

Mecánica de fractura *y análisis de falla*

Héctor Hernández Albañil
Édgar Espejo Mora



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

Sede Bogotá

Colección Sede

CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS	7
PRÓLOGO	9
1. TEORÍA DE MECÁNICA DE FRACTURA Y ANÁLISIS DE FALLA	
1. INTRODUCCIÓN	14
2. FACTOR DE INTENSIDAD DE ESFUERZO	16
3. DEFORMACIÓN PLÁSTICA EN FRENTE DE GRIETA	18
4. TENACIDAD DE FRACTURA	21
4.1. TENACIDAD DE FRACTURA EN DEFORMACIÓN PLANA	21
4.2. RELACIÓN ENTRE LA TENACIDAD DE FRACTURA Y OTRAS PROPIEDADES MECÁNICAS	22
5. GRIETAS EN ENTALLAS	25
6. GRIETAS SUPERFICIALES	27
7. CRECIMIENTO DE GRIETAS	29
8. TIPOS DE FRACTURA	31
9. CONCEPTO DE CURVA R	34
10. CRITERIO DE FALLA POR FRACTURA BAJO CONCEPTOS DE MECÁNICA DE FRACTURA ELÁSTICA LINEAL (LEFM)	36
10.1. RESISTENCIA RESIDUAL	39
10.2. TAMAÑO CRÍTICO DE GRIETA	40
11. INICIACIÓN DE GRIETAS POR FATIGA	44
11.1. CARGA DE AMPLITUD CONSTANTE	45
11.2. CARGA DE AMPLITUD VARIABLE	47
11.3. EFECTO DE CONDICIÓN SUPERFICIAL	49
11.4. OTROS EFECTOS EN LA VIDA DE INICIACIÓN DE GRIETAS	50

12. PROPAGACIÓN DE GRIETAS POR FATIGA	51
12.1. INTRODUCCIÓN	51
12.2. FACTOR DE INTENSIDAD DE ESFUERZO EN FATIGA	52
12.3. RAPIDEZ DE CRECIMIENTO DE GRIETAS POR FATIGA	53
13. VIDA DE PROPAGACIÓN DE GRIETAS POR FATIGA	57
14. CRECIMIENTO DE GRIETA ASISTIDO POR EL AMBIENTE	63
15. FALLA POR COLAPSO PLÁSTICO	65
16. DIAGRAMA DE EVALUACIÓN DE FALLA	67
17. DESPLAZAMIENTO DE ABERTURA EN PUNTA DE GRIETA, CTOD	71
18. CURVA DE DISEÑO CTOD	74
19. ENSAYOS DE TENACIDAD DE FRACTURA	76
19.1. TENACIDAD DE FRACTURA EN DEFORMACIÓN PLANA	76
19.2. DETERMINACIÓN DE LA CURVA R	79
19.3. EVALUACIÓN DE LA TENACIDAD DE FRACTURA POR EL MÉTODO CTOD	81
20. DIAGRAMA DE RESISTENCIA RESIDUAL	85
21. TOLERANCIA DE DAÑO	87
22. PRINCIPIOS DE ENERGÍA	92
22.1. RATA DE LIBERACIÓN DE ENERGÍA	92
22.2. INTEGRAL J	96
23. DEFORMACIÓN PLÁSTICA EN EL FRENTE DE GRIETA Y EFECTOS ASOCIADOS	98
23.1. INTRODUCCIÓN	98
23.2. MODELO DE ZONA PLÁSTICA DE IRWIN	98
23.3. MODELO DE DUGDALE	100
24. CASOS ESPECIALES EN APLICACIONES DE MECÁNICA DE FRACTURA	105
24.1. GRIETAS QUE EMANAN DE AGUJEROS	105
24.2. CARGA BIAXIAL	106
24.3. SUPERPOSICIÓN DE FACTORES DE INTENSIDAD DE ESFUERZO	107
24.4. TENACIDAD DE FRACTURA DE UNIONES SOLDADAS	108
24.5. ANÁLISIS DE FALLA	108

25. MECANISMOS DE FRACTURA	112
26. CONTROL DE FRACTURA	116
27. ANÁLISIS DE FALLAS	120
27.1. CAUSAS GENERALES DE FALLAS	120
27.2. SECUENCIA GENERAL DE ANÁLISIS DE FALLA	120
27.3. CLASIFICACIÓN DE FRACTURAS	126
27.4. ELEMENTOS DE ANÁLISIS DE FALLA POR FRACTURA	128
27.4.1. <i>Etapas de análisis de falla por fractura asistido por cálculos estructurales</i>	133
27.5. ELEMENTOS DE ANÁLISIS DE FALLAS POR DESGASTE	135
27.5.1. <i>Tipos de desgaste</i>	136
27.5.2. <i>Procedimiento de análisis de falla por desgaste</i>	137
27.6. FALLAS EN ENGRANAJES	139
27.6.1. <i>Falla por fractura</i>	139
27.6.2. <i>Falla por fatiga superficial (Picado)</i>	139
27.6.3. <i>Falla por flujo plástico</i>	140
27.6.4. <i>Falla por desgaste</i>	140
27.6.5. <i>Regiones de falla de engranajes (Figura 27.20)</i>	141
27.7. FALLAS EN EJES Y CIGÜEÑALES	142
27.7.1. <i>Falla por desgaste</i>	143
27.7.2. <i>Falla por fatiga</i>	144
27.8. FALLAS EN TORNILLOS	146
27.9. FALLAS EN RODAMIENTOS	147
27.9.1. <i>Falla por desgaste</i>	147
27.9.2. <i>Falla por fatiga por contacto de rodadura</i>	147
27.9.3. <i>Falla por flujo plástico</i>	148
28. ANÁLISIS DE FALLAS POR FATIGA EN COMPONENTES DE PUENTES	150
28.1. INTRODUCCIÓN	150
28.2. DAÑO POR FATIGA	150
28.3. ELEMENTOS DE EVALUACIÓN DE CAUSAS DE AGRIETAMIENTO LOCALIZADO	154
28.3.1. <i>Adquisición de datos de antecedentes de falla</i>	155
28.3.2. <i>Examen fractográfico</i>	156
28.3.3. <i>Ensayos mecánicos</i>	156
28.3.4. <i>Análisis químico</i>	157
28.3.5. <i>Examen metalográfico</i>	157

28.4. DAÑO ACUMULADO	158
28.5. PROPAGACIÓN DE GRIETAS POR FATIGA	161
28.6. AGRIETAMIENTO INDUCIDO POR DISTORSIÓN	166
28.7. FATIGA EN CONEXIONES MECÁNICAS	167
28.8. INSPECCIÓN DE AGRIETAMIENTO POR FATIGA	169
28.9. MEDIDAS CORRECTIVAS	171
28.10. ESFUERZOS RESIDUALES	173
28.11. EFECTO DEL MEDIO AMBIENTE	173
28.12. EVALUACIÓN FRACTOMECÁNICA	174
28.13. PROBABILIDAD DE FALLA	175
28.14. RESUMEN	176
DEFINICIONES	179
29. CONTROL DE FRACTURA EN RECIPIENTES A PRESIÓN	182
29.1. INTRODUCCIÓN	182
29.2. ESFUERZOS EN RECIPIENTES A PRESIÓN	183
29.3. DEFORMACIONES EN RECIPIENTES A PRESIÓN	186
29.4. ESFUERZOS TÉRMICOS	188
29.5. TERMOFLUENCIA Y ROTURA A TEMPERATURA ELEVADA	189
29.6. RELAJACIÓN Y RELEVO DE ESFUERZOS A TEMPERATURA ALTA	190
29.7. CRITERIO DE FUGA ANTES QUE FRACTURA	192
29.8. CRECIMIENTO DE GRIETAS POR FATIGA	193
29.9. FRACTURA EN RECIPIENTES A PRESIÓN	193
30. COMPORTAMIENTO A FRACTURA DE COMPONENTES SOLDADOS	204
30.1. MODELO DE COMPORTAMIENTO A FRACTURA DE UNA UNIÓN SOLDADA	205
30.2. PROPAGACIÓN DE GRIETAS POR FATIGA EN UNIONES SOLDADAS	207
30.3. ESFUERZOS RESIDUALES	210
30.4. TENACIDAD DE FRACTURA EN UNIONES SOLDADAS	211
31. FALLAS METALÚRGICAS EN CALDERAS	213
31.1. INTRODUCCIÓN	213
31.2. FALLAS MECÁNICAS	214
31.2.1. Rotura de labio grueso	217
31.2.2. Rotura de labio delgado	218
31.2.3. Termofluencia	220
31.2.4. Fatiga térmica	223

31.3. DAÑO POR REACCIONES GAS-METAL	223
31.3.1. Reacciones en lado de vapor	224
31.3.2. Reacciones en lado de fuego	226
31.4. EROSIÓN	226
31.5. DAÑO POR CORROSIÓN	227
31.5.1. Principios básicos	227
31.5.2. Ataque uniforme	228
31.5.3. Picado	228
31.5.4. Corrosión por rendija	230
31.5.5. Corrosión intergranular	230
31.5.6. Erosión - corrosión	230
31.5.7. Corrosión - fatiga	230
31.5.8. Agrietamiento por corrosión - esfuerzo (SCC)	231
31.5.9. Daño por hidrógeno.	231
31.5.10. Corrosión en lado de fuego	232
31.5.11. Corrosión en lado de agua	233
31.6. DEPÓSITOS	234
31.7. INSPECCIÓN NO DESTRUCTIVA	236
31.8. RESUMEN	236
32. MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO Y SU APLICACIÓN EN FRACTOGRAFÍA	238
32.1. INTRODUCCIÓN	238
32.2. PRINCIPIOS DE OPERACIÓN DEL SEM	238
32.3. COMPONENTES BÁSICOS DEL SEM (FIGURA 32.3)	239
32.4. CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DE IMÁGENES OBTENIDAS EN EL SEM	240
32.4.1. Amplificación	242
32.4.2. Resolución	242
32.4.3. Profundidad de campo	243
32.5. APLICACIÓN DEL SEM EN FRACTOGRAFÍA	243
32.6. MICROANÁLISIS POR SEM	243
32.7. MECANISMOS DE FRACTURA QUE SE ESTUDIAN MEDIANTE EL EMPLEO DEL SEM	244
PROBLEMAS	
1. PROBLEMAS RESUELTOS	248
2. PROBLEMAS PROPUESTOS	253

APÉNDICES

APÉNDICE A. DATOS TÍPICOS DE TENACIDAD DE FRACTURA 257

APÉNDICE B. DATOS TÍPICOS DE RATA DE CRECIMIENTO
 DE GRIETAS POR FATIGA EN ACEROS 257

APÉNDICE C. CORRELACIONES EMPÍRICAS ENTRE TENACIDAD DE
 FRACTURA Y ENERGÍA ABSORBIDA EN ENSAYOS DE IMPACTO CHARPY 258

APÉNDICE D. FACTORES DE CONVERSIÓN 258

II CASOS DE FALLA ESTUDIADOS

33. ANÁLISIS DE FALLA Y EL DISEÑO DE MÁQUINAS 263

33.1. EL INFORME DE ANÁLISIS DE FALLA 263

33.2. EL PAPEL DEL ANÁLISIS DE FALLA EN LA METÓDICA DEL DISEÑO 264

34. ANÁLISIS DE LA FALLA DE UNA ROSCA EN UNA AUTOPARTE 272

34.1. DESCRIPCIÓN DE LA FALLA Y FRACTOGRAFÍA 272

34.2. ANÁLISIS METALGRÁFICO 272

34.2.1. Zona de análisis 272

34.2.2. Metalografía 272

34.2.3. Dureza 274

34.3. DISCUSIÓN DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES 275

34.4. CONCEPTO DE FALLA 277

34.5. RECOMENDACIONES 277

35. ANÁLISIS DE LA FALLA DEL PUENTE DE PESCADERO 278

35.1. INTRODUCCIÓN 278

35.2. ENSAYOS DE TRACCIÓN 280

35.2.1. Pendolón 280

35.2.2. ARCO 280

35.2.3. Atiesador 281

35.3. ANÁLISIS QUÍMICO 281

35.4. PERFILES DE DUREZA 283

35.5. DIMENSIONES DE CORDÓN DE SOLDADURA 283

35.5.1. Atiesador - platina inferior de arco 284

35.5.2. Platina-platina de arco 284

35.6. FRACTOGRAFÍA 284

35.6.1. Fractura en unión platina atiesadora - platina inferior de arco 284

35.6.2. Fractura en unión platina inferior del arco - soporte del pendolón 285

35.7. CONCLUSIONES, CONCEPTO DE FALLA Y RECOMENDACIONES 285

36. ANÁLISIS DE LA FALLA DE UN RIEL DE FERROCARRIL	288
36.1. DESCRIPCIÓN DEL RIEL	288
36.2. CONDICIONES DE CARGA Y SOLICITACIÓN DE ESFUERZOS	289
36.3. DESCRIPCIÓN DE LA FALLA DEL RIEL	292
36.4. FRACTOGRAFÍA DEL RIEL	293
36.5. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE COMPOSICIÓN QUÍMICA, DUREZA Y METALOGRAFÍA	294
36.6. CONCEPTO DE FALLA	297
36.7. RECOMENDACIONES	298
37. ANÁLISIS DE LA FALLA DEL BRAZO DE UNA RETROEXCAVADORA	300
37.1. DESCRIPCIÓN DEL BRAZO DE LA RETROEXCAVADORA	300
37.2. CONDICIONES DE CARGA Y SOLICITACIÓN DE ESFUERZOS	301
37.3. DESCRIPCIÓN DE LA FALLA DEL BRAZO DE LA RETROEXCAVADORA	302
37.4. FRACTOGRAFÍA DEL BRAZO DE LA RETROEXCAVADORA	303
37.5. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE DUREZA Y METALOGRAFÍA	303
37.6. EMISIÓN DEL CONCEPTO DE FALLA	305
38. ANÁLISIS DE LA FALLA DE UN EJE DE LEVAS DE UN MOTOR ENCENDIDO POR COMPRESIÓN (DIESEL)	308
38.1. DESCRIPCIÓN DEL EJE DE LEVAS	308
38.2. CONDICIONES DE CARGA Y SOLICITACIÓN DE ESFUERZOS	308
38.3. DESCRIPCIÓN DE LA FALLA DEL EJE DE LEVAS	312
38.4. FRACTOGRAFÍA DE LAS LEVAS	313
38.5. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE ESPECTROSCOPIA, DUREZA Y METALOGRAFÍA .	315
38.6. EMISIÓN DEL CONCEPTO DE FALLA	319
38.7. RECOMENDACIONES	320
39. ANÁLISIS DE LA FALLA DE UN EJE DE UNA BOMBA VERTICAL DE ACUEDUCTO	321
39.1. DESCRIPCIÓN DE LA BOMBA	321
39.2. CONDICIONES DE CARGA Y SOLICITACIÓN DE ESFUERZOS	323
39.3. DESCRIPCIÓN DE LA FALLA DEL EJE DE LA BOMBA VERTICAL	326
39.4. FRACTOGRAFÍA DEL EJE DE LA BOMBA VERTICAL	326
39.5. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE ESPECTROSCOPIA, DUREZA Y METALOGRAFÍA	329
39.6. CONCEPTO DE FALLA	331
39.7. RECOMENDACIONES	332

40. ANÁLISIS DE LA FALLA DE UN ENGRANAJE DE TRANSMISIÓN	333
40.1. ESTIMACIÓN DEL EFECTO DE LA REPOTENCIACIÓN DE LOS VEHÍCULOS EN LOS ESFUERZOS DE SERVICIO EN PIE DE DIENTE DE LOS ENGRANAJES	334
40.2. ESTIMACIÓN DEL EFECTO DEL CAMBIO DE ENGRANAJES SOBRE LOS ESFUERZOS DE SERVICIO EN PIE DE DIENTE	335
40.3. ANÁLISIS QUÍMICOS	336
40.4. METALOGRAFÍAS	337
40.5. PERFILES DE MICRODUREZA	340
40.6. FRACTOGRAFÍAS DE LOS DIENTES DEL ENGRANAJE NACIONAL	341
40.7. CONCEPTO DE FALLA Y CONCLUSIONES	342
40.8. RECOMENDACIONES	343
41. ANÁLISIS DE LA FALLA DE UNA BIELA DE UN COMPRESOR DE GAS	344
41.1. ESTADO DE LA BIELA FALLADA	346
41.2. FRACTOGRAFÍAS Y ESTADO DE LOS CASQUETES	346
41.3. ESTADO DE OTROS ELEMENTOS DEL COMPRESOR	348
41.4. CONCLUSIONES, CONCEPTO DE FALLA Y COMENTARIOS	355
REFERENCIAS	363