

**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**

## CAPÍTULO 7

### CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

#### 7.1. CONCLUSIONES

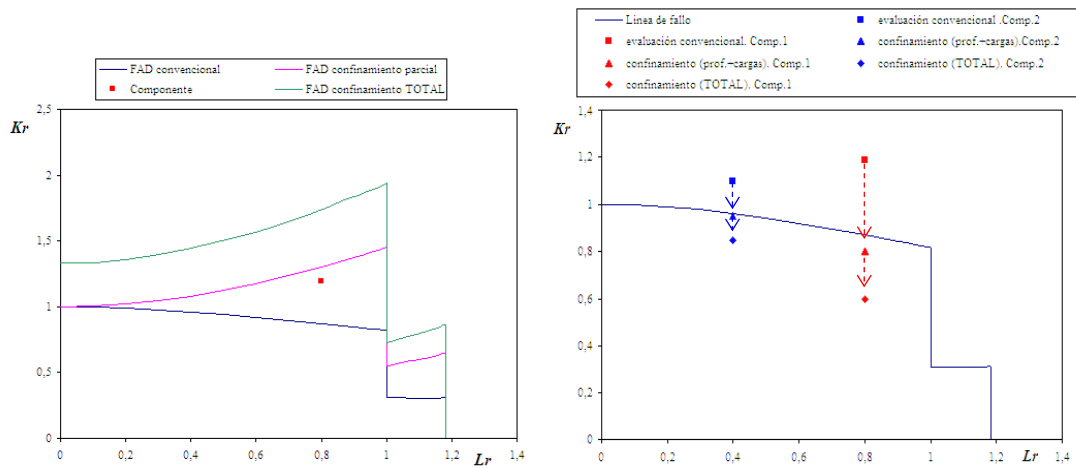
##### 7.1.1. *Sobre el modelo propuesto*

En esta Tesis Doctoral se ha analizado el fenómeno de la pérdida de confinamiento en el plano de aplicación de la carga y sus consecuencias en el análisis de componentes estructurales mediante Diagramas de Fallo. Se distinguen dos fuentes de bajo confinamiento bien diferenciadas: la debida al predominio de cargas de tracción y defectos poco profundos y la ocasionada por la existencia de un radio finito en el fondo de los mismos (efecto entalla). Ambas pérdidas de confinamiento han sido analizadas por diversos autores, de forma inconexa y sin un enfoque global que permita analizar casos en los que se producen ambas situaciones simultáneamente. A partir de los estudios de la Mecánica de la Fractura Biparamétrica y del modelo denominado “*Critical Average Stress Model*” (*CASM*) [16] se ha justificado teóricamente la independencia de ambos fenómenos, lo que permite combinar sus formulaciones y plantear, mediante el uso de la metodología de los Diagramas de Fallo, un modelo global de evaluación con respecto al cual pueden establecerse las siguientes conclusiones:

- 1.1 La independencia entre los dos tipos de pérdida de confinamiento ha sido demostrada en el ámbito de la elasticidad lineal ya que se parte de la Mecánica de la Fractura Biparamétrica, en la cual el segundo parámetro es la tensión  $T$  (parámetro elástico), y del modelo de entalla *CASM*, fundamentado en la elasticidad lineal.

1.2 Tal independencia se ha asumido en el rango de la elastoplasticidad, mediante el uso de la Mecánica de la Fractura Biparamétrica a través del parámetro  $Q$  (elastoplástico) y de la aplicación de los modelos elásticos  $CASM$  y  $MFF$  en situaciones elastoplásticas. Esto último es posible, ya que el modelo  $CASM$  ha sido utilizado por sus autores en condiciones elastoplásticas dando resultados aceptables y el modelo  $MFF$  puede usarse en dichas situaciones tras un proceso de calibrado.

1.3 Los modelos resultantes han surgido por combinación de los principales enfoques de la Mecánica de la Fractura Biparamétrica (correcciones paramétrica y  $CM$ ) y de la teoría de entallas (correcciones  $CASM$  y  $MFF$ ). Por lo tanto, se han planteado cuatro formulaciones distintas para analizar el mismo fenómeno. Todas ellas sirven tanto para modificar la Línea de Fallo, ampliando la zona segura del FAD por efecto del confinamiento en dos pasos independientes, como para trasladar verticalmente en sentido descendente el punto de evaluación de un componente, manteniendo como referencia la Línea de Fallo convencional. La Fig. 7.1 ilustra la aplicación del modelo mediante las dos vías. A su vez, se ha esbozado la metodología que surge de la aplicación directa de los resultados obtenidos en ensayos de tenacidad aparente (ensayos de tenacidad a fractura realizados en probetas entalladas).



**Fig. 7.1.** Vías de aplicación del modelo: mediante la modificación de la Línea de Fallo(a la izquierda) y mediante el desplazamiento del punto de evaluación (derecha)

### 7.1.2. Sobre el alcance experimental

Con objeto de validar el modelo propuesto y sus distintas formulaciones, se ha realizado un programa experimental utilizando el material S355JR (acero estructural) con dos partes

diferenciadas. En la primera se ha caracterizado el comportamiento a tracción y a fractura (tanto tenacidad a fractura como tenacidad aparente) del material, en sus distintos espesores y en un rango de temperaturas que va desde el “Upper Shelf” hasta el “Lower Shelf”, pasando por la Zona de Transición. En la segunda se han ensayado a tracción probetas de escala industrial procedentes de perfiles laminados con espesores, tipos de defecto (fisuras y entallas de 1.2 y 2.0 mm) y temperaturas (“Lower Shelf”, distintos estados de la Zona de Transición y “Upper Shelf”) diferentes, cubriendo así un amplio rango de estados del material y de condiciones de confinamiento en el fondo del defecto. De los resultados de los ensayos se destaca lo siguiente:

2.1. Teniendo como referencia la caracterización del comportamiento mecánico del material y, particularmente, la evolución de su tenacidad a fractura con la temperatura, los ensayos de caracterización de la resistencia a fractura realizados en probetas entalladas de geometría normalizada han puesto en evidencia que el “efecto entalla” lleva asociadas dos modificaciones en el comportamiento a fractura que son equivalentes a las observadas en el análisis biparamétrico del confinamiento: en primer lugar, un incremento de la tenacidad en la zona del “Upper Shelf” a medida que el radio de entalla aumenta, es decir, cuando el confinamiento decrece. En segundo lugar, una traslación de la Temperatura de Referencia  $T_0$  hacia valores menores, lo que implica una mayor ductilidad en la respuesta cuanto mayor es la reducción del confinamiento asociada al incremento del radio de entalla. La Fig. 7.2 muestra esta evolución del comportamiento, la cual abre una nueva vía de futuro para el análisis de la tenacidad aparente que es susceptible de ser utilizada en el modelo.

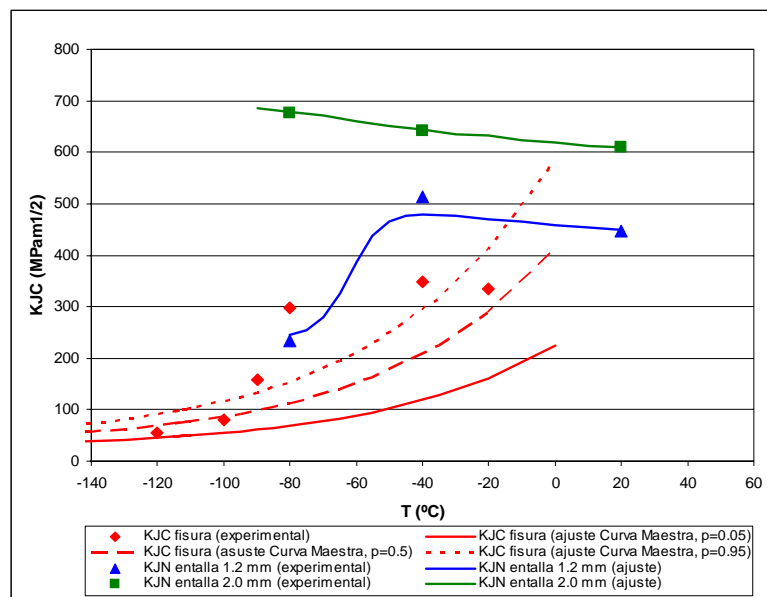
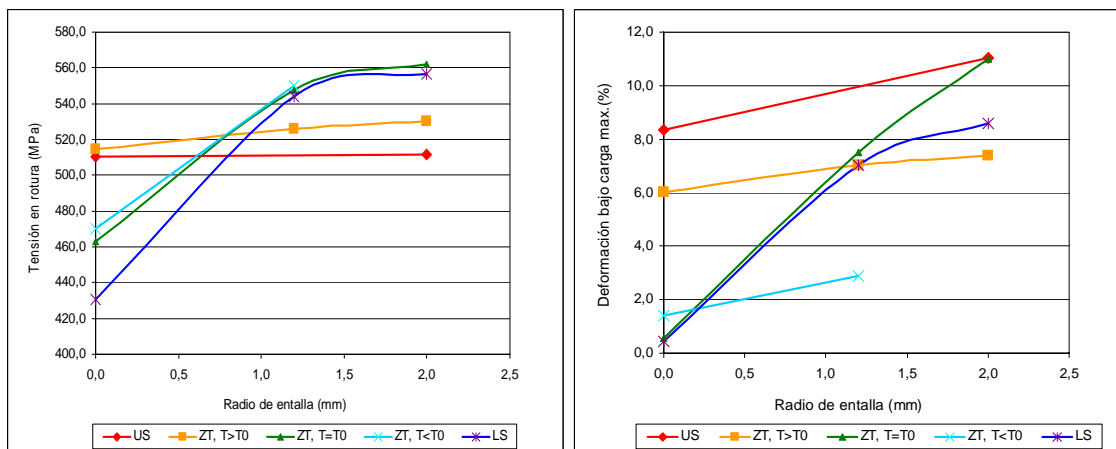


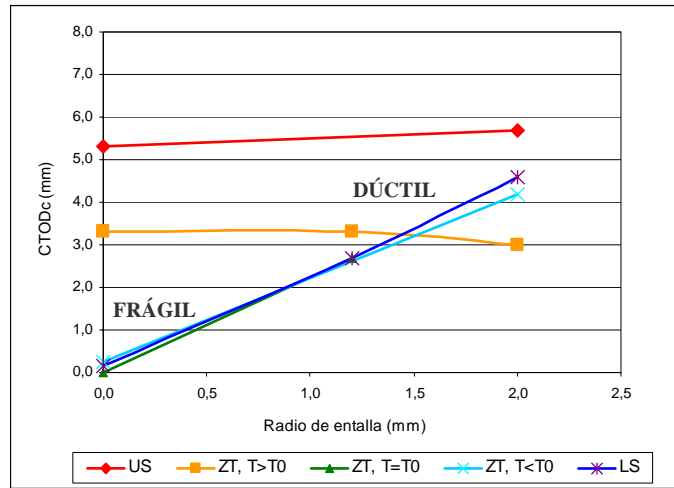
Fig. 7.2. Evolución de la resistencia a fractura en función de la temperatura y del radio existente en el fondo del defecto.

2.2. En referencia a los ensayos realizados sobre probetas a escala industrial, se aprecia que para una temperatura determinada, la carga y la deformación en rotura aumentan con el radio existente en el fondo del defecto. Esta situación es más acusada cuanto menor es la temperatura con respecto a la temperatura  $T_0$  de cada material. Ello justifica una evolución coincidente con la observada en las probetas de caracterización: la tenacidad es mayor a medida que aumenta el radio de entalla. Este efecto es particularmente importante en aquellas ocasiones en las que el cambio de defecto significa una transformación desde comportamiento frágil a dúctil. La Fig. 7.3 muestra esta situación. Como puede observarse, el efecto de entalla apenas es apreciable para condiciones de ensayo por encima de  $T_0$ . Sin embargo, por debajo de la misma se produce una transición asociada a la entalla, desde condiciones de fragilidad en rotura en probetas fisuradas a condiciones dúctiles en probetas entalladas. El efecto entalla puede ser considerado como una traslación de la Temperatura de Referencia lo que, además de corroborar lo visto en las probetas de geometría normalizada, refuerza el interés de potenciar su caracterización para poder así integrarla en modelos de evaluación como el aquí presentado.



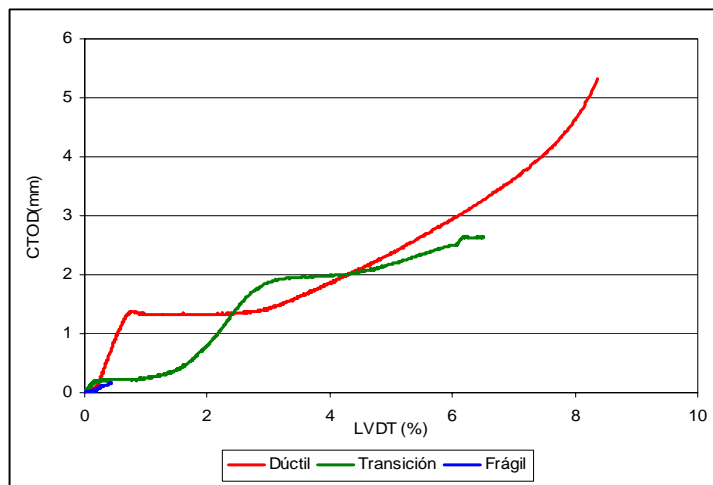
**Fig. 7.3.** Evolución de la tensión de rotura y de la deformación bajo carga máxima en función del radio existente en el fondo del defecto y de la zona de comportamiento del material.

2.3 El efecto entalla tiene, consecuentemente, un claro efecto en los valores de resistencia a fractura alcanzados, de tal manera que ésta, medida a través del valor en rotura del parámetro CTOD ( $CTOD_c$ ), es tanto mayor cuanto mayor es el radio de entalla. Como se puede apreciar en la Fig. 7.4, aparece una transición frágil-dúctil asociada a la evolución del radio de entalla por debajo de la Temperatura de Referencia.



**Fig. 7.4.** Relación existente el CTOD en rotura ( $CTOD_c$ ) y el radio de entalla de la probeta. US: Upper Shelf, ZT: Zona de Transición,  $T_0$ : Temperatura de Transición, LS: Lower Shelf

2.4 Las diferencias de comportamiento observadas se han modelizado a través de la relación entre la deformación global y la local en el entorno del defecto, que pueden ser seguidas por técnicas instrumentales convencionales en componentes en los cuales se conozca la situación de sus defectos. En la Fig. 7.5 se aprecian los tres modelos, con claras diferencias no sólo en los valores críticos del CTOD (con variaciones de más de un orden de magnitud), sino también en la evolución de la relación entre las deformaciones globales y locales en el entorno del defecto. El comportamiento frágil se ha encontrado siempre en fisuras, mientras que el de tránsito sólo en probetas con 1.2 mm de radio de entalla y temperaturas menores o iguales a la de referencia  $T_0$ . Ninguna probeta con 2.00 mm de radio de entalla ha salido del comportamiento dúctil.



**Fig. 7.5.** Relación entre deformaciones locales y globales para los distintos tipos de comportamiento de los componentes ensayados.

### 7.1.3. Sobre la validación y el alcance del modelo

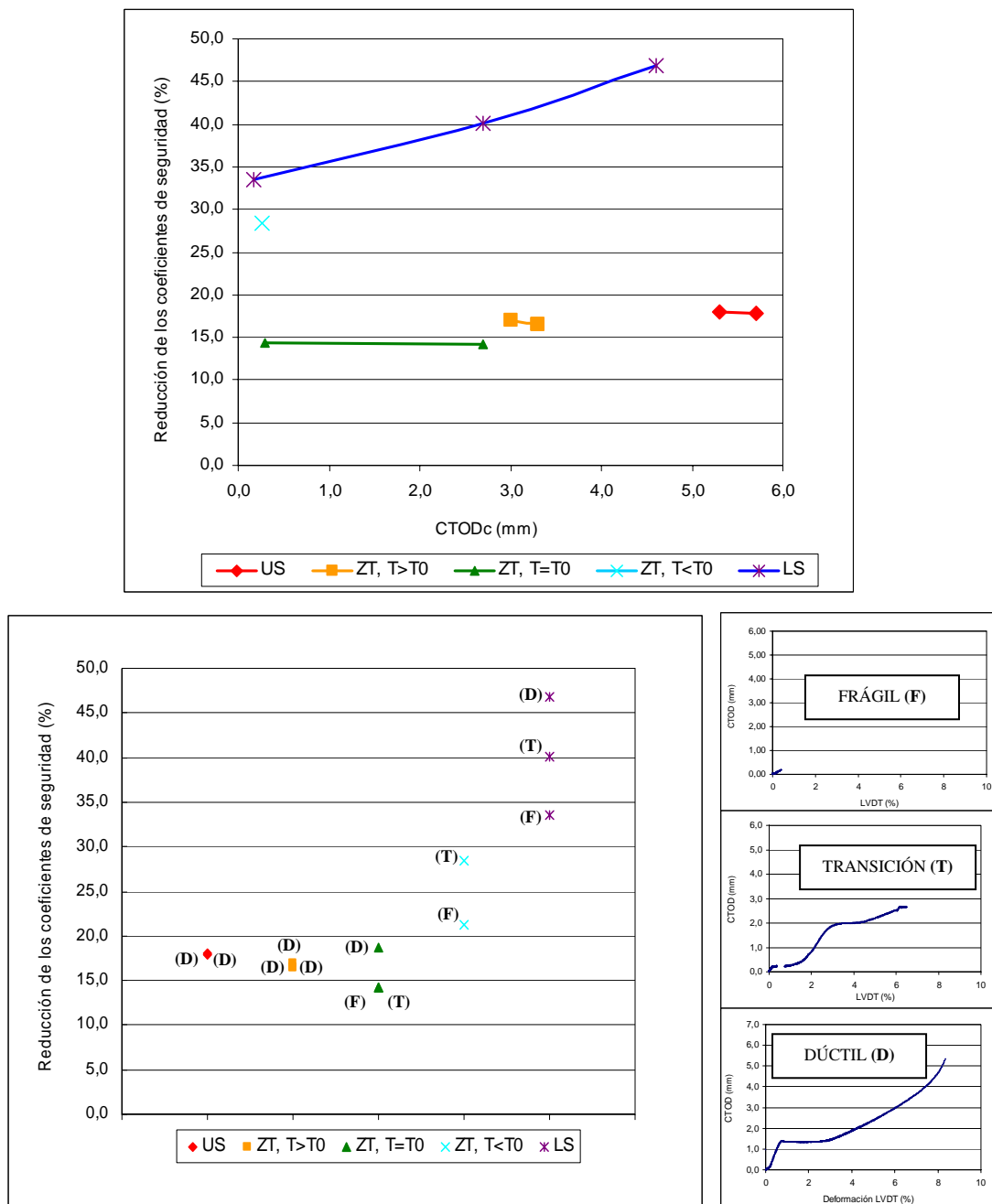
El modelo propuesto para la evaluación global de la pérdida de confinamiento se ha aplicado a los ensayos de validación, comparando las cargas de rotura obtenidas en estos últimos con las proporcionadas por aquellos. Las principales conclusiones obtenidas tras el análisis de los resultados son los siguientes:

- 3.1 La metodología propuesta en este trabajo disminuye significativamente el conservadurismo obtenido mediante el uso de procedimientos habituales (basados en la Mecánica de la Fractura Uniparamétrica) cuando se evalúan componentes estructurales en situaciones de bajo confinamiento. La reducción del conservadurismo llega a aproximarse al 100 % en algunos casos, mientras que los valores medios se sitúan en torno al 50 % para los distintos tipos de correcciones. Puede considerarse por tanto que las reducciones obtenidas son más que relevantes, teniendo en cuenta que no todo el conservadurismo inicial viene dado por el confinamiento en el fondo del defecto, sino que hay otras fuentes del mismo como puede ser el hecho de que se ha realizado un análisis de iniciación de la propagación, y con un Línea de Fallo conservadora, mientras que en muchos casos se ha producido cierta propagación previa a la rotura (un análisis de desgarro dúctil reduciría otra parte del conservadurismo).
- 3.2. El modelo planteado proporciona para los componentes ensayados una evaluación segura de componentes estructurales con bajo confinamiento, ya que en todos los casos el coeficiente de seguridad obtenido es mayor que la unidad. Este hecho avala las consideraciones de selección de parámetros ( $m_B, \sigma_0$ ) realizadas con base en las referencias bibliográficas. De todas las vías ensayadas, los mejores resultados en cuanto a acercamiento a la realidad del ensayo han correspondido a la combinación de las correcciones paramétrica y MFF.
- 3.3. La reducción del conservadurismo ha sido mayor en probetas fisuradas que en entalladas. Ello conlleva dos consideraciones con diferente perspectiva:
  - Por un lado, que se alcanza una eficacia del 100 % en las probetas fisuradas tras el primer escalón de corrección por confinamiento, y que la optimización del proceso cuando hay entallas requiere del segundo escalón de corrección, lo cual avala no sólo el modelo sino también la independencia de los procesos de corrección tal y como ha sido fundamentado en la propia concepción del mismo.

- Por otro lado, que hay razones físicas que pueden explicar este hecho diferencial. En primer lugar, las correcciones de entalla son de naturaleza elasticolineal mientras que los componentes ensayados con entalla han presentado siempre un comportamiento elastoplástico. El resultado es que dichas correcciones han dado generalmente una subestimación del aumento de la resistencia a fractura del componente, aunque para las entallas de menor radio y las temperaturas más bajas la aproximación a la realidad experimental obtenida sobre probetas de geometría normalizada sea manifiesta. En segundo lugar hay otro factor determinante, las probetas entalladas han tenido valores en rotura del parámetro  $L_r$  superiores a  $L_{rmax}$ , por lo que reducciones del parámetro  $K_r$  (por aumento de la resistencia a fractura) no han tenido consecuencia alguna en el coeficiente de seguridad, a pesar de que justifiquen el tipo de comportamiento observado, con endurecimiento por plastificación.

3.4 En situaciones de comportamiento dúctil a temperaturas por encima de la de referencia ( $T > T_0$ ), las correcciones de la Mecánica de la Fractura Biparamétrica son las responsables de la reducción del coeficiente de seguridad, especialmente cuando se aplica la corrección paramétrica, cuyo efecto es sustancialmente mayor que el de la corrección  $CM$ . En situaciones de comportamiento de transición y dúctil a temperaturas inferiores ( $T \leq T_0$ ) la corrección del efecto entalla es apreciable. La Fig. 7.6 pone de manifiesto la evolución de la reducción conseguida de los coeficientes de seguridad en función de las tipologías de comportamiento de los componentes y de la temperatura de ensayo. Como consecuencia de la evolución del efecto de las entallas al disminuir la temperatura, la previsión de reducción de los márgenes de seguridad por encima de la Temperatura de Referencia  $T_0$  se reduce de manera uniforme hasta un  $16 \pm 2$  % y siempre asociado al primer escalón de corrección. Sólo para temperaturas inferiores a la de referencia la reducción del conservadurismo supera el 20 %, haciéndose más importante a medida que la temperatura desciende y el confinamiento asociado al radio de entalla disminuye. Las mejoras en la previsión alcanzan así valores por encima del 40 % y eficacias superiores al 80 %, que podrían llegar a casi el 100 % si se operase con procesos (líneas de fallo) más refinados.





**Fig. 7.6.** Reducción de los coeficientes de seguridad obtenidos en función del CTODc y su relación con las distintas tipologías de comportamiento de los componentes ensayados.

3.5 La metodología propuesta acerca más la evaluación de la integridad estructural a la física del problema, aún en aquellas situaciones en las que el coeficiente de seguridad no se ve modificado. Así, la aplicación de las correcciones por confinamiento llega a justificar el mecanismo de rotura de cada ensayo, algo que no se consigue con la Mecánica de la Fractura Uniparamétrica en situaciones de bajo confinamiento.

En definitiva esta Tesis propone una metodología novedosa, justificada teóricamente, validada con éxito en un amplio rango de grados de plasticidad y que permite reducir el conservadurismo que en ocasiones surge de la aplicación de procedimientos estándar a situaciones de bajo confinamiento. Su trascendencia y solidez viene avalada por el hecho de que ha sido incluida en el recientemente desarrollado Procedimiento Europeo de Integridad Estructural (FITNET) [14], en su apartado 12.5.5.

## 7.2. TRABAJO FUTURO

Como consecuencia de la realización del presente trabajo y tras el análisis presentado, se han ido comentando distintos aspectos que son susceptibles de un análisis más profundo, de una validación más exhaustiva o de una cuantificación más detallada. A continuación se comentan los principales temas de investigación que, a partir de los resultados y el análisis de esta Tesis Doctoral, podrían ser objeto de estudio:

- *Modelo elastoplástico de entallas.*

La metodología propuesta en este trabajo surge de la demostración de independencia entre las dos principales fuentes de pérdida de confinamiento en el plano de aplicación de la carga: la ocasionada por defectos poco profundos y cargas de tracción y la producida por el efecto de entalla. Esto permite añadir, como un múltiplo más, la corrección por efecto de entalla a la formulación de la mecánica de la fractura biparamétrica. Pero dicha independencia ha sido demostrada en el campo elástico lineal, lo que permite combinar cualquier modelo de entalla elasticolineal (CASM o MFF) con la corrección biparamétrica elástico-lineal (tensión  $T$ ).

Las correcciones elásticas por efecto entalla pueden utilizarse, directamente en el caso de la CASM [16] y tras un calibrado la MFF [17], en situaciones de cierta plasticidad y combinarse con la corrección biparamétrica elastoplástica (parámetro  $Q$ ). Sin embargo, con este proceder, en situaciones de mayor plasticidad la corrección biparamétrica es cuantitativamente mucho mayor que la corrección por efecto entalla. Por lo tanto sería interesante, en primer lugar, obtener una corrección por efecto de entalla basada en conceptos elastoplásticos y comprobar si el mayor peso cuantitativo que tiene la corrección biparamétrica en el modelo propuesto en esta Tesis y en situaciones de elevada plasticidad es algo intrínseco a dichas situaciones o ha sido resultado de la subestimación del aumento de resistencia a fractura ocasionado por la aplicación de modelos elásticos en el campo elastoplástico. En segundo lugar, sería también de gran interés demostrar la independencia

entre los dos tipos de pérdida de confinamiento en el rango elastoplástico, algo que en este trabajo se ha asumido a partir del resultado en el campo elástico.

- *Validación del modelo propuesto en componentes entallados con roturas frágiles.*

El modelo propuesto ha sido aplicado con éxito en situaciones con plasticidad media o elevada en las que el parámetro  $L_r$  es mayor que la unidad. Tal y como se ha comentado en capítulos precedentes en situaciones muy frágiles, en las cuales la rotura se produce con valores de  $L_r$  inferiores a 0.2, la pérdida de confinamiento ocasionada por la profundidad del defecto y el tipo de carga es muy reducida y únicamente la pérdida de confinamiento por efecto entalla tendría relevancia. Dado que las correcciones CASM y MFF han sido suficientemente validadas por sus autores [16,17], el modelo quedaría también validado para situaciones en las que  $0 \leq L_r \leq 0.2$ . En definitiva, quedarían por validar situaciones en las cuales  $0.2 \leq L_r \leq 1.0$ , en las cuales la plasticidad es moderada. En principio el modelo debería funcionar ya que son situaciones muy próximas a aquellas de las cuales se ha derivado teóricamente, pero su aplicación con garantías en la práctica ingenieril requiere una rigurosa validación.

Los ensayos realizados no han cubierto las situaciones de plasticidad baja porque hasta ahora no se había constatado el hecho de que la Zona de Transición de la curva de tenacidad de los componentes entallados sufría un importante desplazamiento hacia temperaturas menores ocasionada por el efecto entalla. De este modo, ensayos que en el caso de material fisurado deberían haber producido roturas frágiles (temperaturas de hasta  $-100^\circ\text{C}$ ), generaron realmente roturas con considerable plasticidad en el caso de las probetas entalladas. En consecuencia, en futuras investigaciones al respecto habrá que tener en cuenta que para ensayar componentes entallados en el “*Lower Shelf*” es necesario llegar a temperaturas mucho menores que las correspondientes al material fisurado.

- *Cuantificación del desplazamiento de la Curva Maestra ocasionada por el efecto de entalla.*

La Curva Maestra se ha revelado como una importante herramienta para la evaluación de la integridad estructural de todo tipo de componentes fabricados con aceros ferríticos. Permite caracterizar la tenacidad a fractura del material en toda la Zona de Transición. Para su obtención es necesario realizar una serie de ensayos de tenacidad a fractura sobre probetas fuertemente flexionadas y con fisuras profundas. En definitiva, probetas con un elevado confinamiento en el fondo de la fisura. La realidad del componente puede ser bien distinta, con un confinamiento mucho menor, y tal como demuestran algunos estudios [53,94] su

verdadera Curva Maestra puede estar considerablemente desplazada hacia temperaturas menores (en [94] se cuantifica el desplazamiento como una décima parte del valor de la tensión  $T$ ).

En este trabajo se ha demostrado a partir de los resultados experimentales y del análisis de integridad estructural, que cuando el defecto del material es tipo entalla, la Curva Maestra del material sufre un desplazamiento adicional hacia temperaturas menores. Esta observación viene corroborada a su vez por el hecho de que el efecto entalla provoca una pérdida de confinamiento independiente pero de la misma naturaleza que la ocasionada por las cargas o la profundidad del defecto. Si esta última provoca un desplazamiento de la Curva Maestra, la primera no podía ser menos.

Por lo tanto sería de interés cuantificar el desplazamiento de la Curva Maestra ocasionado por el efecto de entalla, de tal manera que para un componente con entallas poco profundas y sometido a cargas de tracción (sometido pues a las dos fuentes de pérdida de confinamiento) sea posible definir la verdadera Curva Maestra del componente a partir de la Curva Maestra del material obtenida de forma ordinaria.

- *Aplicación y validación del modelo en otro tipo de materiales.*

Los ensayos realizados en el desarrollo de esta Tesis Doctoral han sido desarrollados con un acero ferrítico (*S355JR*) de amplio uso en construcción civil. El confinamiento es un fenómeno puramente geométrico y por lo tanto independiente del material, por lo que si el modelo funciona en el material utilizado no hay razón alguna para pensar que no lo vaya hacer en otro tipo de materiales. Sin embargo hay materiales que se utilizan en condiciones en las cuales la seguridad ha de garantizarse sobremanera. Es el caso de aleaciones de aluminio en la industria aeronáutica, aleaciones como el Inconel en la industria nuclear, etc. La validación del modelo en estos materiales es un requisito indispensable para su posterior utilización. A su vez, es recomendable su validación en materiales no metálicos, como pueden ser los cerámicos o los polímeros.

- *Análisis de la relación entre las pérdidas de confinamiento en el plano y fuera del plano de aplicación de la carga.*

Es bien sabido que la resistencia a fractura del material cambia en función del espesor del componente evaluado. Así, los ensayos de tenacidad a fractura requieren el uso de probetas de un espesor mínimo determinado que garantice condiciones de deformación plana. A medida que se reduce el espesor la resistencia a fractura del material aumenta. Esto ocurre

porque se va pasando de un estado de deformación plana a otro de tensión plana, es decir, se va produciendo una relajación de tensiones en la dirección perpendicular al plano de aplicación de la carga y, en definitiva, una pérdida de confinamiento.

La cuantificación de este efecto es algo muy complicado y no ha sido propuesto aún un modelo satisfactorio al respecto. Más allá de dicha cuantificación, de cuya importancia nadie duda, sería interesante el estudio de la relación entre las pérdidas de confinamiento fuera y dentro del plano de aplicación de la carga, analizando su posible independencia y abriendo caminos para la obtención de un modelo que considere todas las posibles pérdidas de confinamiento. Esto permitiría aprovechar al máximo la capacidad resistente de los materiales, lo cual generaría importantes ahorros para la industria permitiéndola ser más segura y competitiva.

## CHAPTER 7

### CONCLUSIONS AND FUTURE WORK

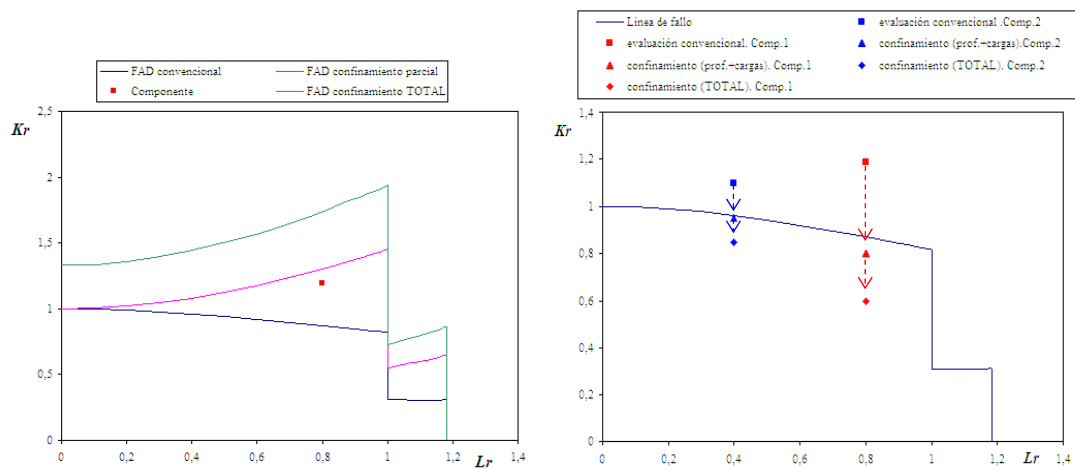
#### 7.1. CONCLUSIONS

##### 7.1.1. *On the model proposed*

*This Doctorate Thesis analyses the phenomenon of the loss of constraint on the load application plane and its consequences in the analysis of structural components by means of Failure Assessment Diagrams. Two clearly distinct sources of low constraint are distinguished: that caused by the predominance of tensile loads and shallow defects and that produced by the existence of a finite radius at the defect tip (notch effect). Both types of loss of constraint have been analysed by several authors, but in a rather disjointed way and without a global focus that might allow cases in which both situations arise simultaneously to be analysed. Using Biparametric Fracture Mechanics and the model denominated “Critical Average Stress Model” (CASM) [16], the independence of the two phenomena has been theoretically justified, which allows their formulations to be combined and makes it possible to propose, through the use of the Failure Assessment Diagram methodology, a global assessment model concerning which the following conclusions may be drawn:*

- 1.1. The independence of the two sources of loss of constraint has been demonstrated in the area of linear elasticity, since they arise from Biparametric Fracture Mechanics in which the second parameter is the T stress (elastic parameter), and from the CASM notch model, based on linear elasticity.*

- 1.2. This independence has been assumed in the range of elastoplasticity through the use of Biparametric Fracture Mechanics by means of the  $Q$  parameter (elastoplastic) and the application of the CASM and FFM (Finite Fracture Mechanics) elastic models in elastoplastic situations. The latter is possible as the CASM model has been used by its authors in moderate elastoplastic conditions with acceptable results and the FFM model can be used in these situations after a calibration process.
- 1.3. The resulting models have arisen through the combination of the main approaches of Biparametric Fracture Mechanics (parametric correction and Master Curve correction) and notch theory (CASM and FFM corrections). Thus, four different formulations have been proposed for analysing this phenomenon. All of these can be used both for modifying the Failure Assessment Line, amplifying the safe zone of the FAD through the constraint effect in two independent steps, and for moving vertically in a downwards direction the point of assessment of a component, maintaining as a reference the conventional Failure Assessment Line. In turn, the methodology arising from the direct application of the results obtained in apparent toughness tests (fracture toughness tests performed on notched specimens) has been defined.



**Fig. 7.1.** Forms of application of the model: through the modification of the Failure Assessment Line (left) and through the displacement of the assessment point (right)

### 7.1.2. On the experimental scope

In order to validate the proposed model and its various formulations, an experimental program has been performed with two distinct parts using the S355JR material (structural steel). In the first part, the tensile and fracture behaviour of the material has been characterised (both

fracture toughness and apparent toughness), at its various thicknesses and for a range of temperatures that goes from the “Upper Shelf” to the “Lower Shelf”, passing through the Transition Zone. In the second part, tensile tests have been performed on industrial scale specimens with varying thicknesses, types of defect (cracks and notches of 1.2 and 2.0 mm) and temperatures (“Lower Shelf”, various states of the Transition Zone and “Upper Shelf”), thus covering a wide range of states of the material and constraint conditions at the defect tip. The following are some of the most important observations to be made on the test results:

2.1. Taking as a reference the characterisation of the mechanical behaviour of the material and, in particular, the evolution of its fracture toughness with temperature, the fracture resistance characterisation tests performed on standard geometry notched specimens have highlighted the fact that the “notch effect” gives rise to two modifications in the fracture behaviour which are equivalent to those observed in the biparametric analysis of constraint: first, an increase in toughness in the “Upper Shelf” zone as the notch radius increases; that is, when the constraint decreases. Secondly, a shift in the Reference Temperature  $T_0$  towards lower values, which means the greater the reduction in the constraint associated to the increase in the notch radius, the greater the ductility in the response. Fig. 7.2 shows this evolution of the behaviour, which opens up a new path for the future in the apparent toughness analysis, for its possible use in the model.

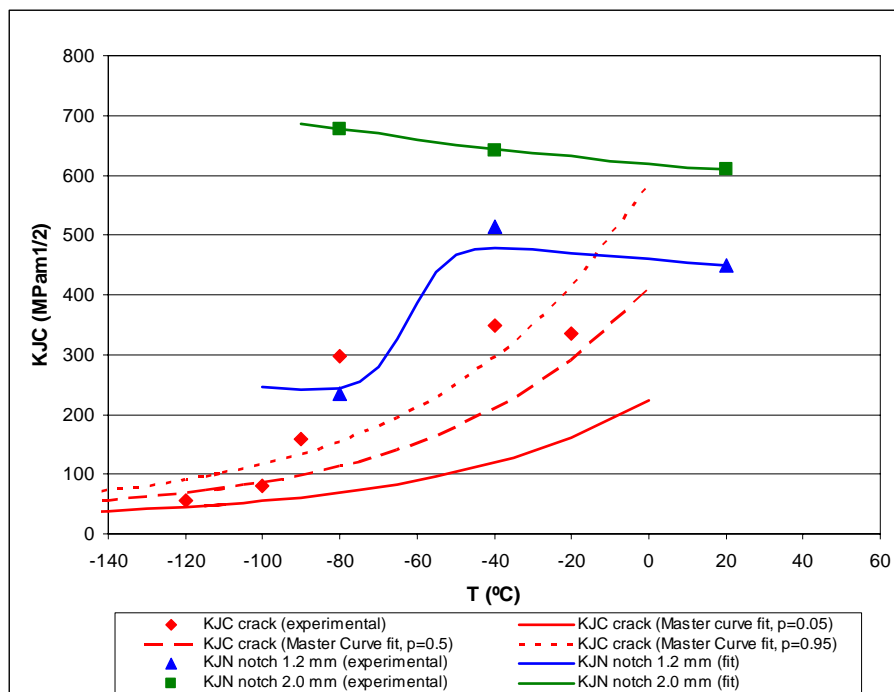
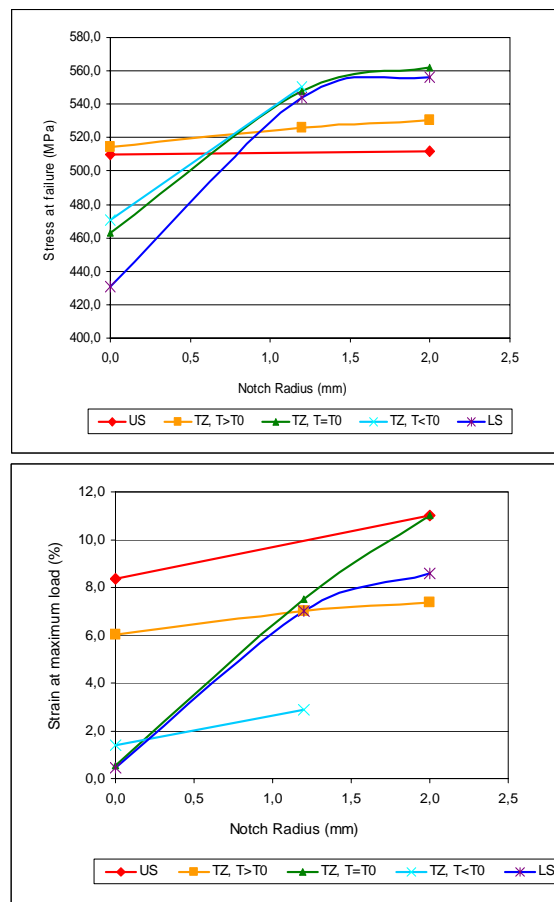


Fig. 7.2. Evolution of fracture resistance as a function of the temperature and of the radius at the defect tip.

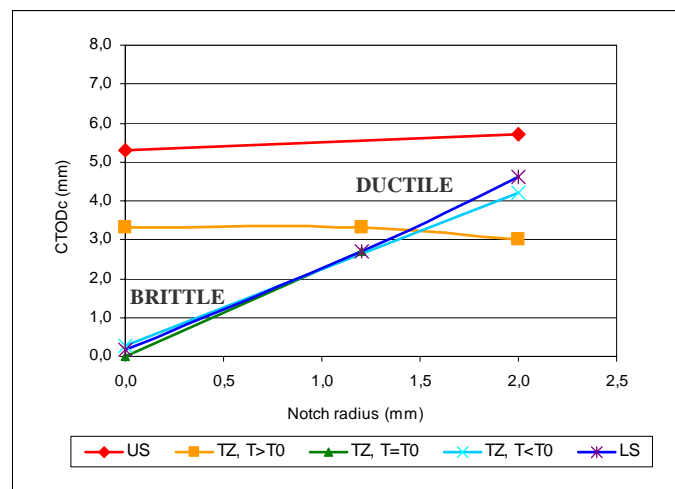


2.2. In the tests performed on the industrial scale specimens, it can be observed that, for a specific temperature, the load and the strain at failure increase with an increase in the radius at the defect tip. This situation is more pronounced for temperatures further from the  $T_0$  temperature of each material. This explains an evolution which coincides with that observed in the characterisation specimens: the greater the notch radius, the greater the toughness. This effect is particularly important on those occasions when the change in defect means a transformation from brittle to ductile behaviour. Fig. 7.3 shows this situation. As can be observed, the notch effect can hardly be appreciated for test conditions over the  $T_0$ . However, below this temperature, a transition takes place associated to the notch, from brittle fracture conditions in cracked specimens to ductile conditions in notched specimens. The notch effect can be considered as a shift in the Reference Temperature which, as well as corroborating what has been observed in the standard geometry specimens, confirms the value of addressing its characterisation in order to integrate it in assessment models such as that presented here.



**Fig. 7.3.** Evolution of stress at failure and strain under maximum load as a function of the radius at the defect tip and of the behaviour zone of the material.

2.3. The notch effect thus has a clear effect on the fracture resistance values reached, in such a way that this fracture resistance, measured using the value at failure of the CTOD ( $CTOD_c$ ) parameter, is greater, the greater the notch radius. As can be observed in Fig. 7.4, a brittle to ductile transition appears associated to the evolution of the notch radius below the Reference Temperature.



**Fig. 7.4.** Relation between CTOD at failure ( $CTOD_c$ ) and the notch radius of the specimen. US: Upper Shelf, ZT: Transition Zone,  $T_0$ : Transition Temperature, LS: Lower Shelf

2.4 The differences in behaviour observed have been modelled through the relation between the global strain and the local strain at the defect tip, which can be monitored using conventional techniques in components in which the situation of their defects is known. Three models can be appreciated in Fig. 7.5, with clear differences not only in the critical values of the CTOD (with variations of more than one order of magnitude), but also in the evolution of the relation between the global strain and the local strain at the defect tip. The brittle behaviour has always been found in cracks, while the transition behaviour has only been found in specimens with 1.2 mm of notch radius and at temperatures lower than the Reference Temperature  $T_0$ . No specimen with a notch radius of 2.00 mm has lost its ductile behaviour.

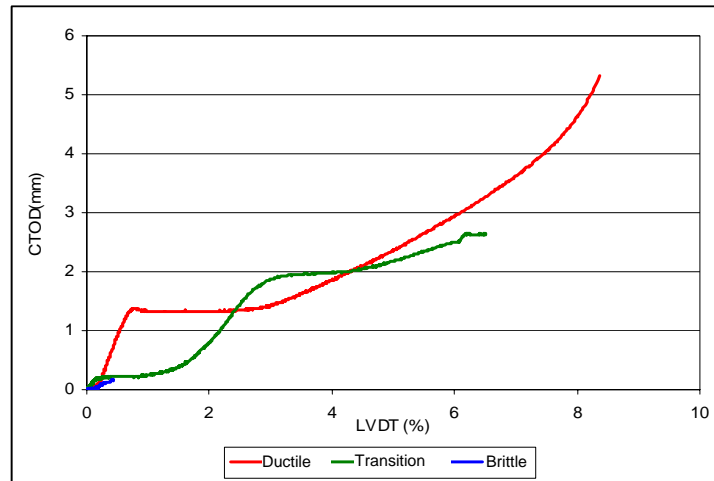


Fig. 7.5. Relation between local and global strains for the various types of behaviour of the material.

### 7.1.3. On the validation and the scope of the model

The model proposed for the global assessment of the loss of constraint has been applied in the validation tests, comparing the failure loads obtained in these tests with those provided by the model. The main conclusions obtained from the analysis of the results are the following:

3.1. The methodology proposed in this work significantly reduces the conservatism obtained using the most widely used procedures (based on Uniparametric Fracture Mechanics) on structural components in low constraint situations. The reduction in conservatism almost reaches 100 % in some cases while the average values in the case of the tests performed on structural steel is around 50 % for the various types of correction. It may be considered therefore that the reductions obtained are more than relevant, bearing in mind that not all the initial conservatism is given by the constraint at the defect tip; rather, there are other sources of conservatism such as the fact it has been an initiation analysis while in many cases there has been some propagation before failure (a ductile tearing analysis will further reduce conservatism).

3.2 The model proposed provides a safe assessment of structural components with low constraint, since in all cases the safety factor obtained is greater than the unit. This fact confirms the parameter selection considerations ( $m_B, \sigma_0$ ) performed on the basis of the bibliographical references. Of all of the methods tested, the best results as regards being close to the test reality correspond to the combination of parametric correction and FFM.

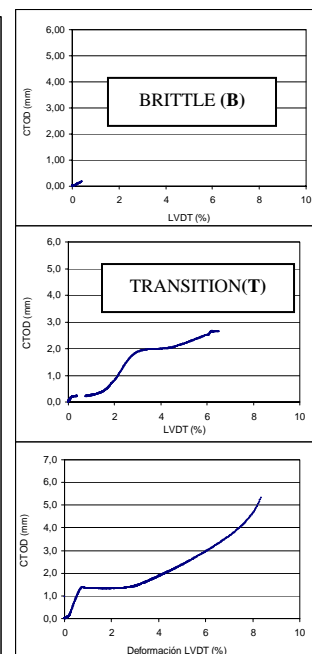
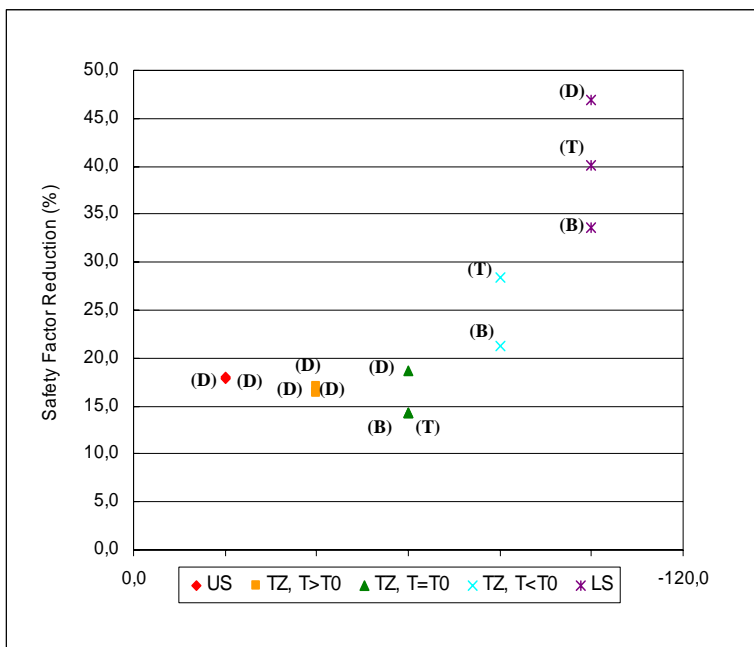
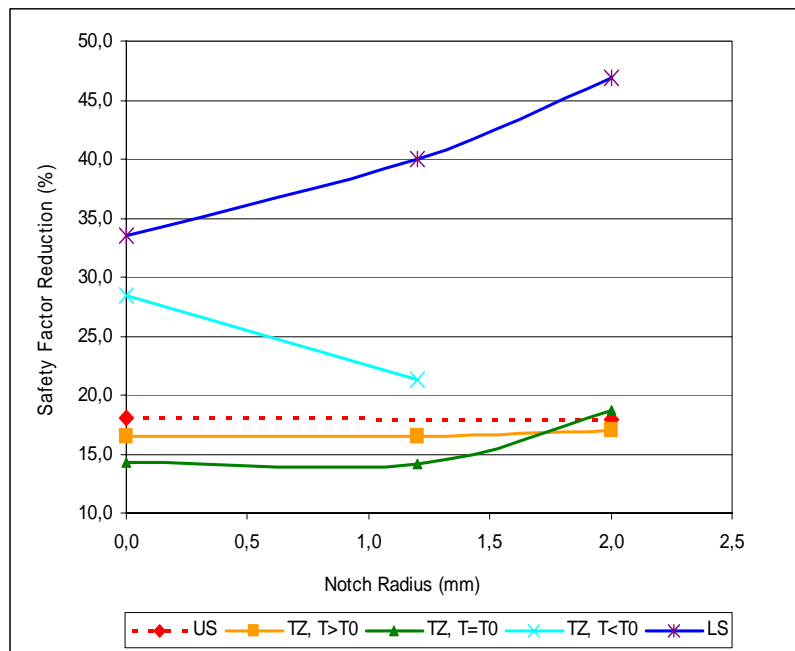
3.3. *The reduction in conservatism was higher in the cracked specimens than in the notched specimens. This leads to two considerations with different perspectives:*

- *On the one hand, that an efficiency of 100 % is reached in cracked specimens after the first stage of constraint correction, and that the optimisation of the process when there are notches requires the second stage of correction, which confirms not only the model but also the independence of the correction processes, as had been devised in their very conception.*
- *On the other hand, there are physical reasons which can explain this difference: notch corrections are of a linear-elastic nature, while the notched components tested have always shown an elastoplastic behaviour. Consequently, these corrections have generally given rise to a low estimate of the increase in the fracture resistance of the material, although for the smaller radius and the lowest temperatures, the approximation to the experimental reality obtained for the standard geometry specimens is clear. Secondly, another decisive factor is that the notched specimens have values for the parameter  $L_r$  at failure greater than  $L_{rmax}$ , so that the reductions in parameter  $K_r$  (due to the increase in fracture resistance) have had no bearing on the safety factor, even though they explain the type of behaviour observed, with hardening through plastification.*

3.4. *In situations of ductile behaviour at temperatures above the Reference Temperature ( $T > T_0$ ), the corrections of the Biparametric Fracture Mechanics are those responsible for the reduction in the safety factor, especially when the parametric correction, whose effect is substantially greater than that of the MC (Master Curve) correction, is applied. In transition and ductile behaviour situations at lower temperatures ( $T \leq T_0$ ), the notch effect correction is appreciable. Fig. 7.6 highlights the evolution of the reduction achieved in the safety factors depending on the typologies of behaviour of the components and the test temperature. As a consequence of the evolution of the notch effect as the temperature lowers, the prediction of the reduction in the safety margins above the reference temperature  $T_0$  are gradually reduced to  $16 \pm 2$  %, always associated to the first stage of correction. Only for temperatures lower than the Reference Temperature does the reduction in conservatism surpass 20 %, increasing as the temperature descends and the constraint associated to the notch radius decreases. The improvements in the prediction reach values of over 40% and efficiencies of over 80 %, which could reach almost 100 % if finer processes (Failure Assessment Lines) were used.*

3.5. The methodology proposed brings structural integrity assessment closer to the physics of the problem, even in those situations in which the safety factor is not modified. Thus, the application of the constraint correction can actually explain the failure mechanism of each test, something which cannot be achieved with Uniparametric Fracture Mechanics for low constraint situations.

In short, this Thesis proposes a new methodology, theoretically justified and successfully validated in a wide range of plasticity conditions, which makes it possible to reduce the conservatism produced at times through the application of standard procedures to low constraint situations. Its importance and soundness are confirmed by the fact that it has been included in the recently developed European Fitness-for-Service Procedure (FITNET) [14], in its Section 12.5.5.



DUCTILE (D)
-------------

**Fig. 7.6.** Reduction in safety factors obtained as a function of the  $CTOD_c$  and its relation with the various material behaviour typologies.

## 7.2. FUTURE WORK

In the course of the present work, it has been observed that several aspects involved in it require a more thorough analysis, a more exhaustive validation or a more detailed quantification. The main areas of research which might, on the basis of the results and analysis of this Thesis, be the object of study are outlined below:

- *Elastoplastic notch model.*

*The methodology proposed in this work is based on the demonstration of the independence of the two main sources of constraint loss on the load application plane: that produced by shallow defects and tensile loads and that produced by the notch effect. This makes it possible to add, as a further multiple, the notch effect correction in the formulation of the biparametric fracture mechanics. But this independence has already been demonstrated in the linear elastic field, which allows any linear-elastic notch model (CASM or FFM) to be combined with the biparametric linear-elastic correction (T stress).*

*Elastic notch effect corrections can be used, directly in the case of CASM [16] and after a calibration in case of FFM [17] in situations of certain plasticity, and can be combined with biparametric elastoplastic correction (Q parameter). However, with this procedure, in situations of higher plasticity, the biparametric correction is greater than the notch effect correction. It would thus be of great interest to first obtain a notch effect correction based on elastoplastic concepts and to verify whether the greater quantitative weight of biparametric correction in the model proposed in this Thesis and in situations of high plasticity is something intrinsic to these situations or whether it is the result of the underestimation of the increase in resistance to fracture produced by the application of elastic models in the elastoplastic domain. Secondly, it would also be of great value to demonstrate the independence between these two types of loss of constraint in the*

*elastoplastic range, something which has been assumed in this work on the basis of the results in the elastic domain.*

- *Validation of the model proposed in notched components with brittle failures.*

*The model proposed has been applied successfully in situations with a high or medium plasticity in which the  $L_r$  parameter is greater than the unit. As stated above, in highly brittle situations, in which the fracture takes place at  $L_r$  values lower than 0.2, the loss of constraint produced by the depth of the defect and the type of load is very slight and only the loss of constraint through the notch effect would be of relevance. Given that the CASM and FFM corrections have been adequately validated by their authors [16,17], the model would also be validated for situations in which  $0 \leq L_r \leq 0.2$ . In short, what remains to be validated are situations in which  $0.2 \leq L_r \leq 1.0$  (moderate plasticity). In principle, the model should work, since these are situations very similar to those from which it has been theoretically derived, but its safe application in engineering work requires a thorough validation.*

*The tests performed did not cover low plasticity situations because it had not until now been observed that the Transition Zone of the toughness curve of notched components experienced a substantial shift towards lower temperatures produced by the notch effect. Thus, tests which in the case of cracked materials should have produced brittle fractures (temperatures of up to  $-100^\circ\text{C}$ ), in fact generated fractures with a considerable plasticity in the case of the notched specimens. Thus, any future research on this topic must bear in mind that in order to test notched components in the "Lower Shelf" it is necessary to reach far lower temperatures than those corresponding to the cracked material.*

- *Quantification of the displacement of the Master Curve produced by the notch effect.*

*The Master Curve has proven to be an important tool in the structural integrity assessment of all types of components manufactured with ferritic steels. It enables the fracture toughness of the material to be characterised in all of the Transition Zone. To obtain it, a series of fracture toughness tests needs to be performed on specimens subjected to bending loads and with deep cracks; in short, specimens with a high degree of constraint at the crack tip.*

*The reality of the component may be quite different, with a far lower constraint, and, as has been demonstrated in some studies [53,94], its Master Curve may be considerably*

displaced towards lower temperatures (in [94] this displacement was quantified as a tenth of the  $T$  stress value).

It has been demonstrated in this work, on the basis of the experimental results and the structural integrity assessment, that when the defect in the material is of the notch type, the Master Curve of the material undergoes a further displacement towards lower temperatures. This observation is in turn corroborated by the fact that the notch effect causes a loss of constraint which is independent from, but of the same nature as, that caused by the type of loads or the depth of the defect. If the latter causes a displacement in the Master Curve, the former will do too.

It would thus be of great interest to quantify the displacement of the Master Curve produced by the notch effect, so that, for a component with shallow notches subjected to tensile loads (subjected, therefore, to two sources of loss of constraint), it will be possible to define the Master Curve of the component from the Master Curve of the material obtained in the usual way.

- Application and validation of the model in other types of materials.

The tests performed in the course of this Doctorate Thesis were performed with a ferritic steel (S355JR) which is widely used in civil construction. Constraint is a purely geometrical phenomenon and is thus independent of the material, so that if the model works for the material used, there is no reason to think that it will not work for other types of material. However, there are materials that are used in conditions in which safety must be absolutely guaranteed. This is the case of the aluminium alloys used in the aeronautics industry, alloys such as Inconel used in the nuclear industry, etc. The validation of the model in these materials is an essential requisite for their subsequent use. In turn, its validation is recommendable in non-metallic materials, such as ceramics and polymers.

- Analysis of the relation between the losses of constraint on and off the load application plane.

It is well-known that the fracture resistance of the material changes with the thickness of the component assessed. Thus, the fracture toughness tests require the use of specimens of a specific minimum thickness which guarantees plane strain conditions. As the thickness decreases, the fracture resistance of the material increases. This occurs because the material passes from a state of plane strain to another of plane stress; that is, a relaxing of



*the stresses occurs in the direction perpendicular to the load application plane and thus a loss of constraint occurs.*

*The quantification of this effect is a rather complex question and no satisfactory model has yet been proposed. As well as this quantification, whose importance is beyond doubt, it would also be of interest to study the relation between the losses of constraint on and off the load application plane, analysing their possible independence and paving the way to obtain a model which considers all possible types of losses of constraint. This would enable the resistance of materials to be exploited to the maximum, which could generate substantial savings for industry, making it safer and more competitive.*