

INSTITUTO NACIONAL DE TECNICA AEROESPACIAL. «Esteban Terradas»

Introducción a los métodos de
ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS
de control de la calidad de los materiales

Francisco Ramírez Gómez

Miguel Angel Fernández Soler
Gabriel Delojo Morcillo
Carlos Valdecantos Martínez

Amador Alonso Roldán
Agustín Sánchez Pascual
José Manuel de los Ríos Rubalcaba

M A D R I D
TERCERA EDICION

INDICE

	<u>Página</u>
INTRODUCCION	XXVII
CAPITULO 1: EMPLEO RACIONAL DE LOS METODOS DE ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS	3
1.1 ETAPAS BASICAS DE LA INSPECCION	4
1.11 Elección del método y técnicas operatorias idóneos	4
1.12 Obtención de una indicación propia	4
1.13 Interpretación de la indicación	5
1.14 Evaluación de la indicación	5
1.2 FACTORES ECONOMICOS	6
1.21 El grado de calidad y su relación con el costo de la producción y el valor comercial del producto	6
1.211 Desplazamiento de la zona de rentabilidad por un factor imprevisto	7
1.212 Deformación de la zona de rentabilidad	8
1.213 Restablecimiento de una zona coherente de rentabilidad	8
1.214 Punto óptimo de funcionamiento	9
1.22 Balance económico de los métodos de Ensayos no Destructivos	9
1.221 Disminución lograda en los costos de la producción	9
1.222 Costos del ensayo	10
1.23 Justificación económica de una inspección previa en las primeras materias o en produc- tos semielaborados	10
1.24 Programación de los ensayos	11
1.241 Primeras materias	11
1.242 Materiales en proceso de elaboración	12
1.243 Materiales en servicio	12
1.244 Número de ensayos diferentes	13
— Referencias del Capítulo 1	13

	<i>Página</i>
CAPITULO 2: RADIOLOGIA INDUSTRIAL	17
2.1 FUNDAMENTOS FISICOS	18
2.11 <i>Historia</i>	18
2.12 <i>Conexión de la radiología con la física</i>	19
2.121 <i>Espacio, tiempo y relatividad</i>	19
2.122 <i>La radiación electromagnética</i>	21
2.123 <i>La naturaleza de los rayos X</i>	22
2.124 <i>El fenómeno cuántico</i>	23
2.125 <i>La estructura de la materia</i>	23
2.126 <i>Partículas elementales y átomos</i>	24
2.2 TECNICAS RADIOGRAFICAS CONVENCIONALES	25
2.21 <i>Principios geométricos</i>	25
2.22 <i>Fuentes: Generación de los rayos X y γ</i>	29
2.221 <i>Fuentes convencionales generadoras de rayos X</i>	29
2.221.1 <i>Tubos de rayos X «normales»</i>	34
2.221.2 <i>Tubos especiales de rayos X</i>	37
2.222 <i>Fuentes isotópicas</i>	38
2.222.1 <i>Características de las fuentes isotópicas</i>	39
2.222.2 <i>Contenedores</i>	45
2.23 <i>Comparación entre las fuentes electrónicas y las isotópicas</i>	47
2.24 <i>Absorción y difusión de la radiación</i>	48
2.241 <i>El efecto Thompson o efecto fotoeléctrico</i>	49
2.242 <i>El efecto Compton</i>	51
2.243 <i>La producción de pares</i>	52
2.244 <i>Efecto Rayleigh</i>	53
2.245 <i>Interacciones de las radiaciones ultrablandas con la materia</i>	53
2.246 <i>Consideraciones prácticas en torno a la absorción</i>	54
2.25 <i>Película radiográfica. Proceso fotográfico</i>	55
2.251 <i>Revelado</i>	56
2.252 <i>Fijado</i>	57
2.253 <i>Lavado y secado</i>	58
2.26 <i>Características de la imagen y de las películas radiográficas</i>	58
2.261 <i>Hojas reforzadoras</i>	61
2.27 <i>Estudio de las variables que inciden en la calidad de una radiografía</i>	63
2.271 <i>Contraste subjetivo</i>	64
2.272 <i>Cálculo de las exposiciones</i>	65
2.273 <i>La evaluación de la calidad de las radiografías</i>	70

	Página
2.273.1 Indicadores de calidad de imagen	71
2.273.2 Indicadores de calidad de imagen de uso común: ICI europeos ...	72
2.273.3 Comentarios al empleo de los ICI: Índice de sensibilidad	82
2.28 Técnicas operatorias	84
2.281 Examen radiográfico de uniones soldadas	84
2.281.1 Uniones «a tope»	84
2.281.2 Uniones en ángulo	92
2.282 Examen radiográfico de piezas moldeadas	95
2.282.1 Piezas pequeñas de aleación ligera	95
2.282.2 Piezas pequeñas de aleaciones pesadas	95
2.282.3 Piezas de tamaño grande o mediano	97
2.283 Examen radiográfico de sistemas y de componentes, en fase de montaje o en servicio	97
2.29 Interpretación de las indicaciones de la imagen radiográfica	99
2.291 Tipos de heterogeneidades y de anomalías detectables radiográficamente	100
2.291.1 Uniones soldadas	107
2.291.2 Piezas moldeadas	115
2.291.3 Sistemas y componentes en fase de montaje o en servicio	123
2.292 Localización de heterogeneidades	148
2.293 Atlas de radiografías tipo	150
2.294 Indicaciones falsas	151
2.3 TÉCNICAS RADIOGRAFICAS ESPECIALES	153
2.31 Técnicas que emplean radiaciones electromagnéticas de longitud de onda $\lambda < 100 \text{ Å}$...	154
2.311 Técnicas que utilizan equipos especiales generadores de rayos X	154
2.311.1 Técnicas de muy baja tensión	154
2.311.2 Técnicas de alta y muy alta tensión	156
2.311.3 Técnicas radiográficas para objetos en movimiento	162
2.312 Técnicas que emplean medios especiales de registro	164
2.312.1 Xerorradiografía	164
2.312.2 Ionografía	165
2.312.3 Radiografía cromática o coloreada	166
2.313 Técnicas especiales de exposición	166
2.313.1 Tomografía	166
2.313.2 Solidografía	168
2.313.3 Radiografía continua	168
2.313.4 Microrradiografía	169
2.314 Técnicas que utilizan medios especiales de observación	172
2.314.1 Fluoroscopia	172
2.314.2 Estereorradiografía	178
2.32 Radiografía mediante emisión de partículas subatómicas	179
2.321 Radiografía mediante neutrones o neutrografía	179

	<i>Página</i>
2.321.1 Fuentes de neutrones	180
2.321.2 Interacción de los neutrones con la materia	185
2.321.3 Moderación	187
2.321.4 El registro de la imagen	190
2.321.5 Aplicaciones de la neutrografía	193
2.322 Betagrafía	194
2.33 Radiografía mediante la radiación propia o inducida en el objeto	197
2.331 Autorradiografía	197
2.4 RIESGOS, DOSIMETRIA, PROTECCION Y MEDIDAS DE SEGURIDAD	197
2.41 Riesgos y dosimetría	197
2.42 Protección y medidas de seguridad	199
2.421 Protección y medidas de seguridad frente a la radiación directa de las fuentes isotópicas	200
2.422 Protección y medidas de seguridad frente a la radiación directa de las fuentes de rayos X	203
2.423 Radiación de «fuga»	206
2.424 Protección y medidas de seguridad frente a la radiación difusa	206
2.425 Detectores de radiación	207
2.425.1 Cámaras de ionización	207
2.425.2 Contadores Geiger-Müller	207
— Referencias del Capítulo 2	209
CAPITULO 3: ULTRASONIDOS	217
3.1 NATURALEZA Y PROPIEDADES DE LAS ONDAS ULTRASONICAS	219
3.11 Propagación de las ondas ultrasónicas en diversos medios	219
3.111 Parámetros	222
3.112 Modos o tipos de ondas	222
3.112.1 Onda longitudinal	222
3.112.2 Onda transversal	222
3.112.3 Onda de superficie	223
3.112.4 Onda de Lamb	223
3.113 Formas de ondas	224
3.114 Fórmulas y datos numéricos	225
3.114.1 Frecuencia, longitud de onda y velocidad acústica	225
3.114.2 Impedancia acústica	225
3.114.3 Presión acústica	226
3.114.4 Energía acústica específica	226
3.114.5 Intensidad acústica	229
3.114.6 Amplitud máxima de oscilación	230

	Página
3.114.7 Velocidad acústica	230
3.114.8 Otros datos numéricos	231
3.12 Comportamiento de las ondas ultrasónicas en superficies límites	231
3.121 Incidencia perpendicular o normal	231
3.121.1 Superficie límite única y plana	231
3.121.2 Superficies límites múltiples	233
3.122 Incidencia angular	238
3.122.1 Leyes de la reflexión y de la refracción	238
3.122.2 Valores de la presión acústica	240
3.13 Características de un campo ultrasónico de un oscilador	242
3.131 Campo próximo y campo lejano	242
3.132 Campo ultrasónico simplificado	245
3.133 Campo ultrasónico con una excitación no uniforme del oscilador. Excitación por impulsos	246
3.14 Eco y sombra de un obstáculo en un campo ultrasónico	247
3.141 Eco y sombra de un obstáculo en forma de disco circular perpendicular al eje del oscilador	248
3.141.1 Eco del obstáculo	248
3.141.2 Sombra del obstáculo	250
3.142 Heterogeneidades con orientación oblicua en forma de disco circular	251
3.143 Heterogeneidades muy pequeñas	253
3.144 Heterogeneidades naturales	253
3.144.1 Efecto de la rugosidad	253
3.144.2 Efecto de la morfología	254
3.144.3 Efecto de la naturaleza de la heterogeneidad	254
3.15 Atenuación de las ondas ultrasónicas en los sólidos	255
3.151 Dispersión	255
3.152 Absorción	255
3.153 Ley de la atenuación	256
3.16 Generación y recepción de las ondas ultrasónicas	256
3.161 Efecto piezoeléctrico	257
3.161.1 Frecuencia característica fundamental	258
3.161.2 Excitación por impulsos	258
3.161.3 Materiales piezoeléctricos	259
3.162 Efecto magnetostrictivo	260
3.163 Generación y recepción de los diversos modos o tipos de ondas ultrasónicas para los ensayos no destructivos de materiales	260
3.2 EQUIPOS Y TECNICAS OPERATORIAS	261
3.21 Características de diseño de los equipos de ultrasonidos	261
3.211 Sistema de excitación de los ultrasonidos	264

	<i>Página</i>
3.212 Frecuencia de excitación y dimensiones óptimas del cristal piezoeléctrico	265
3.213 Sistema de emisión y recepción de los ultrasonidos	267
3.213.1 Método de resonancia	268
3.213.2 Método de transparencia o de sombra	269
3.213.3 Métodos de impulso-eco	270
3.214 Características de diseño de los equipos de medida de la intensidad acústica y del tiempo de recorrido —IT	274
3.214.1 Sistema de sincronismo	275
3.214.2 Generador de alta frecuencia	279
3.214.3 Amplificador	281
3.214.4 Sistemas de representación	284
3.214.5 Monitores	286
3.22 Factores que influyen en la transmisión de los ultrasonidos a través de la superficie de exploración de la muestra de ensayo	287
3.221 Efecto del medio de acoplamiento	288
3.222 Efecto de la condición y estado de acabado de la superficie de exploración ...	289
3.223 Efecto de la curvatura de la superficie de exploración	290
3.224 Efecto de la frecuencia de excitación y del diámetro del cristal	292
3.23 Palpadores	293
3.231 Palpadores de contacto	293
3.231.1 Palpadores de incidencia normal	293
3.231.2 Palpadores angulares de ondas longitudinales y de ondas transversales.	298
3.231.3 Palpadores de ondas de superficie	304
3.231.4 Palpadores angulares de incidencia variable (generación de ondas de Lamb)	305
3.232 Palpadores de inmersión	306
3.232.1 Palpadores focalizantes	310
3.232.2 Palpadores de inmersión local	310
3.232.3 Instalaciones para ensayos por inmersión	311
3.233 Palpadores especiales	311
3.24 Técnicas operatorias	313
3.241 Muestras con superficies paralelas relativamente próximas	322
3.241.1 Medida de espesores	323
3.241.2 Detección de heterogeneidades	324
3.242 Muestras cilíndricas o prismáticas	332
3.242.1 Detección de heterogeneidades internas	332
3.242.2 Detección de heterogeneidades superficiales	338
3.242.3 Varillas, alambres e hilos	340
3.243 Uniones soldadas	340
3.243.1 Uniones a tope	341
3.243.2 Uniones soldadas por puntos	346
3.243.3 Otras uniones soldadas	347

	Página
3.244 Muestras de forma compleja	348
3.244.1 Inspección de fabricación	348
3.244.2 Revisiones de mantenimiento (ejemplos)	351
3.245 Resumen	357
3.3 INTERPRETACION DE LAS INDICACIONES	363
3.31 Tipos de heterogeneidades detectables	363
3.311 Características de la heterogeneidad	363
3.312 Características del material	364
3.313 Parámetros del ensayo	364
3.313.1 Frecuencia	364
3.313.2 Características del palpador	364
3.313.3 Características de diseño del equipo	366
3.32 Detección e identificación de una heterogeneidad	366
3.321 Morfología de la heterogeneidad	366
3.322 Orientación de la heterogeneidad	371
3.323 Posición de la heterogeneidad	371
3.323.1 Incidencia normal	371
3.323.2 Incidencia angular	372
3.323.3 Ondas de superficie	374
3.324 Tamaño de la heterogeneidad	374
3.325 Naturaleza de la heterogeneidad	375
3.33 Criterios y técnicas operatorias para la determinación del tamaño de las heterogeneidades	375
3.331 Heterogeneidades mayores que la sección transversal del haz ultrasónico	375
3.332 Heterogeneidades menores que la sección del haz ultrasónico	376
3.332.1 Bloques patrón o de referencia	378
3.332.2 Diagramas DAT	381
3.332.3 La atenuación en los metales	383
3.332.4 Pérdidas en la transmisión	387
3.332.5 Determinación del tamaño equivalente de una heterogeneidad mediante el diagrama DAT	388
3.332.6 Escalas DAT	390
3.332.7 Discusión acerca de los diagramas y escalas DAT	393
3.34 Guía para la interpretación	394
3.35 Indicaciones falsas	394
3.351 Interferencias eléctricas	394
3.352 Parásitos motivados por el palpador	395
3.353 Parásitos originados por la rugosidad superficial de la muestra	395
3.354 Parásitos debidos a reflexiones con conversión de ondas	396
3.355 Parásitos debidos a detalles constructivos de la muestra de ensayo	397
3.356 Parásitos debidos a la estructura del material	398
3.357 Parásitos accidentales	398
— Referencias del Capítulo 3	399

	<i>Página</i>
CAPITULO 4: METODOS DE CAMPOS MAGNETICOS	403
4.1 PROPIEDADES MAGNETICAS DE LOS MATERIALES	404
4.11 <i>El magnetismo en los medios materiales</i>	407
4.12 <i>Permeabilidad y susceptibilidad magnéticas</i>	407
4.13 <i>Imanación de un material ferromagnético</i>	408
4.14 <i>Curva de imanación de un material ferromagnético</i>	408
4.15 <i>Curva de histéresis</i>	409
4.16 <i>Pérdidas por histéresis</i>	409
4.17 <i>Permeabilidad magnética</i>	410
4.18 <i>Campos desmagnetizantes</i>	410
4.19 <i>Efecto Hall</i>	411
4.2 METODOS DE CAMPOS MAGNETICOS ESTATICOS	412
4.21 <i>Ondas eléctricas no sinusoidales y medida de armónicos</i>	412
4.22 <i>Sondas Foerster</i>	413
4.221 <i>Construcción y funcionamiento de las sondas de medida</i>	415
4.222 <i>Acoplamiento de las sondas en los palpadores Foerster</i>	415
4.223 <i>Medida de campos magnéticos uniformes</i>	416
4.224 <i>Medida de la diferencia entre las intensidades de dos campos magnéticos distintos o de dos puntos de un campo magnético no uniforme (gradientes de campos magnéticos)</i>	418
4.225 <i>Influencia del campo magnético terrestre en la medida de campos magnéticos estáticos y su corrección</i>	419
4.23 <i>Generadores Hall</i>	419
4.24 <i>Equipos y técnicas operatorias</i>	420
4.241 <i>Medidores Foerster</i>	420
4.241.1 <i>Magnetoscopio Foerster</i>	420
4.241.2 <i>Coercímetro</i>	421
4.241.3 <i>Coercímetro para medidas a temperatura elevada</i>	422
4.242 <i>Otros equipos y técnicas operatorias</i>	422
4.25 <i>Areas de aplicación</i>	422
4.251 <i>Aplicaciones basadas en la medida de la fuerza coercitiva y magnetización remanente</i>	423
4.251.1 <i>Clasificación de materiales por ensayos de medida de la fuerza coercitiva</i>	423
4.251.2 <i>Ensayos por el método de polo magnético puntual</i>	424
4.252 <i>Aplicaciones basadas en las variaciones de densidad de flujo magnético</i>	426
4.252.1 <i>Medida de espesores de muestras no ferromagnéticas</i>	426
4.252.2 <i>Medida de espesores de muestras ferromagnéticas</i>	426

	Página
4.252.3 Medida de espesores de recubrimientos no ferromagnéticos sobre una base ferromagnética	427
4.253 Aplicaciones basadas en las medidas de campos magnéticos producidos por corrientes continuas	428
4.253.1 Control de excentricidad de tubos	428
4.253.2 Control de excentricidad de un conductor con su recubrimiento aislante	428
4.253.3 Medida de profundidad de grietas	429
4.254 Otras aplicaciones	429
4.254.1 Determinación del contenido en ferrita en materiales no ferromagnéticos	429
4.254.2 Control de nivel de líquidos	430
4.254.3 Medida de flujos de fluidos	430
4.254.4 Medida del verdadero campo tangencial en las muestras de ensayo, para la optimación del examen por partículas magnéticas	430
4.3 METODOS DE CAMPOS MAGNETICOS DINAMICOS	432
4.31 Método de determinación del ciclo de histéresis	432
4.311 Aplicaciones del método de determinación del ciclo de histéresis a la selección de materiales	433
4.32 Método de control diferencial	434
4.33 Medida de la pérdida de potencia	434
— Referencias del Capítulo 4	435
 CAPITULO 5: METODOS DE INDUCCION ELECTROMAGNETICA — CORRIENTES INDUCIDAS	 439
5.1 PRINCIPIOS BASICOS, EQUIPOS Y TECNICAS OPERATORIAS	440
5.11 Solenoide rodeando una muestra cilíndrica (solenoide envolvente)	442
5.111 Estudio teórico. Permeabilidad magnética efectiva y función característica	443
5.111.1 Solenoide con bobina secundaria	443
5.111.2 Solenoide simple	447
5.111.3 Resumen: representación y significado de μ_{ef} y de $[1-\eta+\eta\mu_r\mu_{ef}]$	449
5.112 Obtención de la información sobre los distintos parámetros de la muestra de ensayo	450
5.112.1 Muestras no ferromagnéticas	450
5.112.2 Muestras ferromagnéticas	454
5.113 Zonas en los planos complejos de impedancia aparente o de voltaje normalizados con máximo poder de resolución	457
5.12 Solenoide aplicado a la superficie de la muestra (palpadores)	459
5.121 Efecto de separación	459
5.122 Efecto de la curvatura de la superficie de la muestra	462

	<i>Página</i>
5.123 Efecto de borde	462
5.124 Características de los palpadores	466
5.13 Correlación entre las propiedades físicas de la muestra y sus características meta- lúrgicas	468
5.14 Penetración de las corrientes inducidas	468
5.141 Distribución del campo magnético y de las corrientes inducidas en el interior de una muestra cilíndrica metálica	469
5.142 Profundidad efectiva de penetración	471
5.15 Frecuencia óptima de ensayo	474
5.16 Equipos y técnicas operatorias	476
5.161 Frecuencia de ensayo	476
5.162 Intensidad del campo magnético	477
5.163 Saturación magnética	477
5.164 Selector de fase y sistemas de representación de las indicaciones	477
5.165 Disposición de los solenoides	480
5.165.1 Control absoluto	480
5.165.2 Control diferencial	481
5.166 Características de diseño de los equipos de corrientes inducidas	482
5.2 APLICACIONES METALURGICAS DE ESTOS METODOS	486
5.3 CARACTERIZACION DE LOS MATERIALES METALICOS	487
5.31 Materiales ferromagnéticos	488
5.311 Clasificación por la naturaleza o composición	489
5.312 Clasificación por estado de tratamiento	491
5.313 Clasificación por naturaleza y por estado de tratamiento	491
5.314 Determinación de la profundidad y dureza de capas endurecidas	493
5.314.1 Capas cementadas	494
5.314.2 Capas endurecidas por temple superficial	495
5.314.3 Capas nitruradas	499
5.315 Factores que afectan los resultados de los ensayos de materiales ferromag- néticos	501
5.32 Materiales no ferromagnéticos	502
5.321 Conductividad eléctrica de varios metales y aleaciones a temperatura de 20°C.	505
5.322 Metales no aleados	505
5.322.1 Cobre	505
5.322.2 Aluminio	507
5.322.3 Titanio	508
5.323 Aleaciones de aluminio	508
5.323.1 Aleaciones de aluminio bonificables	508
5.323.2 Aleaciones de aluminio no bonificables endurecidas por acritud	511

	<i>Página</i>
5.324 Aleaciones de cobre	511
5.324.1 Aleaciones de cobre bonificables	511
5.324.2 Aleaciones de cobre no bonificables endurecibles por acritud	512
5.325 Aleaciones de titanio	513
5.326 Otros metales y aleaciones	514
5.327 Factores que afectan los resultados de los ensayos de materiales no ferro- magnéticos	515
5.4 ZONAS AFECTADAS POR CALENTAMIENTOS LOCALES	515
5.41 Detección de zonas afectadas por calentamientos locales	515
5.42 Ejemplo de aplicación	518
5.5 PROBLEMAS DE CORROSION	521
5.51 Detección, identificación y determinación de la profundidad de la corrosión	522
— Referencias del Capítulo 5	526
CAPITULO 6: DETECCION DE GRIETAS SUPERFICIALES	531
6.1 LIQUIDOS PENETRANTES	532
6.11 Fundamento, aplicaciones y limitaciones	532
6.111 Etapas básicas del ensayo	532
6.112 Aplicaciones	535
6.113 Limitaciones	535
6.12 Naturaleza y propiedades de los líquidos penetrantes	535
6.121 Propiedades físicas de los líquidos penetrantes	536
6.121.1 Viscosidad	536
6.121.2 Tensión superficial y poder humectante	536
6.121.3 Volatilidad	537
6.121.4 Inercia química	537
6.121.5 Toxicidad, olor, irritación de la piel	537
6.122 Tipos de líquidos penetrantes	537
6.122.1 Penetrantes fluorescentes	537
6.122.2 Penetrantes coloreados	538
6.13 Naturaleza y propiedades de los reveladores	538
6.131 Propiedades de los reveladores	538
6.132 Tipos de reveladores	538
6.133 Reveladores en forma de polvo seco	539
6.133.1 Aplicación de los reveladores secos	539
6.134 Reveladores húmedos	539
6.134.1 Aplicación de los reveladores húmedos	539
6.135 Selección del revelador	540
6.14 Ventajas y limitaciones de los diferentes tipos de líquidos penetrantes	540

	<i>Página</i>
6.15 <i>Tiempos de penetración, de eliminación y de revelado</i>	543
6.151 <i>Tiempo de penetración</i>	543
6.152 <i>Tiempo de eliminación</i>	543
6.153 <i>Tiempo de revelado</i>	543
6.16 <i>Fuentes de luz negra</i>	543
6.161 <i>Efectos fisiológicos de la luz negra</i>	544
6.17 <i>Interpretación y registro de las indicaciones</i>	544
6.171 <i>Mecanismo de formación de las indicaciones</i>	544
6.172 <i>Factores a tener en cuenta en la interpretación</i>	544
6.172.1 <i>Aspecto de las indicaciones</i>	545
6.172.2 <i>Otros elementos de juicio para interpretar una indicación</i>	546
6.173 <i>Registro de las indicaciones</i>	546
6.18 <i>Indicaciones falsas</i>	546
6.181 <i>Lavado defectuoso</i>	546
6.182 <i>Manipulación poco cuidadosa</i>	546
6.183 <i>Geometría y construcción de la pieza</i>	557
6.19 <i>Control de la calidad de los líquidos penetrantes</i>	557
6.191 <i>Control de la sensibilidad</i>	557
6.192 <i>Control del brillo (para líquidos penetrantes fluorescentes)</i>	557
6.2 <i>PARTICULAS FILTRADAS</i>	558
6.21 <i>Fundamentos del método</i>	558
6.211 <i>Formación de las indicaciones</i>	558
6.211.1 <i>Influencia de la porosidad</i>	558
6.211.2 <i>Influencia del líquido de ensayo</i>	558
6.212 <i>Influencia de un tratamiento de prehumectación</i>	559
6.213 <i>Indicaciones falsas</i>	559
6.3 <i>PARTICULAS ELECTRIZADAS</i>	559
6.31 <i>Fundamentos del método</i>	560
6.311 <i>Naturaleza de las partículas</i>	560
6.312 <i>Capas no conductoras sobre base metálica</i>	560
6.312.1 <i>Limitaciones</i>	561
6.313 <i>Materiales no conductores sin base metálica</i>	561
6.32 <i>Materiales y equipo</i>	562
6.321 <i>Material</i>	562
6.322 <i>Equipo</i>	562
6.33 <i>Precauciones</i>	562
6.331 <i>Efecto de las cargas electrostáticas</i>	562

	Página
6.332 Efecto de la humedad atmosférica	562
6.333 Excesiva temperatura del objeto	563
6.334 Pérdida de indicaciones	563
6.335 Probetas patrón	563
6.34 Interpretación de las indicaciones	563
6.341 Indicaciones falsas	563
6.4 PARTICULAS MAGNETICAS	564
6.41 Fundamentos del método	564
6.42 Sistemas de magnetización	568
6.421 Magnetización mediante imanes	568
6.422 Magnetización mediante corriente eléctrica	569
6.422.1 Magnetización mediante paso de corriente a través de la pieza	569
6.422.2 Magnetización con bobinas o solenoides	573
6.43 Las partículas magnéticas	574
6.431 Efecto del tamaño de las partículas magnéticas	574
6.431.1 Por vía seca	574
6.431.2 Por vía húmeda	574
6.432 Efecto de la forma de las partículas magnéticas	575
6.433 Permeabilidad magnética, retentividad y fuerza coercitiva	575
6.434 Movilidad	575
6.435 Visibilidad y contraste	576
6.44 Técnicas operatorias y campos de aplicación	576
6.441 Características de las discontinuidades y de las piezas a ensayar que influyen sobre la elección de la técnica de ensayo	577
6.442 Elección del sistema de magnetización y de las partículas magnéticas	577
6.442.1 Elección del tipo de corriente de magnetización	577
6.442.2 Elección del tipo de partículas. Comparación entre su aplicación por vía seca y por vía húmeda	578
6.442.3 Ventajas y limitaciones de ambos métodos	579
6.442.4 Comparación entre el método residual y el método continuo	579
6.45 Instalaciones para magnetización	579
6.451 Instalaciones universales	579
6.451.1 Unidades portátiles	579
6.451.2 Unidades fijas	605
6.452 Instalaciones automáticas	605
6.46 Interpretación y registro de las indicaciones	605
6.461 Interpretación de las indicaciones	605
6.462 Registro de las indicaciones	607
6.463 Indicaciones falsas	607

	<i>Página</i>
6.47 Desmagnetización	608
6.471 Límites de la desmagnetización	609
6.472 Desmagnetización aparente	609
6.473 Sistemas de desmagnetización	610
6.474 Medida del campo magnético residual	611
6.5 DETECCION Y MEDIDA DE LA PROFUNDIDAD DE GRIETAS	611
6.51 Métodos magnéticos	611
6.511 Equipos por corrientes inducidas	612
6.511.1 Equipos por exploración de la superficie mediante sonda o palpador.	613
6.511.2 Equipos por paso de la muestra por el interior de un solenoide	613
6.512 Equipos basados en la distorsión magnética	614
6.512.1 Detección mediante sonda	614
6.512.2 Detección mediante banda magnética. Magnetografía	615
6.52 Métodos eléctricos, basados en la conducción de corriente eléctrica	615
6.521 Procedimiento para determinar la profundidad de grietas	616
6.522 Otras aplicaciones	617
6.6 SENSIBILIDAD Y FIABILIDAD DE LOS METODOS DE ENSAYOS NO DESTRUC- TIVOS EN LA DETECCION CUANTITATIVA DE GRIETAS SUPERFICIALES	617
6.61 Mecánica de las fracturas	618
6.611 Tamaño crítico de un defecto	619
6.612 Comparación entre diferentes materiales estructurales	620
6.613 Aligeramiento de los componentes estructurales	622
6.62 El binomio: Mecánica de las fracturas - Ensayos no destructivos (MF - END) como criterio de diseño	622
6.621 Discontinuidades o imperfecciones más agresivas	623
6.622 Tamaño mínimo de grieta detectable mediante END	623
6.63 Sensibilidad y fiabilidad de los métodos de ensayos no destructivos	623
6.631 Probabilidad de detección de una grieta con un nivel de confianza dado	624
6.631.1 Tamaño de la muestra	624
6.631.2 Gráficos de probabilidad de detección de grietas en función de su tamaño. Umbral de detección U_D	625
6.632 Estudios estadísticos experimentales. Algunos ejemplos	626
6.632.1 Aptitud o capacidad de los END en la detección de grietas	626
6.632.2 Habilidad o destreza de los operadores	629
— Referencias del Capítulo 6	633
 CAPITULO 7: NUEVOS METODOS Y TECNICAS ESPECIALES DE ENSA- YOS NO DESTRUCTIVOS	 637
7.1 EL ESPECTRO ELECTROMAGNETICO	637
7.11 Región del espectro visible	639

	Página
7.111 Interferometría holográfica	639
7.111.1 Técnicas operatorias y aplicaciones	640
7.112 Fibras ópticas	641
7.112.1 Principios teóricos	641
7.112.2 Pérdidas ópticas. Atenuación de la radiación	643
7.112.3 Materiales y formas de las fibras ópticas	644
7.112.4 Propiedades ópticas	644
7.112.5 Aplicaciones	645
7.12 Región del espectro infrarrojo	646
7.121 Termografía mediante radiómetros (métodos dinámicos)	647
7.13 Región de las ondas hertzianas	649
7.131 Métodos por microondas	650
7.131.1 Propagación de las microondas	650
7.131.2 Técnicas operatorias	652
7.132 Métodos dieléctricos (radioondas)	653
7.133 Métodos eléctricos (estáticos y dinámicos)	653
7.133.1 Ensayo «corona»	654
7.134 Métodos magnéticos (estáticos y dinámicos)	654
7.134.1 Corrientes inducidas multifrecuencia	655
7.2 EL ESPECTRO ACUSTICO	660
7.21 Región sónica	661
7.22 Región ultrasónica	662
7.221 Espectroscopía ultrasónica	663
7.221.1 Técnicas operatorias	663
7.221.2 Ejemplos de aplicaciones	663
7.221.3 Desarrollos futuros	666
7.222 Emisión acústica	666
7.222.1 Investigación de la mecánica de las fracturas y del comportamiento de los materiales	667
7.222.2 Integridad de las estructuras	668
7.222.3 Desarrollos futuros	669
7.3 OTROS NUEVOS METODOS Y TECNICAS ESPECIALES	669
7.31 Radiografía mediante emisión de partículas subatómicas	669
7.311 Radiografía mediante protones	670
7.32 Métodos basados en fenómenos de capilaridad, absorción y estanquidad	672
7.33 Análisis de tensiones	672
— Referencias del Capítulo 7	673
* * *	
APENDICE I: Normas, especificaciones y recomendaciones sobre Ensayos no Destructivos.	677
APENDICE II: Bibliografía	725
APENDICE III: Resumen de la legislación referente a la Radiología industrial	733
INDICES de tablas, de figuras y de láminas	741