

# ÍNDICE

<b>PRÓLOGO</b> .....	13
<b>TEMA 1: PROCESOS DE CONFORMADO</b> .....	15
1.1. Introducción .....	15
1.2. Consideraciones sobre el conformado .....	17
1.2.1. Influencia de la temperatura sobre el conformado .....	19
1.2.2. Variaciones estructurales en el conformado .....	20
1.2.3. Velocidad de deformación generalizada en el conformado .....	24
1.2.4. Otros aspectos que afectan al conformado .	27
1.3. Conformado de productos no planos .....	30
1.3.1. Forja libre .....	31
1.3.2. Forja cerrada .....	34
1.4. Laminado .....	37
1.4.1. Laminación controlada .....	43
1.5. Extrusión .....	45
1.6. Embutición .....	47
1.7. Trefilado .....	49
1.8. Plegado .....	51
1.9. Conformado de materiales metálicos en estado semisólido .....	51
1.9.1. Introducción .....	51
1.9.2. Consideraciones generales .....	53
1.9.3. Desarrollo del proceso de conformado en estado semisólido .....	55
1.9.3.1. Colada magneto-hidrodinámica (MHD) .....	56
1.9.3.2. Control del proceso de colada ....	57
1.9.3.3. Proceso de deformación .....	58
1.9.4. Aplicaciones .....	61

1.9.5. Consideraciones finales .....	66
1.10. Conformado por moldeo .....	67
1.10.1. Tipos de conformado por moldeo .....	68
1.10.2. Parámetros del conformado por moldeo.	76
1.11. Simulaciones del conformado .....	79
<b>TEMA 2: SINTERIZACIÓN .....</b>	<b>89</b>
2.1. Introducción .....	89
2.2. El conformado pulvimetalúrgico .....	90
2.3. Fundamentos teóricos del sinterizado .....	91
2.3.1. Estado inicial .....	95
2.3.2. Estado intermedio .....	96
2.3.3. Etapa final .....	97
2.4. Compactación previa en el sinterizado .....	98
2.4.1. La pieza en verde .....	99
2.5. Sinterizado de polvos mixtos .....	101
2.6. Sinterización forzada .....	101
2.7. Sinterizado con fase líquida .....	102
2.7.1. Densificación .....	104
2.8. Operaciones prácticas y sus efectos .....	104
2.9. Técnicas de conformado en caliente .....	105
2.9.1. Compactación isostática .....	105
2.9.2. Compactación pseudoisostática .....	106
2.10. Spray forming .....	107
2.11. Plasma spray .....	108
2.12. Aplicaciones .....	109
<b>TEMA 3: TÉCNICAS DE UNIÓN .....</b>	<b>113</b>
3.1. Introducción .....	113
3.2. Clasificación de las uniones .....	114
3.3. Técnicas de unión mediante dispositivos o accesorios .....	115
3.4. Unión mediante adhesivos .....	124
3.5. Ensamblaje .....	127
3.6. Soldadura .....	129
3.6.1. Clasificación .....	131
3.6.2. Aspectos metalúrgicos de la soldadura ....	133
3.6.2.1. Mecanismos de continuidad .....	134
3.6.2.2. Energía de activación de la intercara. ....	135
3.6.2.3. Efectos de los transitorios térmicos. ....	136

**TEMA 4: COMPORTAMIENTO DE LOS MATERIALES**

<b>EN SERVICIO</b> .....	141
4.1. Introducción .....	141
4.2. Fallos en servicio .....	141
4.2.1. Análisis de fallos .....	142
4.2.2. Clasificación de fallos .....	143
4.2.3. Mecanismos de fractura .....	145
4.3. Corrosión .....	146
4.3.1. Introducción .....	146
4.3.2. Tipos de corrosión .....	148
4.3.3. Prevención de la corrosión .....	151
4.3.4. Fractura por corrosión bajo tensiones ....	152
4.3.4.1. Susceptibilidad del material .....	154
4.3.4.2. Estado de tensiones .....	155
4.3.4.3. Influencia del medio ambiente ....	156
4.3.4.4. Mecanismos de fractura .....	157
4.3.4.5. Soluciones posibles .....	158
4.4. Fatiga .....	158
4.4.1. Introducción .....	158
4.4.2. Factores que afectan a la fatiga .....	161
4.4.3. Tipos de fatiga .....	162
4.4.3.1. Inicio de grietas .....	163
4.4.3.2. Propagación de grietas .....	165
4.4.4. Influencia del medio ambiente en la fatiga .	171
4.4.4.1. Influencia ambiental sobre la resistencia total .....	172
4.4.4.2. Influencia ambiental sobre la propagación de grietas .....	172
4.4.5. Interacción fatiga-corrosión .....	173
4.4.6. Fatiga térmica .....	174
4.4.6.1. Problemas derivados de la fatiga térmica .....	175
4.4.6.2. Ejemplos de fatiga térmica .....	176
4.5. Termofluencia .....	178
4.5.1. Introducción .....	178
4.5.2. Equipos de ensayo .....	179
4.5.3. Curvas de fluencia .....	180
4.5.4. Mecanismos de deformación .....	183
4.5.5. Mapas de mecanismos de deformación por fluencia .....	186
4.5.6. Fractura por fluencia .....	189
4.5.7. Tiempos de rotura por fluencia .....	191

4.5.7.1. Parámetro de Larson-Miller . . . . .	192
4.5.7.2. Concepto de proyección $\theta$ . . . . .	195
4.6. Interacción fatiga-fluencia . . . . .	197
4.6.1. Introducción . . . . .	197
4.6.2. Crecimiento de cavidades . . . . .	198
4.6.3. Crecimiento de grietas . . . . .	199
4.6.4. Factores que influyen en la fatiga-fluencia . . . . .	200
4.6.4.1. Influencia de la forma del ciclo de carga . . . . .	201
4.6.4.2. Influencia de la frecuencia y del envejecimiento térmico . . . . .	203
4.6.4.3. Influencia de las condiciones microestructurales . . . . .	204
4.7. Desgaste . . . . .	205
4.7.1. Introducción . . . . .	205
4.7.2. Tipos de desgaste . . . . .	206
4.7.3. Delaminación . . . . .	210
<b>TEMA 5: ESTUDIO DE DEFECTOS EN MATERIALES</b>	
<b>METÁLICOS . . . . .</b>	<b>211</b>
5.1. Introducción . . . . .	211
5.2. Las impurezas en los materiales metálicos . . . . .	212
5.2.1. Efecto de las impurezas . . . . .	214
5.2.2. Eliminación de las impurezas . . . . .	215
5.3. Clasificación y descripción de los defectos . . . . .	216
5.3.1. Defectos superficiales en lingotes . . . . .	216
5.3.2. Defectos internos en lingotes . . . . .	219
5.3.3. Defectos superficiales en transformados, inherentes al lingote . . . . .	227
5.3.4. Defectos internos en transformados, inherentes al lingote . . . . .	228
5.3.5. Defectos superficiales en transformados, generados en la transformación . . . . .	231
5.3.6. Defectos internos en transformados, generados en la transformación . . . . .	237
5.4. Fragilidad inducida por los defectos . . . . .	238
5.4.1. Modos de fragilidad . . . . .	238
5.4.2. Origen de las fisuras . . . . .	240
<b>TEMA 6: ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS . . . . .</b>	<b>243</b>
6.1. Introducción . . . . .	243
6.2. Inspección en servicio . . . . .	244

6.2.1. Elección del método . . . . .	245
6.2.2. Obtención de una indicación propia . . . . .	245
6.2.3. Interpretación y evaluación de la indicación. . . . .	246
6.3. Radiología industrial . . . . .	246
6.3.1. Fuentes de radiación . . . . .	249
6.3.2. Soportes radiográficos . . . . .	251
6.3.3. Calidad de las radiografías . . . . .	252
6.3.4. Exposiciones y técnicas radiográficas . . . . .	253
6.3.4.1. Técnicas radiográficas especiales . . . . .	258
6.3.5. Protección radiológica . . . . .	262
6.3.6. Procedimiento general de examen por radiografías . . . . .	263
6.4. Ensayos por ultrasonidos . . . . .	265
6.4.1. Introducción . . . . .	265
6.4.2. Interferencia de las ondas con los materiales: atenuación . . . . .	267
6.4.3. Generación de ondas ultrasónicas . . . . .	268
6.4.4. Equipos de ultrasonidos . . . . .	269
6.4.4.1. Factores implicados en la transmisión de ultrasonidos . . . . .	271
6.4.4.2. Palpadores . . . . .	272
6.4.5. Métodos de ensayo . . . . .	275
6.4.5.1. Aplicaciones a distintos tipos de muestras . . . . .	278
6.4.6. Interpretación de las indicaciones . . . . .	280
6.5. Ensayos mediante partículas magnéticas . . . . .	284
6.5.1. Introducción . . . . .	284
6.5.2. Técnicas de magnetización . . . . .	288
6.5.3. Aplicación de las partículas magnéticas . . . . .	290
6.5.4. Interpretación y registro de las indicaciones. . . . .	293
6.5.5. Desmagnetización . . . . .	294
6.6. Ensayos por líquidos penetrantes . . . . .	295
6.6.1. Objeto del ensayo y su campo de aplicación . . . . .	296
6.6.2. Productos utilizados . . . . .	296
6.6.3. Técnicas de inspección . . . . .	298
6.6.4. Indicaciones . . . . .	299
6.6.5. Ventajas y limitaciones del ensayo por líquidos penetrantes . . . . .	300
<b>BIBLIOGRAFÍA . . . . .</b>	<b>303</b>

### 4.5.6. Fractura por fluencia

Durante la etapa terciaria del proceso de fluencia se inicia la estricción de la probeta de ensayo, como consecuencia de la localización de la deformación producida en una determinada zona de la misma. La fractura es dúctil, por lo tanto tendrá una acusada estricción, además de un alto nivel de alargamiento, consecuencia de las deformaciones soportadas. La aceleración de la velocidad de fluencia, durante el estado terciario, puede ser debida a diferentes causas, algunas de ellas se indican a continuación.

Una primera causa de esta aceleración puede ser la formación y unión de microcavidades en las fronteras de grano. Estas cavidades podrían haberse formado durante la fluencia primaria, con un efecto despreciable en la velocidad de fluencia, y solo cuando se incrementa su número y su tamaño se produce un debilitamiento del material que puede provocar la fractura. Este modelo de fallo por fluencia es, por tanto, intergranular.

Otra causa posible es la degradación de la microestructura del material. Ya se ha indicado anteriormente, las partículas de segunda fase que existen en la mayoría de las aleaciones utilizadas en ingeniería constituyen obstáculos al movimiento de las dislocaciones, dando lugar a un endurecimiento del material. A lo largo del tiempo, puede producirse un crecimiento de las partículas de mayor tamaño, junto con la desaparición de las más pequeñas, lo que origina una pérdida gradual de la resistencia a la fluencia, es decir, un incremento de la velocidad de fluencia. Este efecto, en la práctica, puede ser tan importante como el de la formación de cavidades en las fronteras de grano.

La fractura por fluencia se divide en: fractura por deslizamiento de los bordes de grano, denominada en «w»; y fractura por coalescencia de cavidades intergranulares, denominada rotura tipo «r», produciéndose a temperaturas elevadas y cargas medias.

En la figura 4.17 se presenta un ejemplo de ambos tipos de fractura, la micrografía superior corresponde al tipo «w» y la inferior al tipo «r», que han tenido lugar al ensayar un acero inoxidable bajo fluencia a temperaturas de 700 y 750°C.

Pequeñas adiciones de impurezas pueden cambiar el modo de fallo de transgranular a intergranular y en consecuencia, desplazar la tipología de rotura en el correspondiente mapa. Así, dos coladas de igual composición de un acero inoxidable austenítico, tipo AISI 304, sometidos a fluencia a temperaturas de 550 a 750°C y cargas de 30 a 360 MPa, presentan importantes diferencias en los campos de dominio de cada tipo de fractura: transgranular, intergranular y mixta.

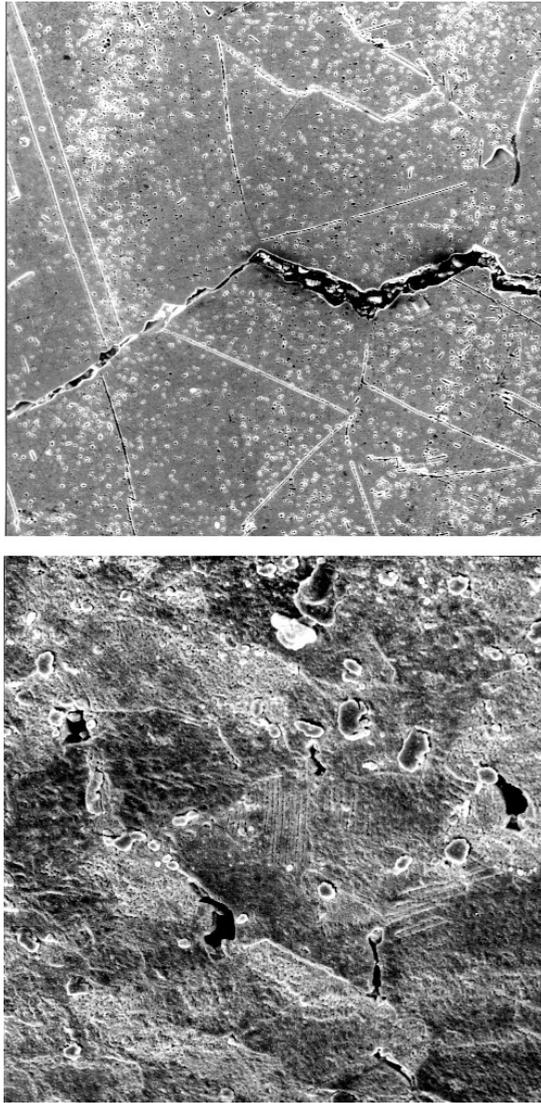


FIGURA 4.17

En la figura 4.18 se presentan los mapas fractográficos de las coladas A y B, pudiéndose observar el desplazamiento producido, como consecuencia de la mayor cantidad de precipitación dispersa en los bordes de subgrano de la colada B, lo que facilita la formación de cavidades tipo r, al favorecer la nucleación de cavitaciones en los bordes de subgranos e impedir el deslizamiento de los mismos, deslizamiento que origina la formación de grietas tipo w.

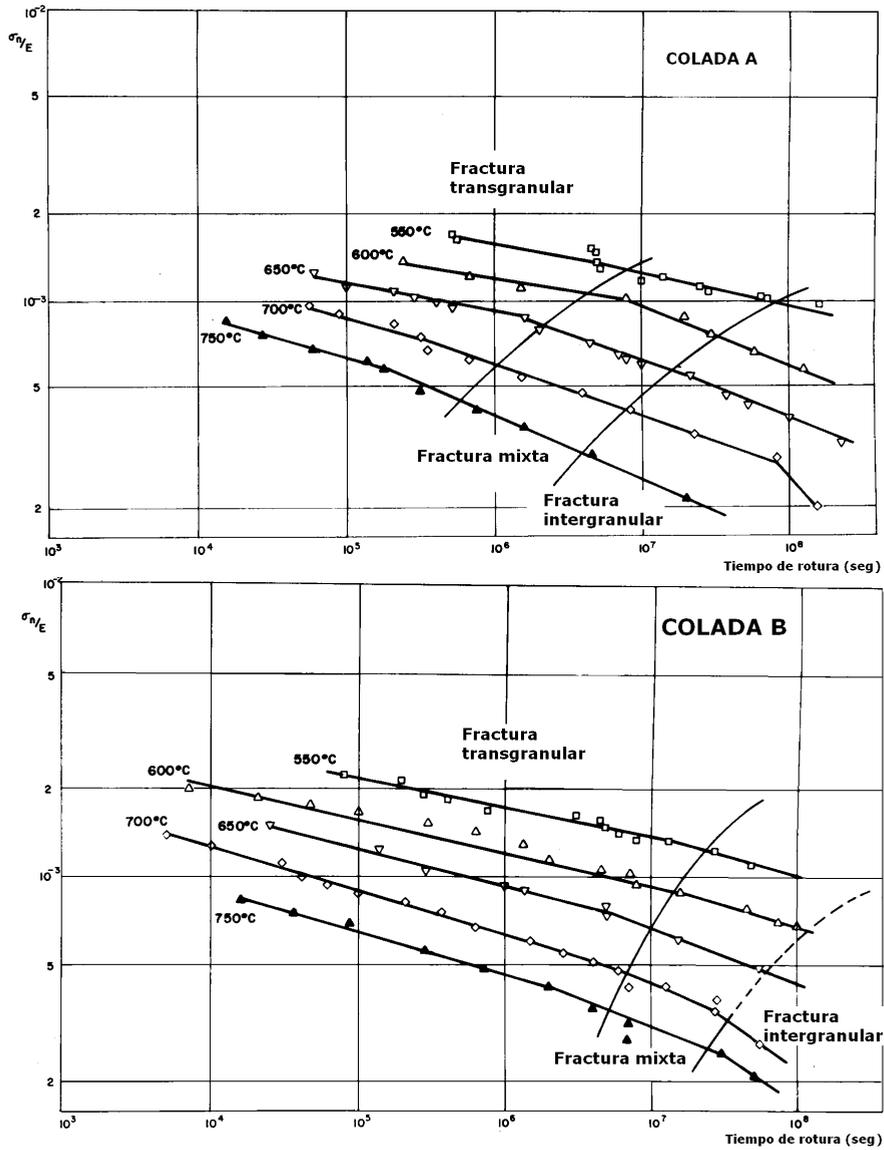


FIGURA 4.18

### 4.5.7. Tiempo de rotura por fluencia

La determinación del tiempo necesario para que se produzca la rotura por fluencia en un material, teniendo en cuenta la tensión y temperatura de trabajo, es un dato básico para el diseño de componentes, como ya se ha indicado con anterioridad.

Para alcanzar este objetivo, diferentes investigadores han desarrollado trabajos que han permitido establecer la dependencia del tiempo de rotura de la tensión aplicada y de la temperatura.

Los principales estudios sobre este tema son los siguientes:

- La regla de Monkman-Grant.
- El parámetro de Sherby-Dorn.
- El parámetro de Larson-Miller.
- Las ecuaciones de Kachanov-Rabotnov.
- El concepto de proyección  $\theta$ .

En la tabla 4.3 se presenta un resumen de las fórmulas empíricas obtenidas en cada uno de estos procedimientos de evaluación, así como las principales características de los mismos, estudiándose la metodología del parámetro de Larson-Miller, por ser la de mayor utilización en el campo de la ingeniería y el concepto de proyección  $\theta$ , por ser el que describe de forma más ajustada el proceso completo de deformación y rotura.

#### 4.5.7.1. *Parámetro de Larson-Miller*

La aproximación de Larson-Miller consiste en determinar empíricamente, para cada material, un parámetro,  $P(\sigma)$ , dependiente de la tensión, que relaciona la temperatura con el tiempo de fallo, obteniéndose la siguiente ecuación:

$$P(\sigma) = (C + \log t_f) T/1.000 \quad [4.7]$$

donde  $C$  es una constante de valor comprendido entre 17 y 23 que habitualmente se toma igual a 20;  $t_f$  es el tiempo necesario para que se produzca el fallo, en horas, y  $T$  la temperatura de servicio en grados Kelvin. La utilización de este concepto permite, en principio, disminuir considerablemente los tiempos de ensayo de fluencia, aumentando la temperatura de los mismos.

En la figura 4.19 se presenta el diagrama general de tiempos de aceros inoxidable austeníticos ensayados bajo fluencia a temperaturas de 550 a 750°C, en el que se representan los valores de  $P$  que resulta de los valores experimentales obtenidos para cada temperatura y tiempo de rotura en función de la tensión aplicada, y que dan lugar a la curva que sirve de base para, mediante la aplicación del parámetro de Larson-Miller, extrapolar a tiempos superiores. Por ejemplo, se puede comprobar como a

Metodología	Formulación	Características
<b>Monkman-Grant</b>	$\dot{\epsilon}_s t_f = C_{MG}$ $\dot{\epsilon}_s$ = velocidad de fluencia secundario $t_f$ = tiempo de rotura	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>C_{MG}</math> comprendido entre 0,03 y 0,3</li> <li>• Permite una reducción importante en el tiempo de los ensayos</li> <li>• <math>C_{MG}</math> representa la deformación acumulada en el fallo, cuando el fluencia estacionario es predominante</li> <li>• En el fallo por estrangulamiento, <math>C_{MG} \cong 1/n</math></li> </ul>
<b>Sherby-Dorn</b>	$\theta(\sigma) = t_f e^{-Q/RT}$ $\theta(\sigma)$ = parámetro de Sherby-Dorn $Q$ = energía de activación $R$ = constante de los gases	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>\theta(\sigma)</math> = función empírica que depende de la tensión pero no de la temperatura</li> <li>• Determinados <math>\theta(\sigma)</math> y <math>Q</math>, se puede interpolar y extrapolar a otras tensiones y temperaturas</li> <li>• Se supone que la energía de activación <math>Q</math>, es constante.</li> </ul>
<b>Larson-Miller</b>	$P(\sigma) = (20 + \log t_f) T/1.000$ $P(\sigma)$ = parámetro Larson-Miller	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>P(\sigma)</math>, se determina empíricamente</li> <li>• Amplia utilización en materiales de ingeniería</li> </ul>
<b>Kachanov-Rabotnov</b>	$\dot{\omega} = \frac{D\sigma^\chi}{(1 + \phi)(1 + \omega)^\phi}$ $\dot{\epsilon}_s t_f = B\sigma^{n-\chi}/D$ $t_f = (D\sigma^\chi)^{-1}$ $\epsilon_f = \frac{B\sigma^n (1 + \phi)}{D\phi^\chi (1 + \phi - n)}$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>\omega</math> = parámetro de daños, sin significado físico</li> <li>• <math>\dot{\omega}</math> = variación de <math>\omega</math> con respecto al tiempo</li> <li>• <math>B, D, n, \chi, \phi</math>, parámetros que dependen de la temperatura</li> </ul>
<b>Proyección <math>\theta</math></b>	$\epsilon = \theta_1 (1 - e^{-\theta_2 t}) + \theta_3 (e^{-\theta_4 t} - 1)$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Define la curva de fluencia mediante una ecuación matemática</li> <li>• Parámetros <math>\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4</math>, determinados empíricamente</li> <li>• Rango de validez amplio</li> <li>• Permite definir velocidad de fluencia secundario mediante una expresión matemática</li> <li>• Permite calcular <math>t_f</math> en función de una deformación considerada límite</li> </ul>

TABLA 4.3