Índice general

1. Introducción **1**
1.1. Motivación . . . 3
1.2. Objetivos . . . 3
1.2.1. Objetivo general . . . 3
1.2.2. Objetivos parciales . . . 3
1.3. Aportaciones de la Tesis . . . 4
1.4. Organización de la Tesis . . . 4

I Revisión del estado actual del tema **7**

2. Revisión general de métodos de cálculo del F.I.T. **9**
2.1. Introducción . . . 11
2.2. Métodos aplicables mediante el M.E.F. . . . 12
2.3. Campo singular en extremo de grieta 2D . . . 12
2.3.1. Refinamiento de malla . . . 14
2.3.2. Elementos singulares . . . 15
2.4. Método de los Elementos Finitos Extendido (X-FEM) . . . 16
2.4.1. Introducción . . . 16
2.4.2. Funciones de enriquecimiento de extremo de grieta . . . 17
2.4.3. Funciones de enriquecimiento Heaviside . . . 18
2.5. Métodos locales o directos . . . 21
2.6. Método de la función de peso . . . 22
2.7. Métodos energéticos o indirectos . . . 25
2.7.1. La integral de contorno J . . . 25
2.7.2. Relación entre J y K en MFEL . . . 27
2.7.3. Método de la Integral de Dominio (EDI) . . . 28
2.7.4. Método de la integral integral de interacción M . . . 30

3. Revisión general de los métodos aplicados al estudio de iniciación y propagación de fretting fatiga **33**
3.1. El problema de fretting fatiga . . . 35
3.1.1. Contacto completo . . . 36

3.1.1.1. Contacto completo en adhesión 38
3.1.1.2. Contacto completo en deslizamiento 39
3.1.2. Contacto incompleto (cilíndrico) 43
3.2. Criterios de iniciación de grieta 51
3.2.1. Criterio de máxima amplitud de la tensión tangencial 53
3.2.2. McDiarmid 53
3.2.3. Fatemi-Socie 54
3.2.4. Smith-Watson-Topper 55
3.2.5. Crossland 57
3.2.6. Ruiz 57
3.2.7. MSS (Maximum Shear Stress) 58
3.3. Criterios de orientación en propagación de grieta 59
3.3.1. MTS (Maximum Tangential Stress o "Hoop Stress") 59
3.3.2. Criterio de Nuismer 60
3.3.3. MTS modificado para propagación bajo carga cíclica (Hourlier) 61
3.3.4. Efecto de la tensión T (T-stress) 63
3.3.4.1. Criterio MTS generalizado (inclusión del T-stress) . . 64
3.4. Predicción de vida 65
3.4.1. Modelos basados en la iniciación 67
3.4.1.1. McDiarmid 68
3.4.1.2. Fatemi-Socie 68
3.4.1.3. Smith-Watson-Topper 69
3.4.2. Modelos basados en la propagación de grieta 69
3.4.2.1. Modificación del factor de intensidad de tensiones considerando el efecto del cierre de grieta 74
3.4.2.2. Umbral de crecimiento para grietas largas 75
3.4.2.3. Modificación del umbral para grietas cortas 76
3.4.2.4. Modificación de la longitud de grieta 78
3.4.2.5. Modificación del factor de intensidad de tensiones considerando el efecto de grietas cortas 78
3.4.2.6. Ajuste a datos de ensayos 78
3.4.3. Modelos combinados de iniciación y propagación 79
3.4.3.1. Longitud de iniciación fija 79
3.4.3.2. Longitud de iniciación variable 81

II Implementación y aplicación del método X-FEM en fretting fatiga 87

4. Implementación X-FEM con contacto en caras de grieta 89
4.1. Integral de dominio modificada para el cálculo de K_{II} considerando el contacto en caras de grieta 91
4.2. Implementación X-FEM en el programa ABAQUS 93
4.2.1. Elemento de usuario UEL 93
4.2.2. Formulación *shifted* 94

4.2.3. Elementos overlay 94
4.2.4. Presentación de los resultados 95
4.3. Contacto de caras de grieta en X-FEM 96
4.3.1. Formulación del problema de contacto sin rozamiento 97
4.3.2. Formulación del problema de contacto con rozamiento de Coulomb 98
4.4. Implementación X-FEM con contacto en caras de grieta utilizando elementos tipo barra T2D2 (restricciones puntuales) 99
4.4.1. Validación de la implementación 100
4.4.1.1. Solución analítica del problema 100
4.4.1.2. Solución numérica del problema con X-FEM 102
4.5. Implementación X-FEM con contacto en caras de grieta utilizando planteamiento tipo mortar 105
4.5.1. Ecuaciones de restricción para contacto con X-FEM 108
4.5.1.1. Elementos con cuatro nodos Heaviside 109
4.5.1.2. Elemento de extremo de grieta 110
4.5.1.3. Elementos con nodos Heaviside y de extremo de grieta 111
4.6. Ejemplos numéricos 111
4.6.1. Campo analítico de tensiones y desplazamientos. Solución de Westergaard 112
4.6.1.1. Solución para el modo simétrico (modo I) 113
4.6.1.2. Solución para el modo antisimétrico (modo II) sin fricción en caras de grieta 116
4.6.1.3. Modificación de la solución de Westergaard en modo II para incluir fricción en caras de grieta 118
4.6.2. Convergencia de K_{II} para contacto sin fricción 119
4.6.2.1. Malla uniforme 120
4.6.2.2. Malla no uniforme 122
4.6.3. Convergencia de K_{II} para contacto con fricción 123
4.6.3.1. Malla uniforme 124
4.6.3.2. Malla no uniforme 125
4.7. Simulación del cierre de grieta en condiciones de fretting fatiga 126

5. Análisis del comportamiento de grietas de fretting fatiga y correlación experimental 133
5.1. Introducción 135
5.2. Descripción de los ensayos experimentales 136
5.2.1. Caracterización del material y características de las probetas . 136
5.2.2. Ensayos de fretting fatiga 139
5.3. Descripción del modelo numérico 140
5.4. Estudio de iniciación de grieta 142
5.4.1. Aplicación de criterios de iniciación en la superficie de la probeta 142
5.4.2. Planteamiento de Lamacq y Dubourg 152
5.4.2.1. Grietas de iniciación Tipo I (iniciación por tensiones tangenciales) 152
5.4.2.2. Transición de grieta fase I/II 152

5.4.2.3. Grietas de iniciación Tipo II (iniciación por tensiones normales) . . . 155
5.5. Estudio de propagación de grieta con X-FEM . . . 158

6. Estimación de la vida de fatiga a partir de los análisis de X-FEM y correlación experimental 167
6.1. Estimación de vida en contacto cilíndrico . . . 169
6.1.1. Resultados obtenidos por Szolwinski y Farris . . . 169
6.1.1.1. Descripción del modelo numérico . . . 169
6.1.1.2. Cálculo de K_{I} mediante X-FEM considerando la interacción grieta-contacto . . . 173
6.1.2. Resultados obtenidos por Araújo y Nowell . . . 174
6.1.2.1. Descripción del modelo numérico . . . 175
6.1.2.2. Cálculo de K_{I} mediante X-FEM considerando la interacción grieta-contacto . . . 176
6.1.3. Comparación de los resultados analíticos y numéricos en la estimación de $\mathrm{d}a/\mathrm{d}N$ . . . 177
6.2. Estimación de vida en contacto completo . . . 178
6.2.1. Resultados experimentales obtenidos por el Grupo . . . 178
6.2.1.1. Ensayos de fretting fatiga . . . 178
6.2.1.2. Curvas $\mathrm{d}a/\mathrm{d}N$ . . . 178
6.2.2. Predicción de vida mediante el método de longitud de iniciación variable . . . 181
6.2.2.1. Estimación del FIT . . . 182
6.2.2.2. Predicción de vida. Influencia de los coeficientes de la ley de Paris . . . 184
6.2.2.3. Influencia de los criterios multiaxiales y de los métodos analíticos y numéricos en la estimación de vida . . . 186
6.2.2.4. Influencia de las leyes de propagación en la estimación de vida . . . 190

7. Conclusiones y trabajos futuros 197
7.1. Conclusiones . . . 199
7.1.1. Conclusiones generales . . . 199
7.1.2. Conclusiones parciales . . . 199
7.2. Trabajos futuros . . . 201

III Apéndices 203

A. Desarrollo de la integral J_p 205

B. Valores de los FITs generalizados y comparación entre los métodos empleados 209

Bibliografía 211