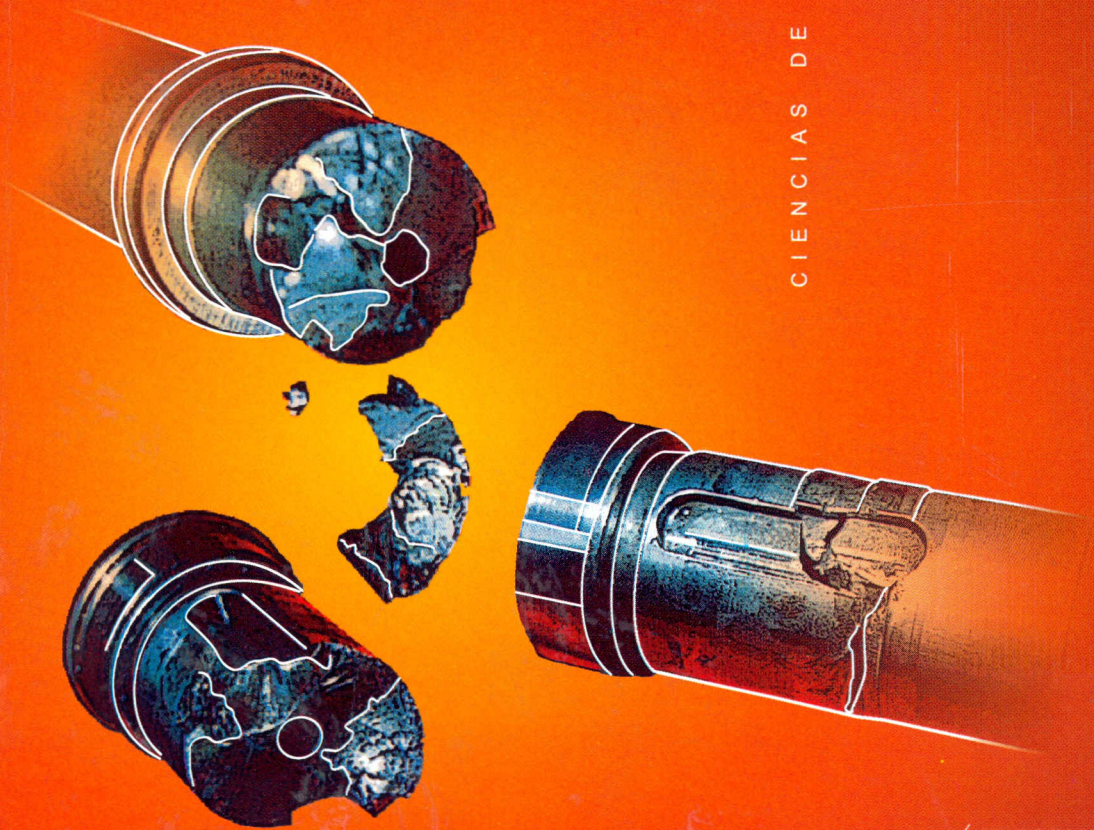


FUNDAMENTOS DEL ANÁLISIS DE FALLA

GUSTAVO TOVAR SÁNCHEZ

CIENCIAS DE LA INGENIERÍA



EDITORIAL
ESCUELA
COLOMBIANA
DE INGENIERÍA

Contenido

PREFACIO

XIX

1. Principios, causas y metodología en el análisis de falla

FUENTES FUNDAMENTALES DE FALLA

2

1. Diseño
2. Selección inadecuada del material
3. Tratamiento térmico defectuoso
4. Manufactura defectuosa
5. Mecanizado deficiente
6. Montaje deficiente
7. Mantenimiento deficiente
8. Fallas de corrosión

2

2

3

3

3

3

3

4

PROCESO DE INVESTIGACIÓN

4

ETAPAS DEL PROCESO DE ANÁLISIS DE LAS FALLAS

4

1. Evidencia documental
2. Condiciones reales de servicio
3. Entrevistas
4. Examen preliminar del componente o equipo que falló
5. Selección de muestras para ensayos
6. Ensayos No Destructivos
7. Selección y preservación de las superficies de fractura
8. Examen macroscópico
9. Examen microscópico de la estructura
10. Determinación del tipo de fractura
11. Análisis de composición del material
12. Ensayos simulados de servicio
13. Formulación de conclusiones e informe
14. Recomendaciones

5

5

5

5

6

6

6

6

7

7

7

7

8

8

OBJETIVOS DE LOS ANÁLISIS DE FALLA

8

2. Propiedades mecánicas

ENSAYO DE TENSIÓN - DIAGRAMA ESFUERZO - DEFORMACIÓN

10

Máquina de tensión

10

Probetas

11

Carga	11
Deformímetros	11
ESFUERZO Y DEFORMACIÓN DE INGENIERÍA	14
UNIDADES	16
PROPIEDADES OBTENIDAS DEL ENSAYO DE TENSIÓN	16
ESFUERZO DE FLUENCIA O RESISTENCIA A LA FLUENCIA	16
RESISTENCIA A LA TENSIÓN	18
PROPIEDADES ELÁSTICAS	19
RELACIÓN DE POISSON	21
Ductilidad	22
EFECTO DE LA TEMPERATURA	23
ENSAYO DE FLEXIÓN PARA MATERIALES FRÁGILES	24
RESISTENCIA A LA FLEXIÓN O MÓDULO DE RUPTURA	25
MÓDULO DE FLEXIÓN	26
Ejemplo ilustrativo	26
ESFUERZO VERDADERO VS. DEFORMACIÓN VERDADERA	27
DUREZA	28
Ensayo de dureza Brinell (BHN)	28
Dureza Vickers (VHN)	29
Dureza Rockwell	29
ENSAYO DE IMPACTO	32
Propiedades obtenidas a partir del ensayo de impacto	33
Uso de las propiedades de impacto	35
MECÁNICA DE LA FRACTURA	36
Tenacidad a la fractura	36
Importancia de la mecánica de la fractura	40
Selección de un material	40
Diseño de un componente	40
Diseño de un método de manufactura o de ensayo	41
Ejemplo ilustrativo	41
ENSAYO DE FATIGA	41
Resultados del ensayo de fatiga	44
Ejemplo ilustrativo	46
ENSAYO DE CREEP O FLUENCIA LENTA	47
Ejemplo ilustrativo	49
REFERENCIAS	51

3. Introducción a los ensayos no destructivos y a los métodos de inspección

DEFINICIONES IMPORTANTES	53
USOS DE LOS NDT	54
Detección y evaluación de fugas	54
Metrología	54
Caracterización de la estructura o de la microestructura	55

Determinación de la respuesta esfuerzo-deformación y de la respuesta dinámica	55
Identificación rápida de metales y aleaciones	56
REFERENCIA	57

4. Inspección visual

BOROSCOPIOS	60
Selección	62
FOCO Y RESOLUCIÓN	62
Iluminación	62
Magnificación y campo de visión	62
Distancia de trabajo	63
Dirección de la visión	63
Ambiente	63
Aplicaciones	64
SENSORES ÓPTICOS	64
Sistemas de magnificación	65
Comparadores ópticos	65
REFERENCIA	66

5. Inspección con líquidos penetrantes

PRINCIPIOS FÍSICOS	68
DESCRIPCIÓN DEL PROCESO	69
SISTEMAS DE PENETRACIÓN	70
Sistemas de lavado con agua del penetrante	70
Sistema posemulsionable	72
Sistema de remoción por solventes	72
MATERIALES PARA DETECCIÓN POR LÍQUIDOS PENETRANTES	73
Penetrantes de lavado en agua	73
Penetrantes posemulsificantes lipofílicos e hidrofílicos	74
Penetrantes removibles por solvente	74
Características físicas y químicas	74
EMULSIFICADORES	75
LIMPIADORES DE SOLVENTE	75
DESARROLLADORES	76
Desarrolladores secos	77
Desarrolladores húmedos	77
Desarrolladores solubles en agua	78
Desarrolladores no acuosos suspendibles en solvente	78
Selección del desarrollador	79
Requerimientos de equipo	80
Prelimpieza	81
SELECCIÓN DEL SISTEMA PENETRANTE	83

Sensibilidad y costo	83
TÉCNICAS CON EQUIPOS PORTÁTILES	85
Kits o conjuntos portátiles	85
Especificaciones y normas	85
Especificaciones	86
SISTEMAS DE CONTROL	86
REFERENCIA	87

6. Inspección con partículas magnéticas

APLICACIONES	89
VENTAJAS	90
LIMITACIONES	90
DESCRIPCIÓN DE LOS CAMPOS MAGNÉTICOS	91
Anillo magnetizado	91
Barra magnetizada	93
MAGNETIZACIÓN CIRCULAR	93
MAGNETIZACIÓN LONGITUDINAL	94
EFFECTO DE LA DIRECCIÓN DE FLUJO	94
MÉTODOS DE MAGNETIZACIÓN	96
CORRIENTE DE MAGNETIZACIÓN	96
Corriente directa	97
Corriente alterna	97
FUENTES DE POTENCIA	98
Equipo portátil	98
Unidades móviles	98
Equipo estacionario	98
MÉTODOS PARA GENERAR CAMPOS MAGNÉTICOS	99
Horquillas	100
Bobinas	101
Conductores centrales	102
Método de contacto directo	103
Contactos de punta	104
Corrientes inducidas	106
PARTÍCULAS MAGNÉTICAS Y LÍQUIDOS PARA SUSPENDERLAS	109
Propiedades magnéticas	110
Efecto del tamaño de la partícula	110
Efecto de la forma de la partícula	110
Visibilidad y contraste	111
Partículas secas	111
Partículas húmedas	111
Líquidos aceitosos para suspensión	112
Líquido de suspensión en agua	112
Potencia del baño	112
LUZ ULTRAVIOLETA	113

Discontinuidades detectables	114
Discontinuidades en la superficie	114
Discontinuidades subsuperficiales	115
INDICACIONES NO RELEVANTES	115
DESMAGNETIZACIÓN DESPUÉS DE LA INSPECCIÓN	116
REFERENCIA	117

7. Inspección por corrientes de Eddy

MÉTODOS DE CORRIENTES DE EDDY VS. MÉTODOS DE INSPECCIÓN MAGNÉTICA	120
PRINCIPIOS DE OPERACIÓN	121
Funciones de un sistema básico	121
Elementos de un sistema de inspección típico	123
VARIABLES DE OPERACIÓN	124
Impedancia de la bobina	124
Conductividad eléctrica	126
Permeabilidad magnética	126
Factor <i>lift-off</i> (de acercamiento entre bobina y pieza)	128
Factor de llenado	129
Efecto de borde	129
Efecto de piel	130
Frecuencias de inspección	132
Bobinas de inspección	133
Bobinas de probeta y circundantes	133
Bobinas múltiples	134
Tamaños y formas	136
INSTRUMENTOS PARA CORRIENTES DE EDDY	136
Instrumentos de lectura	139
DISCONTINUIDADES DETECTABLES POR INSPECCIÓN DE CORRIENTES DE EDDY	139
Muestras de referencia	140
REFERENCIA	141

8. Inspección ultrasónica

DETECTORES ULTRASÓNICOS DE DEFECTOS	144
TRANSDUCTORES	145
AGENTES DE ACOPLAMIENTO	149
MÉTODOS BÁSICOS DE INSPECCIÓN	150
MÉTODO PULSO-ECO	150
Principios de operación	151
Presentación de datos	151
TÉCNICA DE HAZ EN ÁNGULO	154
MÉTODOS DE TRANSMISIÓN	158
CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LAS ONDAS ULTRASÓNICAS	158
Ondas longitudinales	159

Ondas transversales (ondas de corte)	160
Ondas de superficie (ondas Rayleigh)	161
Ondas de Lamb (ondas de placa)	161
FACTORES QUE INFLUENCIAN LA INSPECCIÓN ULTRASONICA	162
Impedancia acústica	163
ÁNGULO DE INCIDENCIA	165
Ángulos críticos	166
Absorción	167
Dispersión	167
VENTAJAS, DESVENTAJAS Y APLICACIONES	167
Ventajas	167
Desventajas	168
Aplicaciones	168
REFERENCIA	169

9. Radiografía

PRINCIPIOS DE OPERACIÓN	172
USOS DE LA RADIOGRAFÍA	172
APLICACIONES	173
LIMITACIONES	175
PRINCIPIOS DE LA RADIOGRAFÍA	176
FACTORES GEOMÉTRICOS	177
FUENTES DE RADIACIÓN	178
PRODUCCIÓN DE RAYOS X	179
PRODUCCIÓN DE RAYOS GAMMA	180
TUBOS DE RAYOS X	180
EQUIVALENCIA RADIOGRÁFICA	185
PRINCIPIOS DE FORMACIÓN DE SOMBRA	186
CONVERSIÓN DE LA IMAGEN	186
Película de rayos X	188
Características de las películas de rayos X	188
Tipos de película	189
Selección de la película	190
REFERENCIA	194

10. Corrosión, prevención y control de la corrosión en la industria

DEFINICIÓN DE LA CORROSIÓN	195
AMBIENTES CORROSIVOS	196
FUNDAMENTOS ELECTROQUÍMICOS DE LA CORROSIÓN	196
CORROSIÓN UNIFORME	199
CORROSIÓN GALVÁNICA	201
CORROSIÓN CON EROSIÓN	203
CORROSIÓN POR RESQUICIOS	206
CORROSIÓN POR PICADURAS	208

EXFOLIACIÓN Y SEPARACIÓN SELECTIVA	210
CORROSIÓN INTERGRANULAR	211
AGRIETAMIENTO POR CORROSIÓN CON ESFUERZOS	212
ENSAYOS DE CORROSIÓN	214
ENSAYO DE PÉRDIDAS DE PESO	215
TÉCNICAS DE RESISTENCIA ELÉCTRICA	217
POLARIZACIÓN LINEAL	217
MEDICIONES DE VELOCIDADES DE CORROSIÓN POR POLARIZACIÓN LINEAL	219
Ventajas	219
Limitaciones y precauciones	219
PREVENCIÓN DE LA CORROSIÓN	220
Selección de materiales	220
Alteración del medio	221
Diseño	222
Protección catódica y anódica	224
Películas (pinturas) y revestimiento de protección	226
CORROSIÓN POR FUENTES DE AGUAS NATURALES	227
Prevención de la corrosión	227
Películas protectoras de carbonato de calcio	228
REFERENCIAS	229

11. Películas de protección

ELECTRODEPOSICIÓN	231
ATOMIZACIÓN CON LLAMA. METALIZACIÓN	232
ENCHAPE	232
INMERSIÓN EN CALIENTE	233
DEPOSICIÓN DE VAPOR	233
DIFUSIÓN	233
CONVERSIÓN QUÍMICA	233
NUEVOS DESARROLLOS. INGENIERÍA DE SUPERFICIE	234
PELÍCULAS POR ATOMIZACIÓN TÉRMICA (<i>THERMAL SPRAY COTTINGS</i> , TSC)	235
Áreas de aplicación	235
Materiales de capa	235
Etapas básicas del proceso de atomización	236
Procesos de atomización térmica	236
Selección del método de atomización o rociado térmico	240
Parámetros del proceso de atomización	240
Preparación de la superficie	240
Velocidad de deposición	240
Limitaciones del espesor de la película	241
Materiales de unión de la película	241
Método de terminado de la película atomizada	241
Pinturas de protección	242
REFERENCIAS	246

12. Fractografía y metalografía

SELECCIÓN, PRESERVACIÓN Y LIMPIEZA DE LAS SUPERFICIES DE FRACTURA	247
Limpieza	248
Corte	248
MODOS DE FRACTURA POR CARGA SIMPLE	249
EXAMEN MACROSCÓPICO DE LAS SUPERFICIES DE FRACTURA	250
EXAMEN MICROSCÓPICO DE LAS SUPERFICIES DE FRACTURA	253
Microscopía óptica	253
Microscopio Electrónico de Transmisión	253
Microscopio Electrónico de Barrido	254
DETERMINACIÓN DEL TIPO DE FRACTURA	257
Fractura dúctil	258
FRACTURA FRÁGIL	263
Fractura intergranular	273
Agrietamiento de corrosión con esfuerzos	276
FRACTURA FRÁGIL TRANSANGULAR	277
Fractografía de las fracturas frágiles intergranulares	278
FRACTURA FRÁGIL INTERGRANULAR	278
FRACTURA POR FATIGA	279
Características generales de las fracturas de fatiga	280
AGRIETAMIENTO DE CORROSIÓN CON ESFUERZOS	284
CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL SCC	284
FRAGILIZACIÓN POR HIDRÓGENO	287
Fractografía de la fragilización por hidrógeno	288
FALLAS POR CREEP Y RUPTURA POR ESFUERZO	288
FALLAS COMPLEJAS	290
SELECCIÓN Y PREPARACIÓN DE SECCIONES PARA METALOGRAFÍA	291
EXAMEN Y ANÁLISIS DE LAS MUESTRAS DE METALOGRAFÍA	294
REFERENCIAS	295

13. Esfuerzos residuales y defectos causados por el proceso de manufactura

DEFINICIÓN	297
FACTORES FUNDAMENTALES SOBRE LOS ESFUERZOS RESIDUALES	298
Esfuerzos residuales térmicos	299
Esfuerzos residuales metalúrgicos	304
Esfuerzos residuales mecánicos	305
EFFECTOS QUÍMICOS SOBRE LOS ESFUERZOS RESIDUALES	308
Defectos causados por el proceso de manufactura	308
Defectos en la fundición	309
DEFECTOS PRODUCIDOS DURANTE EL TRABAJO MECÁNICO DE METALES	313
Trabajo en caliente	314
Quemaduras o temperatura de trabajo excesiva	315

Temperaturas bajas de trabajo	315
Defectos preexistentes en el lingote	315
Esfuerzos residuales	316
Procedimientos de trabajo defectuoso	316
Trabajo en frío	317
DEFECTOS EN EL PROCESO DE SOLDADURA	317
Falta de fusión y penetración	319
Socavación	319
Agrietamiento por hidrógeno	319
DEFECTOS DE TRATAMIENTO TÉRMICO	319
DEFECTOS DE MECANIZADO	320
REFERENCIAS	321

14. Fallas por desgaste

TIPOS DE DESGASTE	324
DESGASTE ADHESIVO	324
Medidas preventivas	326
DESGASTE ABRASIVO	327
FATIGA DE SUPERFICIE O FATIGA POR CONTACTO	329
Picaduras de origen superficial	330
Picaduras de origen subsuperficial	331
Fatiga por debajo de las capas endurecidas	331
DESGASTE POR EROSIÓN (EROSIVO)	332
DESGASTE CORROSIVO O QUÍMICO	332
DESGASTE POR FRICCIÓN REPETITIVA (<i>FRETTING</i>)	333
Prevención	335
CORROSIÓN CON EROSIÓN	336
DESGASTE POR CHOQUE DE GOTEO LÍQUIDO	337
Variables significativas en el choque por goteo líquido	337
MODOS DE LUBRICACIÓN	338
LUBRICANTES	339
Fallas de los lubricantes que conducen a desgaste	340
ANÁLISIS DE FALLAS POR DESGASTE	340
Información sobre antecedentes	341
Examen	341
REFERENCIAS	342

Casos históricos de análisis de falla

CASOS DE ANÁLISIS DE FALLA	343
<i>Ejemplo 1:</i> Falla por corrosión con esfuerzo de una abrazadera tipo correa, hecha de aleación 19-9 DL para resistencia al calor	343
<i>Ejemplo 2:</i> Fractura por fatiga de un eje para émbolo que se inició en un filete agudo	346

<i>Ejemplo 3:</i> Falla frágil del collar de fijación fabricado en placa de laminación en acero grado 4140	348
<i>Ejemplo 4:</i> Fractura de los vástagos de una válvula de disco debido a selección incorrecta del material	350
<i>Ejemplo 5:</i> Guardas para ejes rechazadas por inclusiones de escoria	352
<i>Ejemplo 6:</i> Cigüeñal de un motor diésel que se fracturó por fatiga debido a inclusiones subsuperficiales	354
<i>Ejemplo 7:</i> Fractura de un dado forjado causado por segregación	355
<i>Ejemplo 8:</i> Fractura del brazo de una horquilla de elevación debido a deficiencias microestructurales	356
<i>Ejemplo 9:</i> Fractura frágil de los casquillos de un conjunto de rodillos debido a microestructura inadecuada	358
<i>Ejemplo 10:</i> Indicaciones de superficie en barras de acero 4130 laminado en caliente	360
<i>Ejemplo 11:</i> Falla de una tubería sin costura a causa de grietas de temple	362
<i>Ejemplo 12:</i> Fallas en engranajes y piñones a causa de carburación inapropiada	363
<i>Ejemplo 13:</i> Fractura por tensión originada en porosidad por contracción de un conector fundido en arena en acero de baja aleación	365
<i>Ejemplo 14:</i> Cabezote de un secador de papel de fundición de hierro gris que se retiró de servicio	367
<i>Ejemplo 15:</i> Falla por fatiga de la carcasa para un eje moldeada en arena y fundida en acero, originada en una grieta de punto caliente	371
<i>Ejemplo 16:</i> Agrietamiento por fatiga del conjunto del codo de acero inoxidable en una junta soldada en una región de esfuerzo alto	373
<i>Ejemplo 17:</i> Fractura por fatiga del conjunto de la caja de la cámara de combustión interior de una turbina de gas debido a falta de fusión de la soldadura y a socavación	374
<i>Ejemplo 18:</i> Falla por fatiga de un cabezal de entrada debido a técnica de soldadura pobre y a diseño desfavorable de la junta	376
<i>Ejemplo 19:</i> Falla por distorsión de un resorte para válvula automotriz	378
<i>Ejemplo 20:</i> Agarrotamiento de una válvula hidráulica tipo carrete	380
<i>Ejemplo 21:</i> Daño por rayadura causado por ruptura de la capa de cromo en un cilindro	382
<i>Ejemplo 22:</i> Falla de un impulsor de bronce de una bomba por daño por cavitación	384
<i>Ejemplo 23:</i> Falla por fatiga de un cable de alambres de acero debido a carga de choque	386
<i>Ejemplo 24:</i> Falla de los piñones motores de acero carburado de un impulsor debido a picaduras y desgaste	387

<i>Ejemplo 25:</i> Ruptura de los tubos de acero 1,25 Cr - 0,5 Mo del recalentador de una caldera por recalentamiento localizado	389
<i>Ejemplo 26:</i> Falla de los filetes de la tuerca y de la contratuerca de los ejes de soporte de una prensa de separación de grasa de los sólidos	392
<i>Ejemplo 27:</i> Fallas de las placas de acero inoxidable de un intercambiador de calor para pasterización de un producto alimenticio, por corrosión por resquicios	397
<i>Ejemplo 28:</i> Falla por ruptura de tubería de calderas por deficiencias en el tratamiento del agua de alimentación y por recalentamiento por direccionamiento incorrecto de la llama de combustión	403
<i>Ejemplo 29:</i> Falla por soldadura del eje de la caja reductora de una extrusora	408
<i>Ejemplo 30:</i> Falla de la tubería de alimentación de los productos para el tratamiento del agua de alimentación de una caldera	414
REFERENCIAS	417
BIBLIOGRAFÍA PARA LECTURA SUPLEMENTARIA	418
ÍNDICE DE FIGURAS	437
ÍNDICE DE TABLAS	444
ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS	445
ÍNDICE ANALÍTICO	449