y refinamiento de malla n° 11

Este análisis del eje a fatiga se ha realizado con una **fisura radial** de dimensiones **0,6x3x5 mm³** (ancho x largo x profundidad), ubicada a **65 mm** de la sección crítica número III. Los datos obtenidos se muestran en las siguientes imágenes.

Log Damage (Logaritmo del daño):

La proporción entre ciclos de fatiga acumulados y el número total de ciclos a fallo. Un valor mayor que la unidad indica fallo. Al igual que el logaritmo de la vida, se expresa en órdenes logarítmicos. La relación entre *Log Life* y *Log Damage* puede ser expresada como ($Log Life = - Log Damage$).



Ilustración 10. 141 Log damage eje con fisura radial n°11

Log Life (Logaritmo de la vida):

El número estimado de ciclos hasta que el modelo parte. La relación entre *Log Life* y *Log Damage* puede ser expresada como ($Log Life = - Log Damage$).

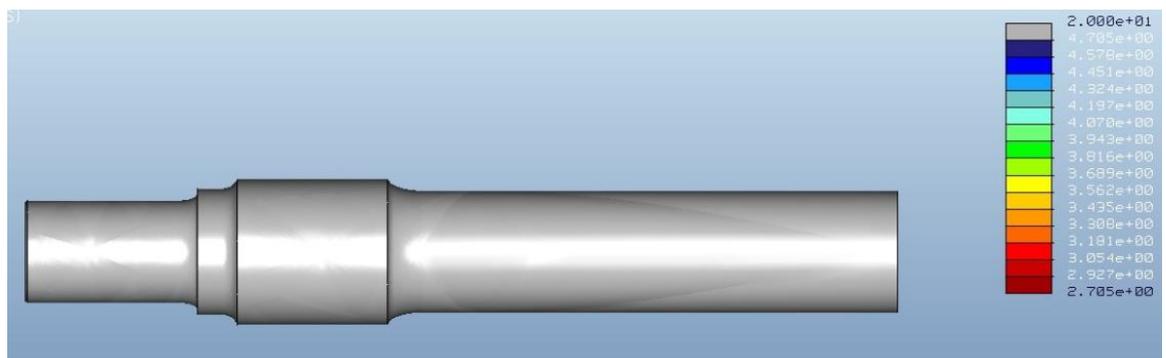


Ilustración 10. 142 Log life eje con fisura radial n°11

Como se puede observar el número de ciclos es superior a 10^7 en todo el eje. En la zona de las **fisuras radiales** realizadas, la vida deseada también es superior a 10^7 ciclos, por lo que los ejes con las fisuras mencionadas cumplen la norma EN 1326.



Confidence of life (confianza en la vida):

Confidence of life representa la proporción entre la vida calculada y la vida de diseño objetivo.

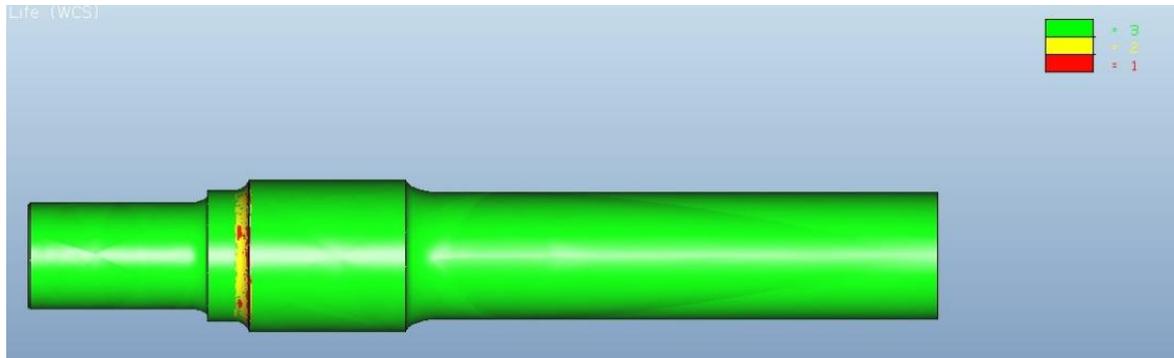


Ilustración 10. 143 *Confidence of life* eje fisura radial n°11

Factor of safety (factor de seguridad):

Representa el factor de seguridad permisible sobre la carga de entrada. Cuando la vida a fatiga calculada para el modelo es mayor que la vida de diseño objetivo el software proporciona un cálculo para determinar un factor de seguridad permisible sobre la carga de entrada. Esto representa el grado según el cual la amplitud de la carga puede ser aumentada sin comprometer la vida de diseño objetivo.

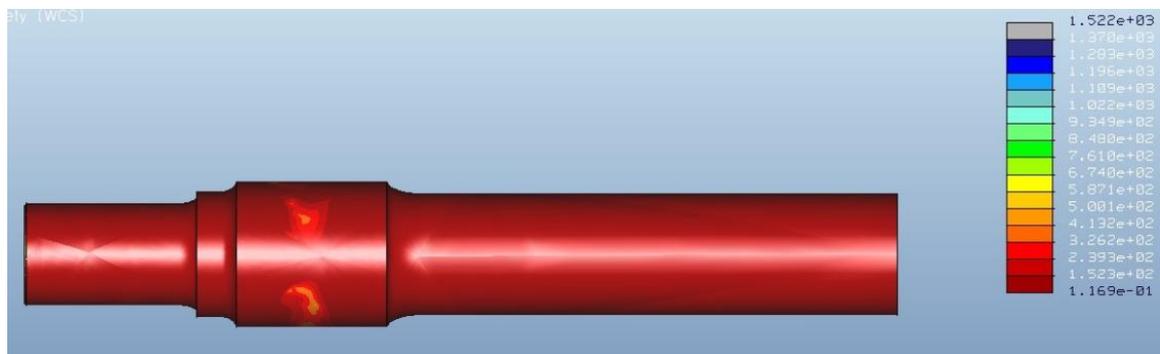


Ilustración 10. 144 *Factor of safety* eje fisura radial n°11



10.6- ANÁLISIS DE RESULTADOS

10.6.1. Fisura cúbica vs. fisura radial. Análisis estático

En la siguiente tabla se representan los datos de la **tensión** y **desplazamiento** máximo a lo largo del eje con **fisura cúbica**. También se representa la tensión máxima sufrida en la misma fisura cúbica del eje.

FISURA CÚBICA			
Análisis	Tensión máx. (MPa)	Desplazamiento máx. (mm)	Tensión máx. fisura (MPa)
1	864,2	0,2960	51,75
2	741,3	0,2961	34,14
3	743,7	0,2959	19,73
4	648,6	0,2967	16,05
5	778,1	0,2966	17,37
6	731,6	0,2961	14,50
7	824,6	0,2962	10,74
8	670,9	0,2979	8,00
9	684,4	0,2973	6,31
10	659,5	0,2963	3,31
11	658,3	0,2962	3,30

Tabla 10. 5 Resultados del eje con fisura cúbica. Análisis estático

En la siguiente tabla se muestran los datos de la **tensión** y **desplazamiento** máximo, a lo largo del eje con **fisura radial**. Se representa también la tensión máxima sufrida en la misma fisura del eje.

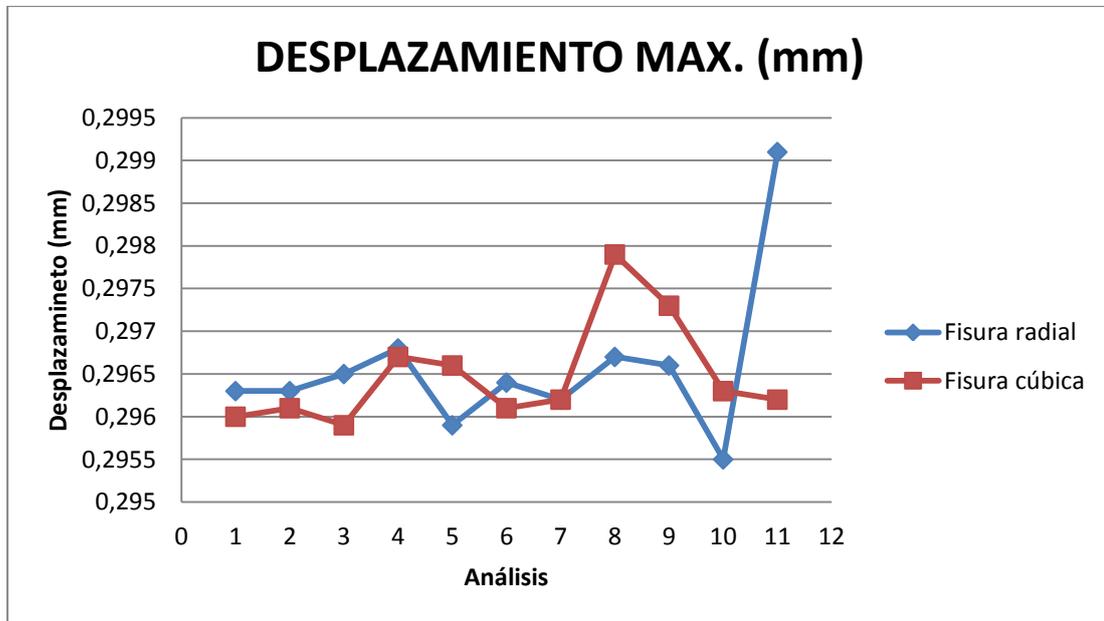
FISURA RADIAL			
Análisis	Tensión máx. (MPa)	Desplazamiento máx. (mm)	Tensión máx. fisura (MPa)
1	897,0	0,2963	29,60
2	720,6	0,2963	21,90
3	758,0	0,2965	17,90
4	661,2	0,2968	15,80
5	701,0	0,2959	14,30
6	759,0	0,2964	10,26
7	798,0	0,2962	8,57
8	706,0	0,2967	7,37
9	673,0	0,2966	7,10
10	687,0	0,2955	3,59
11	685,0	0,2991	2,79

Tabla 10. 6 Resultados del eje con fisura radial. Análisis estático

Como se aprecia en los análisis mostrados, la tensión máxima se produce en la sección crítica II del eje ferroviario, mientras que el desplazamiento máximo se origina en el extremo del semieje.

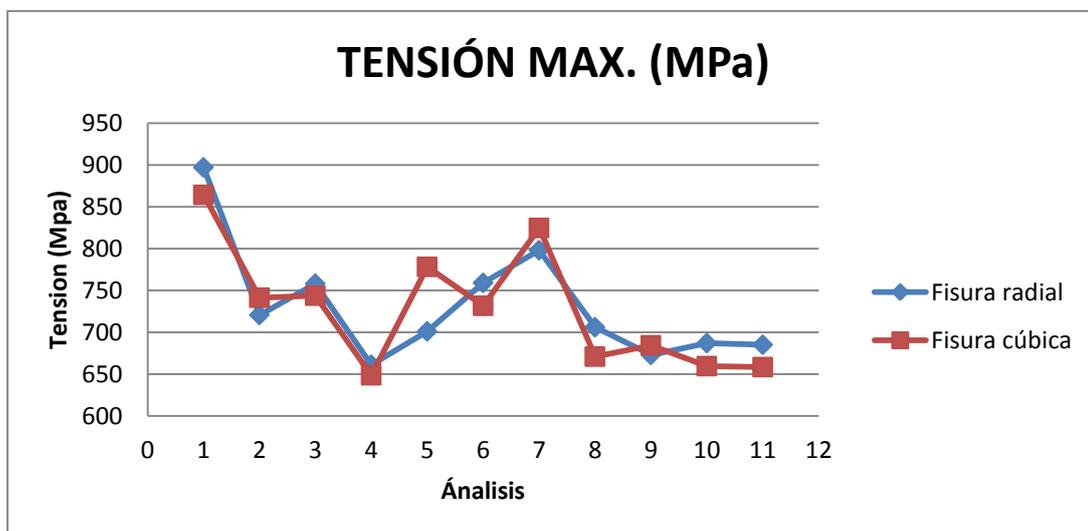


En la gráfica siguiente se representan los valores del desplazamiento máximo (mm) en el eje obtenidos en los **análisis estáticos**. Los valores en **azul** corresponden a los resultados del eje con **fisura radial**, mientras que los valores representados en color **rojo** pertenecen a los obtenidos en el eje con **fisura cúbica**. Los desplazamientos máximos se producen en el extremo del semieje.



Gráfica 10. 1 Desplazamiento máximo del eje con fisura

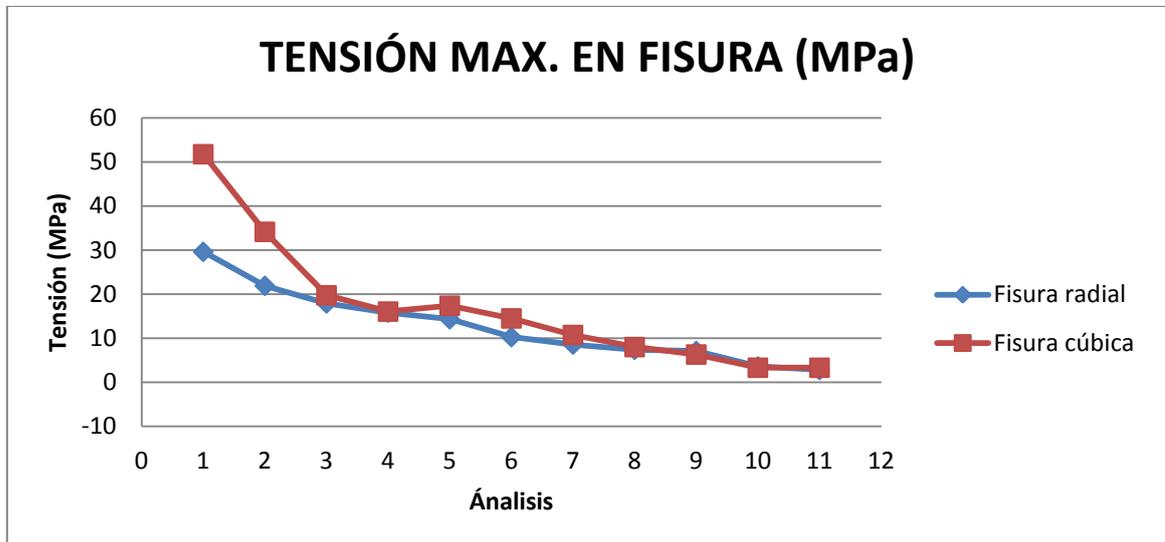
En la gráfica mostrada a continuación se representan los valores de tensión máxima (MPa) en el eje obtenidos en los **análisis estáticos**. Los valores en **azul** corresponden a los resultados del eje con **fisura radial**, mientras que los valores representados en color **rojo** pertenecen a los obtenidos en el eje con **fisura cúbica**. La tensión máxima se produce en la sección crítica II del eje ferroviario.



Gráfica 10. 2 Tensión máxima del eje con fisura



En la siguiente gráfica se representan los valores de **tensión máxima** (MPa) en la fisura realizada sobre el eje, en la zona de contacto eje-rueda. Dichos valores han sido obtenidos mediante **análisis estáticos**. Los valores en **azul** corresponden a los resultados del eje con **fisura radial**, mientras que los valores representados en color **rojo** pertenecen a los obtenidos en el eje con **fisura cúbica**.



Gráfica 10. 3 Tensión máxima en las fisuras



10.6.2. Fisura cúbica vs. fisura radial. Análisis de fatiga

En la siguiente tabla se representa el número de ciclos que soporta el eje con **fisura cúbica** antes de romperse. También se representan los ciclos que soporta la propia fisura del eje. Estos resultados se han obtenido realizando los correspondientes **análisis a fatiga**.

FISURA CÚBICA			
Análisis	nº de ciclos en eje	nº máx. ciclos en grieta	nº mín. ciclos en grieta
1	10^{20}	10^{20}	$10^{9,31}$
2	10^{20}	10^{20}	$10^{11,60}$
3	10^{20}	10^{20}	$10^{13,90}$
4	10^{20}	10^{20}	$10^{14,70}$
5	10^{20}	10^{20}	$10^{14,00}$
6	10^{20}	10^{20}	$10^{14,71}$
7	10^{20}	10^{20}	$10^{16,11}$
8	10^{20}	10^{20}	$10^{18,06}$
9	10^{20}	10^{20}	$10^{18,03}$
10	10^{20}	10^{20}	10^{20}
11	10^{20}	10^{20}	10^{20}

Tabla 10. 7 Resultados del eje con fisura cúbica. Análisis de fatiga

Como se puede observar en la tabla, el número de ciclos es superior a 10^7 en todo el eje. En la zona de las **fisuras cúbicas** realizadas, la vida deseada también es superior a 10^7 ciclos, por lo que los ejes con las fisuras cúbicas mencionadas cumplen la norma EN 1326.

En la tabla mostrada a continuación se representa el número de ciclos que soporta el eje con **fisura radial** antes de romperse. También se representan los ciclos que soporta la propia fisura del eje. Dichos valores han sido obtenidos tras realizar los **análisis a fatiga** correspondientes.

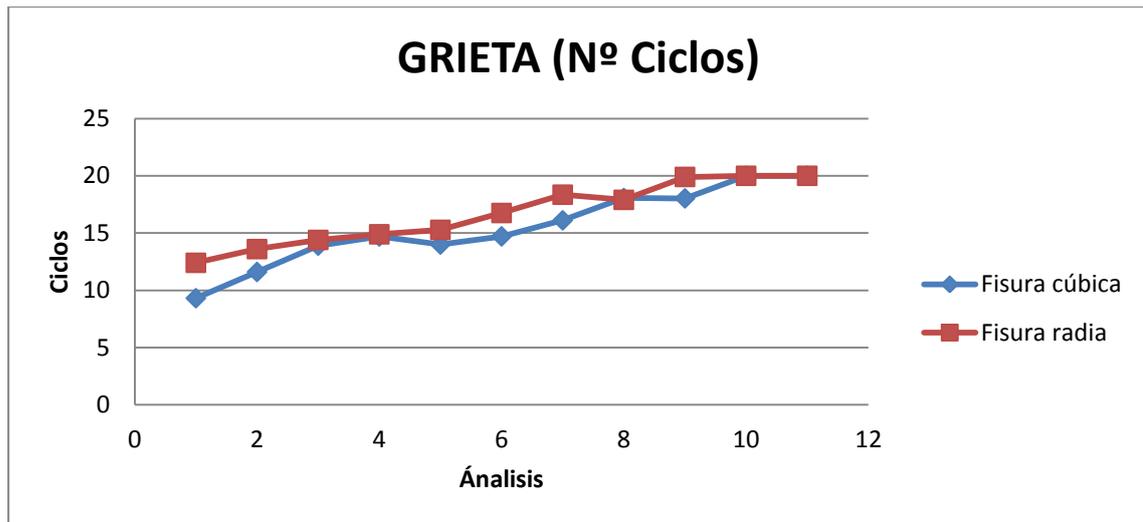
FISURA RADIAL			
Análisis	nº de ciclos en eje	nº máx. ciclos en grieta	nº mín. ciclos en grieta
1	10^{20}	$10^{19,9}$	$10^{12,40}$
2	10^{20}	10^{20}	$10^{13,60}$
3	10^{20}	10^{20}	$10^{14,40}$
4	10^{20}	10^{20}	$10^{14,89}$
5	10^{20}	10^{20}	$10^{15,28}$
6	10^{20}	10^{20}	$10^{16,75}$
7	10^{20}	10^{20}	$10^{18,35}$
8	10^{20}	10^{20}	$10^{17,90}$
9	10^{20}	10^{20}	$10^{19,90}$
10	10^{20}	10^{20}	10^{20}
11	10^{20}	10^{20}	10^{20}

Tabla 10. 8 Resultados del eje con fisura radial. Análisis de fatiga



Como se observa en la tabla, el número de ciclos es superior a 10^7 en todo el eje. En la zona de las **fisuras radiales** realizadas la vida deseada también es superior a 10^7 ciclos, por lo que los ejes con las fisuras cúbicas mencionadas cumplen la norma EN 1326.

La tabla siguiente representa el número de ciclos que aguantan las fisuras realizadas en eje. En color **azul** se representan los ejes con **fisuras cúbicas**. En color **rojo** se muestran los ejes con **fisuras radiales**.



Gráfica 10. 4 Número de ciclos en fisuras



10.6.3. Fisura cúbica vs. radial con refinamiento de malla. Análisis estático

En la siguiente tabla se representan los datos de la tensión y desplazamiento máximo a lo largo del eje con **fisura cúbica**. También se representa la tensión máxima sufrida en la misma fisura del eje. Estos **análisis estáticos** se han realizado con **refinamiento de malla** en la fisura.

FISURA CÚBICA			
Análisis	Tensión (MPa)	Desplazamiento (mm)	Tensión máx. fisura (MPa)
1	711,8	0,2969	40,30
2	667,2	0,2991	26,63
3	741,7	0,2968	24,56
4	746,9	0,2961	19,46
5	765,5	0,2964	15,75
6	833,0	0,2961	13,38
7	717,4	0,2963	9,49
8	578,7	0,2962	10,14
9	727,5	0,2968	10,90
10	684,6	0,2962	4,86
11	750,7	0,2991	3,15

Tabla 10. 9 Resultados del eje con fisura cúbica y refinamiento de malla. Análisis estático

En la siguiente tabla se muestran los datos de la tensión y desplazamiento máximo a lo largo del eje con **fisura radial**. También se representa la tensión máxima sufrida en la misma fisura del eje. Dichos **análisis estáticos** se han realizado con **refinamiento de malla** en la fisura.

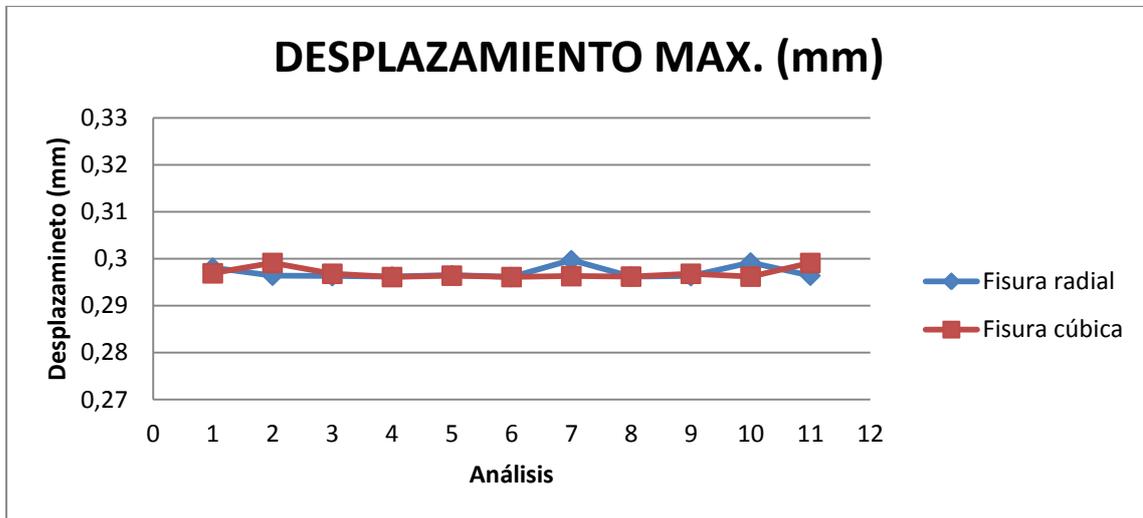
FISURA RADIAL			
Análisis	Tensión (MPa)	Desplazamiento (mm)	Tensión máx. fisura (MPa)
1	702,2	0,2981	79,33
2	693,2	0,2964	64,06
3	726,9	0,2963	57,33
4	633,7	0,2962	42,27
5	726,1	0,2965	32,23
6	758,0	0,2961	28,21
7	801,9	0,2997	21,17
8	688,8	0,2962	19,99
9	668,1	0,2963	12,25
10	806,6	0,2992	9,89
11	712,4	0,2964	6,26

Tabla 10. 10 Resultados del eje con fisura radial y refinamiento de malla. Análisis estático

Como se aprecia en los análisis mostrados, la tensión máxima se produce en la sección crítica II del eje ferroviario, mientras que el desplazamiento máximo se origina en el extremo del semieje.

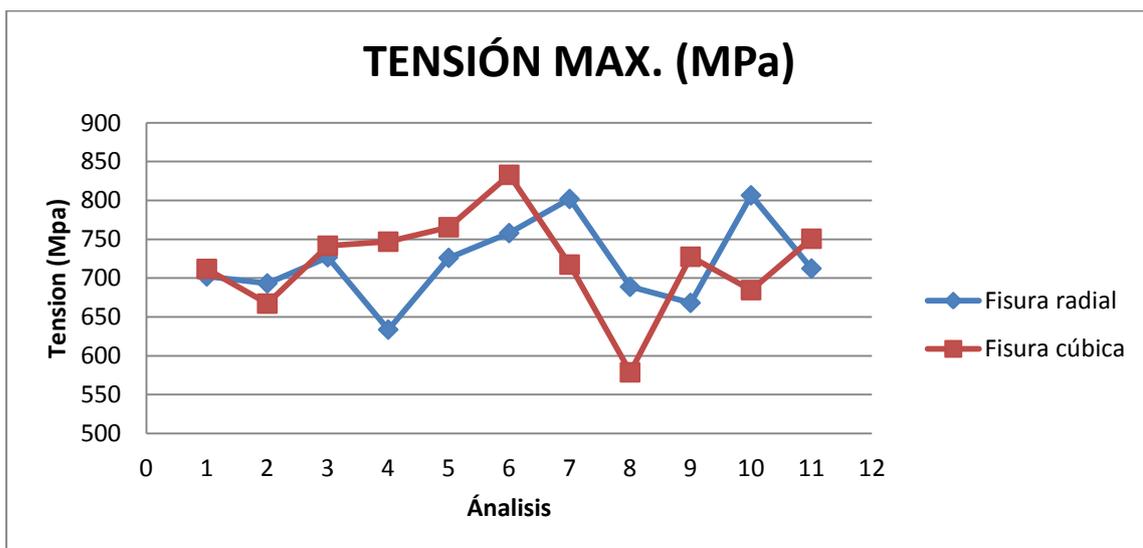


En la siguiente gráfica se representan los valores del desplazamiento máximo (mm) en el eje obtenidos en los **análisis estáticos** con **refinamiento de malla** en la zona de la fisura. Los valores en **azul** corresponden a los resultados del eje con **fisura radial**, mientras que los valores representados en color **rojo** pertenecen a los obtenidos en el eje con **fisura cúbica**. Los desplazamientos máximos se producen en el extremo del semieje.



Gráfica 10. 5 Desplazamiento máximo en el eje con refinamiento de malla en la fisura

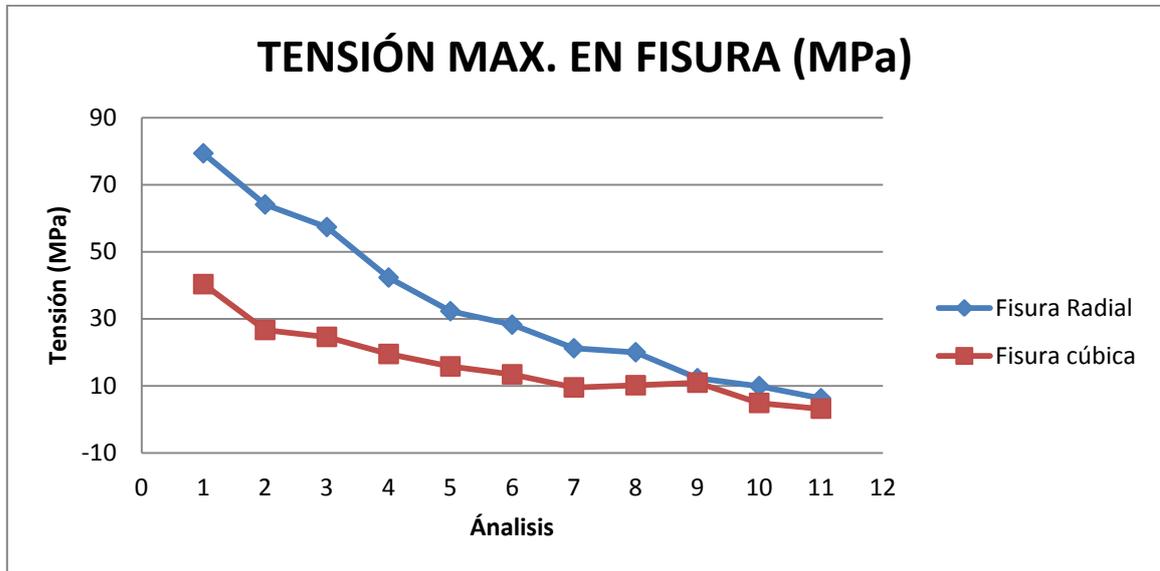
En la gráfica mostrada a continuación se representan los valores de tensión máxima (MPa) en el eje, obtenidos en los **análisis estáticos** con **refinamiento de malla** en fisura. Los valores en **azul** corresponden a los resultados del eje con **fisura radial**, mientras que los valores representados en color **rojo** pertenecen a los obtenidos en el eje con **fisura cúbica**. La tensión máxima se produce en la sección crítica II del eje ferroviario.



Gráfica 10. 6 Tensión máxima en el eje con refinamiento de malla en la fisura



En la siguiente gráfica se representan los valores de tensión máxima (MPa) en la fisura realizada sobre el eje, en la zona de contacto eje-rueda. Dichos valores han sido obtenidos mediante **análisis estáticos** con **refinamiento de malla** en la zona de la fisura. Los valores en **azul** corresponden a los resultados del eje con **fisura radial**, mientras que los valores representados en color **rojo** pertenecen a los obtenidos en el eje con **fisura cúbica**.



Gráfica 10. 7 Tensión máxima en fisura con refinamiento de malla



10.6.4. Fisura cúbica vs. radial con refinamiento de malla. Análisis de fatiga

En la siguiente tabla se representa el número de ciclos que soporta el eje con **fisura cúbica** antes de romperse. También se representan los ciclos que soporta la propia fisura del eje. Estos resultados se han obtenido realizando los correspondientes análisis a fatiga con refinamiento de malla en la zona de fisura.

FISURA CÚBICA			
Análisis	nº de ciclos en eje	nº máx. ciclos en grieta	nº mín. ciclos en grieta
1	10^{20}	$10^{19,88}$	$10^{7,54}$
2	10^{20}	$10^{19,88}$	$10^{8,47}$
3	10^{20}	10^{20}	$10^{8,84}$
4	10^{20}	10^{20}	$10^{10,05}$
5	10^{20}	10^{20}	$10^{11,05}$
6	10^{20}	10^{20}	$10^{11,67}$
7	10^{20}	10^{20}	$10^{12,82}$
8	10^{20}	10^{20}	$10^{13,19}$
9	10^{20}	10^{20}	$10^{14,97}$
10	10^{20}	10^{20}	$10^{16,00}$
11	10^{20}	10^{20}	$10^{17,81}$

Tabla 10. 11 Resultados del eje con fisura cúbica y refinamiento de malla. Análisis de fatiga

Como se puede observar en la tabla, el número de ciclos es superior a 10^7 en todo el eje. En la zona de las **fisuras cúbicas** realizadas la vida deseada también es superior a 10^7 ciclos, por lo que los ejes con las fisuras cúbicas mencionadas cumplen la norma EN 1326.

En la tabla que se muestra a continuación se representa el número de ciclos que soporta el eje con **fisura radial** antes de romperse. También se representan los ciclos que soporta la propia fisura del eje. Dichos valores han sido obtenidos tras realizar los análisis a fatiga correspondientes con refinamiento de malla en la zona de la fisura.

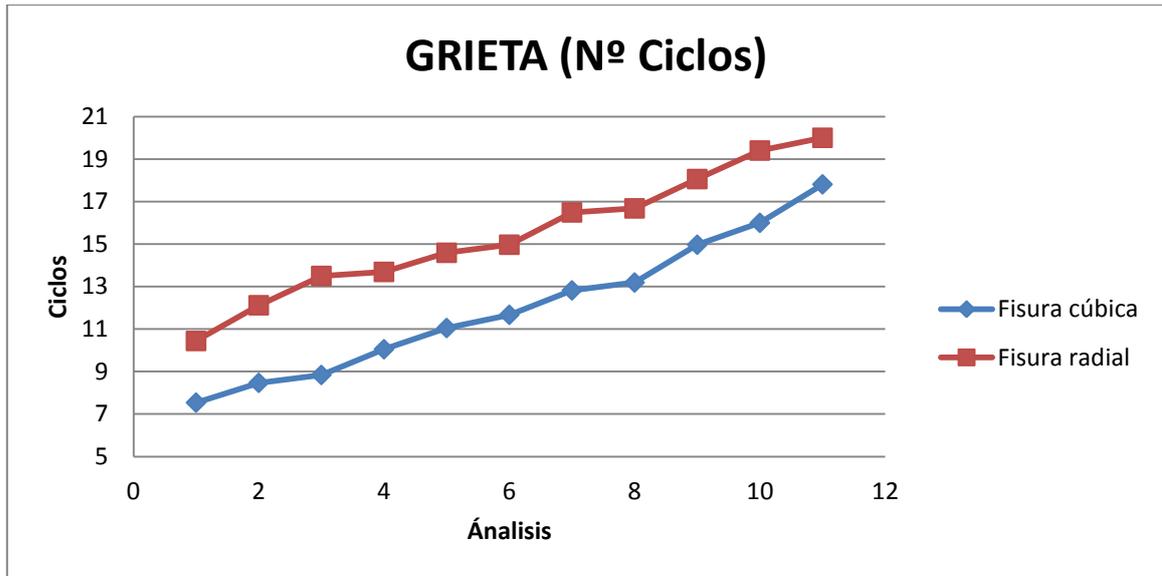
FISURA RADIAL			
Análisis	nº de ciclos en eje	nº máx. ciclos en grieta	nº mín. ciclos en grieta
1	10^{20}	$10^{19,88}$	$10^{10,44}$
2	10^{20}	$10^{19,88}$	$10^{12,12}$
3	10^{20}	10^{20}	$10^{13,50}$
4	10^{20}	10^{20}	$10^{13,69}$
5	10^{20}	10^{20}	$10^{14,59}$
6	10^{20}	10^{20}	$10^{14,97}$
7	10^{20}	10^{20}	$10^{16,49}$
8	10^{20}	10^{20}	$10^{16,68}$
9	10^{20}	10^{20}	$10^{18,06}$
10	10^{20}	10^{20}	$10^{19,40}$
11	10^{20}	10^{20}	10^{20}

Tabla 10. 12 Resultados del eje con fisura radial y refinamiento de malla. Análisis de fatiga



Como se observa en la tabla, el número de ciclos es superior a 10^7 en todo el eje. En la zona de las **fisuras radiales** realizadas la vida deseada también es superior a 10^7 ciclos, por lo que los ejes con las fisuras cúbicas mencionadas cumplen la norma EN 1326.

La siguiente tabla representa el número de ciclos que aguantan las fisuras realizadas en el eje. En color **azul** se representan los ejes con **fisuras cúbicas**. En color **rojo** se muestran los ejes con **fisuras radiales**.



Gráfica 10. 8 Número de ciclos en fisura con refinamiento de malla



11.- CONCLUSIONES Y PROPUESTAS DE MEJORA

11.1.- CONCLUSIONES

11.2.- PROPUESTAS DE MEJORA



11.1.- CONCLUSIONES

El objetivo fundamental de este proyecto ha sido la familiarización con *Pro/Engineer*, software de elementos finitos de reciente implantación en la universidad Carlos III de Madrid. Mediante el empleo de esta herramienta informática, hemos resuelto un problema simplificado de un eje ferroviario sometido a análisis estáticos y de fatiga.

En proyectos anteriores se había realizado un estudio estático del eje simple, y se había estimado la vida a fatiga del mismo, realizando una comparativa de diversos parámetros del programa así como, la variación de aspectos geométricos o de parámetros propios del eje.

En este proyecto se ha estudiado un **eje más complejo**, añadiendo distintos tipos de **fisuras** a lo largo de la zona de contacto entre la rueda y el eje. Para ello se ha trabajado dentro del software con los módulos: *Estándar*, *Mechanica* y *Visualización de Resultados*. El proyecto ha consistido en el **modelado** del eje ferroviario, aplicación de las **cargas y restricciones** oportunas (condiciones de contorno) y por último, se ha sometido el eje a **análisis estáticos y de vida a fatiga**.

Si algo ha quedado patente después de este trabajo, es la rápida, cómoda y sencilla posibilidad de realizar **cambios** entre las diferentes **fases del diseño**. Entre los procesos de diseño y análisis es posible realizar cambios de geometría, material, cargas, restricciones, etc. En este proyecto ha sido de gran utilidad la simplicidad y facilidad de efectuar cambios en la geometría del eje, a la hora de realizar las distintas fisuras cúbicas y radiales en la zona de contacto eje-rueda.

Queda así demostrado que una de las mayores ventajas que puede ofrecer este nuevo software, es la **integración** de las diversas aplicaciones, desde las primeras ideas de concepción de un producto hasta la fabricación de un prototipo con las herramientas de prototipado rápido, pasando por análisis de todo tipo, rediseños, etc.

Tanto para los análisis estáticos como para los de fatiga se han aplicado fisuras cúbicas y fisuras radiales. El objetivo ha sido obtener **resultados** de tensión, desplazamientos y ciclos de vida del eje lo más igualado posible para los dos tipos de fisuras mencionadas. Para ello, una vez obtenidos los resultados en el eje con fisura cúbica, se ha procedido a realizar los mismos análisis con fisuras radiales, iterando sus dimensiones en función de los resultados hasta obtener valores muy próximos a los adquiridos en el eje con fisuras cúbicas.

Se ha tenido en cuenta que en el **modelo real**, el eje y la rueda se encuentran tensionadas debido a exigencias del montaje y por diferencia de temperaturas, por lo que se ha aplicado una **precarga** en ambos elementos para simular este estado.

Una vez obtenidos los resultados, se repitieron los análisis realizando un **refinamiento de la malla** en las fisuras realizadas.



Estos resultados de tensiones y desplazamientos fueron comparados con los límites establecidos por la norma y el límite elástico del material, y efectivamente dichos límites no fueron rebasados.

Entre los **inconvenientes** encontrados durante la ejecución de este proyecto habría que destacar los **tiempos de ejecución de los análisis**, que han resultado demasiado extensos, ya que los equipos de los que se dispone habitualmente a nivel de usuario, no constan de la suficiente capacidad de cálculo que requiere este software. Teniendo en cuenta que geoméricamente el modelo estudiado no está configurado por una morfología compleja, los análisis han tenido una duración de cuatro o cinco horas de ejecución de valor promedio.

En definitiva, los resultados del eje con **fisura cúbica** se han comparado con estudios realizados con **fisuras radiales** y se han discutido con el **personal docente**, llegando a la conclusión de que estos guardan cierta similitud y son lo más próximos posibles. Por tanto, se puede catalogar como aceptable, el empleo de esta herramienta de trabajo para el desarrollo de **estudios mecánicos** de cualquier modelo.

Queda presente con la ejecución de este proyecto, que cada vez es mayor el peso que el uso de estos **softwares** van adquiriendo en la **industria**, como alternativa a la experimentación, lo que se traduce en una **mayor eficiencia**, tiempos menores y en definitiva, ahorro económico.



11.2.- PROPUESTAS DE MEJORA

Como sucede en la mayoría de los casos, todo puede ser mejorado, algo que se tiene presente y que se demuestra con una serie de mejoras propuestas para el modelo estudiado.

El estudio del eje ferroviario está siendo objeto de numerosos proyectos. Inicialmente se comenzaron a analizar ejes simples para determinar la capacidad del programa obteniendo resultados de análisis estáticos y de fatiga. Con este proyecto se ha aumentado el **nivel de dificultad** introduciendo fisuras en la zona de contacto eje-rueda del eje. Adicionalmente se ha estudiado a fatiga el eje para un estado tensional similar al caso real, es decir, se ha tratado de simular las condiciones de contorno del sistema completo en el estudio del eje.

Una de las propuestas de mejora que se formula, es intentar obtener resultados aceptables realizando distintos **refinamientos progresivos de malla**, en cambios de sección y fisuras del eje.

Otra propuesta, es intentar obtener resultados aceptables efectuando **modificaciones en la geometría del eje**, realizando los mismos análisis que en este proyecto, pero en ejes ferroviarios **huecos**.

Otros posibles trabajos de futuro, podrían consistir en intentar estudiar el eje ferroviario, realizando un **análisis de las fisuras** generadas en otras superficies del eje.

También sería una posibilidad que el **eje estudiado** fuera de **tracción**, lo cual implicaría que tendría cambios de sección adicionales, que podrían resultar ser más o menos críticos que los estudiados en este proyecto.

En definitiva, se pueden realizar estudios similares, modificando la geometría del eje y modificando la ubicación de las fisuras en distintas superficies. También se podrían estudiar otros campos como pueden ser vibraciones mecánicas, debido a los efectos de la suspensión o el propio rodaje, efectos térmicos ocasionados por la acción del sistema de freno, etc.



12.- PRESUPUESTO

12.1.- DETALLE DEL PRESUPUESTO



12.1.- DETALLE DEL PRESUPUESTO

Equipo Informático			
Ítem	Unidades	Coste unitario	Coste total
Ordenador personal: ASUS A53S, procesador Intel Core i7 - 2670QM, 2.2GHz, 4GB Ram, tarjeta gráfica Nvidia Geforce GT540M de 2GB, Disco duro 500GB + periféricos	x1	649,99 €	649,99 €
Dispositivo almacenamiento masivo Verbatim de 16GB	x2	9,99 €	19,98 €
Coste total equipo informático			669,97 €

Personal de Ingeniería				
	Precio/hora	Nº horas	Unidades	Coste total
Estudio de manuales de aprendizaje aportados <i>Pro/Engineer</i>	55€/h	200 h	-	11.000 €
Modelado de piezas	55€/h	120 h	-	6.600 €
Desarrollo de análisis estáticos	25€/h	50 h	44 Análisis	1.250 €
Desarrollo de análisis de fatiga	25€/h	200 h	44 Análisis	5.000 €
Elaboración de la memoria	55€/h	180 h	310 Páginas	9.900 €
Elaboración de la presentación	55€/h	35 h	35 Diapositivas	1.925 €
Coste total de personal		785 h		35.675 €

COSTE TOTAL	36.344,97 €
--------------------	--------------------

NOTA: El precio de la hora de trabajo para los apartados referentes a los análisis, se ve reducido debido a que el tiempo invertido por el ingeniero no es íntegro, es decir, se invierte el tiempo en el desarrollo de otras funciones mientras el ordenador realiza los cálculos aunque se esté pendiente durante cortos intervalos de la situación de dichos cálculos.

Por otro lado, no se ha considerado la parte previa a la realización del proyecto que concierne a la recopilación de información de los casos reales para la familiarización con el problema en cuestión, así como la fase de pruebas llevada a cabo para la obtención de resultados coherentes.

Tras el desglose presupuestario, el **coste total de realización del proyecto** es de treinta y seis mil trescientos cuarenta y cuatro euros con noventa y siete céntimos (36.344,97€).



13.- BIBLIOGRAFÍA

13.1.- BIBLIOGRAFÍA



13.1.- BIBLIOGRAFÍA

1. “Manual básico de ProEngineer Wildfire” (Universidad de Navarra). Febrero de 2004.
2. “Introducción a Pro/ENGINEER Wildfire 5.0 (Guía de iniciación al proceso de trabajo). Año 2009.
 - Modelado de un teléfono móvil.
3. “Análisis de un conjunto ferroviario con Pro/Engineer” (Proyecto fin de carrera de Manuel Martín Escacena, Miguel Fuentes Rojas, y Manuel Pérez Carrasco). Año 2011.
 - Guía básica para trabajar con Pro/Engineer.
4. Módulo de ayuda de “Pro/ENGINEER Wildfire 5.0”.
5. Documentación de la asignatura *Diseño de Máquinas*. Departamento de Ingeniería Mecánica. 3º de Ingeniería Técnica Industrial, especialidad Mecánica. Universidad Carlos III de Madrid. Año 2011.
6. Conocimientos adquiridos en ACTREN, Mantenimiento Ferroviario S.A. (Prácticas de empresa)
7. “SAE Fatigue Design Handbook”. Third Edition AE-22. Universidad Carlos III de Madrid. Año 1999.
8. UNE-EN13260. Junio 2004 / UNE-EN13261. Diciembre 2009.



14.- ANEXOS

14.1- RESULTADOS FISURA CÚBICA. ANÁLISIS ESTÁTICO

14.2- RESULTADOS FISURA CÚBICA. ANÁLISIS DE FATIGA

14.3- RESULTADOS FISURA RADIAL. ANÁLISIS ESTÁTICO

14.4- RESULTADOS FISURA RADIAL. ANÁLISIS DE FATIGA



14.1- RESULTADOS FISURA CÚBICA. ANÁLISIS ESTÁTICO

14.1.1. Eje con fisura cúbica n° 1

Este análisis estático del eje se ha realizado con una **fisura cúbica** de dimensiones **5x5x5 mm³**, ubicada a **5 mm** de la sección crítica número III. Los datos obtenidos se muestran en las siguientes imágenes.

Desplazamiento:

Los resultados de los desplazamientos registrados en *Mechanica* indican cómo el eje se deforma bajo las condiciones de contorno aplicadas, diferenciándose por colores en función de la cantidad desplazada, tal y como se muestra en la siguiente figura:

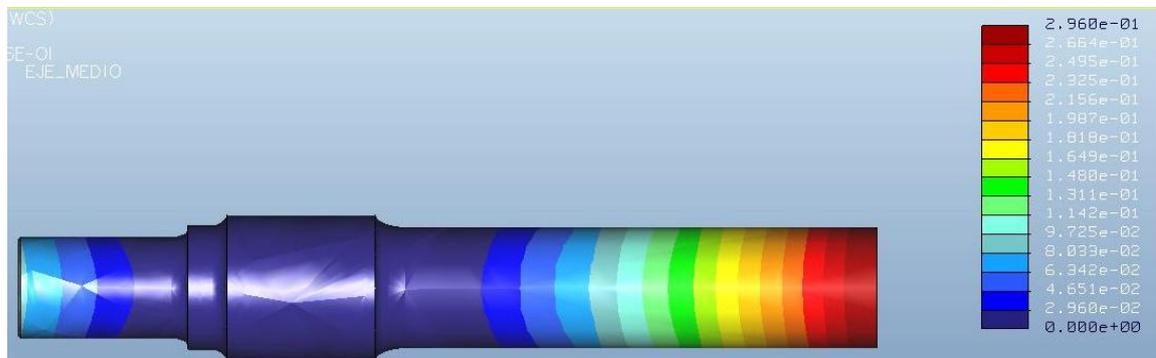


Ilustración 14. 1 Desplazamiento del eje con fisura cúbica n°1

El desplazamiento máximo, de valor 0,2968 mm, se produce en el punto medio del eje (extremo del eje medio).

Tensión:

La tensión máxima, de valor 864,2 MPa, se produce en la sección crítica II, tal y como se observa en las imágenes anteriores. La tensión máxima en la fisura cúbica es de 51,75 MPa.



Ilustración 14. 2 Tensión del eje con fisura cúbica n°1

14.1.2. Eje con fisura cúbica n° 2

Este análisis estático del eje se ha realizado con una **fisura cúbica** de dimensiones **5x5x5 mm³**, ubicada a **10 mm** de la sección crítica número III. Los datos obtenidos se muestran en las siguientes imágenes.

Desplazamiento:

Los resultados de los desplazamientos registrados en *Mechanica* indican cómo el eje se deforma bajo las condiciones de contorno aplicadas, diferenciándose por colores en función de la cantidad desplazada, tal y como se muestra en la siguiente figura:

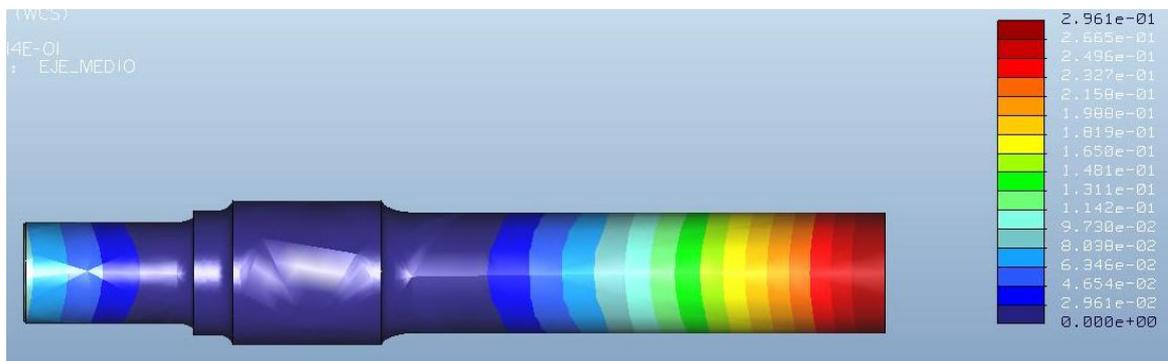


Ilustración 14.3 Desplazamiento del eje con fisura cúbica n°2

El desplazamiento máximo, de valor 0,2961 mm, se produce en el punto medio del eje (extremo del eje medio).

Tensión:

La tensión máxima, de valor 741,3 MPa, se produce en la sección crítica II, tal y como se observa en las imágenes anteriores. La tensión máxima en la fisura cúbica es de 34,14 MPa.

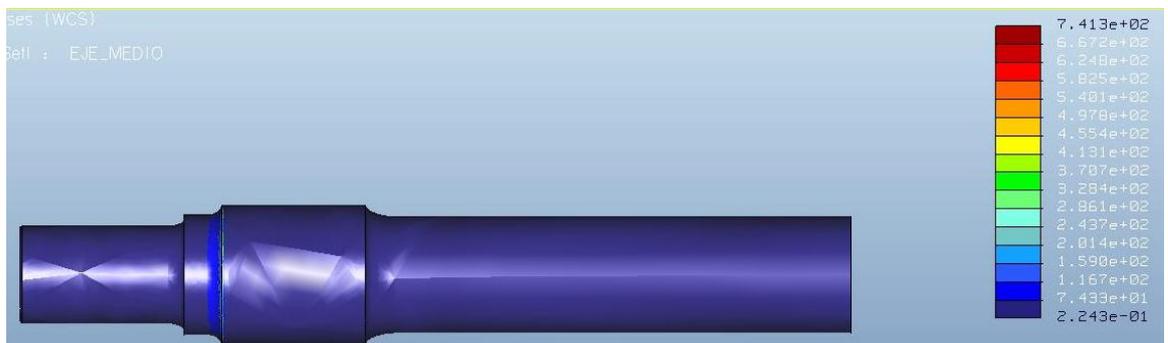


Ilustración 14.4 Tensión del eje con fisura cúbica n°2

14.1.3. Eje con fisura cúbica nº 3

Este análisis estático del eje se ha realizado con una **fisura cúbica** de dimensiones **5x5x5 mm³**, ubicada a **15 mm** de la sección crítica número III. Los datos obtenidos se muestran en las siguientes imágenes.

Desplazamiento:

Los resultados de los desplazamientos registrados en *Mechanica* indican cómo el eje se deforma bajo las condiciones de contorno aplicadas, diferenciándose por colores en función de la cantidad desplazada, tal y como se muestra en la siguiente figura:

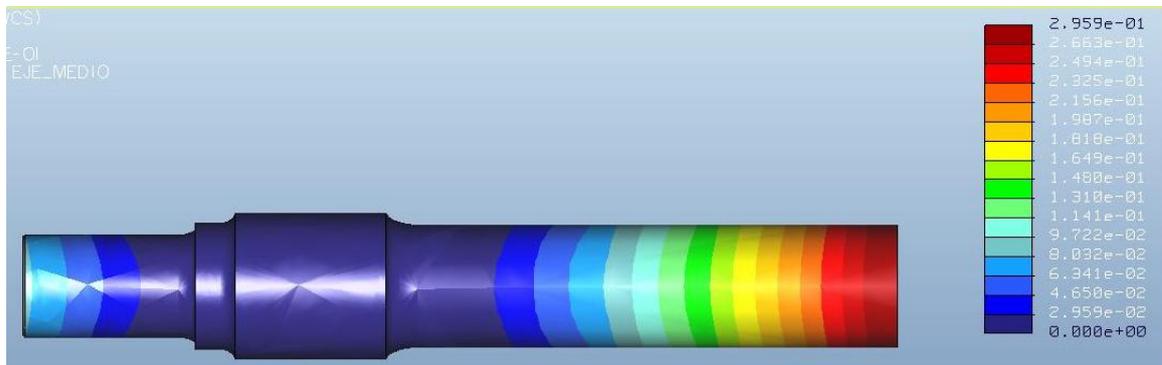


Ilustración 14. 5 Desplazamiento del eje con fisura cúbica nº3

El desplazamiento máximo, de valor 0,2959 mm, se produce en el punto medio del eje (extremo del eje medio).

Tensión:

La tensión máxima, de valor 743,7 MPa, se produce en la sección crítica II, tal y como se observa en las imágenes anteriores. La tensión máxima en la fisura cúbica es de 19,72 MPa.

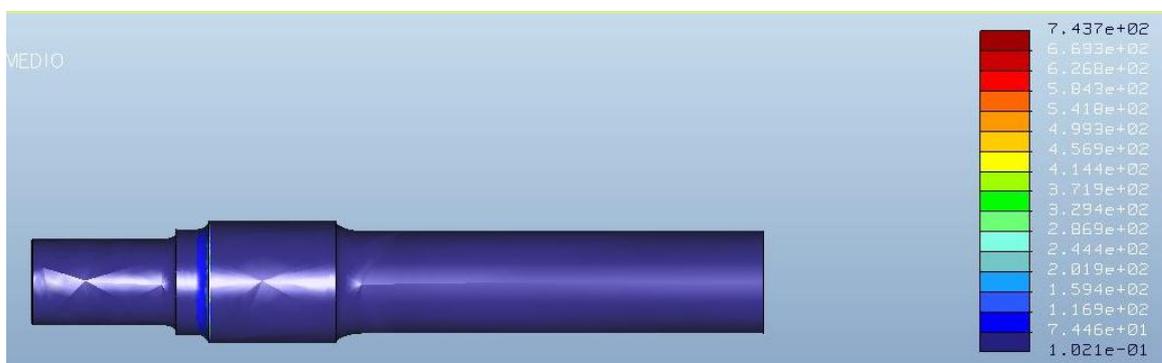


Ilustración 14. 6 Tensión del eje con fisura cúbica nº3



14.1.4. Eje con fisura cúbica nº 4

Este análisis estático del eje se ha realizado con una **fisura cúbica** de dimensiones **5x5x5 mm³**, ubicada a **20 mm** de la sección crítica número III. Los datos obtenidos se muestran en las siguientes imágenes.

Desplazamiento:

Los resultados de los desplazamientos registrados en *Mechanica* indican cómo el eje se deforma bajo las condiciones de contorno aplicadas, diferenciándose por colores en función de la cantidad desplazada, tal y como se muestra en la siguiente figura:

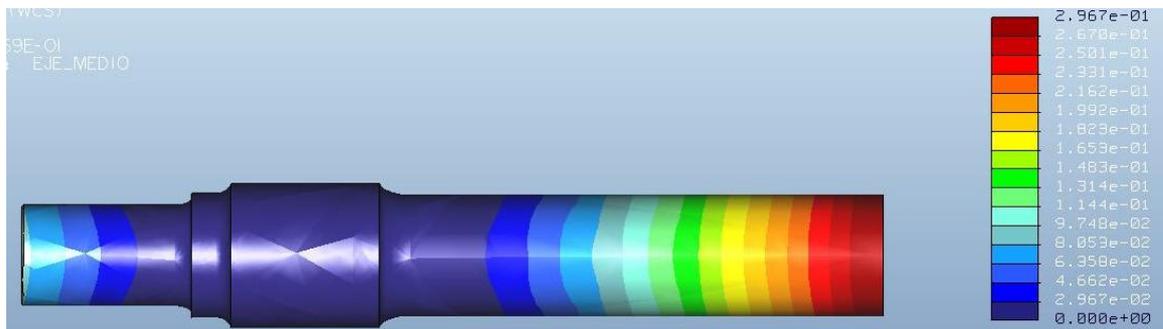


Ilustración 14. 7 Desplazamiento fisura cúbica nº4

El desplazamiento máximo, de valor 0,2967 mm, se produce en el punto medio del eje (extremo del eje medio).

Tensión:

La tensión máxima, de valor 648,6 MPa, se produce en la sección crítica II, tal y como se observa en las imágenes anteriores. La tensión máxima en la fisura cúbica es de 16,05 MPa.

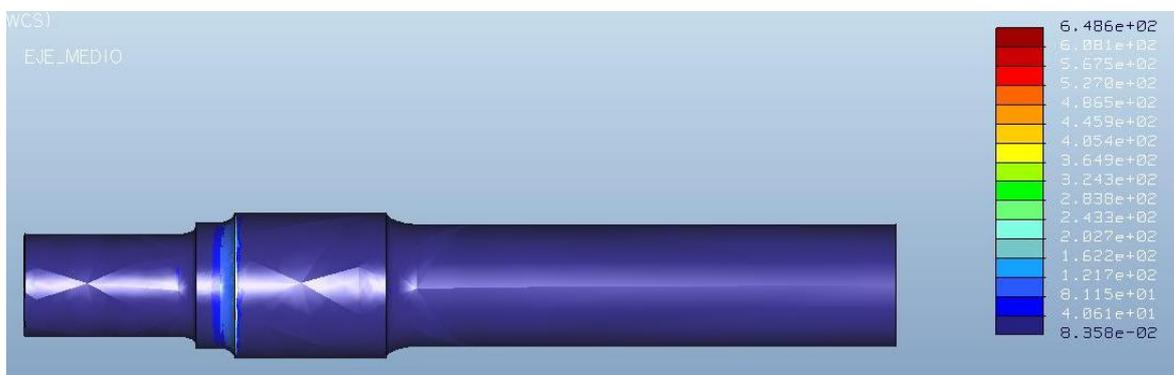


Ilustración 14. 8 Tensión del eje con fisura cúbica nº4



14.1.5. Eje con fisura cúbica n° 5

Este análisis estático del eje se ha realizado con una **fisura cúbica** de dimensiones **5x5x5 mm³**, ubicada a **25 mm** de la sección crítica número III. Los datos obtenidos se muestran en las siguientes imágenes.

Desplazamiento:

Los resultados de los desplazamientos registrados en *Mechanica* indican cómo el eje se deforma bajo las condiciones de contorno aplicadas, diferenciándose por colores en función de la cantidad desplazada, tal y como se muestra en la siguiente figura:

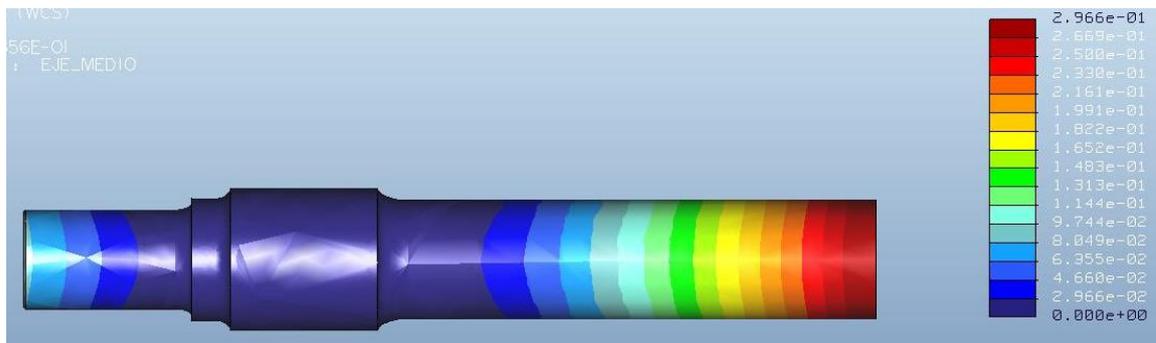


Ilustración 14. 9 Desplazamiento del eje con fisura cúbica n°5

El desplazamiento máximo, de valor 0,2966 mm, se produce en el punto medio del eje (extremo del eje medio).

Tensión:

La tensión máxima, de valor 778,1 MPa, se produce en la sección crítica II, tal y como se observa en las imágenes anteriores. La tensión máxima en la fisura cúbica es de 17,37 MPa.

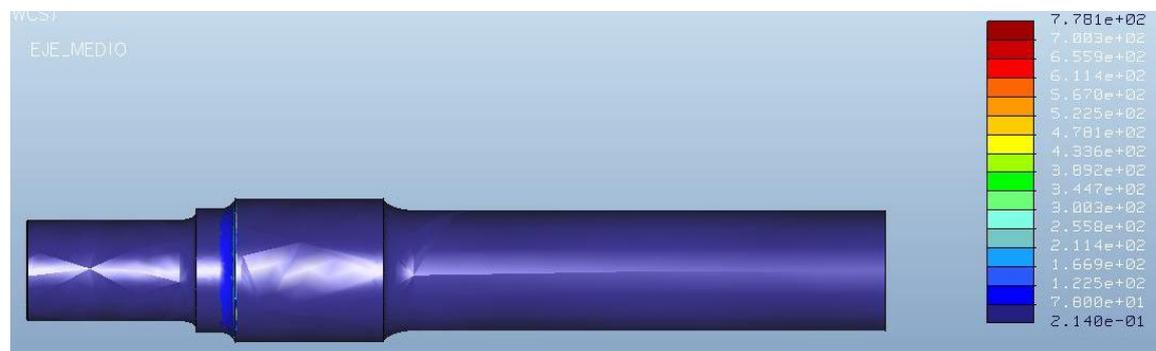


Ilustración 14. 10 Tensión del eje con fisura cúbica n°5



14.1.6. Eje con fisura cúbica nº 6

Este análisis estático del eje se ha realizado con una **fisura cúbica** de dimensiones **5x5x5 mm³**, ubicada a **30 mm** de la sección crítica número III. Los datos obtenidos se muestran en las siguientes imágenes.

Desplazamiento:

Los resultados de los desplazamientos registrados en *Mechanica* indican cómo el eje se deforma bajo las condiciones de contorno aplicadas, diferenciándose por colores en función de la cantidad desplazada, tal y como se muestra en la siguiente figura:

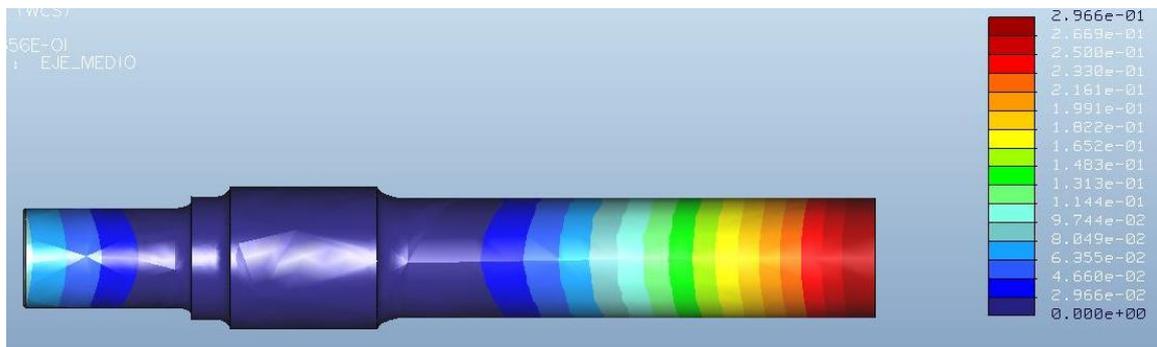


Ilustración 14. 11 Desplazamiento del eje con fisura cúbica nº6

El desplazamiento máximo, de valor 0,2961 mm, se produce en el punto medio del eje (extremo del eje medio).

Tensión:

La tensión máxima, de valor 731,6 MPa, se produce en la sección crítica II, tal y como se observa en las imágenes anteriores. La tensión máxima en la fisura cúbica es de 14,52 MPa.

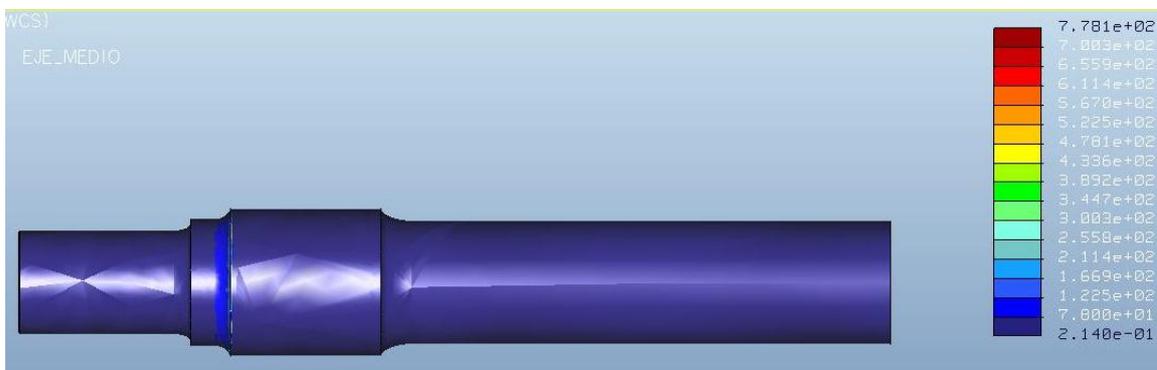


Ilustración 14. 12 Tensión del eje con fisura cúbica nº6



14.1.7. Eje con fisura cúbica nº 7

Este análisis estático del eje se ha realizado con una **fisura cúbica** de dimensiones **5x5x5 mm³**, ubicada a **35 mm** de la sección crítica número III. Los datos obtenidos se muestran en las siguientes imágenes.

Desplazamiento:

Los resultados de los desplazamientos registrados en *Mechanica* indican cómo el eje se deforma bajo las condiciones de contorno aplicadas, diferenciándose por colores en función de la cantidad desplazada, tal y como se muestra en la siguiente figura:

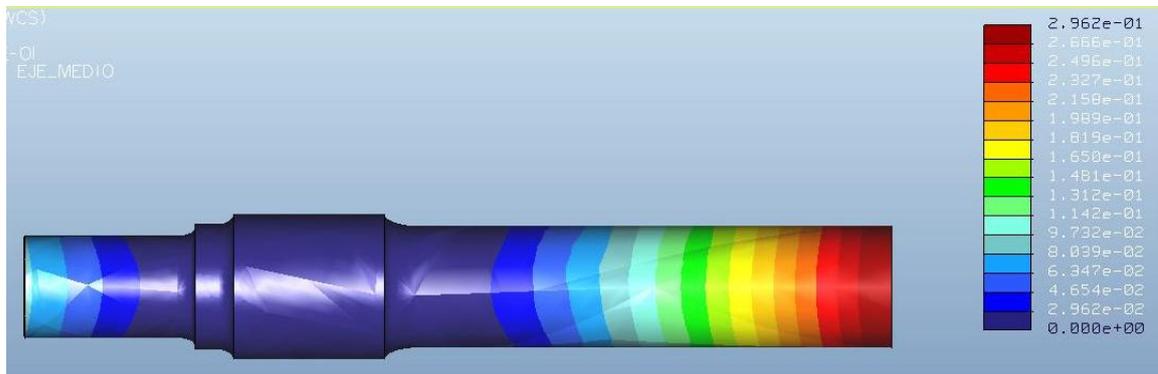


Ilustración 14. 13 Desplazamiento del eje con fisura cúbica nº7

El desplazamiento máximo, de valor 0,2962 mm, se produce en el punto medio del eje (extremo del eje medio).

Tensión:

La tensión máxima, de valor 824,6 MPa, se produce en la sección crítica II, tal y como se observa en las imágenes anteriores. La tensión máxima en la fisura cúbica es de 10,74 MPa.

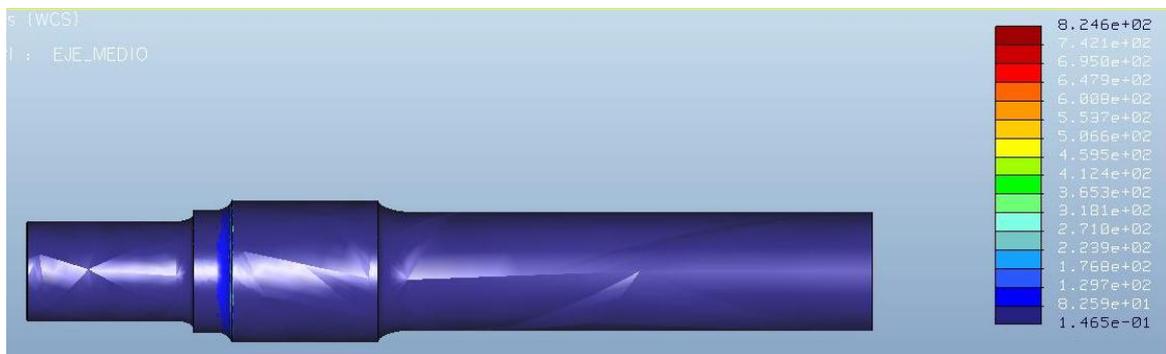


Ilustración 14. 14 Tensión del eje con fisura cúbica nº7



14.1.8. Eje con fisura cúbica n° 8

Este análisis estático del eje se ha realizado con una **fisura cúbica** de dimensiones **5x5x5 mm³**, ubicada a **40 mm** de la sección crítica número III. Los datos obtenidos se muestran en las siguientes imágenes.

Desplazamiento:

Los resultados de los desplazamientos registrados en *Mechanica* indican cómo el eje se deforma bajo las condiciones de contorno aplicadas, diferenciándose por colores en función de la cantidad desplazada, tal y como se muestra en la siguiente figura:

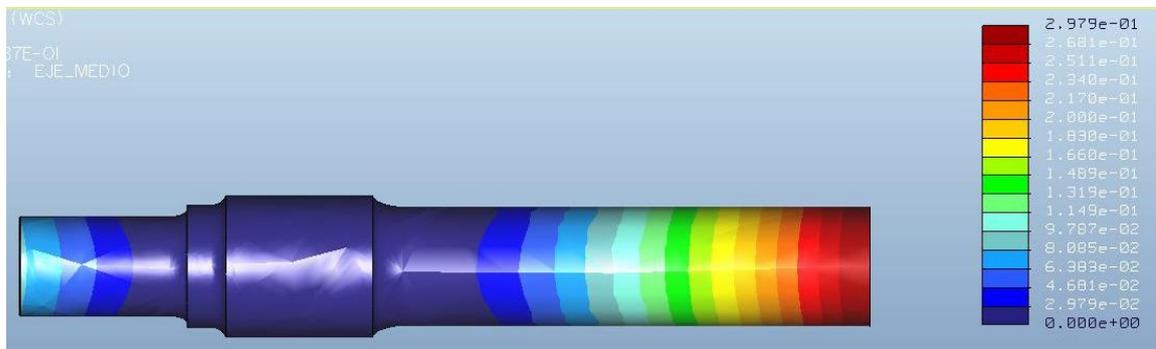


Ilustración 14. 15 Desplazamiento del eje con fisura cúbica n°8

El desplazamiento máximo, de valor 0,2979 mm, se produce en el punto medio del eje (extremo del eje medio).

Tensión:

La tensión máxima, de valor 670,9 MPa, se produce en la sección crítica II, tal y como se observa en las imágenes anteriores. La tensión máxima en la fisura cúbica es de 8,01 MPa.

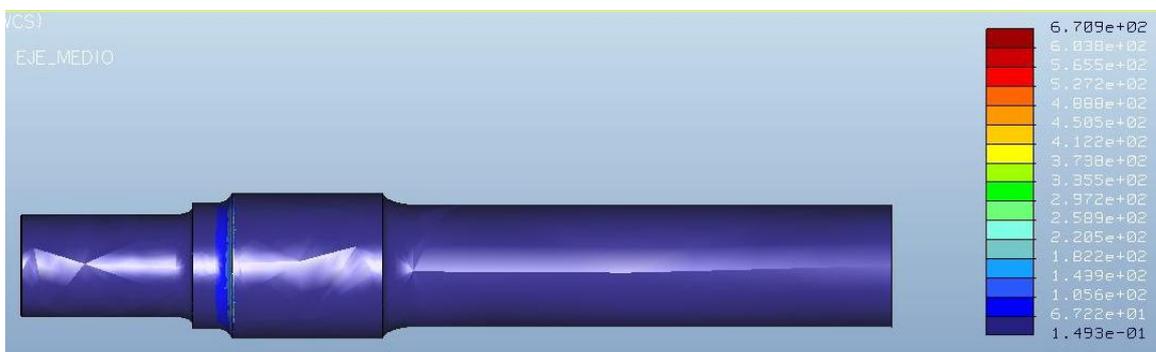


Ilustración 14. 16 Tensión del eje con fisura cúbica n°8



14.1.9. Eje con fisura cúbica nº 9

Este análisis estático del eje se ha realizado con una **fisura cúbica** de dimensiones **5x5x5 mm³**, ubicada a **50 mm** de la sección crítica número III. Los datos obtenidos se muestran en las siguientes imágenes.

Desplazamiento:

Los resultados de los desplazamientos registrados en *Mechanica* indican cómo el eje se deforma bajo las condiciones de contorno aplicadas, diferenciándose por colores en función de la cantidad desplazada, tal y como se muestra en la siguiente figura:

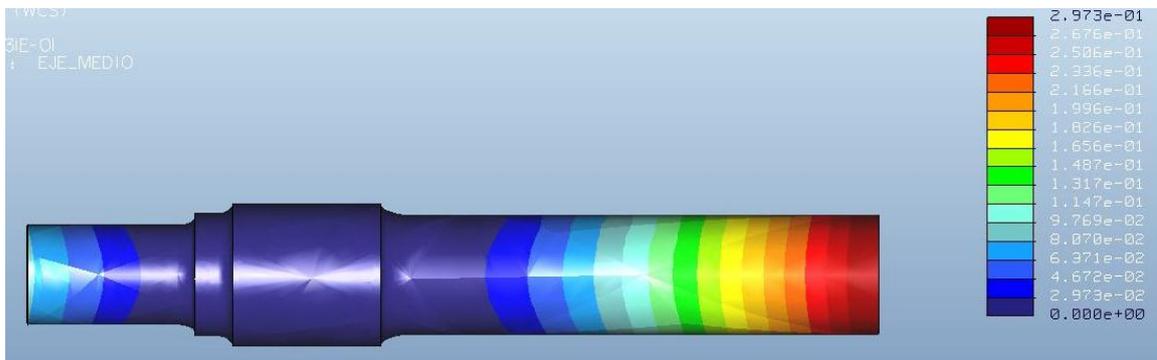


Ilustración 14. 17 Desplazamiento del eje con fisura cúbica nº9

El desplazamiento máximo, de valor 0,2973 mm, se produce en el punto medio del eje (extremo del eje medio).

Tensión:

La tensión máxima, de valor 684,4 MPa, se produce en la sección crítica II, tal y como se observa en las imágenes anteriores. La tensión máxima en la fisura cúbica es de 6,318 MPa.

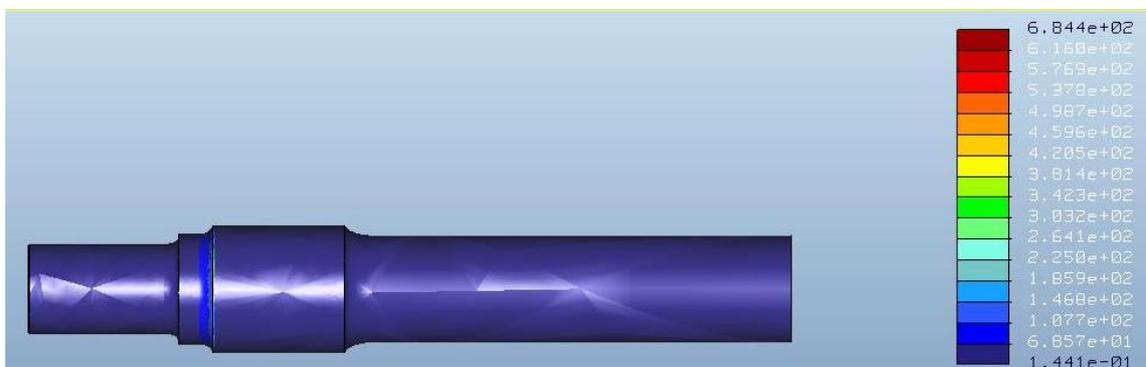


Ilustración 14. 18 Tensión del eje con fisura cúbica nº9



14.1.10. Eje con fisura cúbica n° 10

Este análisis estático del eje se ha realizado con una **fisura cúbica** de dimensiones **5x5x5 mm³**, ubicada a **60 mm** de la sección crítica número III. Los datos obtenidos se muestran en las siguientes imágenes.

Desplazamiento:

Los resultados de los desplazamientos registrados en *Mechanica* indican cómo el eje se deforma bajo las condiciones de contorno aplicadas, diferenciándose por colores en función de la cantidad desplazada, tal y como se muestra en la siguiente figura:

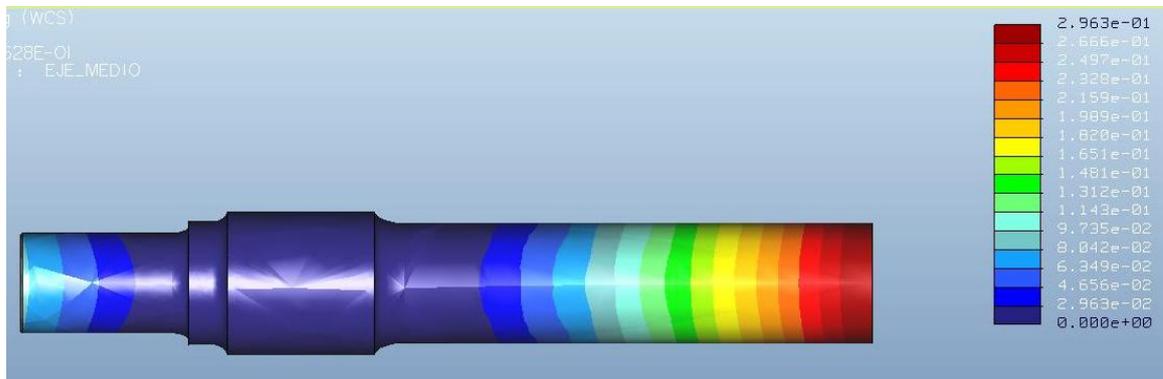


Ilustración 14. 19 Desplazamiento del eje con fisura cúbica n°10

El desplazamiento máximo, de valor 0,2963 mm, se produce en el punto medio del eje (extremo del eje medio).

Tensión:

La tensión máxima, de valor 659,5 MPa, se produce en la sección crítica II, tal y como se observa en las imágenes anteriores. La tensión máxima en la fisura cúbica es de 3,30 MPa.



Ilustración 14. 20 Tensión del eje con fisura cúbica n°10

14.1.11. Eje con fisura cúbica n° 11

Este análisis estático del eje se ha realizado con una **fisura cúbica** de dimensiones **5x5x5 mm³**, ubicada a **65 mm** de la sección crítica número III. Los datos obtenidos se muestran en las siguientes imágenes.

Desplazamiento:

Los resultados de los desplazamientos registrados en *Mechanica* indican cómo el eje se deforma bajo las condiciones de contorno aplicadas, diferenciándose por colores en función de la cantidad desplazada, tal y como se muestra en la siguiente figura:

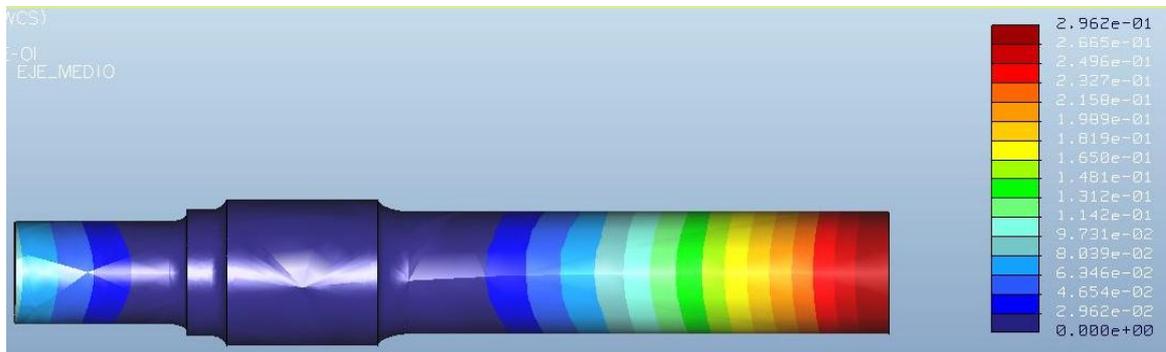


Ilustración 14. 21 Desplazamiento del eje con fisura cúbica n°11

El desplazamiento máximo, de valor 0,2962 mm, se produce en el punto medio del eje (extremo del eje medio).

Tensión:

La tensión máxima, de valor 658,3 MPa, se produce en la sección crítica II, tal y como se observa en las imágenes anteriores. La tensión máxima en la fisura cúbica es de 3,30 MPa.

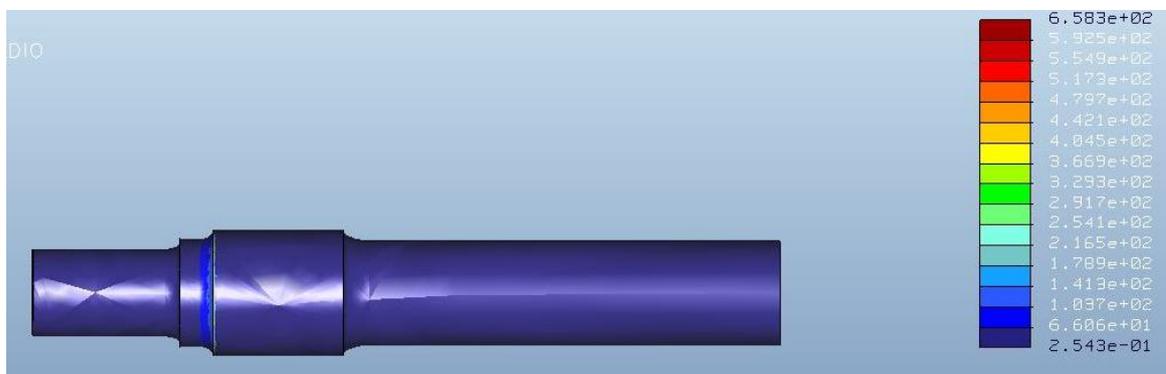


Ilustración 14. 22 Tensión del eje con fisura cúbica n°11



14.2- RESULTADOS FISURA CÚBICA. ANÁLISIS DE FATIGA

14.2.1. Eje con fisura cúbica nº 1

Este análisis del eje a fatiga se ha realizado con una **fisura cúbica** de dimensiones **5x5x5 mm³**, ubicada a **5 mm** de la sección crítica número III. Los datos obtenidos se muestran en las siguientes imágenes.

Log Damage (Logaritmo del daño):

La proporción entre ciclos de fatiga acumulados y el número total de ciclos a fallo. Un valor mayor que la unidad indica fallo. Al igual que el logaritmo de la vida, se expresa en órdenes logarítmicos. La relación entre *Log Life* y *Log Damage* puede ser expresada como ($Log Life = - Log Damage$).

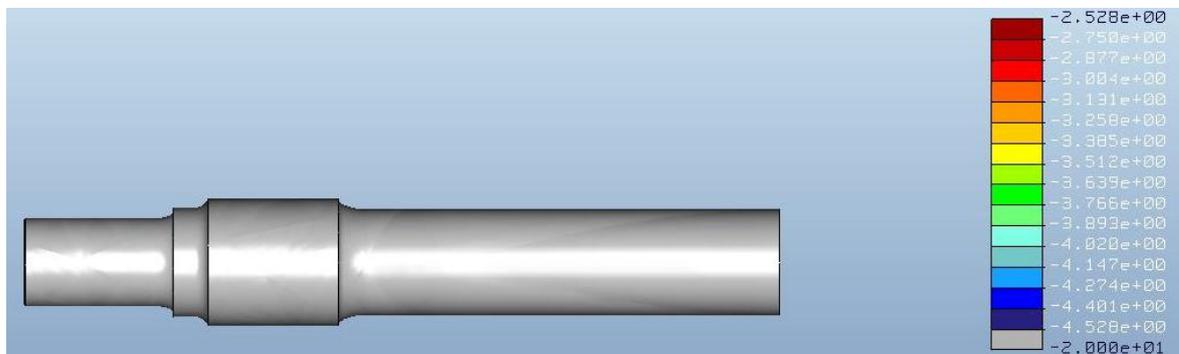


Ilustración 14. 23 Log damage eje con fisura cúbica nº1

Log Life (Logaritmo de la vida):

El número estimado de ciclos hasta que el modelo parte. La relación entre *Log Life* y *Log Damage* puede ser expresada como ($Log Life = - Log Damage$).

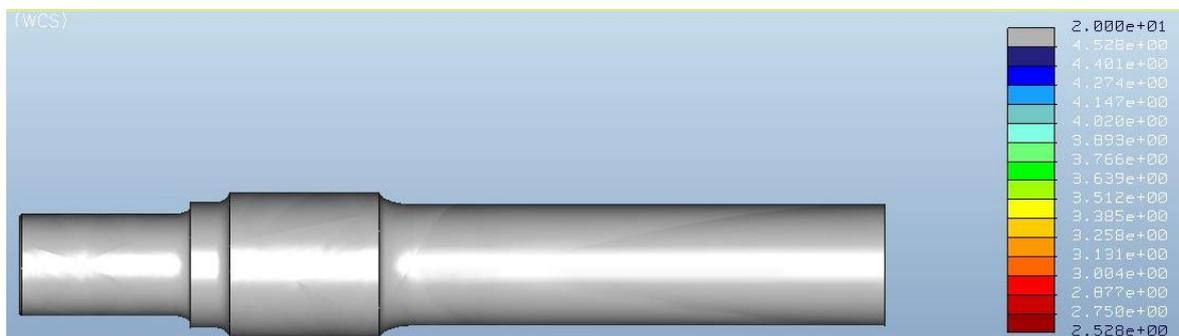


Ilustración 14. 24 Log life eje con fisura cúbica nº1

Como se puede observar el número de ciclos es superior a 10^7 en todo el eje. En la zona de las **fisuras cúbicas** realizadas, la vida deseada también es superior a 10^7 ciclos, por lo que los ejes con las fisuras cúbicas mencionadas cumplen la norma EN 1326.



Confidence of life (confianza en la vida):

Confidence of life representa la proporción entre la vida calculada y la vida de diseño objetivo.

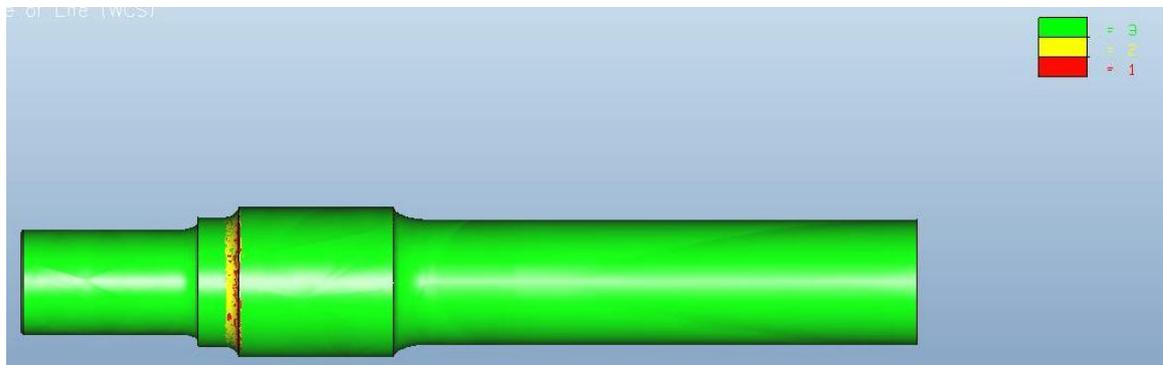


Ilustración 14. 25 *Confidence of life* eje fisura cúbica n°1

Factor of safety (factor de seguridad):

Representa el factor de seguridad permisible sobre la carga de entrada. Cuando la vida a fatiga calculada para el modelo es mayor que la vida de diseño objetivo el software proporciona un cálculo para determinar un factor de seguridad permisible sobre la carga de entrada. Esto representa el grado según el cual la amplitud de la carga puede ser aumentada sin comprometer la vida de diseño objetivo.



Ilustración 14. 26 *Factor of safety* eje fisura cúbica n°1



14.2.2. Eje con fisura cúbica nº 2

Este análisis del eje a fatiga se ha realizado con una **fisura cúbica** de dimensiones **5x5x5 mm³**, ubicada a **10 mm** de la sección crítica número III. Los datos obtenidos se muestran en las siguientes imágenes.

Log Damage (Logaritmo del daño):

La proporción entre ciclos de fatiga acumulados y el número total de ciclos a fallo. Un valor mayor que la unidad indica fallo. Al igual que el logaritmo de la vida, se expresa en órdenes logarítmicos. La relación entre *Log Life* y *Log Damage* puede ser expresada como ($Log Life = - Log Damage$).

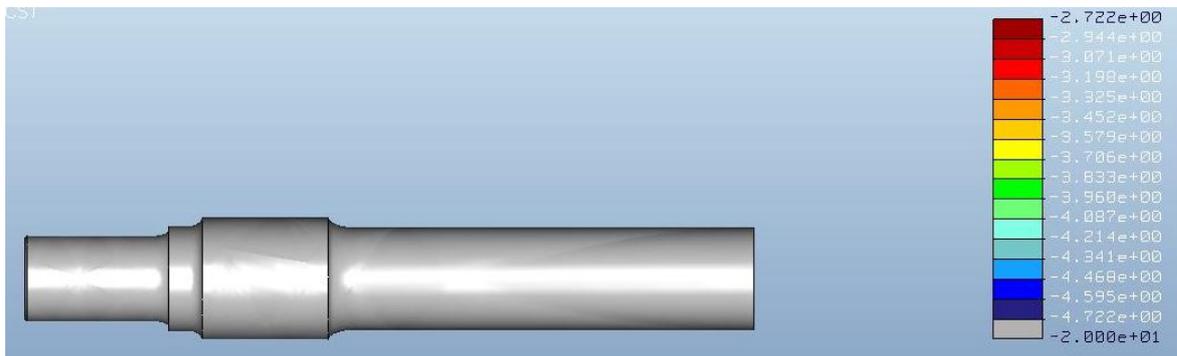


Ilustración 14. 27 Log damage eje con fisura cúbica nº2

Log Life (Logaritmo de la vida):

El número estimado de ciclos hasta que el modelo parte. La relación entre *Log Life* y *Log Damage* puede ser expresada como ($Log Life = - Log Damage$).

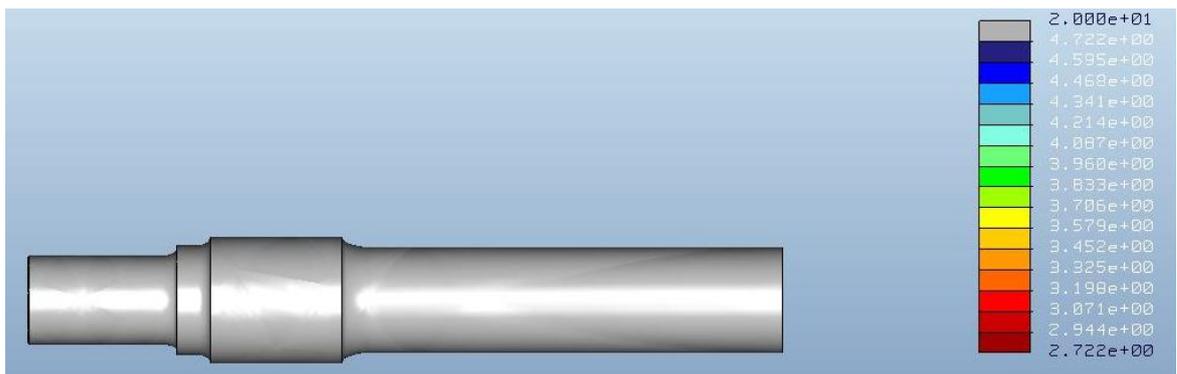


Ilustración 14. 28 Log life eje con fisura cúbica nº2

Como se puede observar el número de ciclos es superior a 10^7 en todo el eje. En la zona de las **fisuras cúbicas** realizadas, la vida deseada también es superior a 10^7 ciclos, por lo que los ejes con las fisuras cúbicas mencionadas cumplen la norma EN 1326.



Confidence of life (confianza en la vida):

Confidence of life representa la proporción entre la vida calculada y la vida de diseño objetivo.

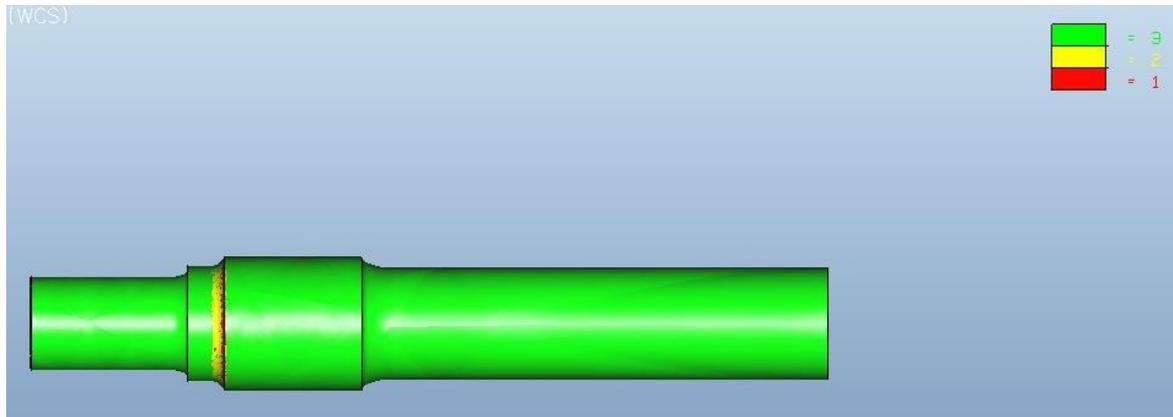


Ilustración 14. 29 *Confidence of life* eje fisura cúbica n°2

Factor of safety (factor de seguridad):

Representa el factor de seguridad permisible sobre la carga de entrada. Cuando la vida a fatiga calculada para el modelo es mayor que la vida de diseño objetivo el software proporciona un cálculo para determinar un factor de seguridad permisible sobre la carga de entrada. Esto representa el grado según el cual la amplitud de la carga puede ser aumentada sin comprometer la vida de diseño objetivo.



Ilustración 14. 30 *Factor of safety* eje fisura cúbica n°2



14.2.3. Eje con fisura cúbica nº 3

Este análisis del eje a fatiga se ha realizado con una **fisura cúbica** de dimensiones **5x5x5 mm³**, ubicada a **15 mm** de la sección crítica número III. Los datos obtenidos se muestran en las siguientes imágenes.

Log Damage (Logaritmo del daño):

La proporción entre ciclos de fatiga acumulados y el número total de ciclos a fallo. Un valor mayor que la unidad indica fallo. Al igual que el logaritmo de la vida, se expresa en órdenes logarítmicos. La relación entre *Log Life* y *Log Damage* puede ser expresada como ($Log Life = - Log Damage$).

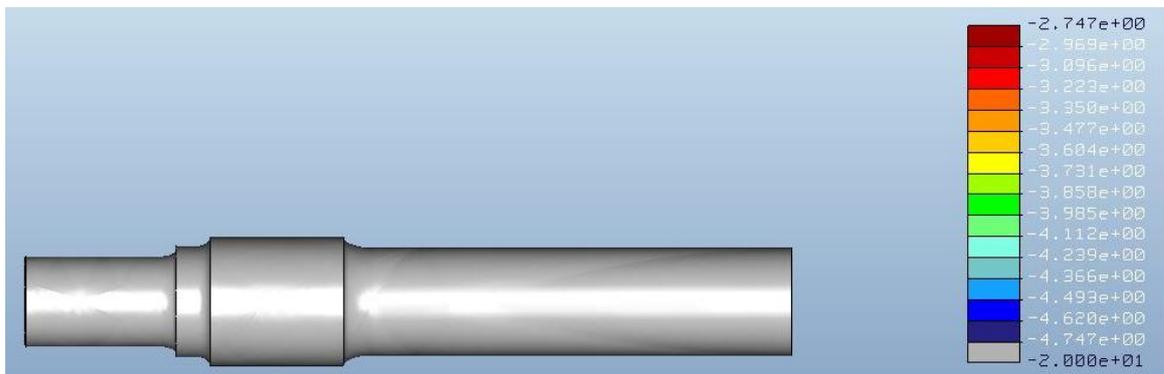


Ilustración 14. 31 Log damage eje con fisura cúbica nº3

Log Life (Logaritmo de la vida):

El número estimado de ciclos hasta que el modelo parte. La relación entre *Log Life* y *Log Damage* puede ser expresada como ($Log Life = - Log Damage$).

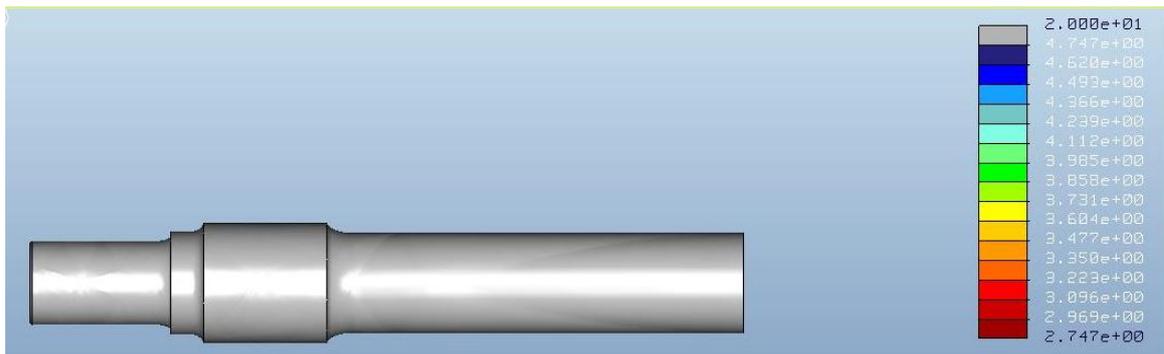


Ilustración 14. 32 Log life eje con fisura cúbica nº3

Como se puede observar el número de ciclos es superior a 10^7 en todo el eje. En la zona de las **fisuras cúbicas** realizadas, la vida deseada también es superior a 10^7 ciclos, por lo que los ejes con las fisuras cúbicas mencionadas cumplen la norma EN 1326.



Confidence of life (confianza en la vida):

Confidence of life representa la proporción entre la vida calculada y la vida de diseño objetivo.



Ilustración 14. 33 *Confidence of life* eje fisura cúbica nº3

Factor of safety (factor de seguridad):

Representa el factor de seguridad permisible sobre la carga de entrada. Cuando la vida a fatiga calculada para el modelo es mayor que la vida de diseño objetivo el software proporciona un cálculo para determinar un factor de seguridad permisible sobre la carga de entrada. Esto representa el grado según el cual la amplitud de la carga puede ser aumentada sin comprometer la vida de diseño objetivo.



Ilustración 14. 34 *Factor of safety* eje fisura cúbica nº3



14.2.4. Eje con fisura cúbica n° 4

Este análisis del eje a fatiga se ha realizado con una **fisura cúbica** de dimensiones **5x5x5 mm³**, ubicada a **20 mm** de la sección crítica número III. Los datos obtenidos se muestran en las siguientes imágenes.

Log Damage (Logaritmo del daño):

La proporción entre ciclos de fatiga acumulados y el número total de ciclos a fallo. Un valor mayor que la unidad indica fallo. Al igual que el logaritmo de la vida, se expresa en órdenes logarítmicos. La relación entre *Log Life* y *Log Damage* puede ser expresada como ($Log Life = - Log Damage$).

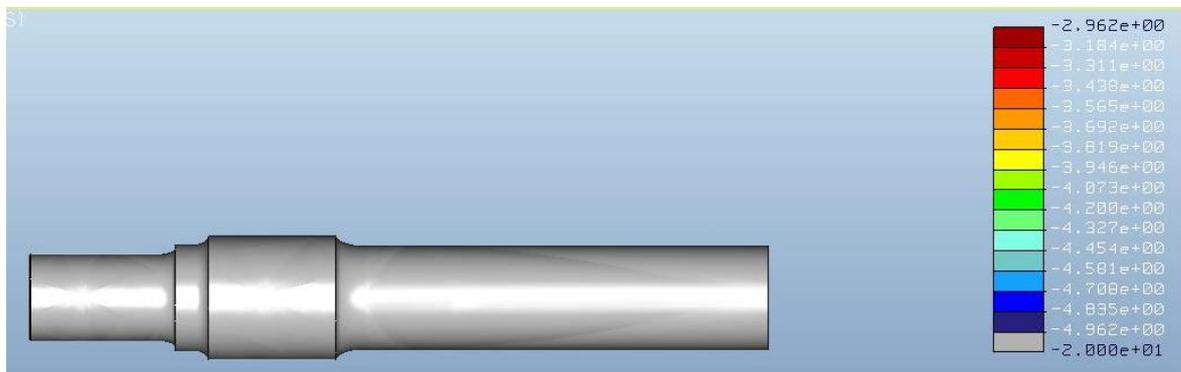


Ilustración 14. 35 Log damage eje con fisura cúbica n°4

Log Life (Logaritmo de la vida):

El número estimado de ciclos hasta que el modelo parte. La relación entre *Log Life* y *Log Damage* puede ser expresada como ($Log Life = - Log Damage$).

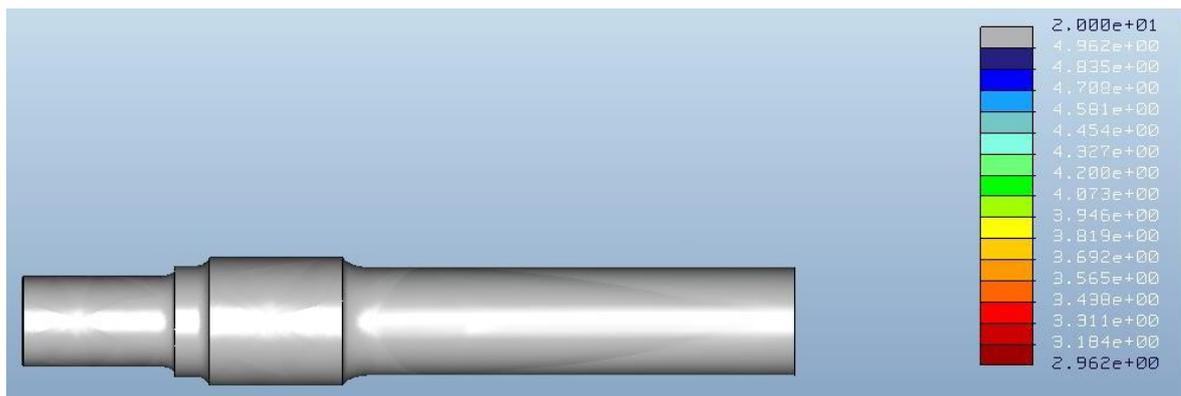


Ilustración 14. 36 Log life eje con fisura cúbica n°4

Como se puede observar el número de ciclos es superior a 10^7 en todo el eje. En la zona de las **fisuras cúbicas** realizadas, la vida deseada también es superior a 10^7 ciclos, por lo que los ejes con las fisuras cúbicas mencionadas cumplen la norma EN 1326.



Confidence of life (confianza en la vida):

Confidence of life representa la proporción entre la vida calculada y la vida de diseño objetivo.

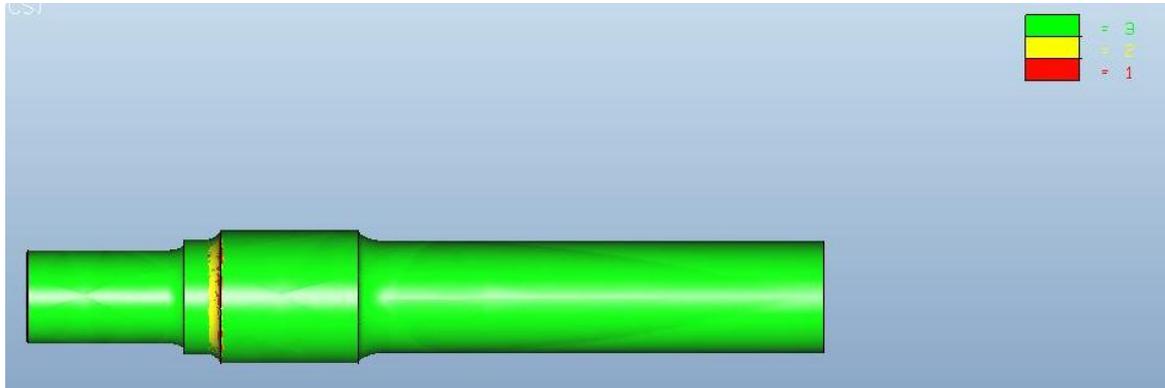


Ilustración 14. 37 *Confidence of life* eje fisura cúbica n°4

Factor of safety (factor de seguridad):

Representa el factor de seguridad permisible sobre la carga de entrada. Cuando la vida a fatiga calculada para el modelo es mayor que la vida de diseño objetivo el software proporciona un cálculo para determinar un factor de seguridad permisible sobre la carga de entrada. Esto representa el grado según el cual la amplitud de la carga puede ser aumentada sin comprometer la vida de diseño objetivo.

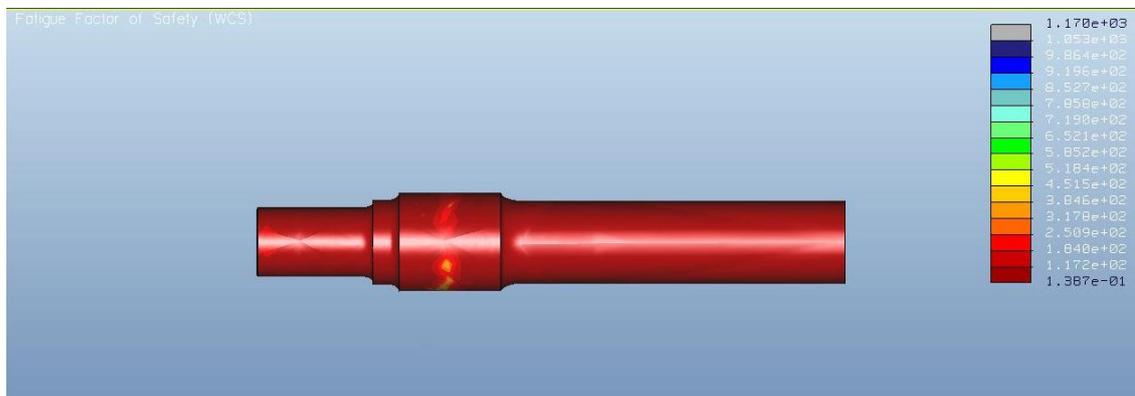


Ilustración 14. 38 *Factor of safety* eje fisura cúbica n°4



14.2.5. Eje con fisura cúbica nº 5

Este análisis del eje a fatiga se ha realizado con una **fisura cúbica** de dimensiones **5x5x5 mm³**, ubicada a **25 mm** de la sección crítica número III. Los datos obtenidos se muestran en las siguientes imágenes.

Log Damage (Logaritmo del daño):

La proporción entre ciclos de fatiga acumulados y el número total de ciclos a fallo. Un valor mayor que la unidad indica fallo. Al igual que el logaritmo de la vida, se expresa en órdenes logarítmicos. La relación entre *Log Life* y *Log Damage* puede ser expresada como ($Log Life = - Log Damage$).

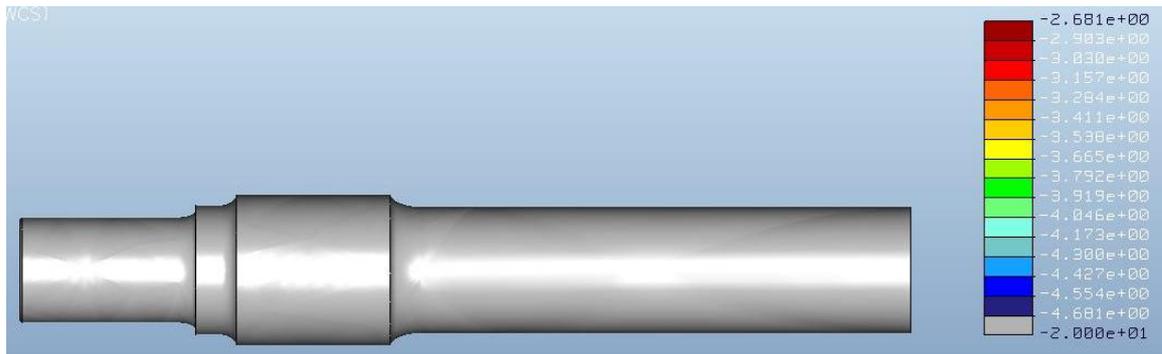


Ilustración 14. 39 Log damage eje con fisura cúbica nº5

Log Life (Logaritmo de la vida):

El número estimado de ciclos hasta que el modelo parte. La relación entre *Log Life* y *Log Damage* puede ser expresada como ($Log Life = - Log Damage$).

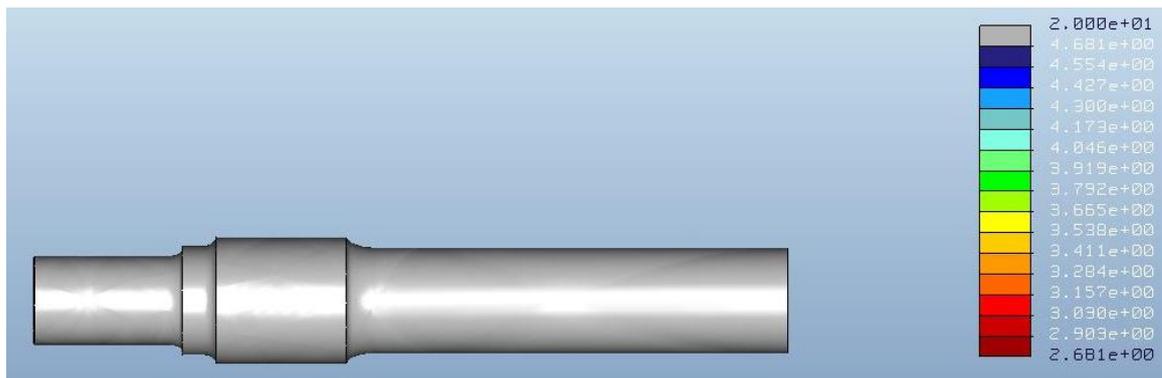


Ilustración 14. 40 Log life eje con fisura cúbica nº5

Como se puede observar el número de ciclos es superior a 10^7 en todo el eje. En la zona de las **fisuras cúbicas** realizadas, la vida deseada también es superior a 10^7 ciclos, por lo que los ejes con las fisuras cúbicas mencionadas cumplen la norma EN 1326.



Confidence of life (confianza en la vida):

Confidence of life representa la proporción entre la vida calculada y la vida de diseño objetivo.

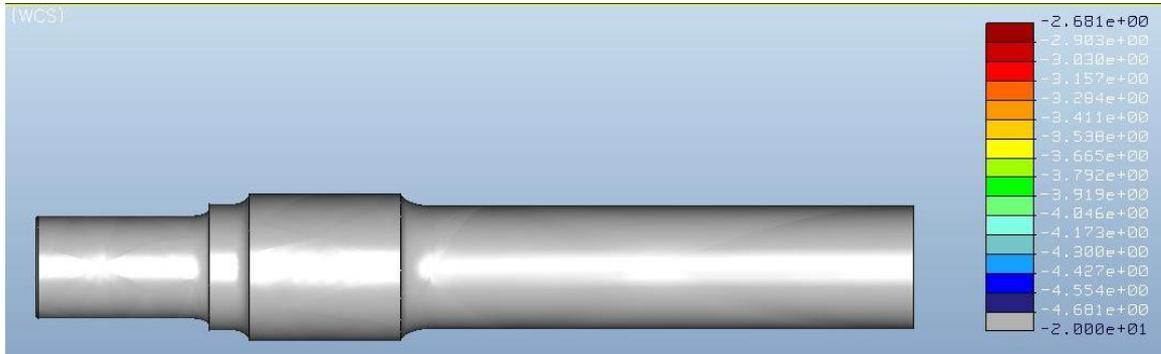


Ilustración 14. 41 *Confidence of life* eje fisura cúbica n°5

Factor of safety (factor de seguridad):

Representa el factor de seguridad permisible sobre la carga de entrada. Cuando la vida a fatiga calculada para el modelo es mayor que la vida de diseño objetivo el software proporciona un cálculo para determinar un factor de seguridad permisible sobre la carga de entrada. Esto representa el grado según el cual la amplitud de la carga puede ser aumentada sin comprometer la vida de diseño objetivo.

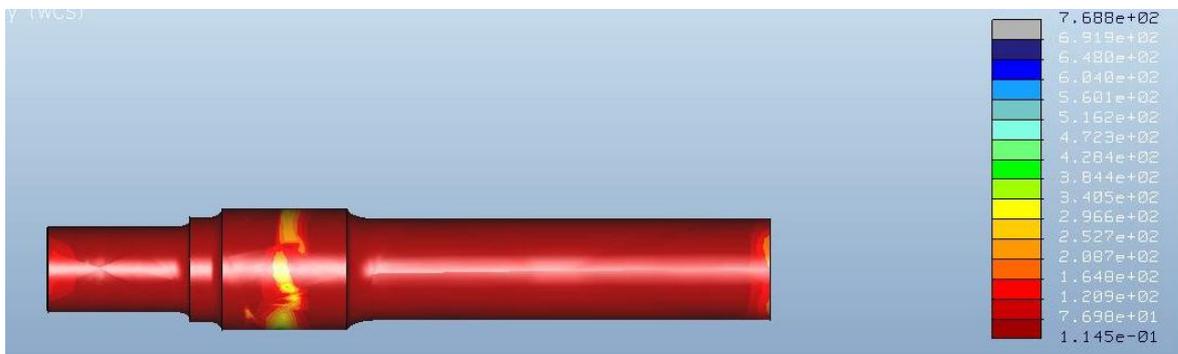


Ilustración 14. 42 *Factor of safety* eje fisura cúbica n°5



14.2.6. Eje con fisura cúbica nº 6

Este análisis del eje a fatiga se ha realizado con una **fisura cúbica** de dimensiones **5x5x5 mm³**, ubicada a **30 mm** de la sección crítica número III. Los datos obtenidos se muestran en las siguientes imágenes.

Log Damage (Logaritmo del daño):

La proporción entre ciclos de fatiga acumulados y el número total de ciclos a fallo. Un valor mayor que la unidad indica fallo. Al igual que el logaritmo de la vida, se expresa en órdenes logarítmicos. La relación entre *Log Life* y *Log Damage* puede ser expresada como ($Log Life = - Log Damage$).

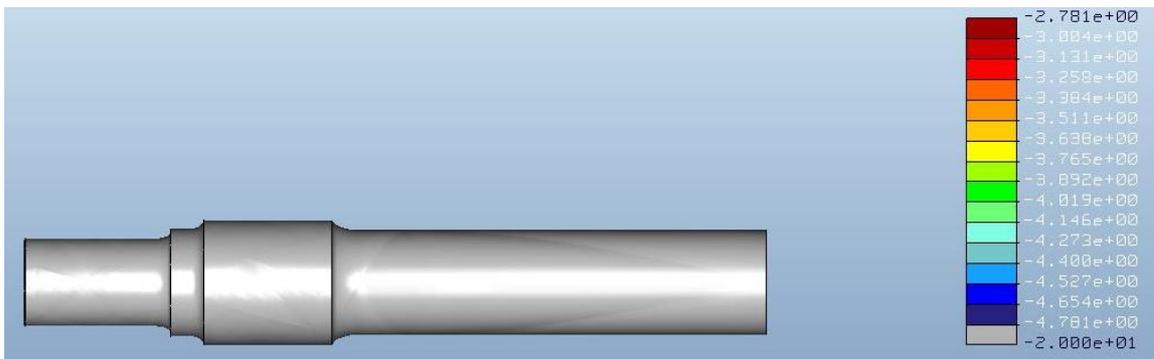


Ilustración 14. 43 Log damage eje con fisura cúbica nº6

Log Life (Logaritmo de la vida):

El número estimado de ciclos hasta que el modelo parte. La relación entre *Log Life* y *Log Damage* puede ser expresada como ($Log Life = - Log Damage$).

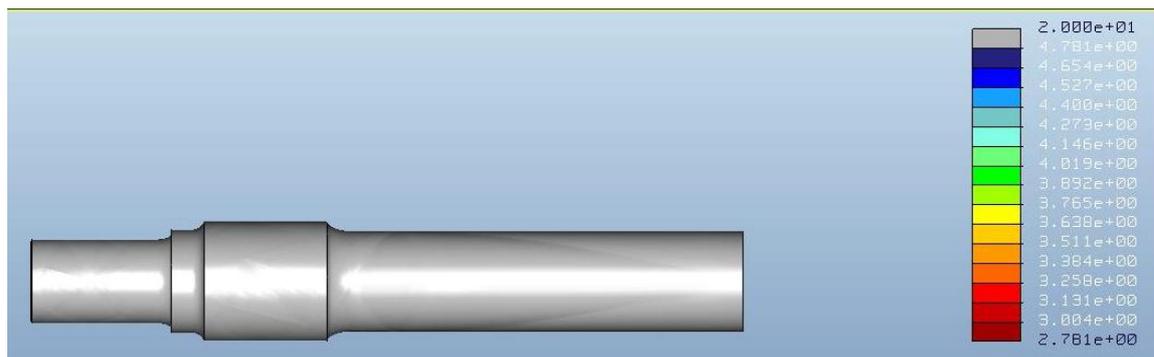


Ilustración 14. 44 Log life eje con fisura cúbica nº6

Como se puede observar el número de ciclos es superior a 10^7 en todo el eje. En la zona de las **fisuras cúbicas** realizadas, la vida deseada también es superior a 10^7 ciclos, por lo que los ejes con las fisuras cúbicas mencionadas cumplen la norma EN 1326.



Confidence of life (confianza en la vida):

Confidence of life representa la proporción entre la vida calculada y la vida de diseño objetivo.

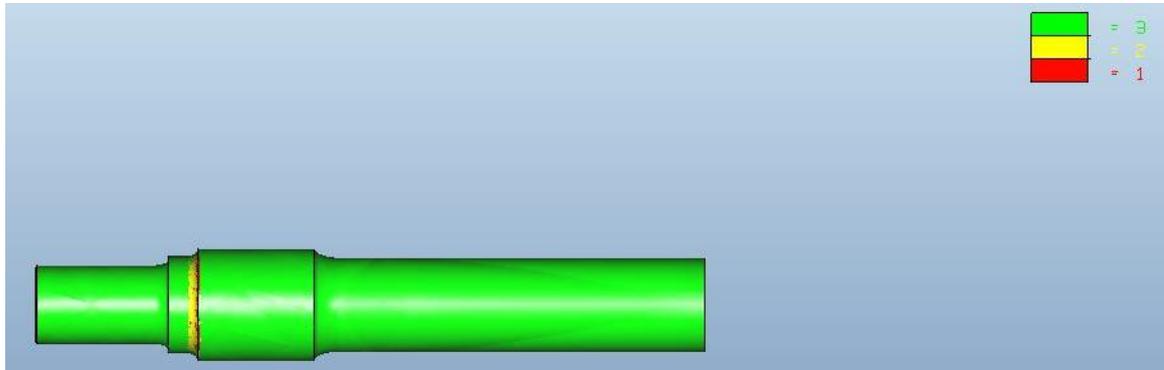


Ilustración 14. 45 *Confidence of life* eje fisura cúbica n°6

Factor of safety (factor de seguridad):

Representa el factor de seguridad permisible sobre la carga de entrada. Cuando la vida a fatiga calculada para el modelo es mayor que la vida de diseño objetivo el software proporciona un cálculo para determinar un factor de seguridad permisible sobre la carga de entrada. Esto representa el grado según el cual la amplitud de la carga puede ser aumentada sin comprometer la vida de diseño objetivo.

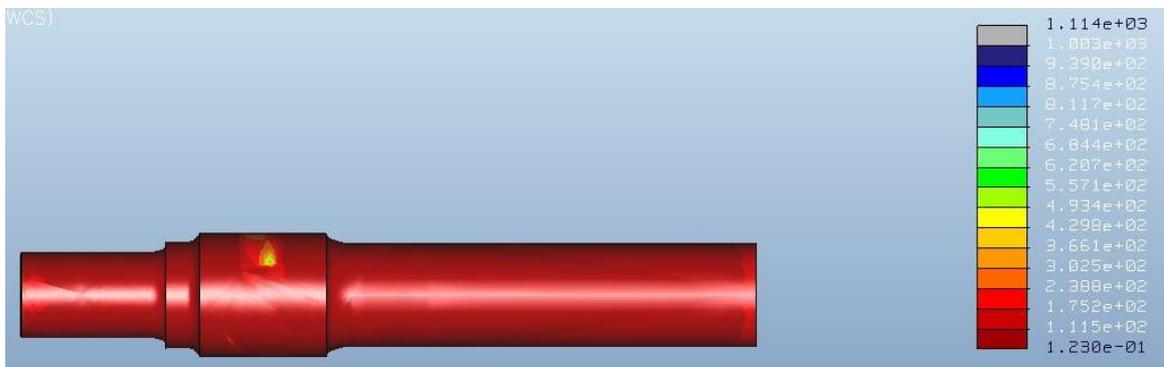


Ilustración 14. 46 *Factor of safety* eje fisura cúbica n°6



14.2.7. Eje con fisura cúbica nº 7

Este análisis del eje a fatiga se ha realizado con una **fisura cúbica** de dimensiones **5x5x5 mm³**, ubicada a **35 mm** de la sección crítica número III. Los datos obtenidos se muestran en las siguientes imágenes.

Log Damage (Logaritmo del daño):

La proporción entre ciclos de fatiga acumulados y el número total de ciclos a fallo. Un valor mayor que la unidad indica fallo. Al igual que el logaritmo de la vida, se expresa en órdenes logarítmicos. La relación entre *Log Life* y *Log Damage* puede ser expresada como ($Log Life = - Log Damage$).

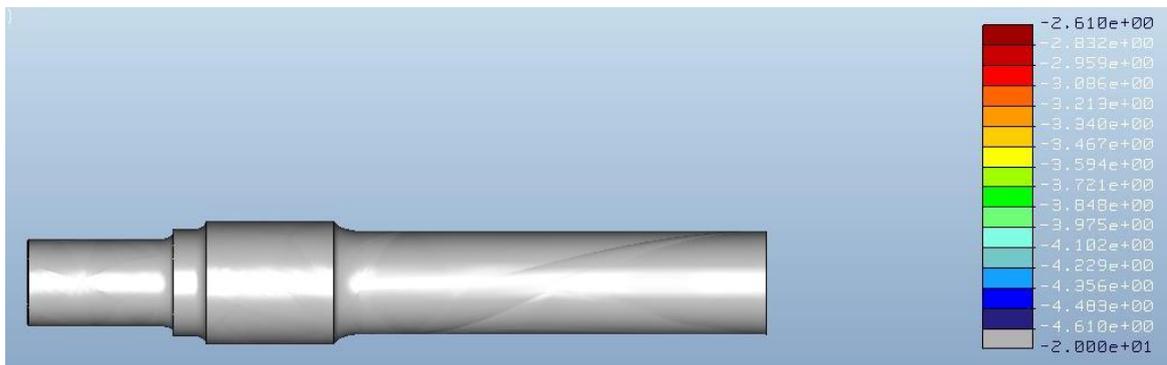


Ilustración 14. 47 Log damage eje con fisura cúbica nº7

Log Life (Logaritmo de la vida):

El número estimado de ciclos hasta que el modelo parte. La relación entre *Log Life* y *Log Damage* puede ser expresada como ($Log Life = - Log Damage$).

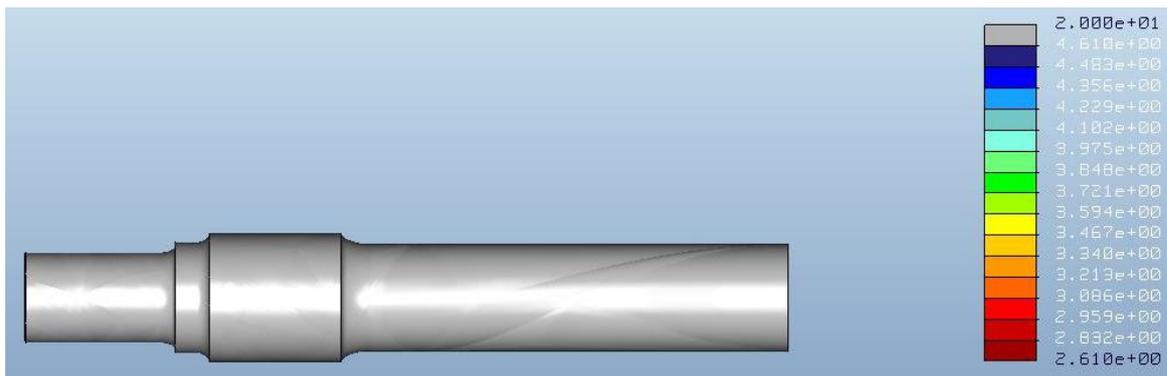


Ilustración 14. 48 Log life eje con fisura cúbica nº7

Como se puede observar el número de ciclos es superior a 10^7 en todo el eje. En la zona de las **fisuras cúbicas** realizadas, la vida deseada también es superior a 10^7 ciclos, por lo que los ejes con las fisuras cúbicas mencionadas cumplen la norma EN 1326.



Confidence of life (confianza en la vida):

Confidence of life representa la proporción entre la vida calculada y la vida de diseño objetivo.

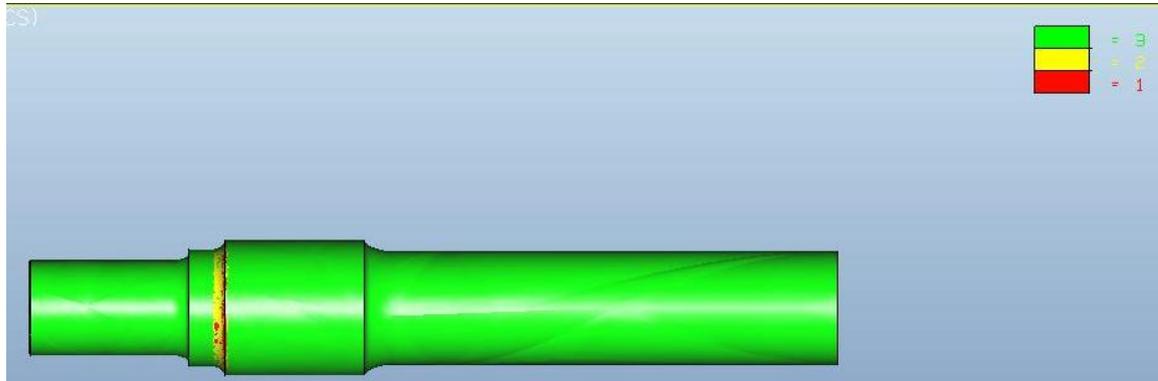


Ilustración 14. 49 *Confidence of life* eje fisura cúbica nº7

Factor of safety (factor de seguridad):

Representa el factor de seguridad permisible sobre la carga de entrada. Cuando la vida a fatiga calculada para el modelo es mayor que la vida de diseño objetivo el software proporciona un cálculo para determinar un factor de seguridad permisible sobre la carga de entrada. Esto representa el grado según el cual la amplitud de la carga puede ser aumentada sin comprometer la vida de diseño objetivo.

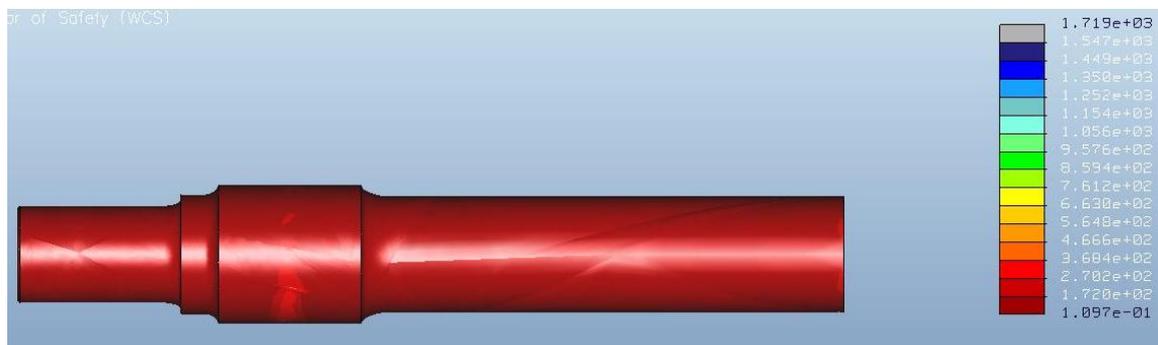


Ilustración 14. 50 *Factor of safety* eje fisura cúbica nº7



14.2.8. Eje con fisura cúbica nº 8

Este análisis del eje a fatiga se ha realizado con una **fisura cúbica** de dimensiones **5x5x5 mm³**, ubicada a **40 mm** de la sección crítica número III. Los datos obtenidos se muestran en las siguientes imágenes.

Log Damage (Logaritmo del daño):

La proporción entre ciclos de fatiga acumulados y el número total de ciclos a fallo. Un valor mayor que la unidad indica fallo. Al igual que el logaritmo de la vida, se expresa en órdenes logarítmicos. La relación entre *Log Life* y *Log Damage* puede ser expresada como ($Log Life = - Log Damage$).



Ilustración 14. 51 Log damage eje con fisura cúbica nº8

Log Life (Logaritmo de la vida):

El número estimado de ciclos hasta que el modelo parte. La relación entre *Log Life* y *Log Damage* puede ser expresada como ($Log Life = - Log Damage$).

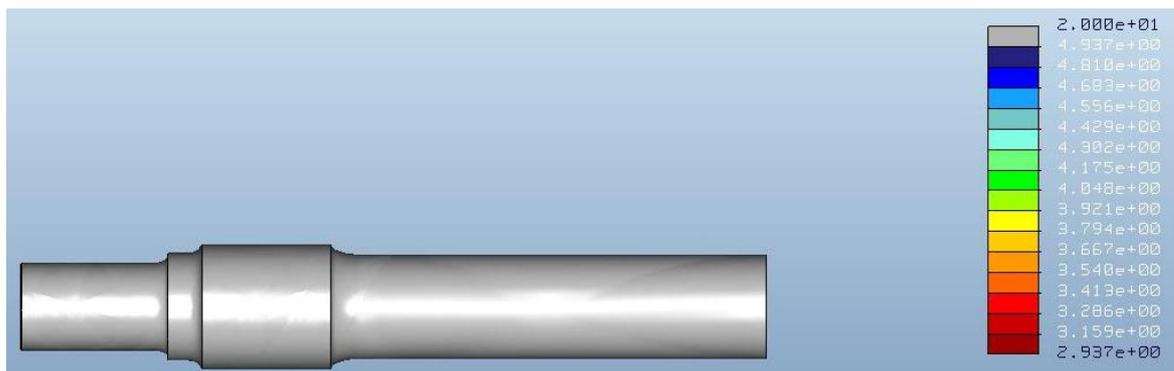


Ilustración 14. 52 Log life eje con fisura cúbica nº8

Como se puede observar el número de ciclos es superior a 10^7 en todo el eje. En la zona de las **fisuras cúbicas** realizadas, la vida deseada también es superior a 10^7 ciclos, por lo que los ejes con las fisuras cúbicas mencionadas cumplen la norma EN 1326.



Confidence of life (confianza en la vida):

Confidence of life representa la proporción entre la vida calculada y la vida de diseño objetivo.



Ilustración 14. 53 *Confidence of life* eje fisura cúbica n°8

Factor of safety (factor de seguridad):

Representa el factor de seguridad permisible sobre la carga de entrada. Cuando la vida a fatiga calculada para el modelo es mayor que la vida de diseño objetivo el software proporciona un cálculo para determinar un factor de seguridad permisible sobre la carga de entrada. Esto representa el grado según el cual la amplitud de la carga puede ser aumentada sin comprometer la vida de diseño objetivo.

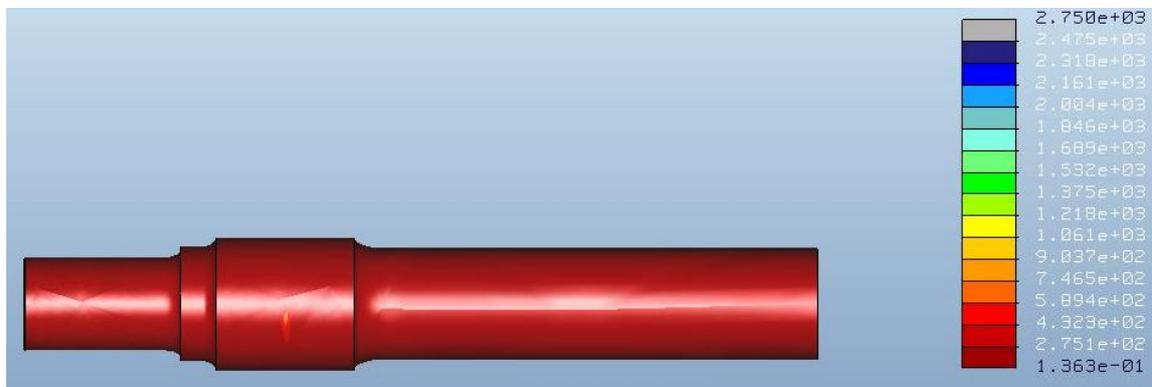


Ilustración 14. 54 *Factor of safety* eje fisura cúbica n°8



14.2.9. Eje con fisura cúbica nº 9

Este análisis del eje a fatiga se ha realizado con una **fisura cúbica** de dimensiones **5x5x5 mm³**, ubicada a **50 mm** de la sección crítica número III. Los datos obtenidos se muestran en las siguientes imágenes.

Log Damage (Logaritmo del daño):

La proporción entre ciclos de fatiga acumulados y el número total de ciclos a fallo. Un valor mayor que la unidad indica fallo. Al igual que el logaritmo de la vida, se expresa en órdenes logarítmicos. La relación entre *Log Life* y *Log Damage* puede ser expresada como ($Log Life = - Log Damage$).

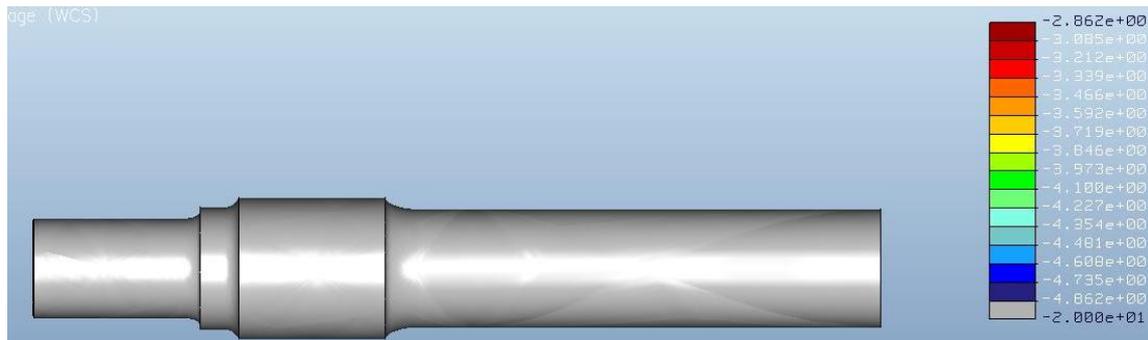


Ilustración 14. 55 Log damage eje con fisura cúbica nº9

Log Life (Logaritmo de la vida):

El número estimado de ciclos hasta que el modelo parte. La relación entre *Log Life* y *Log Damage* puede ser expresada como ($Log Life = - Log Damage$).

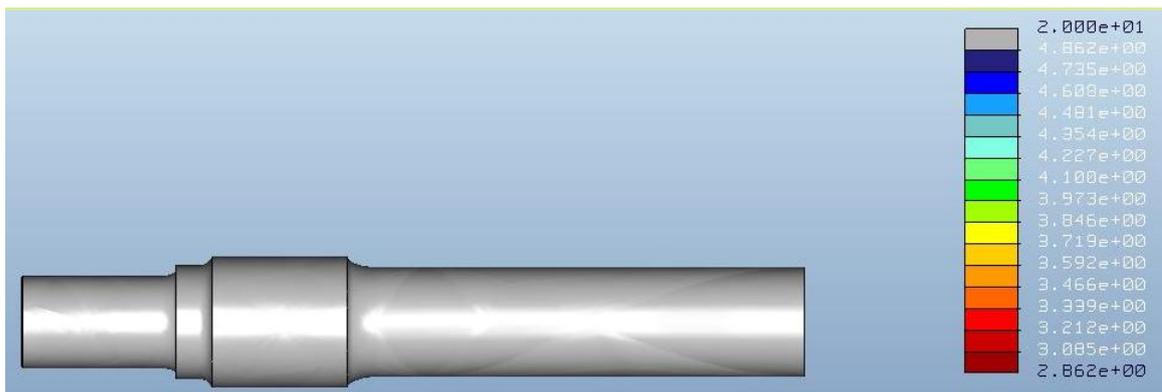


Ilustración 14. 56 Log life eje con fisura cúbica nº9

Como se puede observar el número de ciclos es superior a 10^7 en todo el eje. En la zona de las **fisuras cúbicas** realizadas, la vida deseada también es superior a 10^7 ciclos, por lo que los ejes con las fisuras cúbicas mencionadas cumplen la norma EN 1326.



Confidence of life (confianza en la vida):

Confidence of life representa la proporción entre la vida calculada y la vida de diseño objetivo.



Ilustración 14. 57 *Confidence of life* eje fisura cúbica n°9

Factor of safety (factor de seguridad):

Representa el factor de seguridad permisible sobre la carga de entrada. Cuando la vida a fatiga calculada para el modelo es mayor que la vida de diseño objetivo el software proporciona un cálculo para determinar un factor de seguridad permisible sobre la carga de entrada. Esto representa el grado según el cual la amplitud de la carga puede ser aumentada sin comprometer la vida de diseño objetivo.

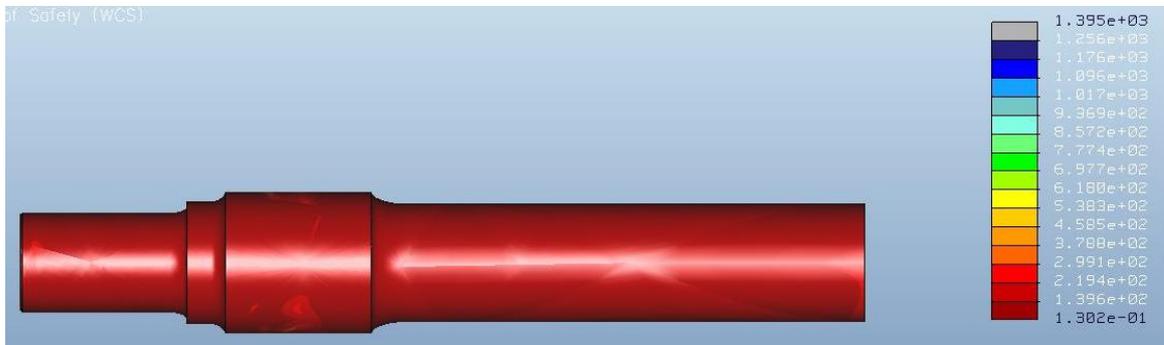


Ilustración 14. 58 *Factor of safety* eje fisura cúbica n°9



14.2.10. Eje con fisura cúbica n° 10

Este análisis del eje a fatiga se ha realizado con una **fisura cúbica** de dimensiones **5x5x5 mm³**, ubicada a **60 mm** de la sección crítica número III. Los datos obtenidos se muestran en las siguientes imágenes.

Log Damage (Logaritmo del daño):

La proporción entre ciclos de fatiga acumulados y el número total de ciclos a fallo. Un valor mayor que la unidad indica fallo. Al igual que el logaritmo de la vida, se expresa en órdenes logarítmicos. La relación entre *Log Life* y *Log Damage* puede ser expresada como ($Log Life = - Log Damage$).



Ilustración 14. 59 Log damage eje con fisura cúbica n°10

Log Life (Logaritmo de la vida):

El número estimado de ciclos hasta que el modelo parte. La relación entre *Log Life* y *Log Damage* puede ser expresada como ($Log Life = - Log Damage$).

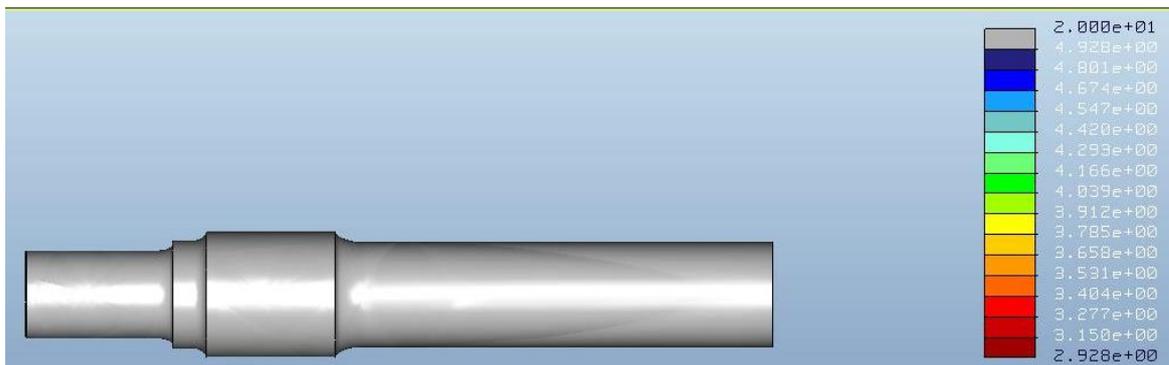


Ilustración 14. 60 Log life eje con fisura cúbica n°10

Como se puede observar el número de ciclos es superior a 10^7 en todo el eje. En la zona de las **fisuras cúbicas** realizadas, la vida deseada también es superior a 10^7 ciclos, por lo que los ejes con las fisuras cúbicas mencionadas cumplen la norma EN 1326.



Confidence of life (confianza en la vida):

Confidence of life representa la proporción entre la vida calculada y la vida de diseño objetivo.

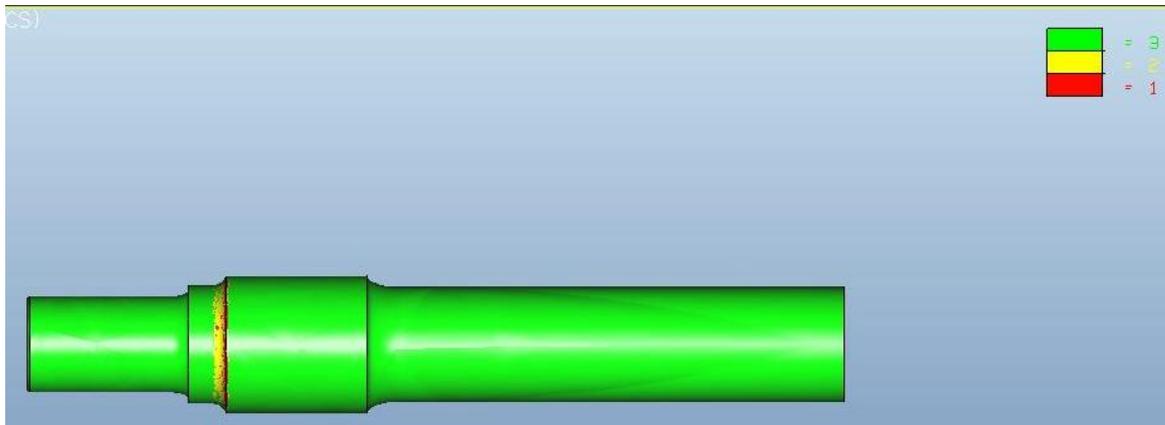


Ilustración 14. 61 *Confidence of life* eje fisura cúbica n°10

Factor of safety (factor de seguridad):

Representa el factor de seguridad permisible sobre la carga de entrada. Cuando la vida a fatiga calculada para el modelo es mayor que la vida de diseño objetivo el software proporciona un cálculo para determinar un factor de seguridad permisible sobre la carga de entrada. Esto representa el grado según el cual la amplitud de la carga puede ser aumentada sin comprometer la vida de diseño objetivo.



Ilustración 14. 62 *Factor of safety* eje fisura cúbica n°10



14.2.11. Eje con fisura cúbica n° 11

Este análisis del eje a fatiga se ha realizado con una **fisura cúbica** de dimensiones **5x5x5 mm³**, ubicada a **65 mm** de la sección crítica número III. Los datos obtenidos se muestran en las siguientes imágenes.

Log Damage (Logaritmo del daño):

La proporción entre ciclos de fatiga acumulados y el número total de ciclos a fallo. Un valor mayor que la unidad indica fallo. Al igual que el logaritmo de la vida, se expresa en órdenes logarítmicos. La relación entre *Log Life* y *Log Damage* puede ser expresada como ($Log Life = - Log Damage$).



Ilustración 14. 63 Log damage eje con fisura cúbica n°11

Log Life (Logaritmo de la vida):

El número estimado de ciclos hasta que el modelo parte. La relación entre *Log Life* y *Log Damage* puede ser expresada como ($Log Life = - Log Damage$).

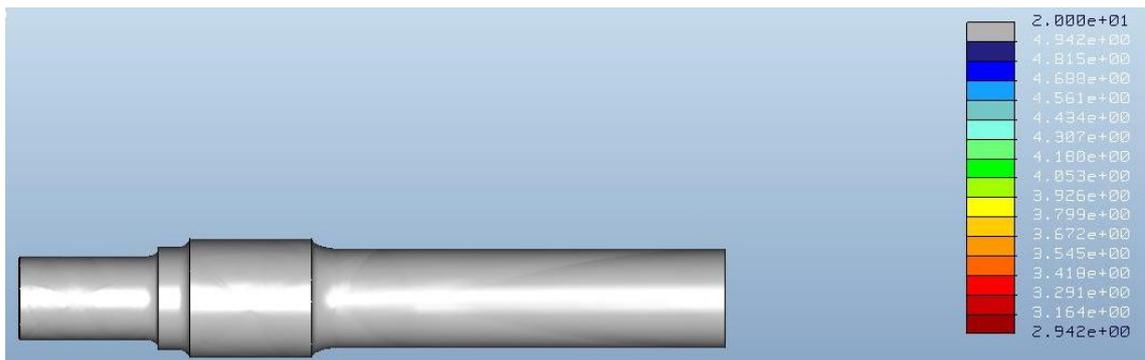


Ilustración 14. 64 Log life eje con fisura cúbica n°11

Como se puede observar el número de ciclos es superior a 10^7 en todo el eje. En la zona de las **fisuras cúbicas** realizadas, la vida deseada también es superior a 10^7 ciclos, por lo que los ejes con las fisuras cúbicas mencionadas cumplen la norma EN 1326.



Confidence of life (confianza en la vida):

Confidence of life representa la proporción entre la vida calculada y la vida de diseño objetivo.

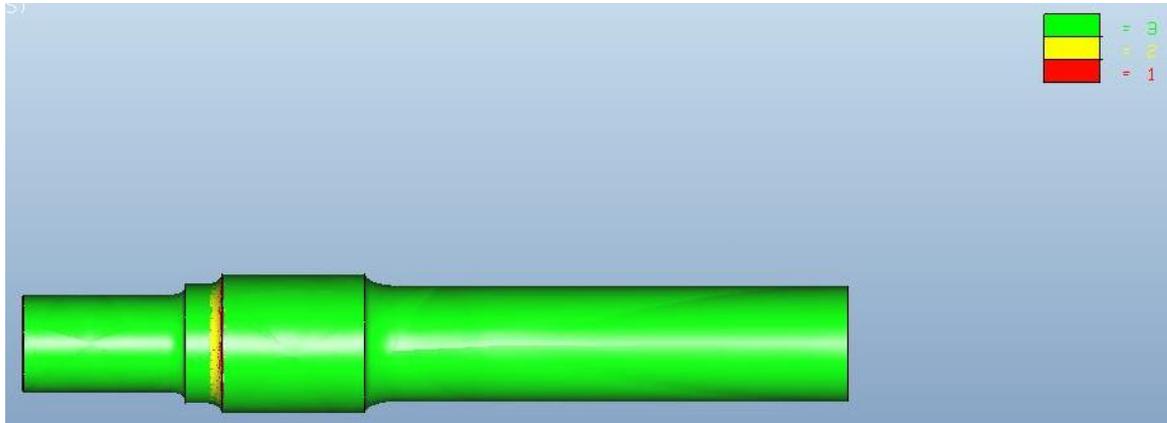


Ilustración 14. 65 *Confidence of life* eje fisura cúbica n°11

Factor of safety (factor de seguridad):

Representa el factor de seguridad permisible sobre la carga de entrada. Cuando la vida a fatiga calculada para el modelo es mayor que la vida de diseño objetivo el software proporciona un cálculo para determinar un factor de seguridad permisible sobre la carga de entrada. Esto representa el grado según el cual la amplitud de la carga puede ser aumentada sin comprometer la vida de diseño objetivo.



Ilustración 14. 66 *Factor of safety* eje fisura cúbica n°11



14.3- RESULTADOS FISURA RADIAL. ANÁLISIS ESTÁTICO

14.3.1. Eje con fisura radial nº 1

Este análisis estático del eje se ha realizado con una **fisura radial** de dimensiones **1x5x5 mm³** (ancho x largo x profundidad), ubicada a **5 mm** de la sección crítica número III. Los datos obtenidos se muestran en las siguientes imágenes.

Desplazamiento:

Los resultados de los desplazamientos registrados en *Mechanica* indican cómo el eje se deforma bajo las condiciones de contorno aplicadas, diferenciándose por colores en función de la cantidad desplazada, tal y como se muestra en la siguiente figura:

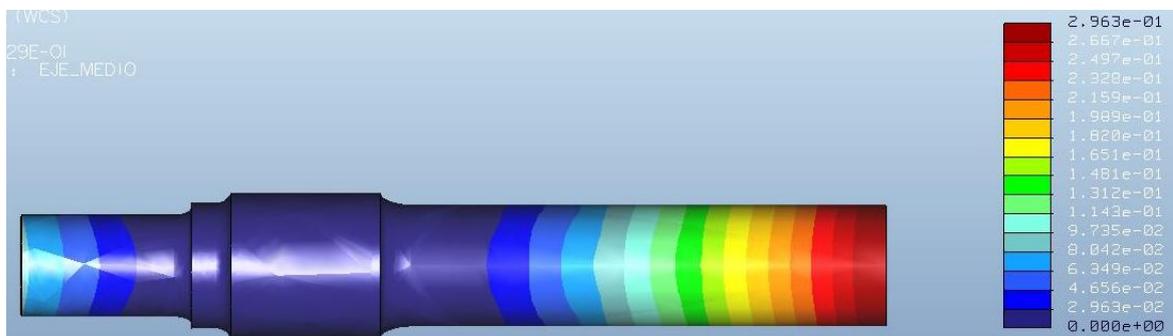


Ilustración 14. 67 Desplazamiento del eje con fisura radial nº1

El desplazamiento máximo, de valor 0,2963 mm, se produce en el punto medio del eje (extremo del eje medio).

Tensión:

La tensión máxima, de valor 897,8 MPa, se produce en la sección crítica II, tal y como se observa en las imágenes anteriores. La tensión máxima en la fisura cúbica es de 29,60 MPa.



Ilustración 14. 68 Tensión del eje con fisura radial nº1



14.3.2. Eje con fisura radial n° 2

Este análisis estático del eje se ha realizado con una **fisura radial** de dimensiones **0,6x3x5 mm³** (ancho x largo x profundidad), ubicada a **11 mm** de la sección crítica número III. Los datos obtenidos se muestran en las siguientes imágenes.

Desplazamiento:

Los resultados de los desplazamientos registrados en *Mechanica* indican cómo el eje se deforma bajo las condiciones de contorno aplicadas, diferenciándose por colores en función de la cantidad desplazada, tal y como se muestra en la siguiente figura:

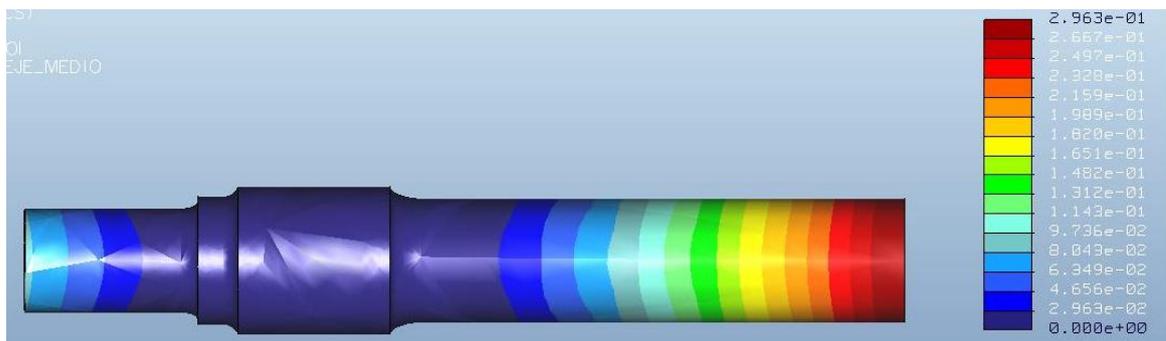


Ilustración 14. 69 Desplazamiento del eje con fisura radial n°2

El desplazamiento máximo, de valor 0,2993 mm, se produce en el punto medio del eje (extremo del eje medio).

Tensión:

La tensión máxima, de valor 667,2 MPa, se produce en la sección crítica II, tal y como se observa en las imágenes anteriores. La tensión máxima en la fisura cúbica es de 26,63 MPa.



Ilustración 14. 70 Tensión del eje con fisura radial n°2

14.3.3. Eje con fisura radial n° 3

Este análisis estático del eje se ha realizado con una **fisura radial** de dimensiones **1x5x5 mm³** (ancho x largo x profundidad), ubicada a **15 mm** de la sección crítica número III. Los datos obtenidos se muestran en las siguientes imágenes.

Desplazamiento:

Los resultados de los desplazamientos registrados en *Mechanica* indican cómo el eje se deforma bajo las condiciones de contorno aplicadas, diferenciándose por colores en función de la cantidad desplazada, tal y como se muestra en la siguiente figura:

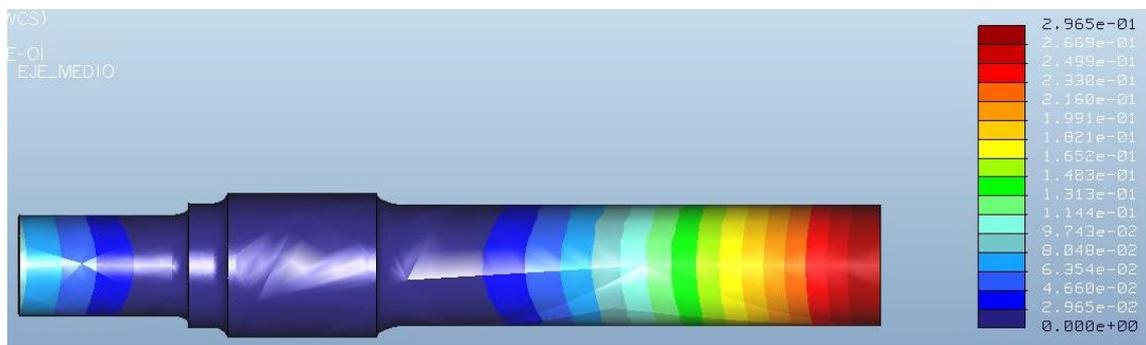


Ilustración 14. 71 Desplazamiento del eje con fisura radial n°3

El desplazamiento máximo, de valor 0,2965 mm, se produce en el punto medio del eje (extremo del eje medio).

Tensión:

La tensión máxima, de valor 758,6 MPa, se produce en la sección crítica II, tal y como se observa en las imágenes anteriores. La tensión máxima en la fisura cúbica es de 17,97 MPa.

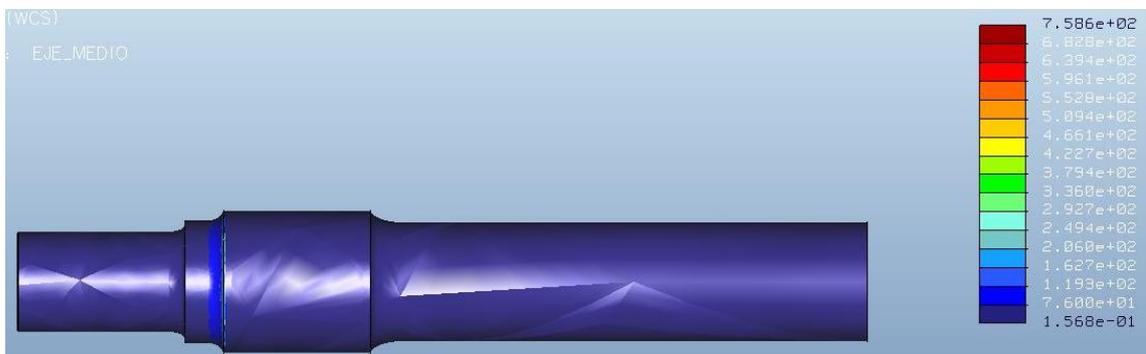


Ilustración 14. 72 Tensión del eje con fisura radial n°3



14.3.4. Eje con fisura radial n° 4

Este análisis estático del eje se ha realizado con una **fisura radial** de dimensiones **1x10x5 mm³** (ancho x largo x profundidad), ubicada a **17,5 mm** de la sección crítica número III. Los datos obtenidos se muestran en las siguientes imágenes.

Desplazamiento:

Los resultados de los desplazamientos registrados en *Mechanica* indican cómo el eje se deforma bajo las condiciones de contorno aplicadas, diferenciándose por colores en función de la cantidad desplazada, tal y como se muestra en la siguiente figura:

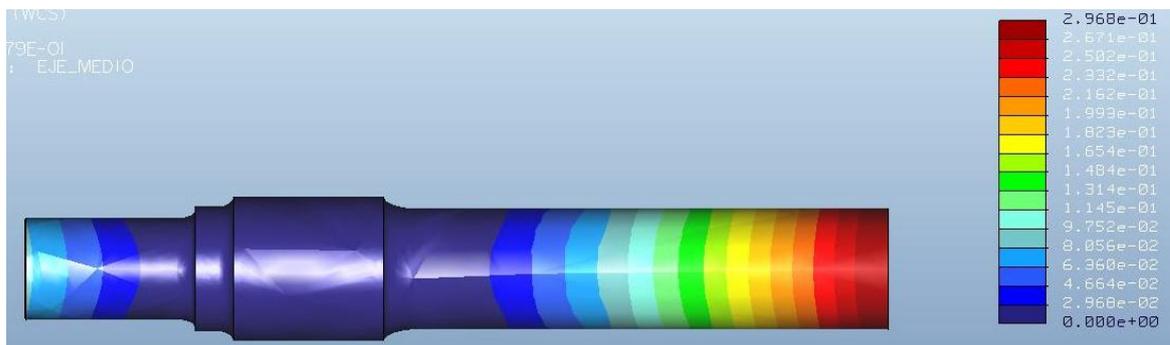


Ilustración 14. 73 Desplazamiento del eje con fisura radial n°4

El desplazamiento máximo, de valor 0,2968 mm, se produce en el punto medio del eje (extremo del eje medio).

Tensión:

La tensión máxima, de valor 661,2 MPa, se produce en la sección crítica II, tal y como se observa en las imágenes anteriores. La tensión máxima en la fisura cúbica es de 15,87 MPa.

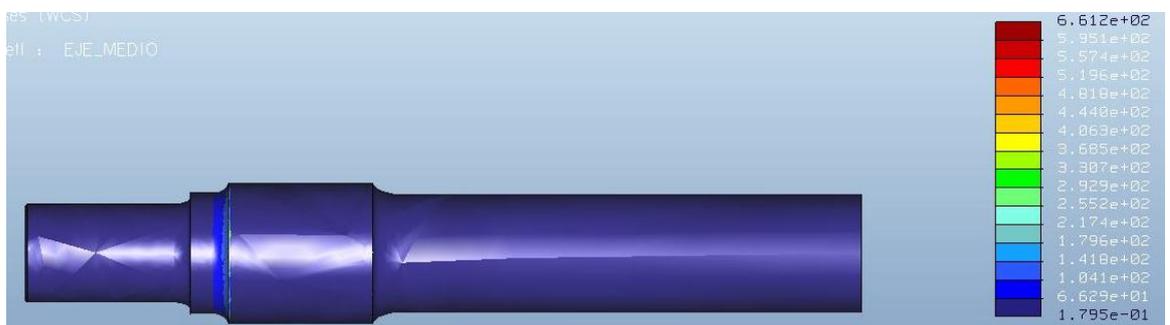


Ilustración 14. 74 Tensión del eje con fisura radial n°4



14.3.5. Eje con fisura radial n° 5

Este análisis estático del eje se ha realizado con una **fisura radial** de dimensiones **0,8x4x5 mm³** (ancho x largo x profundidad), ubicada a **24,5 mm** de la sección crítica número III. Los datos obtenidos se muestran en las siguientes imágenes.

Desplazamiento:

Los resultados de los desplazamientos registrados en *Mechanica* indican cómo el eje se deforma bajo las condiciones de contorno aplicadas, diferenciándose por colores en función de la cantidad desplazada, tal y como se muestra en la siguiente figura:

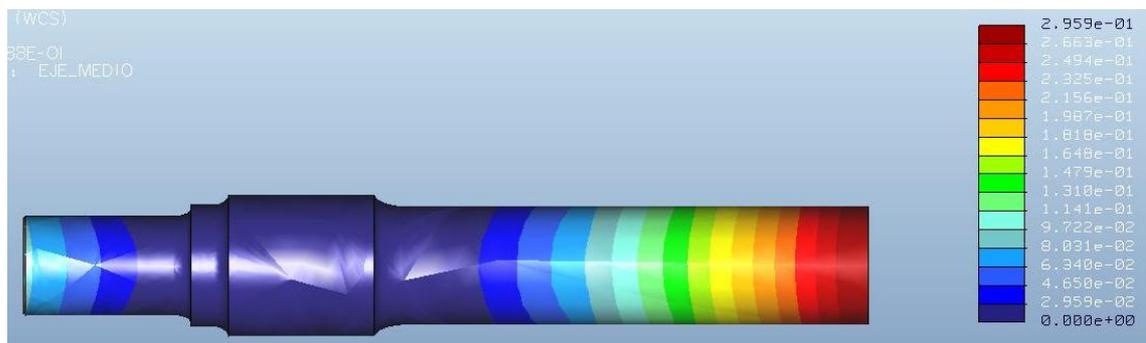


Ilustración 14. 75 Desplazamiento del eje con fisura radial n°5

El desplazamiento máximo, de valor 0,295 mm, se produce en el punto medio del eje (extremo del eje medio).

Tensión:

La tensión máxima, de valor 781,4 MPa, se produce en la sección crítica II, tal y como se observa en las imágenes anteriores. La tensión máxima en la fisura cúbica es de 14,3 MPa.

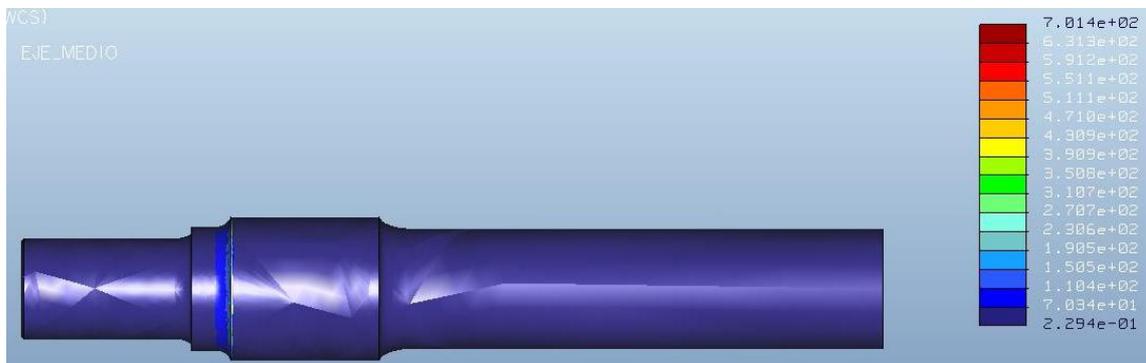


Ilustración 14. 76 Tensión del eje con fisura radial n°5



14.3.6. Eje con fisura radial n° 6

Este análisis estático del eje se ha realizado con una **fisura radial** de dimensiones **1,2x6x5 mm³** (ancho x largo x profundidad), ubicada a **30 mm** de la sección crítica número III. Los datos obtenidos se muestran en las siguientes imágenes.

Desplazamiento:

Los resultados de los desplazamientos registrados en *Mechanica* indican cómo el eje se deforma bajo las condiciones de contorno aplicadas, diferenciándose por colores en función de la cantidad desplazada, tal y como se muestra en la siguiente figura:

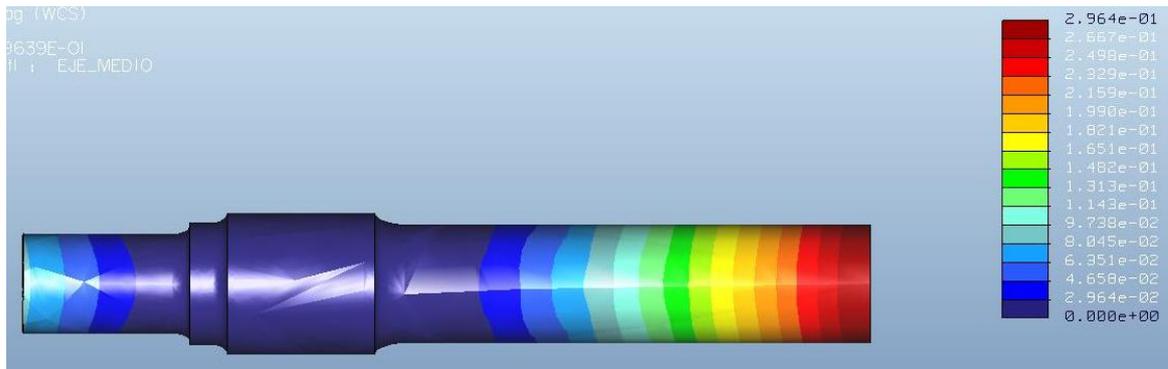


Ilustración 14. 77 Desplazamiento del eje con fisura radial n°6

El desplazamiento máximo, de valor 0,2964 mm, se produce en el punto medio del eje (extremo del eje medio).

Tensión:

La tensión máxima, de valor 757,7 MPa, se produce en la sección crítica II, tal y como se observa en las imágenes anteriores. La tensión máxima en la fisura cúbica es de 10,26 MPa.

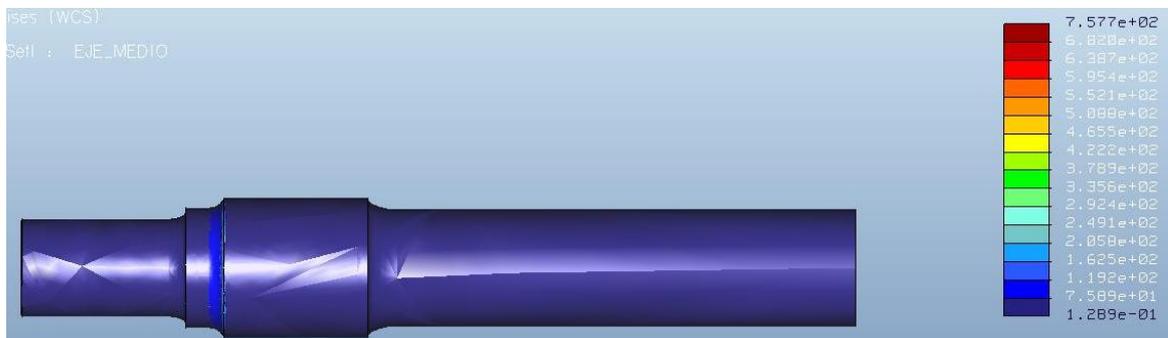


Ilustración 14. 78 Tensión del eje con fisura radial n°6

14.3.7. Eje con fisura radial n° 7

Este análisis estático del eje se ha realizado con una **fisura radial** de dimensiones **0,6x3x5 mm³** (ancho x largo x profundidad), ubicada a **36 mm** de la sección crítica número III. Los datos obtenidos se muestran en las siguientes imágenes.

Desplazamiento:

Los resultados de los desplazamientos registrados en *Mechanica* indican cómo el eje se deforma bajo las condiciones de contorno aplicadas, diferenciándose por colores en función de la cantidad desplazada, tal y como se muestra en la siguiente figura:

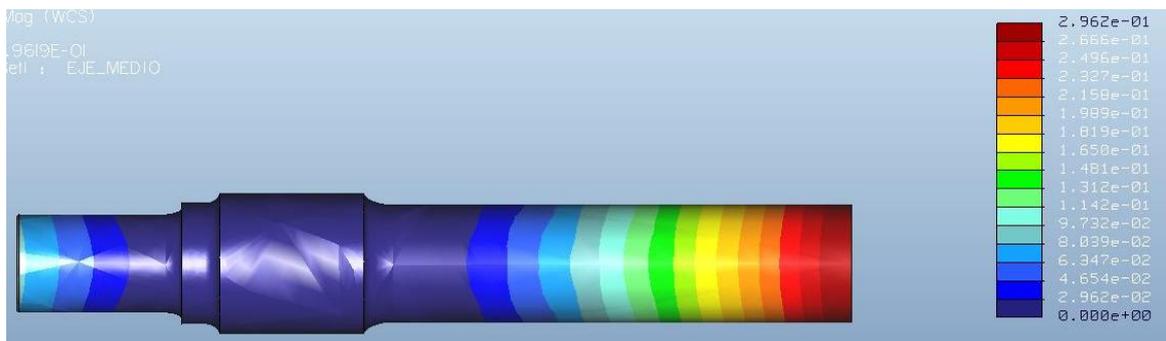


Ilustración 14.79 Desplazamiento del eje con fisura radial n°7

El desplazamiento máximo, de valor 0,2962 mm, se produce en el punto medio del eje (extremo del eje medio).

Tensión:

La tensión máxima, de valor 798,2 MPa, se produce en la sección crítica II, tal y como se observa en las imágenes anteriores. La tensión máxima en la fisura cúbica es de 8,57 MPa.

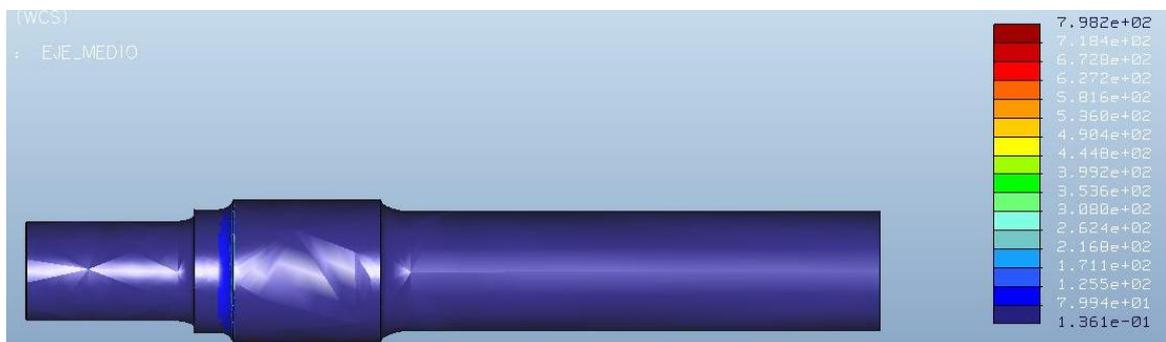


Ilustración 14.80 Tensión del eje con fisura radial n°7



14.3.8. Eje con fisura radial n° 8

Este análisis estático del eje se ha realizado con una **fisura radial** de dimensiones **1x5x5 mm³** (ancho x largo x profundidad), ubicada a **40 mm** de la sección crítica número III. Los datos obtenidos se muestran en las siguientes imágenes.

Desplazamiento:

Los resultados de los desplazamientos registrados en *Mechanica* indican cómo el eje se deforma bajo las condiciones de contorno aplicadas, diferenciándose por colores en función de la cantidad desplazada, tal y como se muestra en la siguiente figura:

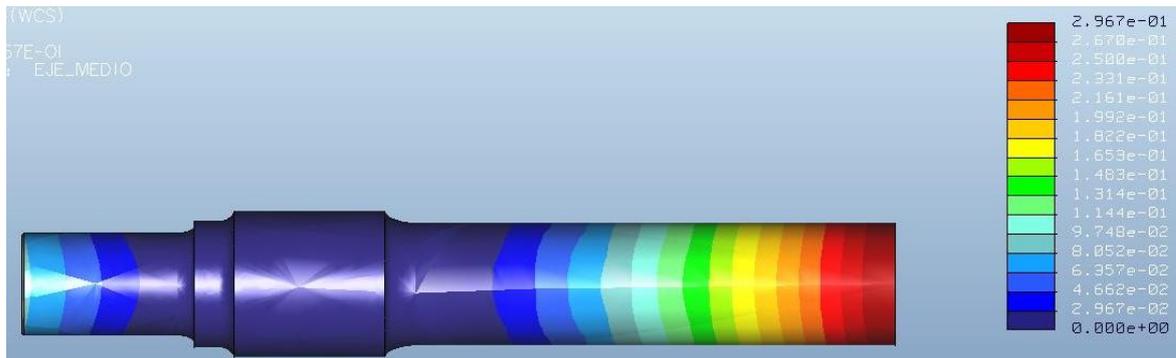


Ilustración 14. 81 Desplazamiento del eje con fisura radial n°8

El desplazamiento máximo, de valor 0,296 mm, se produce en el punto medio del eje (extremo del eje medio).

Tensión:

La tensión máxima, de valor 706,5 MPa, se produce en la sección crítica II, tal y como se observa en las imágenes anteriores. La tensión máxima en la fisura cúbica es de 7,37 MPa.

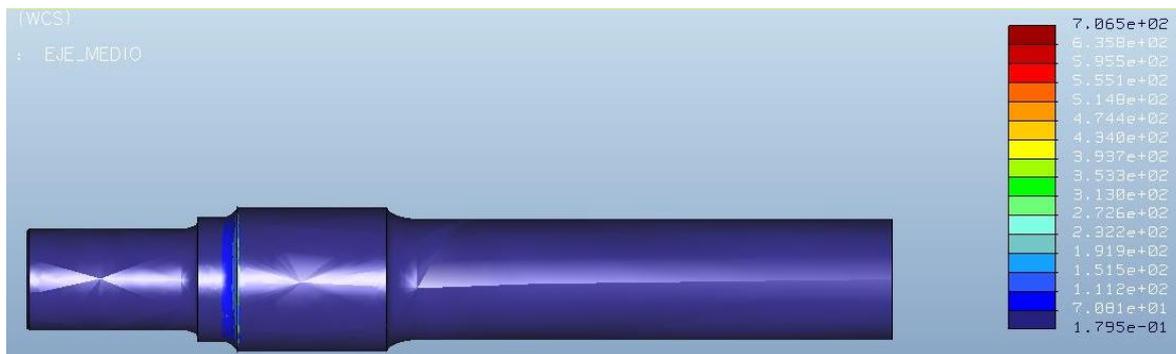


Ilustración 14. 82 Tensión del eje con fisura radial n°8



14.3.9. Eje con fisura radial n° 9

Este análisis estático del eje se ha realizado con una **fisura radial** de dimensiones **1x5x5 mm³** (ancho x largo x profundidad), ubicada a **50 mm** de la sección crítica número III. Los datos obtenidos se muestran en las siguientes imágenes.

Desplazamiento:

Los resultados de los desplazamientos registrados en *Mechanica* indican cómo el eje se deforma bajo las condiciones de contorno aplicadas, diferenciándose por colores en función de la cantidad desplazada, tal y como se muestra en la siguiente figura:

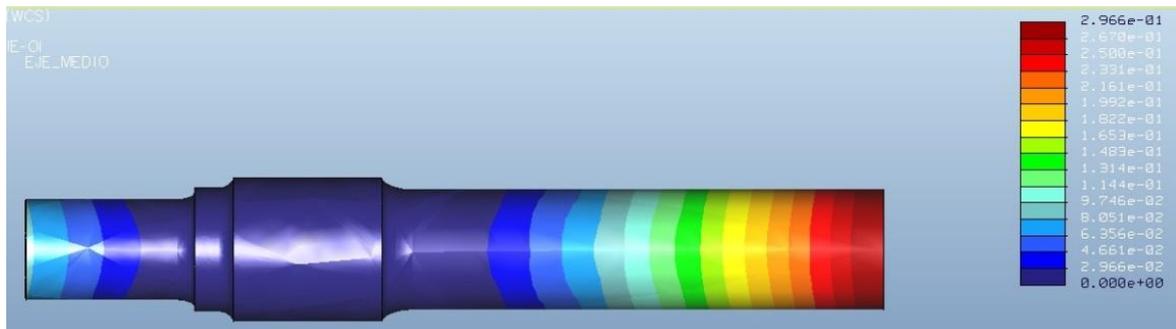


Ilustración 14. 83 Desplazamiento del eje con fisura radial n°9

El desplazamiento máximo, de valor 0,2966 mm, se produce en el punto medio del eje (extremo del eje medio).

Tensión:

La tensión máxima, de valor 673,0 MPa, se produce en la sección crítica II, tal y como se observa en las imágenes anteriores. La tensión máxima en la fisura cúbica es de 7,10 MPa.

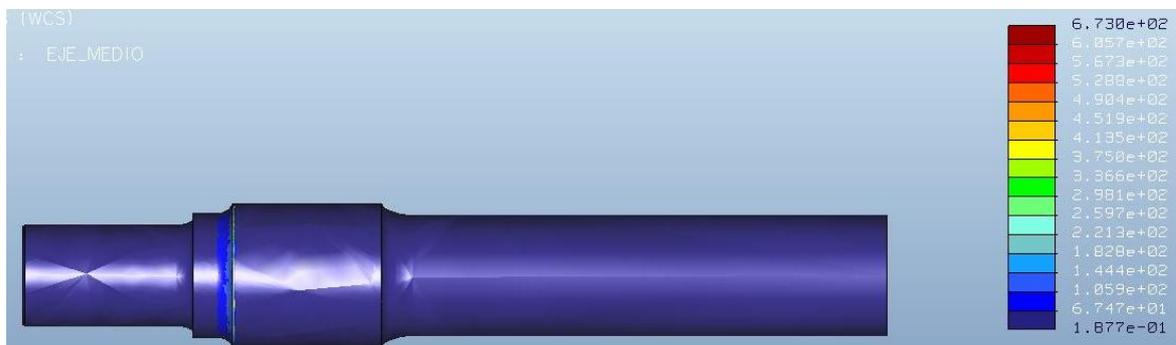


Ilustración 14. 84 Tensión del eje con fisura radial n°9



14.3.10. Eje con fisura radial n° 10

Este análisis estático del eje se ha realizado con una **fisura radial** de dimensiones **1,4x7x5 mm³** (ancho x largo x profundidad), ubicada a **60 mm** de la sección crítica número III. Los datos obtenidos se muestran en las siguientes imágenes.

Desplazamiento:

Los resultados de los desplazamientos registrados en *Mechanica* indican cómo el eje se deforma bajo las condiciones de contorno aplicadas, diferenciándose por colores en función de la cantidad desplazada, tal y como se muestra en la siguiente figura:

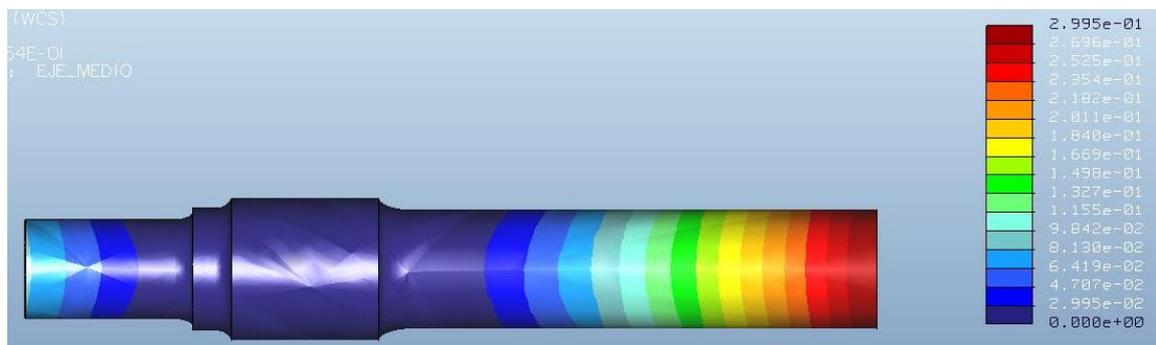


Ilustración 14. 85 Desplazamiento del eje con fisura radial n°10

El desplazamiento máximo, de valor 0,299 mm, se produce en el punto medio del eje (extremo del eje medio).

Tensión:

La tensión máxima, de valor 687,4 MPa, se produce en la sección crítica II, tal y como se observa en las imágenes anteriores. La tensión máxima en la fisura cúbica es de 3,59 MPa.

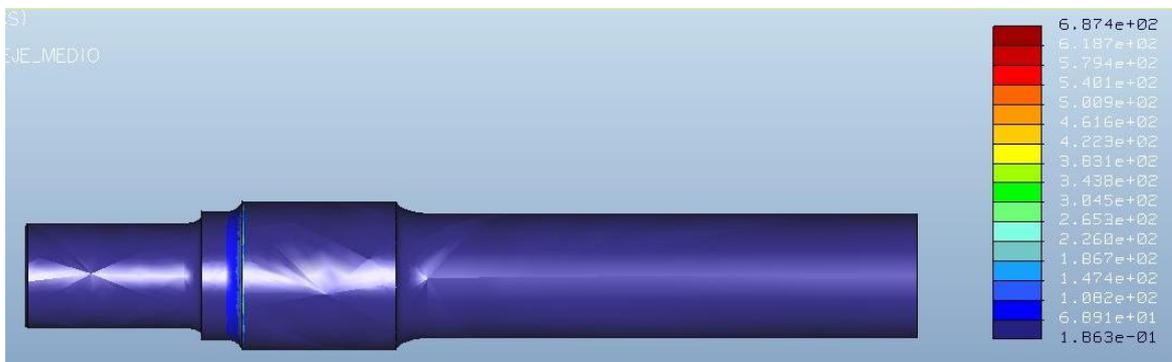


Ilustración 14. 86 Tensión del eje con fisura radial n°10



14.3.11. Eje con fisura radial n° 11

Este análisis estático del eje se ha realizado con una **fisura radial** de dimensiones **1,4x7x5 mm³** (ancho x largo x profundidad), ubicada a **60 mm** de la sección crítica número III. Los datos obtenidos se muestran en las siguientes imágenes.

Desplazamiento:

Los resultados de los desplazamientos registrados en *Mechanica* indican cómo el eje se deforma bajo las condiciones de contorno aplicadas, diferenciándose por colores en función de la cantidad desplazada, tal y como se muestra en la siguiente figura:

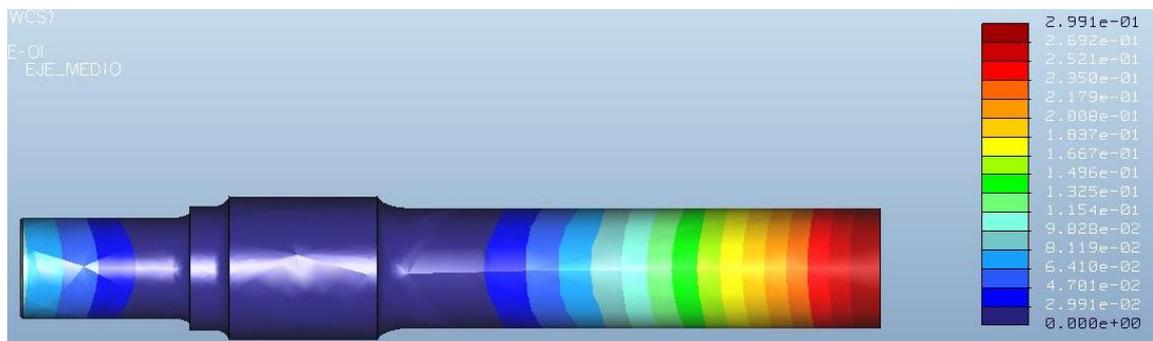


Ilustración 14. 87 Desplazamiento del eje con fisura radial n°11

El desplazamiento máximo, de valor 0,2991 mm, se produce en el punto medio del eje (extremo del eje medio).

Tensión:

La tensión máxima, de valor 685,7 MPa, se produce en la sección crítica II, tal y como se observa en las imágenes anteriores. La tensión máxima en la fisura cúbica es de 2,794 MPa.

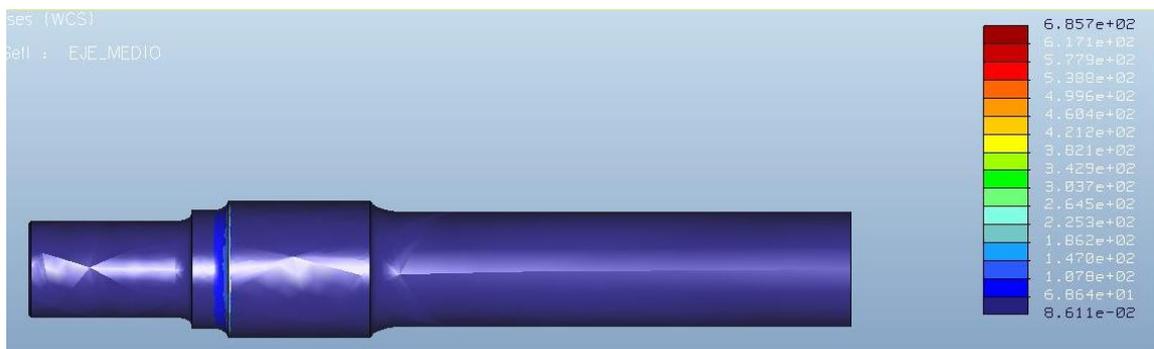


Ilustración 14. 88 Tensión del eje con fisura radial n°11



14.4- RESULTADOS FISURA RADIAL. ANÁLISIS DE FATIGA

14.4.1. Eje con fisura radial nº 1

Este análisis del eje a fatiga se ha realizado con una **fisura radial** de dimensiones **1x5x5 mm³** (ancho x largo x profundidad), ubicada a **5 mm** de la sección crítica número III. Los datos obtenidos se muestran en las siguientes imágenes.

Log Damage (Logaritmo del daño):

La proporción entre ciclos de fatiga acumulados y el número total de ciclos a fallo. Un valor mayor que la unidad indica fallo. Al igual que el logaritmo de la vida, se expresa en órdenes logarítmicos. La relación entre *Log Life* y *Log Damage* puede ser expresada como ($Log Life = - Log Damage$).

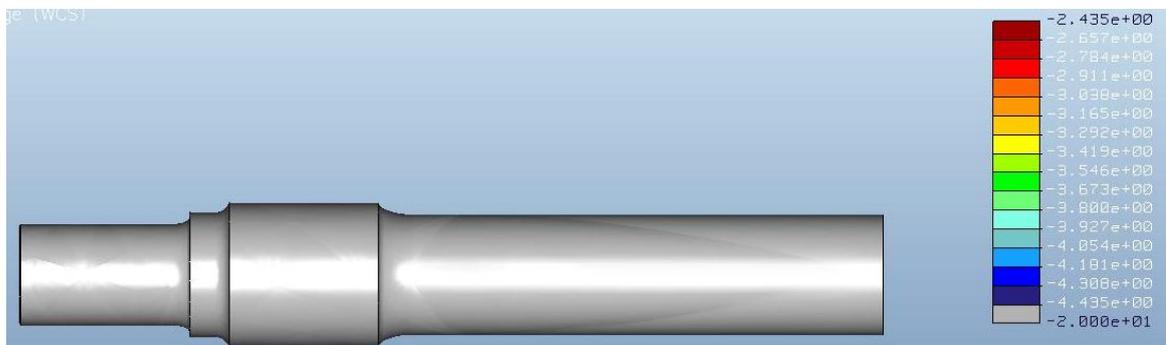


Ilustración 14. 89 Log damage eje con fisura radial nº1

Log Life (Logaritmo de la vida):

El número estimado de ciclos hasta que el modelo parte. La relación entre *Log Life* y *Log Damage* puede ser expresada como ($Log Life = - Log Damage$).



Ilustración 14. 90 Log life eje con fisura radial nº1

Como se puede observar el número de ciclos es superior a 10^7 en todo el eje. En la zona de las **fisuras cúbicas** realizadas, la vida deseada también es superior a 10^7 ciclos, por lo que los ejes con las fisuras cúbicas mencionadas cumplen la norma EN 1326.



Confidence of life (confianza en la vida):

Confidence of life representa la proporción entre la vida calculada y la vida de diseño objetivo.

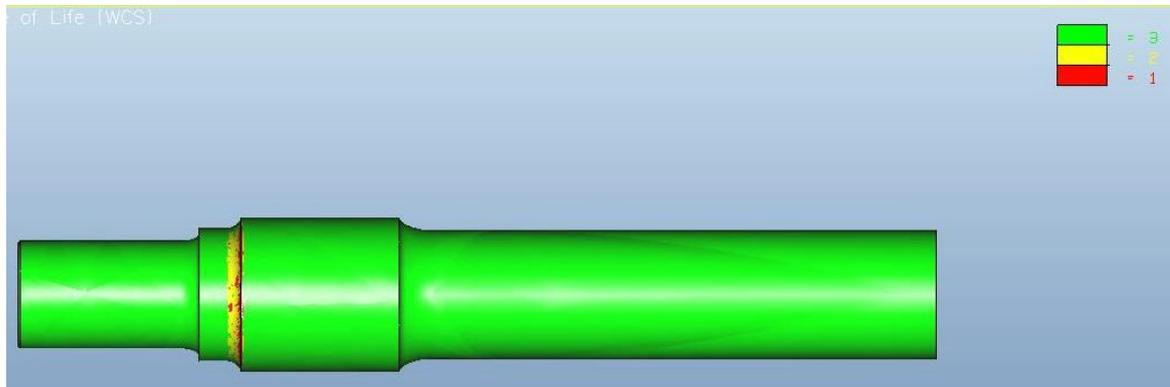


Ilustración 14. 91 *Confidence of life* eje fisura radial n°1

Factor of safety (factor de seguridad):

Representa el factor de seguridad permisible sobre la carga de entrada. Cuando la vida a fatiga calculada para el modelo es mayor que la vida de diseño objetivo el software proporciona un cálculo para determinar un factor de seguridad permisible sobre la carga de entrada. Esto representa el grado según el cual la amplitud de la carga puede ser aumentada sin comprometer la vida de diseño objetivo.

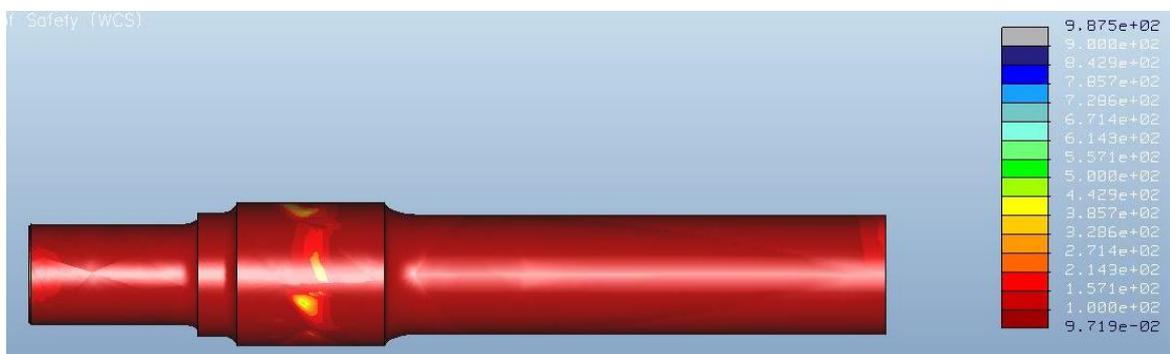


Ilustración 14. 92 *Factor of safety* eje fisura radial n°1



14.4.2. Eje con fisura radial n° 2

Este análisis del eje a fatiga se ha realizado con una **fisura radial** de dimensiones **0,6x3x5 mm³** (ancho x largo x profundidad), ubicada a **11 mm** de la sección crítica número III. Los datos obtenidos se muestran en las siguientes imágenes.

Log Damage (Logaritmo del daño):

La proporción entre ciclos de fatiga acumulados y el número total de ciclos a fallo. Un valor mayor que la unidad indica fallo. Al igual que el logaritmo de la vida, se expresa en órdenes logarítmicos. La relación entre *Log Life* y *Log Damage* puede ser expresada como ($Log Life = - Log Damage$).

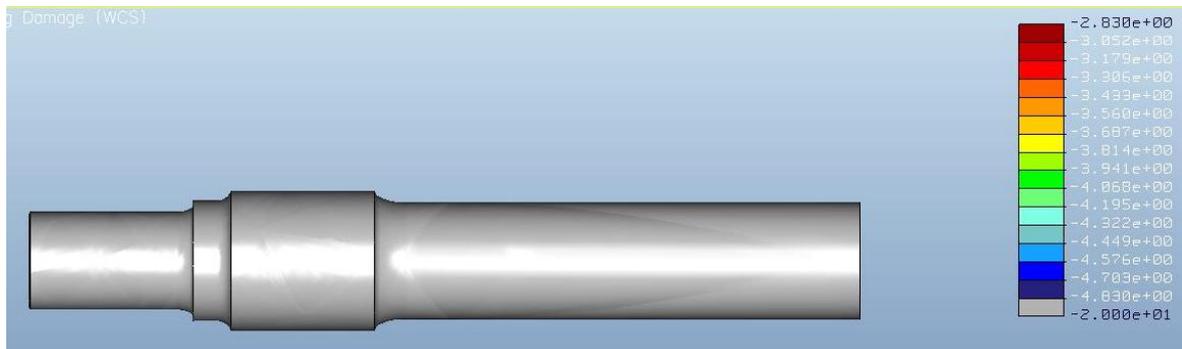


Ilustración 14. 93 Log damage eje con fisura radial n°2

Log Life (Logaritmo de la vida):

El número estimado de ciclos hasta que el modelo parte. La relación entre *Log Life* y *Log Damage* puede ser expresada como ($Log Life = - Log Damage$).

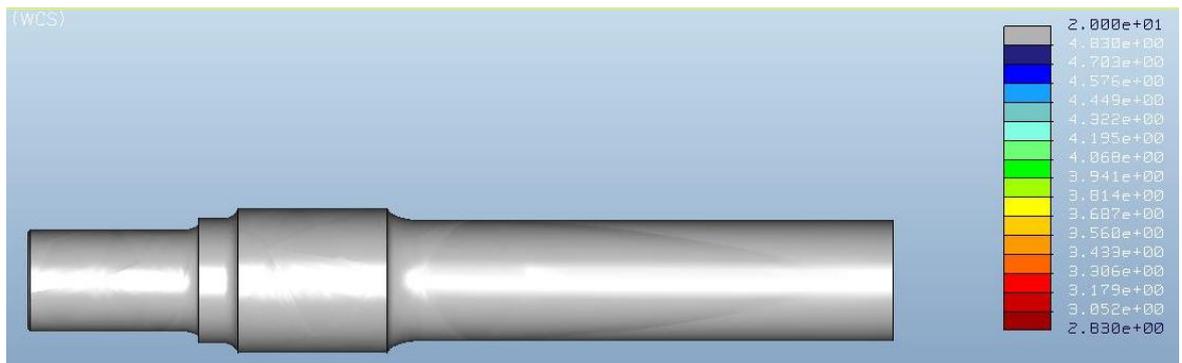


Ilustración 14. 94 Log life eje con fisura radial n°2

Como se puede observar el número de ciclos es superior a 10^7 en todo el eje. En la zona de las **fisuras cúbicas** realizadas, la vida deseada también es superior a 10^7 ciclos, por lo que los ejes con las fisuras cúbicas mencionadas cumplen la norma EN 1326.



Confidence of life (confianza en la vida):

Confidence of life representa la proporción entre la vida calculada y la vida de diseño objetivo.

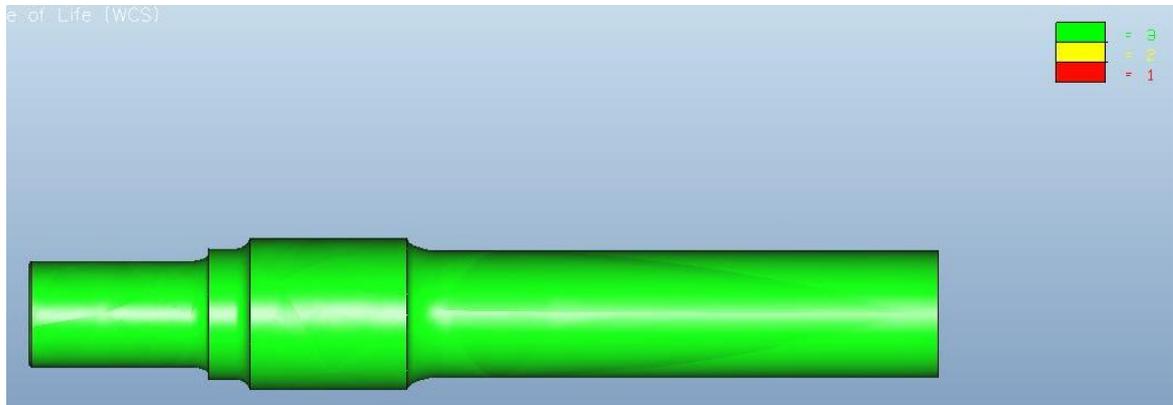


Ilustración 14. 95 *Confidence of life* eje fisura radial n°2

Factor of safety (factor de seguridad):

Representa el factor de seguridad permisible sobre la carga de entrada. Cuando la vida a fatiga calculada para el modelo es mayor que la vida de diseño objetivo el software proporciona un cálculo para determinar un factor de seguridad permisible sobre la carga de entrada. Esto representa el grado según el cual la amplitud de la carga puede ser aumentada sin comprometer la vida de diseño objetivo.

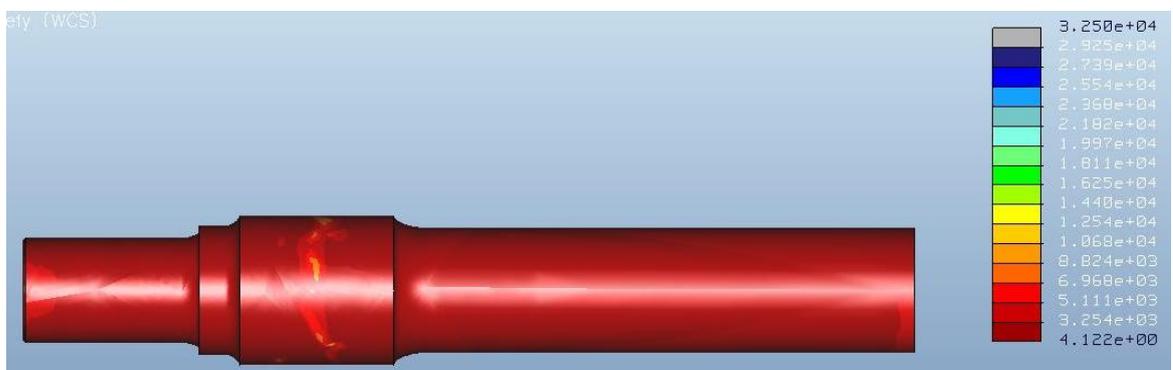


Ilustración 14. 96 *Factor of safety* eje fisura radial n°2



14.4.3. Eje con fisura radial nº 3

Este análisis del eje a fatiga se ha realizado con una **fisura radial** de dimensiones **1x10x5 mm³** (ancho x largo x profundidad), ubicada a **15 mm** de la sección crítica número III. Los datos obtenidos se muestran en las siguientes imágenes.

Log Damage (Logaritmo del daño):

La proporción entre ciclos de fatiga acumulados y el número total de ciclos a fallo. Un valor mayor que la unidad indica fallo. Al igual que el logaritmo de la vida, se expresa en órdenes logarítmicos. La relación entre *Log Life* y *Log Damage* puede ser expresada como ($Log Life = - Log Damage$).

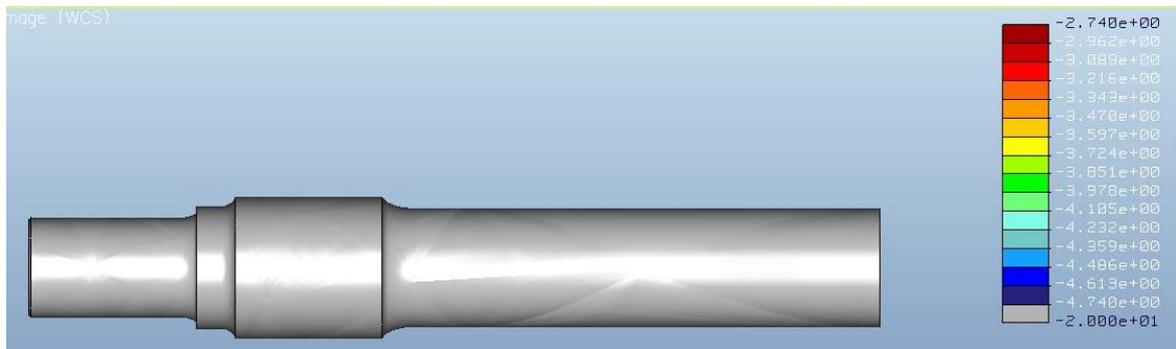


Ilustración 14. 97 Log damage eje con fisura radial nº3

Log Life (Logaritmo de la vida):

El número estimado de ciclos hasta que el modelo parte. La relación entre *Log Life* y *Log Damage* puede ser expresada como ($Log Life = - Log Damage$).

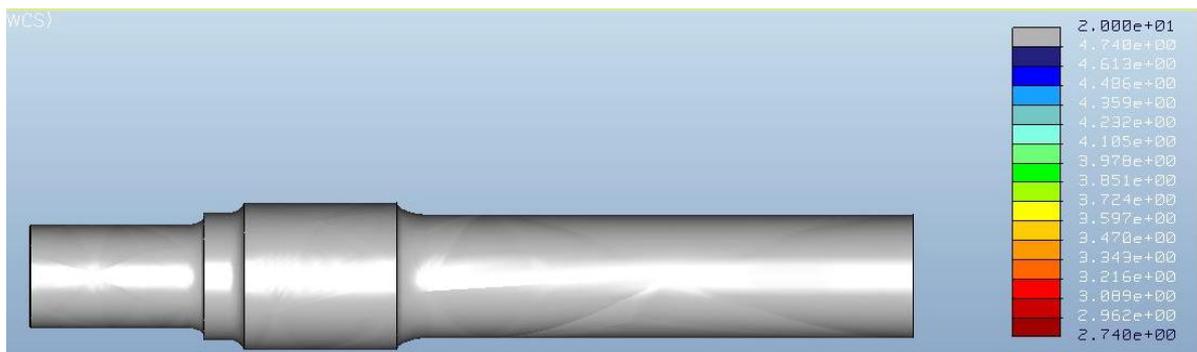


Ilustración 14. 98 Log life eje con fisura radial nº3

Como se puede observar el número de ciclos es superior a 10^7 en todo el eje. En la zona de las **fisuras cúbicas** realizadas, la vida deseada también es superior a 10^7 ciclos, por lo que los ejes con las fisuras cúbicas mencionadas cumplen la norma EN 1326.



Confidence of life (confianza en la vida):

Confidence of life representa la proporción entre la vida calculada y la vida de diseño objetivo.

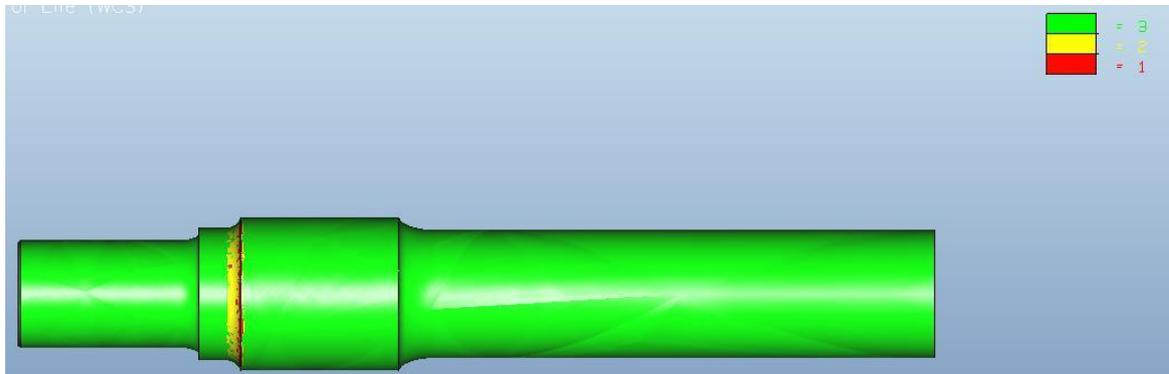


Ilustración 14. 99 *Confidence of life* eje fisura radial n°3

Factor of safety (factor de seguridad):

Representa el factor de seguridad permisible sobre la carga de entrada. Cuando la vida a fatiga calculada para el modelo es mayor que la vida de diseño objetivo el software proporciona un cálculo para determinar un factor de seguridad permisible sobre la carga de entrada. Esto representa el grado según el cual la amplitud de la carga puede ser aumentada sin comprometer la vida de diseño objetivo.

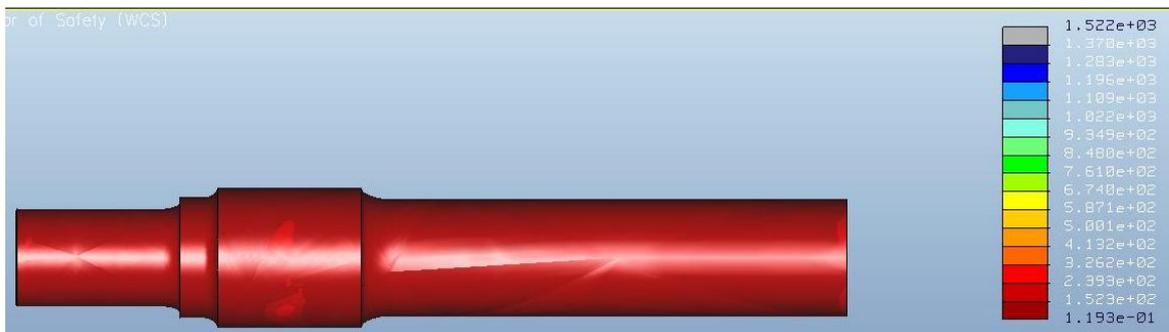


Ilustración 14. 100 *Factor of safety* eje fisura radial n°3



14.4.4. Eje con fisura radial nº 4

Este análisis del eje a fatiga se ha realizado con una **fisura radial** de dimensiones **1x10x5 mm³** (ancho x largo x profundidad), ubicada a **17,5 mm** de la sección crítica número III. Los datos obtenidos se muestran en las siguientes imágenes.

Log Damage (Logaritmo del daño):

La proporción entre ciclos de fatiga acumulados y el número total de ciclos a fallo. Un valor mayor que la unidad indica fallo. Al igual que el logaritmo de la vida, se expresa en órdenes logarítmicos. La relación entre *Log Life* y *Log Damage* puede ser expresada como ($Log Life = - Log Damage$).

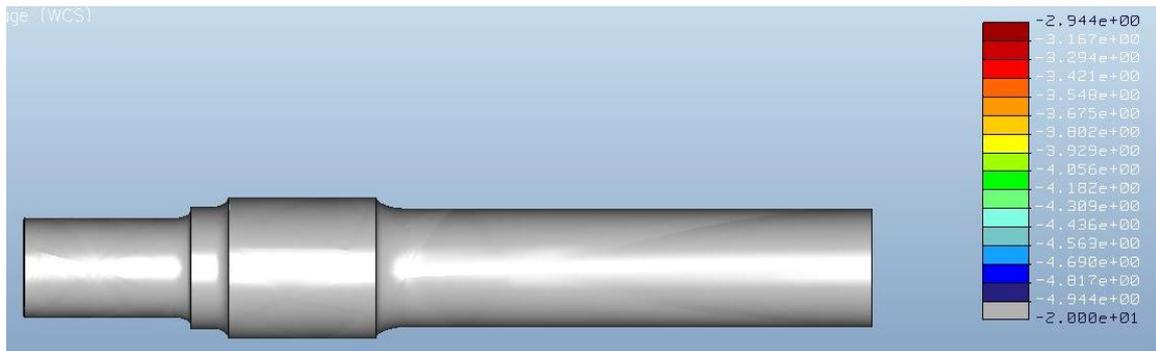


Ilustración 14. 101 Log damage eje con fisura radial nº4

Log Life (Logaritmo de la vida):

El número estimado de ciclos hasta que el modelo parte. La relación entre *Log Life* y *Log Damage* puede ser expresada como ($Log Life = - Log Damage$).

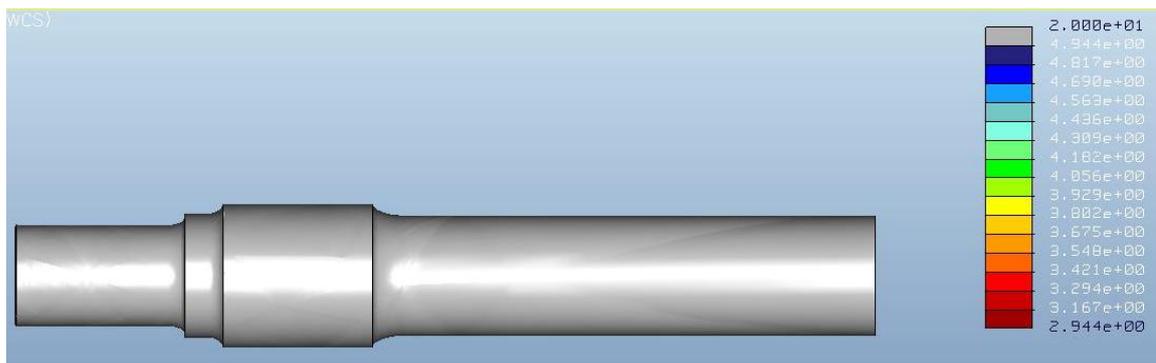


Ilustración 14. 102 Log life eje con fisura radial nº4

Como se puede observar el número de ciclos es superior a 10^7 en todo el eje. En la zona de las **fisuras cúbicas** realizadas, la vida deseada también es superior a 10^7 ciclos, por lo que los ejes con las fisuras cúbicas mencionadas cumplen la norma EN 1326.



Confidence of life (confianza en la vida):

Confidence of life representa la proporción entre la vida calculada y la vida de diseño objetivo.

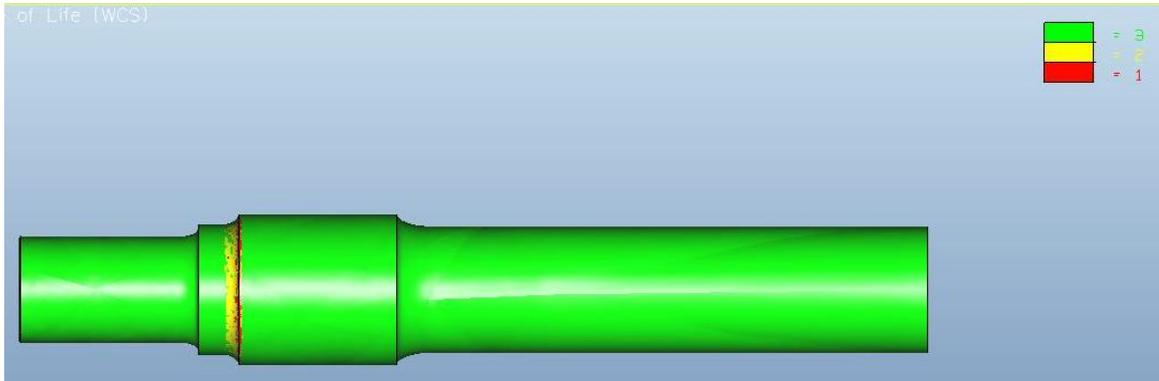


Ilustración 14. 103 Confidence of life eje fisura radial nº4

Factor of safety (factor de seguridad):

Representa el factor de seguridad permisible sobre la carga de entrada. Cuando la vida a fatiga calculada para el modelo es mayor que la vida de diseño objetivo el software proporciona un cálculo para determinar un factor de seguridad permisible sobre la carga de entrada. Esto representa el grado según el cual la amplitud de la carga puede ser aumentada sin comprometer la vida de diseño objetivo.

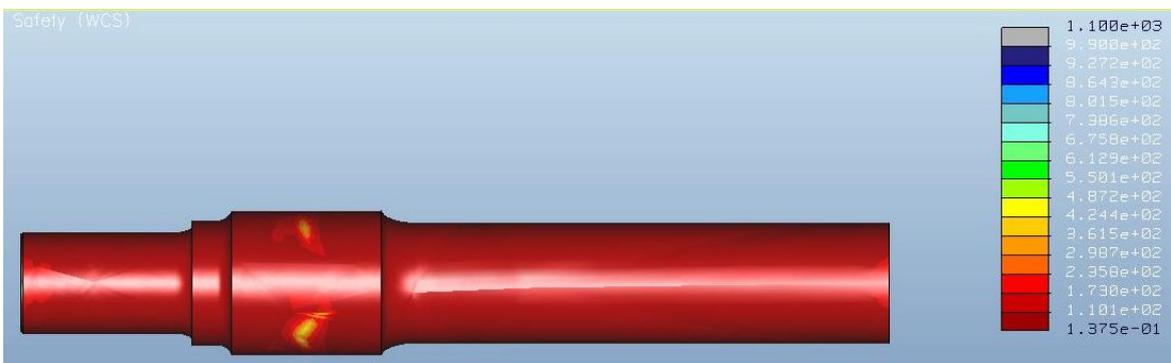


Ilustración 14. 104 Factor of safety eje fisura radial nº4



14.4.5. Eje con fisura radial nº 5

Este análisis del eje a fatiga se ha realizado con una **fisura radial** de dimensiones **0,8x4x5 mm³** (ancho x largo x profundidad), ubicada a **24,5 mm** de la sección crítica número III. Los datos obtenidos se muestran en las siguientes imágenes.

Log Damage (Logaritmo del daño):

La proporción entre ciclos de fatiga acumulados y el número total de ciclos a fallo. Un valor mayor que la unidad indica fallo. Al igual que el logaritmo de la vida, se expresa en órdenes logarítmicos. La relación entre *Log Life* y *Log Damage* puede ser expresada como ($Log Life = - Log Damage$).



Ilustración 14. 105 Log damage eje con fisura radial nº5

Log Life (Logaritmo de la vida):

El número estimado de ciclos hasta que el modelo parte. La relación entre *Log Life* y *Log Damage* puede ser expresada como ($Log Life = - Log Damage$).



Ilustración 14. 106 Log life eje con fisura radial nº5

Como se puede observar el número de ciclos es superior a 10^7 en todo el eje. En la zona de las **fisuras cúbicas** realizadas, la vida deseada también es superior a 10^7 ciclos, por lo que los ejes con las fisuras cúbicas mencionadas cumplen la norma EN 1326.



Confidence of life (confianza en la vida):

Confidence of life representa la proporción entre la vida calculada y la vida de diseño objetivo.

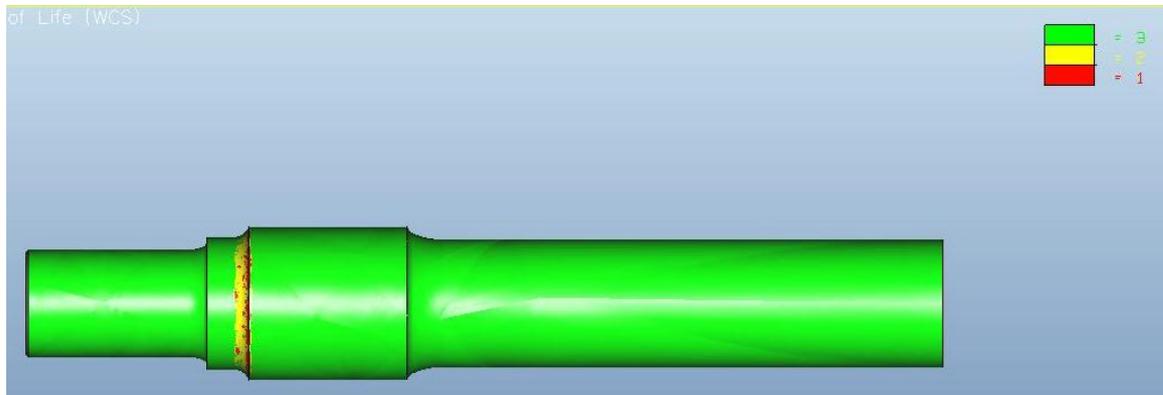


Ilustración 14. 107 *Confidence of life* eje fisura radial n°5

Factor of safety (factor de seguridad):

Representa el factor de seguridad permisible sobre la carga de entrada. Cuando la vida a fatiga calculada para el modelo es mayor que la vida de diseño objetivo el software proporciona un cálculo para determinar un factor de seguridad permisible sobre la carga de entrada. Esto representa el grado según el cual la amplitud de la carga puede ser aumentada sin comprometer la vida de diseño objetivo.

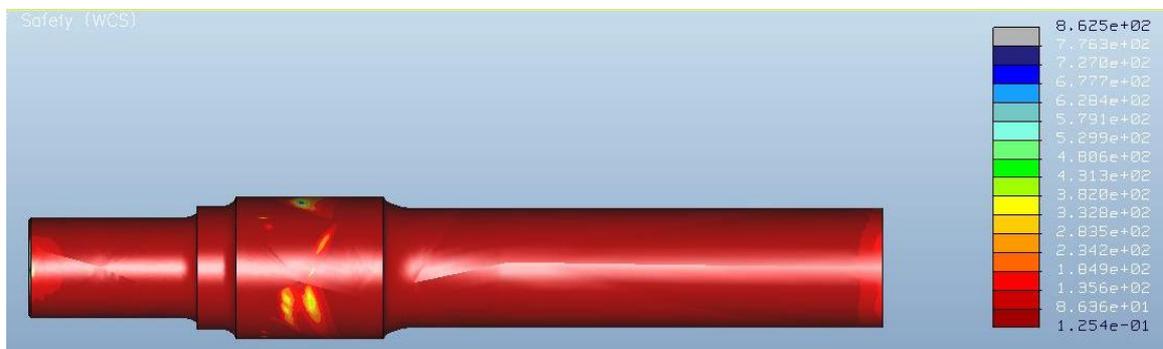


Ilustración 14. 108 *Factor of safety* eje fisura radial n°5



14.4.6. Eje con fisura radial nº 6

Este análisis del eje a fatiga se ha realizado con una **fisura radial** de dimensiones **1,2x6x5 mm³** (ancho x largo x profundidad), ubicada a **30 mm** de la sección crítica número III. Los datos obtenidos se muestran en las siguientes imágenes.

Log Damage (Logaritmo del daño):

La proporción entre ciclos de fatiga acumulados y el número total de ciclos a fallo. Un valor mayor que la unidad indica fallo. Al igual que el logaritmo de la vida, se expresa en órdenes logarítmicos. La relación entre *Log Life* y *Log Damage* puede ser expresada como ($Log Life = - Log Damage$).

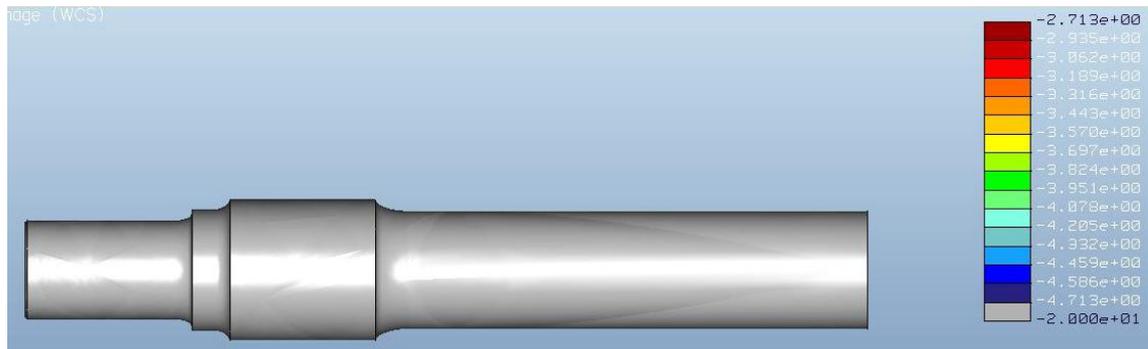


Ilustración 14. 109 Log damage eje con fisura radial nº6

Log Life (Logaritmo de la vida):

El número estimado de ciclos hasta que el modelo parte. La relación entre *Log Life* y *Log Damage* puede ser expresada como ($Log Life = - Log Damage$).

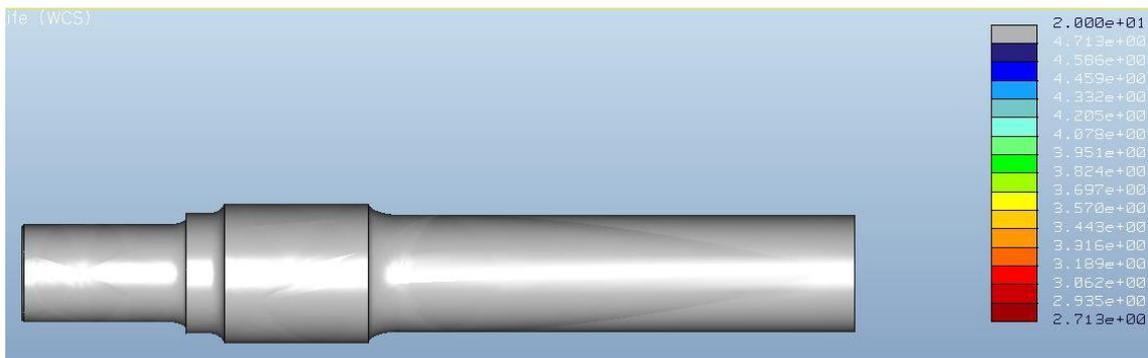


Ilustración 14. 110 Log life eje con fisura radial nº6

Como se puede observar el número de ciclos es superior a 10^7 en todo el eje. En la zona de las **fisuras cúbicas** realizadas, la vida deseada también es superior a 10^7 ciclos, por lo que los ejes con las fisuras cúbicas mencionadas cumplen la norma EN 1326.



Confidence of life (confianza en la vida):

Confidence of life representa la proporción entre la vida calculada y la vida de diseño objetivo.

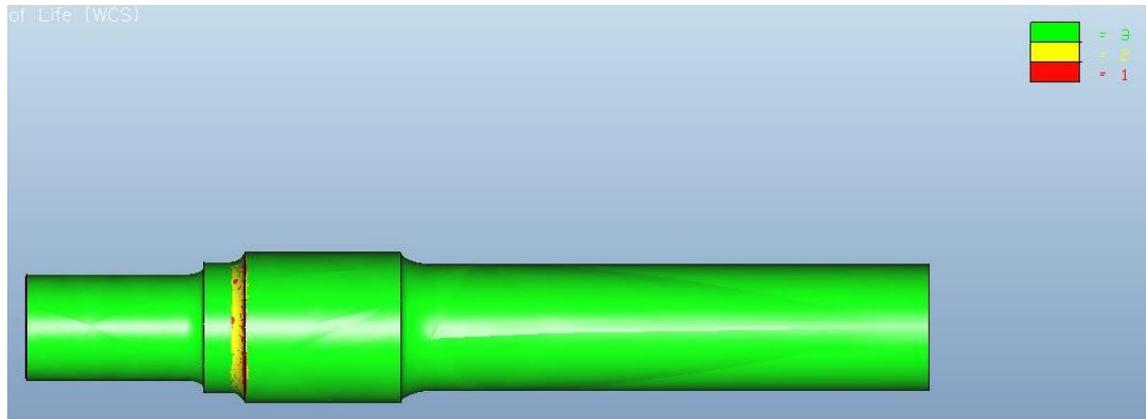


Ilustración 14. 111 *Confidence of life* eje fisura radial nº6

Factor of safety (factor de seguridad):

Representa el factor de seguridad permisible sobre la carga de entrada. Cuando la vida a fatiga calculada para el modelo es mayor que la vida de diseño objetivo el software proporciona un cálculo para determinar un factor de seguridad permisible sobre la carga de entrada. Esto representa el grado según el cual la amplitud de la carga puede ser aumentada sin comprometer la vida de diseño objetivo.

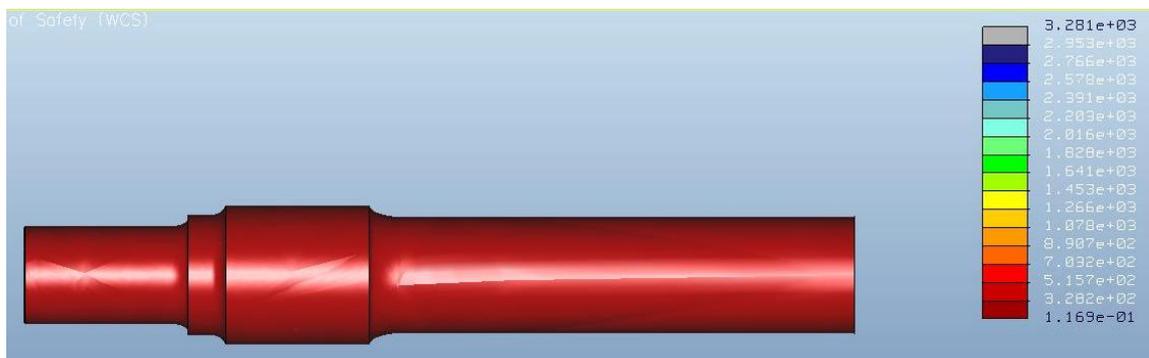


Ilustración 14. 112 *Factor of safety* eje fisura radial nº6



14.4.7. Eje con fisura radial n° 7

Este análisis del eje a fatiga se ha realizado con una **fisura radial** de dimensiones **0,6x3x5 mm³** (ancho x largo x profundidad), ubicada a **36 mm** de la sección crítica número III. Los datos obtenidos se muestran en las siguientes imágenes.

Log Damage (Logaritmo del daño):

La proporción entre ciclos de fatiga acumulados y el número total de ciclos a fallo. Un valor mayor que la unidad indica fallo. Al igual que el logaritmo de la vida, se expresa en órdenes logarítmicos. La relación entre *Log Life* y *Log Damage* puede ser expresada como ($Log Life = - Log Damage$).

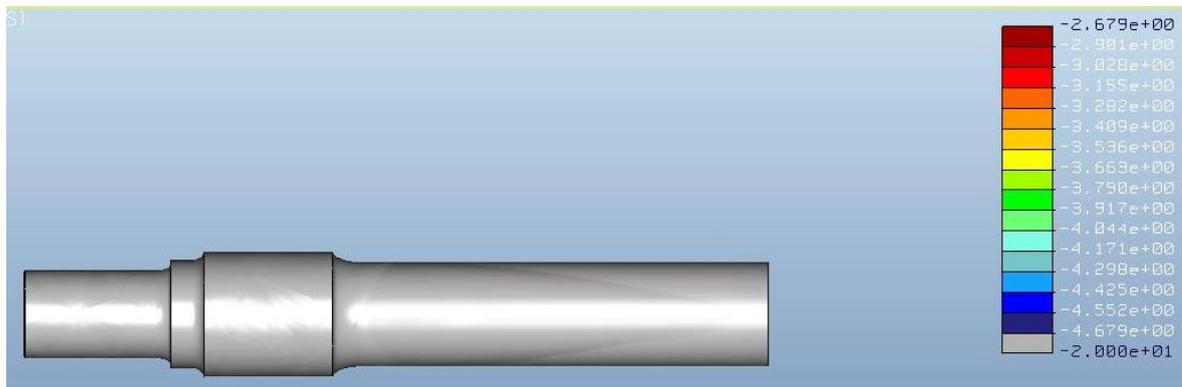


Ilustración 14. 113 Log damage eje con fisura radial n°7

Log Life (Logaritmo de la vida):

El número estimado de ciclos hasta que el modelo parte. La relación entre *Log Life* y *Log Damage* puede ser expresada como ($Log Life = - Log Damage$).

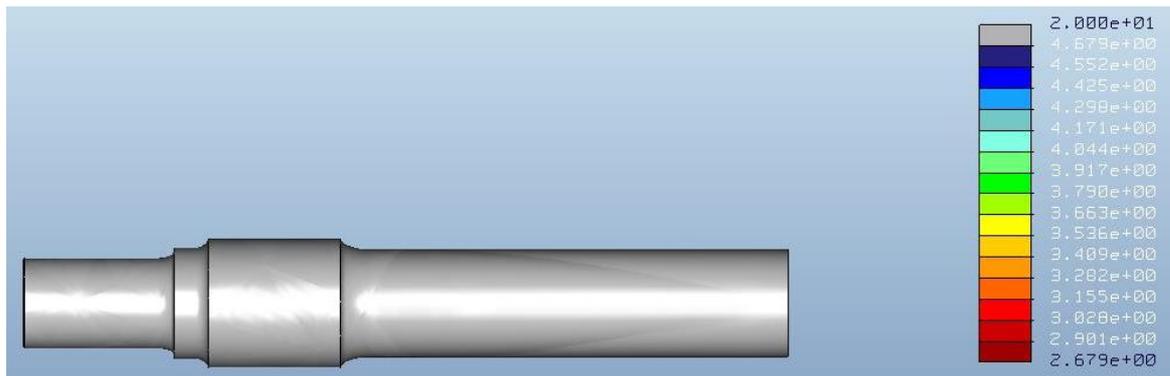


Ilustración 14. 114 Log life eje con fisura radial n°7

Como se puede observar el número de ciclos es superior a 10^7 en todo el eje. En la zona de las **fisuras cúbicas** realizadas, la vida deseada también es superior a 10^7 ciclos, por lo que los ejes con las fisuras cúbicas mencionadas cumplen la norma EN 1326.



Confidence of life (confianza en la vida):

Confidence of life representa la proporción entre la vida calculada y la vida de diseño objetivo.

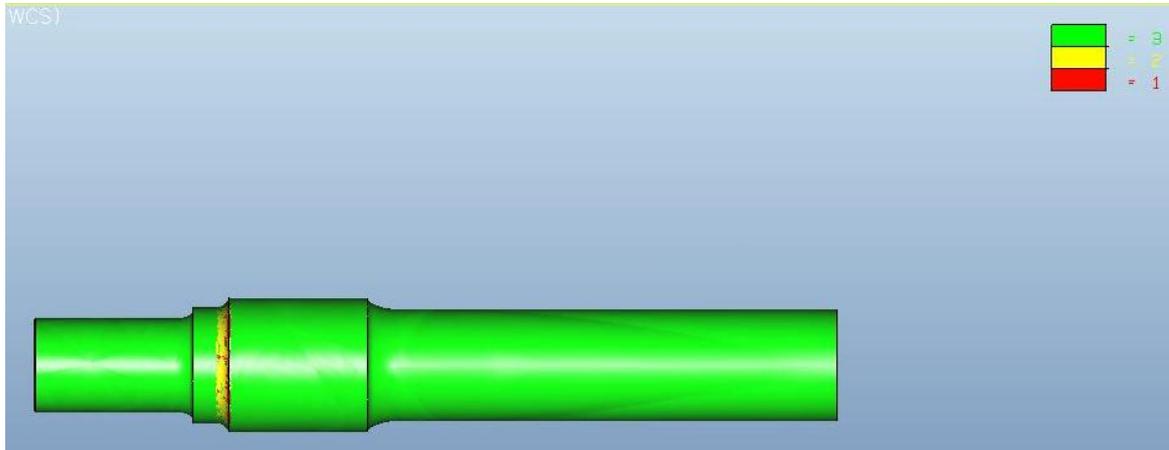


Ilustración 14. 115 *Confidence of life* eje fisura radial n°7

Factor of safety (factor de seguridad):

Representa el factor de seguridad permisible sobre la carga de entrada. Cuando la vida a fatiga calculada para el modelo es mayor que la vida de diseño objetivo el software proporciona un cálculo para determinar un factor de seguridad permisible sobre la carga de entrada. Esto representa el grado según el cual la amplitud de la carga puede ser aumentada sin comprometer la vida de diseño objetivo.

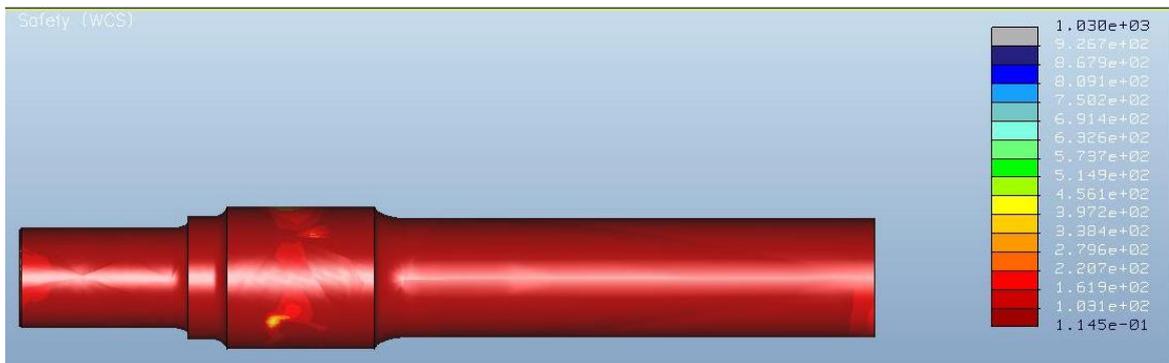


Ilustración 14. 116 *Factor of safety* eje fisura radial n°7



14.4.8. Eje con fisura radial n° 8

Este análisis del eje a fatiga se ha realizado con una **fisura radial** de dimensiones **1x5x5 mm³** (ancho x largo x profundidad), ubicada a **40 mm** de la sección crítica número III. Los datos obtenidos se muestran en las siguientes imágenes.

Log Damage (Logaritmo del daño):

La proporción entre ciclos de fatiga acumulados y el número total de ciclos a fallo. Un valor mayor que la unidad indica fallo. Al igual que el logaritmo de la vida, se expresa en órdenes logarítmicos. La relación entre *Log Life* y *Log Damage* puede ser expresada como ($Log Life = - Log Damage$).

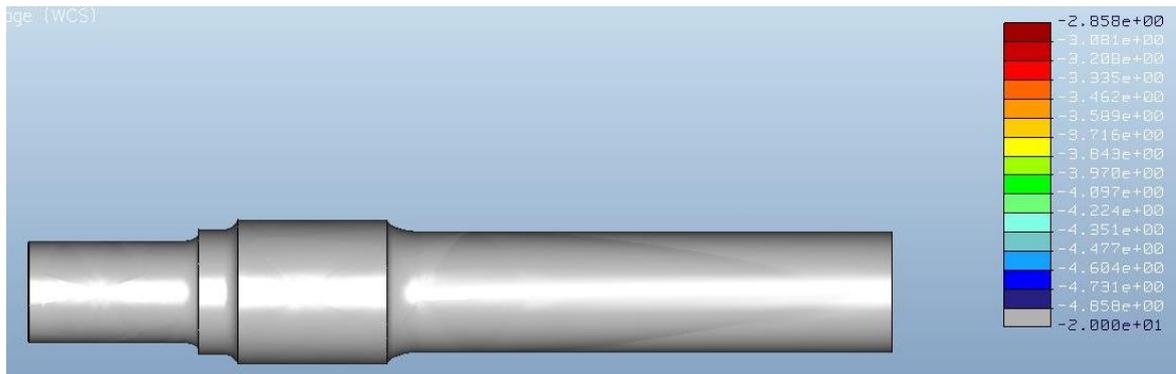


Ilustración 14. 117 Log damage eje con fisura radial n°8

Log Life (Logaritmo de la vida):

El número estimado de ciclos hasta que el modelo parte. La relación entre *Log Life* y *Log Damage* puede ser expresada como ($Log Life = - Log Damage$).

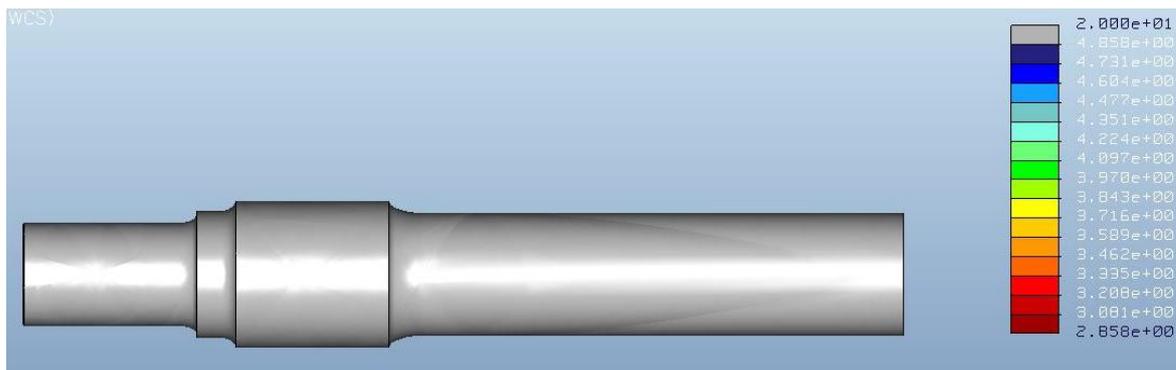


Ilustración 14. 118 Log life eje con fisura radial n°8

Como se puede observar el número de ciclos es superior a 10^7 en todo el eje. En la zona de las **fisuras cúbicas** realizadas, la vida deseada también es superior a 10^7 ciclos, por lo que los ejes con las fisuras cúbicas mencionadas cumplen la norma EN 1326.



Confidence of life (confianza en la vida):

Confidence of life representa la proporción entre la vida calculada y la vida de diseño objetivo.

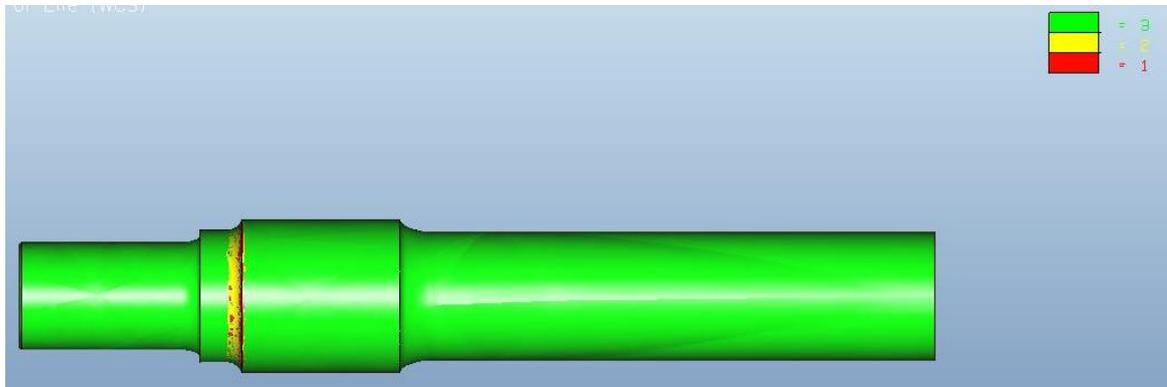


Ilustración 14. 119 *Confidence of life* eje fisura radial n°8

Factor of safety (factor de seguridad):

Representa el factor de seguridad permisible sobre la carga de entrada. Cuando la vida a fatiga calculada para el modelo es mayor que la vida de diseño objetivo el software proporciona un cálculo para determinar un factor de seguridad permisible sobre la carga de entrada. Esto representa el grado según el cual la amplitud de la carga puede ser aumentada sin comprometer la vida de diseño objetivo.

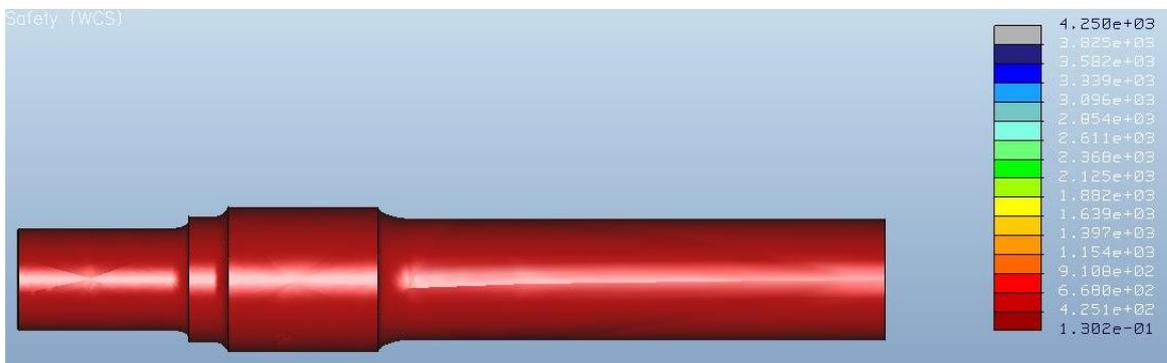


Ilustración 14. 120 *Factor of safety* eje fisura radial n°8



14.4.9. Eje con fisura radial n° 9

Este análisis del eje a fatiga se ha realizado con una **fisura radial** de dimensiones **1x5x5 mm³** (ancho x largo x profundidad), ubicada a **50 mm** de la sección crítica número III. Los datos obtenidos se muestran en las siguientes imágenes.

Log Damage (Logaritmo del daño):

La proporción entre ciclos de fatiga acumulados y el número total de ciclos a fallo. Un valor mayor que la unidad indica fallo. Al igual que el logaritmo de la vida, se expresa en órdenes logarítmicos. La relación entre *Log Life* y *Log Damage* puede ser expresada como ($Log Life = - Log Damage$).

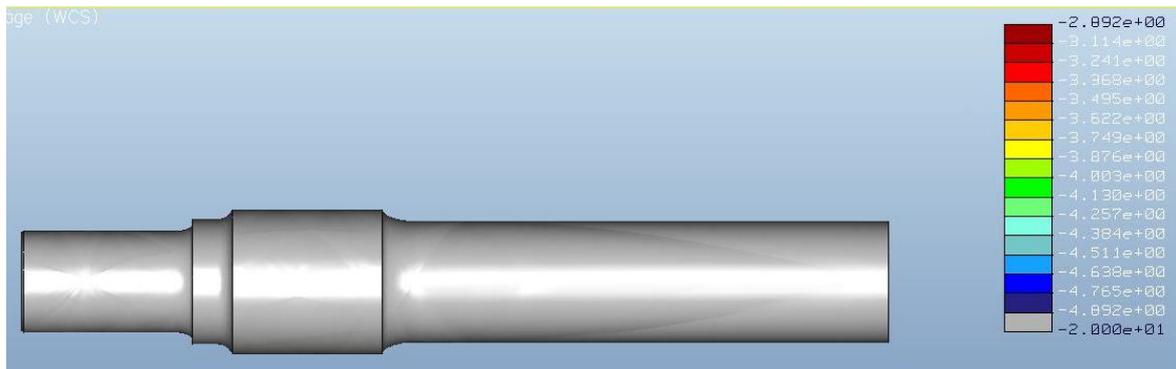


Ilustración 14. 121 Log damage eje con fisura radial n°9

Log Life (Logaritmo de la vida):

El número estimado de ciclos hasta que el modelo parte. La relación entre *Log Life* y *Log Damage* puede ser expresada como ($Log Life = - Log Damage$).

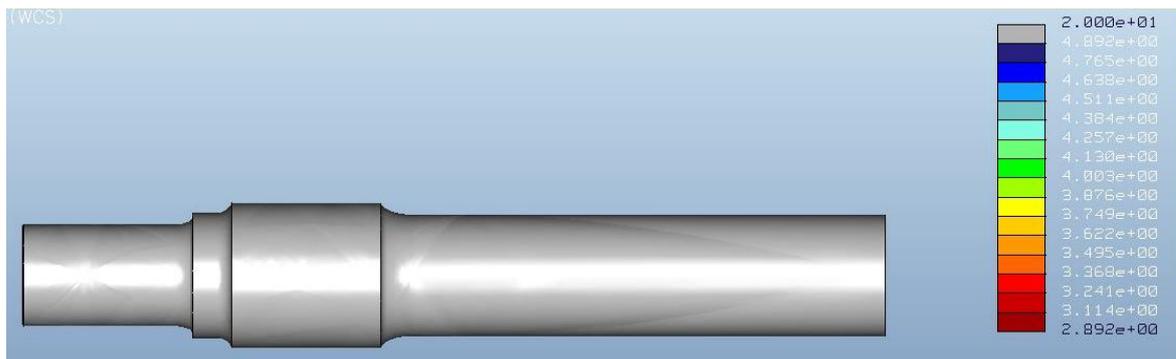


Ilustración 14. 122 Log life eje con fisura radial n°9

Como se puede observar el número de ciclos es superior a 10^7 en todo el eje. En la zona de las **fisuras cúbicas** realizadas, la vida deseada también es superior a 10^7 ciclos, por lo que los ejes con las fisuras cúbicas mencionadas cumplen la norma EN 1326.



Confidence of life (confianza en la vida):

Confidence of life representa la proporción entre la vida calculada y la vida de diseño objetivo.

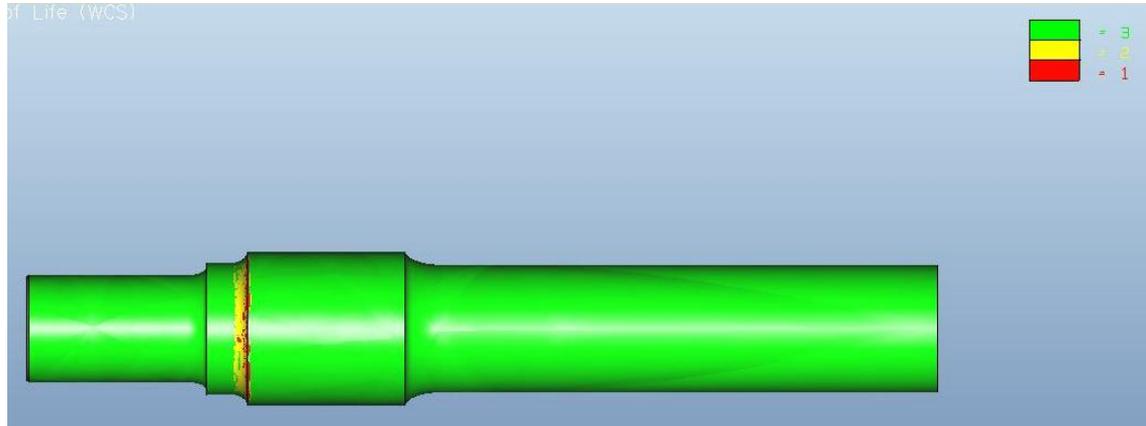


Ilustración 14. 123 *Confidence of life* eje fisura radial n°9

Factor of safety (factor de seguridad):

Representa el factor de seguridad permisible sobre la carga de entrada. Cuando la vida a fatiga calculada para el modelo es mayor que la vida de diseño objetivo el software proporciona un cálculo para determinar un factor de seguridad permisible sobre la carga de entrada. Esto representa el grado según el cual la amplitud de la carga puede ser aumentada sin comprometer la vida de diseño objetivo.

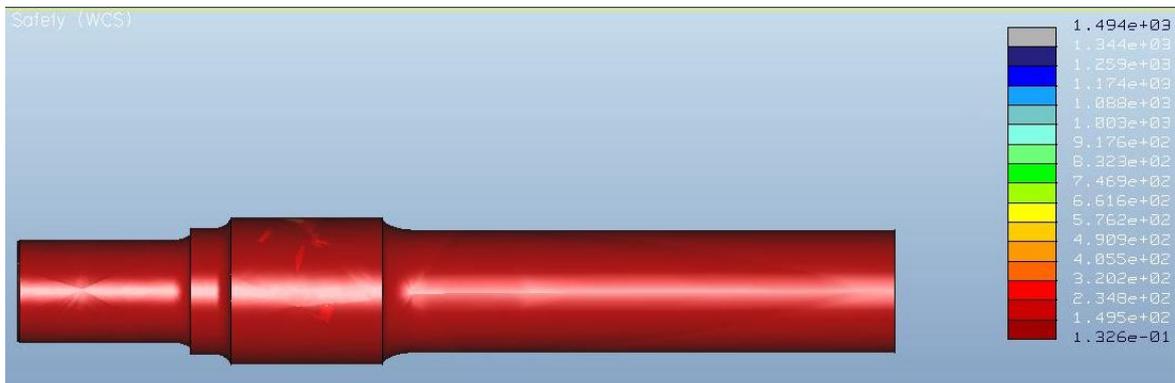


Ilustración 14. 124 *Factor of safety* eje fisura radial n°9



14.4.10. Eje con fisura radial nº 10

Este análisis del eje a fatiga se ha realizado con una **fisura radial** de dimensiones **1,4x7x5 mm³** (ancho x largo x profundidad), ubicada a **60 mm** de la sección crítica número III. Los datos obtenidos se muestran en las siguientes imágenes.

Log Damage (Logaritmo del daño):

La proporción entre ciclos de fatiga acumulados y el número total de ciclos a fallo. Un valor mayor que la unidad indica fallo. Al igual que el logaritmo de la vida, se expresa en órdenes logarítmicos. La relación entre *Log Life* y *Log Damage* puede ser expresada como ($Log Life = - Log Damage$).



Ilustración 14. 125 Log damage eje con fisura radial nº10

Log Life (Logaritmo de la vida):

El número estimado de ciclos hasta que el modelo parte. La relación entre *Log Life* y *Log Damage* puede ser expresada como ($Log Life = - Log Damage$).

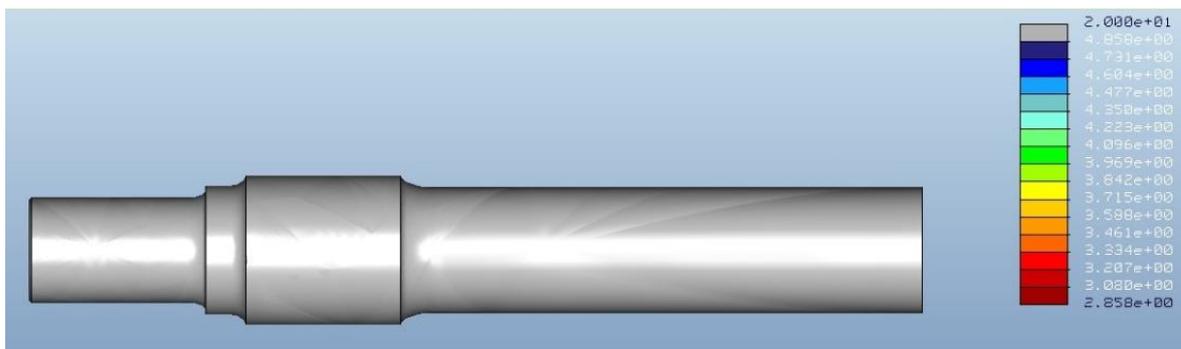


Ilustración 14. 126 Log life eje con fisura radial nº10

Como se puede observar el número de ciclos es superior a 10^7 en todo el eje. En la zona de las **fisuras cúbicas** realizadas, la vida deseada también es superior a 10^7 ciclos, por lo que los ejes con las fisuras cúbicas mencionadas cumplen la norma EN 1326.



Confidence of life (confianza en la vida):

Confidence of life representa la proporción entre la vida calculada y la vida de diseño objetivo.

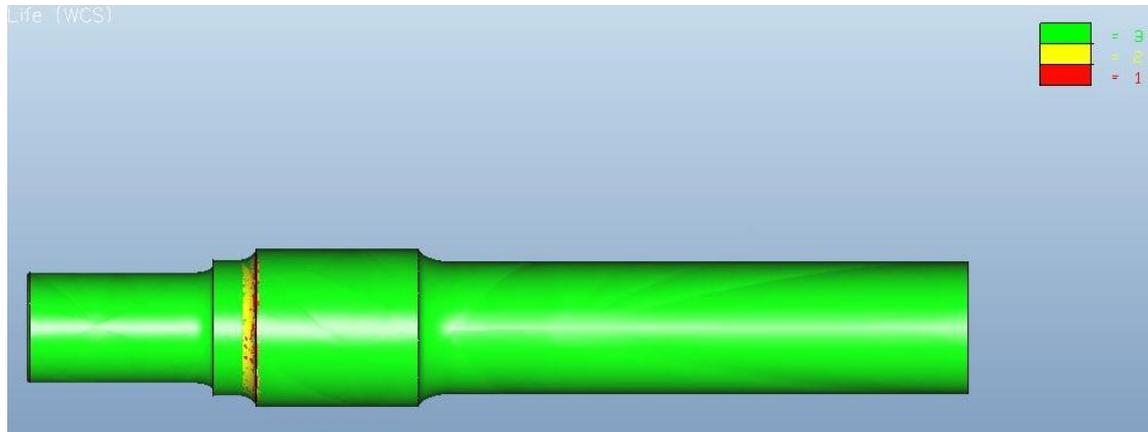


Ilustración 14. 127 *Confidence of life* eje fisura radial n°10

Factor of safety (factor de seguridad):

Representa el factor de seguridad permisible sobre la carga de entrada. Cuando la vida a fatiga calculada para el modelo es mayor que la vida de diseño objetivo el software proporciona un cálculo para determinar un factor de seguridad permisible sobre la carga de entrada. Esto representa el grado según el cual la amplitud de la carga puede ser aumentada sin comprometer la vida de diseño objetivo.



Ilustración 14. 128 *Factor of safety* eje fisura radial n°10



14.4.11. Eje con fisura radial nº 11

Este análisis del eje a fatiga se ha realizado con una **fisura radial** de dimensiones **0,6x3x5 mm³** (ancho x largo x profundidad), ubicada a **70 mm** de la sección crítica número III. Los datos obtenidos se muestran en las siguientes imágenes.

Log Damage (Logaritmo del daño):

La proporción entre ciclos de fatiga acumulados y el número total de ciclos a fallo. Un valor mayor que la unidad indica fallo. Al igual que el logaritmo de la vida, se expresa en órdenes logarítmicos. La relación entre *Log Life* y *Log Damage* puede ser expresada como ($Log Life = - Log Damage$).

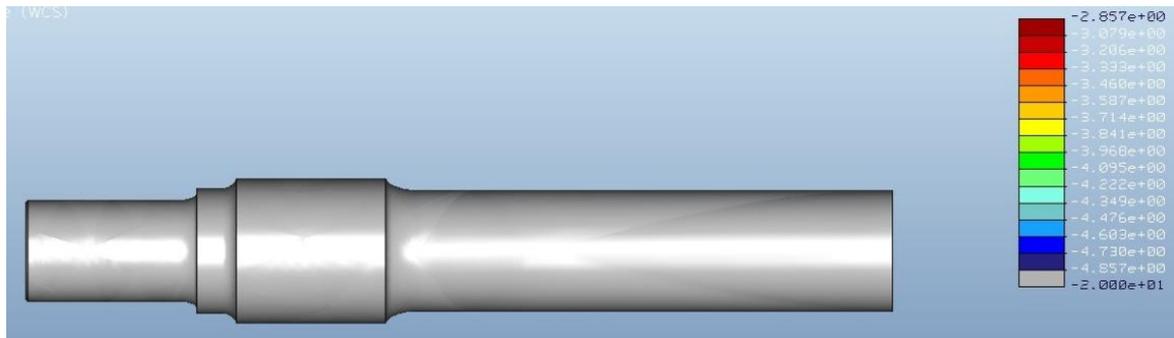


Ilustración 14. 129 Log damage eje con fisura radial nº11

Log Life (Logaritmo de la vida):

El número estimado de ciclos hasta que el modelo parte. La relación entre *Log Life* y *Log Damage* puede ser expresada como ($Log Life = - Log Damage$).

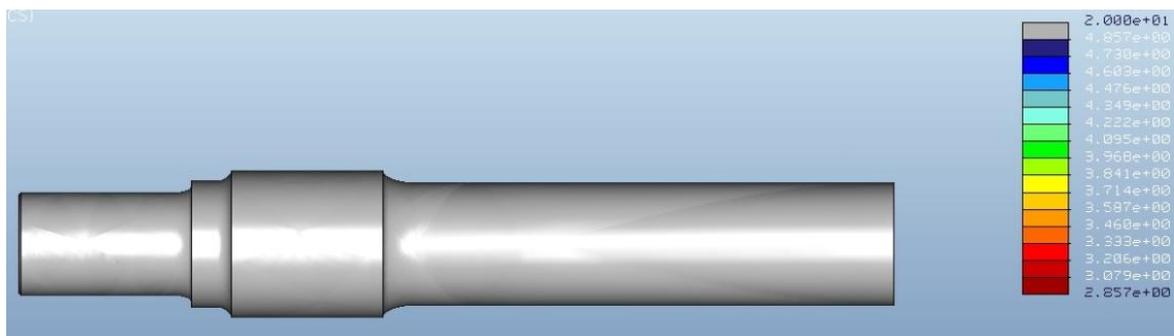


Ilustración 14. 130 Log life eje con fisura radial nº11

Como se puede observar el número de ciclos es superior a 10^7 en todo el eje. En la zona de las **fisuras cúbicas** realizadas, la vida deseada también es superior a 10^7 ciclos, por lo que los ejes con las fisuras cúbicas mencionadas cumplen la norma EN 1326.



Confidence of life (confianza en la vida):

Confidence of life representa la proporción entre la vida calculada y la vida de diseño objetivo.

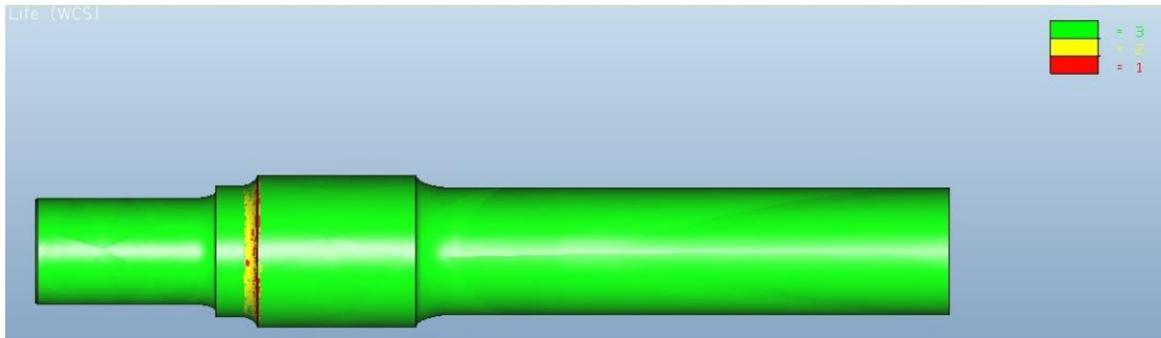


Ilustración 14. 131 *Confidence of life* eje fisura radial n°11

Factor of safety (factor de seguridad):

Representa el factor de seguridad permisible sobre la carga de entrada. Cuando la vida a fatiga calculada para el modelo es mayor que la vida de diseño objetivo el software proporciona un cálculo para determinar un factor de seguridad permisible sobre la carga de entrada. Esto representa el grado según el cual la amplitud de la carga puede ser aumentada sin comprometer la vida de diseño objetivo.



Ilustración 14. 132 *Factor of safety* eje fisura radial n°11



14.5- PLANO EJE

A continuación se muestra el plano del eje ferroviario estudiado en el presente proyecto, sin embargo se ha de tener en cuenta que se han efectuado ciertas modificaciones sobre los mismos para cumplir las especificaciones del trabajo propuesto.

Sobre estas modificaciones decir que han sido establecidas y aprobadas por el tutor del proyecto, las cuales consisten en:

1. Se ha eliminado dos cambios de sección, los interiores, pues no se han tenido en cuenta las cargas ejercidas por los frenos, siendo estos además, menos crítico en cuanto a tensiones y fatiga se refiere.
2. No se han incluido los taladros con el fin de simplificar el proceso y reducir los tiempos de operación y el volumen de datos de los cálculos. Además, como se puede comprobar en proyectos anteriores, su presencia no determina puntos críticos para los estudios a ejecutar.

