

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA

**DEPARTAMENTO DE CIENCIA E INGENIERÍA DEL TERRENO
Y DE LOS MATERIALES**

TESIS DOCTORAL

**EVALUACIÓN DE LA INTEGRIDAD ESTRUCTURAL DE
COMPONENTES SOMETIDOS A CONDICIONES DE
BAJO CONFINAMIENTO**

SERGIO CICERO GONZÁLEZ

Santander, Marzo de 2007

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA

**DEPARTAMENTO DE CIENCIA E INGENIERÍA DEL TERRENO
Y DE LOS MATERIALES**

TESIS DOCTORAL

**EVALUACIÓN DE LA INTEGRIDAD ESTRUCTURAL DE
COMPONENTES SOMETIDOS A CONDICIONES DE
BAJO CONFINAMIENTO**

Autor:

SERGIO CICERO GONZÁLEZ

Director:

D. FEDERICO GUTIÉRREZ-SOLANA SALCEDO

**Tesis Doctoral presentada en la Universidad de Cantabria para la obtención del
Título de Doctor Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos**

Santander, Marzo de 2007

*A mis padres
y Viki*

AGRADECIMIENTOS

Como en todo trabajo extenso y laborioso, la ayuda, colaboración y ánimo de otras personas han facilitado la realización de esta Tesis Doctoral. A todas ellas querría agradecer su aportación.

En primer lugar quisiera darle las gracias a mi Director de Tesis, el Profesor Federico Gutiérrez-Solana Salcedo, por su excelente labor de dirección y por el esfuerzo y tiempo que ha dedicado. También querría agradecer especialmente la colaboración del Profesor José Alberto Álvarez Laso y la de los ingenieros Diego Ferreño Blanco y Roberto Lacalle Calderón por sus numerosas sugerencias y por ayudarme a resolver muchas de las dudas que han ido surgiendo por el camino. Además quisiera hacer extensivo el agradecimiento al resto de miembros del Laboratorio de la División de Ciencia e Ingeniería de los Materiales (LADICIM) de la Universidad de Cantabria, ya que todos ellos, de una u otra manera, me han apoyado en estos años.

Quisiera agradecer al Profesor José Manuel Alegre (Universidad de Burgos) que me haya facilitado material de investigación y a Robert A. Ainsworth (British Energy, Reino Unido) que siempre haya estado dispuesto a resolverme dudas y a aportar ideas.

En estos años he pasado meses en el extranjero y no sería justo olvidarme de Steve Webster, Adam Bannister y Anthony Horn, ingenieros de Corus plc. (Reino Unido) y del Dr. Mustafa Koçak, del GKSS Forschungszentrum (Alemania). Todos ellos hicieron que me sintiera como en casa. Gracias pues a todos ellos.

Por otra parte, quisiera darles las gracias a mis padres, Román y María Jesús, por haberme inculcado desde pequeño la importancia del estudio. Sin esa labor esta Tesis no se hubiese realizado nunca.

Finalmente agradezco de nuevo a mis padres, a mis hermanos, Román y Lucía, y a Viki que hayan aguantado y respetado mis interminables horas de estudio.

*“Aprender sin pensar es inútil.
Pensar sin aprender, peligroso”*

Confucio

ÍNDICE

CAPÍTULO 1	
INTRODUCCIÓN	1
CHAPTER 1	
INTRODUCTION	5
CAPÍTULO 2	
ASPECTOS TEÓRICOS PREVIOS	9
2.1. MECÁNICA DE LA FRACTURA ELÁSTICA LINEAL	9
2.1.1. <i>Introducción: Comportamiento en rotura de los materiales</i>	9
2.1.2. <i>Modos de fractura</i>	10
2.1.3. <i>Estado tensional en el frente de un defecto</i>	11
2.1.4. <i>Factor intensidad de tensiones</i>	13
2.1.5. <i>Condiciones críticas de rotura</i>	15
2.1.5.1. <i>Micromecanismos</i>	15
2.1.5.2. <i>Primer criterio de rotura: La tenacidad a fractura de un material</i>	15
2.1.5.2.1. <i>Consideraciones sobre la tenacidad a fractura</i>	16
2.1.5.3. <i>Segundo criterio de rotura: La tasa de liberación de energía</i>	20
2.2. MECÁNICA DE LA FRACTURA ELASTOPLÁSTICA	22
2.2.1. <i>Introducción</i>	22
2.2.2. <i>Plasticidad en el frente de fisuras</i>	23
2.2.3. <i>Parámetros de fractura en régimen elastoplástico</i>	25
2.2.3.1. <i>Apertura en el frente de fisura: CTOD</i>	25
2.2.3.2. <i>La integral de contorno J</i>	27
2.3. DIAGRAMAS DE FALLO	30
2.3.1. <i>Introducción: Modelo de plastificación local de Dugdale y Barenblatt</i>	30
2.3.2. <i>Obtención del Diagrama de Fallo</i>	34

2.4. LOS PROCEDIMIENTOS DE EVALUACIÓN DE LA INTEGRIDAD ESTRUCTURAL	38
2.4.1. <i>Introducción</i>	38
2.4.2. <i>Procedimientos selectivos</i>	39
2.4.2.1. Diagramas J-T	39
2.4.2.2. Batelle	40
2.4.2.3. KWU	40
2.4.3. <i>Procedimientos comprensivos</i>	40
2.4.3.1. Procedimientos basados en el uso de Diagramas de Fallo	41
2.4.3.1.1. Procedimiento R6	42
2.4.3.1.2. BS 7910	44
2.4.3.1.3. SAQ	45
2.4.3.1.4. Exxon	46
2.4.3.1.5. MPC	46
2.4.3.1.6. API579	47
2.4.3.2. Procedimientos basados en el uso de Diagramas de Fuerza Motriz de Agrietamiento	47
2.4.3.2.1. GE-EPRI	48
2.4.3.2.2. ETM	49
2.4.3.2.3. Tensión de referencia	50
2.4.3.3. Otros	50
2.4.3.3.1. ASME XI	50
2.4.3.3.2. EN J	51
2.4.3.3.3. DPFAD	51
2.4.3.4. El procedimiento SINTAP	51
2.4.3.5. El procedimiento FITNET	54
2.5. EL CONFINAMIENTO TENSIONAL EN MECÁNICA DE LA FRACTURA	56
2.5.1. <i>Concepto y trascendencia del confinamiento</i>	56
2.5.2. <i>La tensión T</i>	57
2.5.3. <i>El parámetro Q</i>	60
2.5.4. <i>Enfoque alternativo</i>	63
CAPÍTULO 3	
EVALUACIÓN DE COMPONENTES SOMETIDOS A CONDICIONES DE BAJO CONFINAMIENTO	65
3.1. INTRODUCCIÓN	65
3.2. EVALUACIÓN DE COMPONENTES FISURADOS	66
3.2.1. <i>Introducción</i>	66
3.2.2. <i>Enfoques teóricos</i>	70
3.2.2.1. Modelos biparamétricos	72
3.2.2.2. Método de la Curva Maestra	75
3.2.2.3. Enfoques locales	77
3.2.2.3.1. Clivaje	78
3.2.2.3.2. Desgarro dúctil	80
3.2.2.4. Métodos energéticos	83

3.2.2.4.1. Clivaje	83
3.2.2.4.2. Desgarro dúctil	84
3.2.3. <i>Enfoques prácticos</i>	88
3.2.3.1. Metodología del R6	88
3.2.3.2. Metodología del SINTAP	91
3.2.3.3. Metodología del FITNET	91
3.3. EVALUACIÓN DE COMPONENTS ENTALLADOS	93
3.3.1. <i>Introducción</i>	93
3.3.2. <i>Conceptos teóricos</i>	94
3.3.2.1. Distribución de tensiones en el fondo de entalla	94
3.3.2.2. Factor de intensidad de tensiones de entalla	96
3.3.3. <i>Criterios de fractura frágil en componentes entallados</i>	97
3.3.3.1. Criterio de fractura global	98
3.3.3.2. Criterios de fractura locales	98
3.3.4. <i>Principales avances en la investigación de entallas</i>	100
3.3.4.1. Modelo de la tensión media crítica	100
3.3.4.2. Modelo de la Mecánica de la Fractura Finita	103
3.3.4.3. Otros estudios relevantes	108
3.4. VISIÓN GENERAL, PROBLEMÁTICA EXISTENTE Y PROPUESTA DE SOLUCIÓN	115
CAPÍTULO 4	
MODELO DE EVALUACIÓN DE LA INTEGRIDAD ESTRUCTURAL DE COMPONENTES SOMETIDOS A CONDICIONES DE BAJO CONFINAMIENTO	117
4.1. INTRODUCCIÓN Y JUSTIFICACIÓN DEL ESTUDIO	117
4.2. MODELOS PROPUESTOS PARA LA EVALUACIÓN GLOBAL DE COMPONENTES CON PÉRDIDA DE CONFINAMIENTO EN EL PLANO DE APLICACIÓN DE LA CARGA	120
4.2.1. <i>Pérdida de confinamiento en componentes figurados</i>	120
4.2.2. <i>Pérdida de confinamiento en componentes entallados</i>	123
4.3. APLICACIÓN DE LOS VALORES DE TENACIDAD APARENTE ASOCIADOS AL CONFINAMIENTO EXISTENTE	127
4.3.1. <i>Aplicación del modelo de la Tensión Media Crítica</i>	127
4.3.2. <i>Aplicación de la Mecánica de la Fractura Finita</i>	128
4.3.3. <i>Aplicación de los resultados de los ensayos de caracterización de la tenacidad aparente</i>	130
4.3.4. <i>Aplicación del desplazamiento de la Curva Maestra</i>	130
4.4. VALIDACIÓN EXPERIMENTAL DEL MODELO	132

CAPÍTULO 5	
ENSAYOS DE VALIDACIÓN DEL MODELO SOBRE ACERO ESTRUCTURAL DE PERFILES LAMINADOS	135
5.1. INTRODUCCIÓN	135
5.2. MATERIAL DE ENSAYO	136
5.3. ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN	137
5.3.1. <i>Ensayos de tracción</i>	138
5.3.2. <i>Ensayos Charpy</i>	144
5.3.3. <i>Ensayos de tenacidad a fractura</i>	146
5.3.4. <i>Ensayos de tenacidad aparente</i>	150
5.4. ENSAYOS ESTRUCTURALES DE VALIDACIÓN	153
5.4.1. <i>Probetas de ensayo</i>	155
5.4.2. <i>Instrumentación y montaje del ensayo</i>	157
5.4.3. <i>Problemas surgidos durante la realización de los ensayos</i>	161
5.4.4. <i>Resultados experimentales</i>	163
5.4.4.1. <i>Ensayos a -20 °C en probetas de 21.3 mm de espesor</i>	164
5.4.4.2. <i>Ensayos a -65 °C en probetas de 15.4 mm de espesor</i>	173
5.4.4.3. <i>Ensayos a -85 °C en probetas de 21.3 mm de espesor</i>	184
5.4.4.4. <i>Ensayos a -100 °C en probetas de 21.3 mm de espesor</i>	194
5.4.4.5. <i>Ensayos a -80 °C en probetas de 25.4 mm de espesor</i>	202
5.4.5. <i>Observaciones derivadas de los resultados</i>	212
CAPÍTULO 6	
APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA PROPUESTA A LOS ENSAYOS DE VALIDACIÓN	217
6.1. INTRODUCCIÓN	217
6.2. APLICACIÓN DE LA MECÁNICA DE LA FRACTURA UNIPARAMÉTRICA	218
6.2.1. <i>Ensayos a -20 °C en probetas de 21.3 mm de espesor</i>	220
6.2.2. <i>Ensayos a -65 °C en probetas de 15.4 mm de espesor</i>	222
6.2.3. <i>Ensayos a -85 °C en probetas de 21.3 mm de espesor</i>	223
6.2.4. <i>Ensayos a -100 °C en probetas de 21.3 mm de espesor</i>	224
6.2.5. <i>Ensayos a -80 °C en probetas de 25.4 mm de espesor</i>	226
6.2.6. <i>Consideraciones finales sobre la aplicación de la Mecánica de la Fractura Uniparamétrica</i>	227
6.3. APLICACIÓN DE LA MECÁNICA DE LA FRACTURA BIPARAMÉTRICA	227
6.3.1. <i>Ensayos a -20 °C en probetas de 21.3 mm de espesor</i>	229
6.3.2. <i>Ensayos a -65 °C en probetas de 15.4 mm de espesor</i>	231
6.3.3. <i>Ensayos a -85 °C en probetas de 21.3 mm de espesor</i>	234
6.3.4. <i>Ensayos a -100 °C en probetas de 21.3 mm de espesor</i>	235
6.3.5. <i>Ensayos a -80 °C en probetas de 25.4 mm de espesor</i>	237

6.3.6. Consideraciones finales tras la corrección por confinamiento	238
6.4. CONSIDERACIÓN DE LA NATURALEZA DE LAS ENTALLAS	239
6.4.1. Ensayos a -20 °C en probetas de 21.3 mm de espesor	246
6.4.2. Ensayos a -65 °C en probetas de 15.4 mm de espesor	248
6.4.3. Ensayos a -85 °C en probetas de 21.3 mm de espesor	250
6.4.4. Ensayos a -100 °C en probetas de 21.3 mm de espesor	251
6.4.5. Ensayos a -80 °C en probetas de 25.4 mm de espesor	252
6.4.6. Consideraciones finales tras la corrección por confinamiento debido al perfil de la entalla	253
6.5. ANÁLISIS Y COMPARACIÓN DE RESULTADOS	254
6.6. CONSIDERACIONES DERIVADAS DEL ANÁLISIS	263
CAPÍTULO 7	
CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO	267
CHAPTER 7	
CONCLUSIONS AND FUTURE WORK	279
CAPÍTULO 8	
BIBLIOGRAFIA	291