

**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 1**

### **INTRODUCCIÓN**

La Mecánica de la Fractura es una disciplina de la ingeniería que tiene sus primeros avances en los años 20 del siglo pasado, con los estudios realizados por Griffith [1]. En las siguientes décadas van sucediéndose nuevos avances: en los años 50 se profundiza en el conocimiento de los campos de tensiones y deformaciones en las proximidades de un defecto (Irwin [2], Williams [3], Elsheby [4],...), en los 60 se aplica la Mecánica de la Fractura al problema de la fatiga (Paris [5,6]) y se extiende su uso a situaciones elasto-plásticas (Burdekin [7], Dugdale [8], McClintock [9], ...).

De esta manera se puede decir que a comienzos de los años 80 los principios generales de esta disciplina quedaron ya suficientemente asentados. Su aplicación era posible a problemas comunes en la industria y permitía mejorar la seguridad de muchas estructuras civiles e industriales, aunque muchas veces los coeficientes de seguridad eran excesivamente conservadores, lo cual no era sino la constatación de la falta de un conocimiento profundo de la realidad del problema. Seguían abiertos muchos interrogantes y una parte importante de los problemas a los que se tenían que enfrentar los ingenieros no encontraban una solución completamente satisfactoria en la aplicación de la disciplina.

Pues bien, una vez sentadas las bases teóricas, en las últimas tres décadas se han ido produciendo importantes avances que han posibilitado la superación, al menos en parte, de muchas de aquellas carencias. Los procedimientos, códigos o normas de diseño y/o evaluación (ASME Code [10], BS7910 [11], R6 [12], SINTAP [13], FITNET [14],...) junto con las

técnicas de simulación numérica mediante el uso de elementos finitos se han revelado como importantísimas herramientas industriales que permiten el diseño de estructuras más seguras, la evaluación de estructuras en funcionamiento y el análisis de los fallos producidos. En sus sucesivas versiones van incorporando los avances que se van realizando en el mundo de la investigación, de tal manera que constituyen no sólo un importante instrumento de trabajo sino que también se han revelado como una nada despreciable fuente de mejora de la competitividad industrial.

Fruto de su continua puesta al día y de los avances en la Mecánica de la Fractura hoy es posible reducir los excesivamente conservadores coeficientes de seguridad con los que en muchas ocasiones se trabajaba en el pasado o bien resolver de forma satisfactoria problemas que hace escasos años no podían siquiera plantearse. Así, hoy es posible utilizar distintos procedimientos en función del grado de conocimiento del comportamiento mecánico del material, procedimientos para el análisis de fisuras en componentes compuestos de materiales con propiedades muy diferentes o disimilares (“*mismatch*”), el análisis de “fuga antes de rotura” (“*leak before break*”), análisis probabilísticos (“*probabilistic risk assessment*”), o bien procedimientos que permitan la consideración de aspectos tales como las tensiones residuales, las interacciones entre defectos, sobrecargas o las condiciones de confinamiento en el fondo del defecto. Este último aspecto es el analizado en esta Tesis Doctoral.

El confinamiento es un término utilizado para referirnos al grado de triaxialidad tensional en el fondo del defecto, de tal manera que cuanto mayor sea el confinamiento mayor es la triaxialidad. Los procedimientos de evaluación de la integridad estructural consideran, por defecto, condiciones de alto confinamiento en el fondo del defecto, suposición que deja al posterior análisis del lado de la seguridad. Sin embargo hay situaciones en las que la geometría del problema y el tipo de cargas aplicadas motivan una pérdida de confinamiento que se traduce en un aumento de la resistencia a fractura del material. En dichas situaciones la hipótesis de alto confinamiento puede resultar excesivamente conservadora. Como fuentes de reducción de confinamiento se pueden citar las propias de:

- 1) Componentes de pequeño espesor.
- 2) Cargas de tracción.
- 3) Defectos superficiales.
- 4) Defectos con radio finito (entallas).

La primera de ellas se produce fuera del plano de aplicación de la carga, ha sido analizada por numerosos investigadores y no va a ser objeto de estudio en este trabajo. El resto de fuentes generan pérdidas de confinamiento en el plano de aplicación de la carga. La segunda y la tercera

generan una pérdida de confinamiento que hoy en día puede ser analizada mediante las metodologías propuestas en procedimientos como el R6, el SINTAP o el FITNET. Por otra parte, tal y como se verá en esta Tesis, diversos autores han cuantificado [15-17] el aumento de la resistencia a fractura producido por defectos tipo entalla pero no se ha analizado su efecto en las evaluaciones de integridad estructural. Tampoco se ha analizado la interacción entre las distintas fuentes.

Este trabajo tiene por objeto el análisis profundo y global de la pérdida de confinamiento en el plano de aplicación de la carga, sus fuentes, sus repercusiones en la evaluación de la integridad de componentes estructurales y fundamentalmente la interacción entre ellas, algo que no ha sido analizado hasta el momento. Como resultado de dicho análisis se va a plantear un modelo de evaluación global de componentes estructurales con defectos en condiciones de bajo confinamiento, de tal manera que se pueda evaluar de forma satisfactoria y desde el conocimiento de la realidad física del problema un componente con entallas superficiales sometido a cargas de tracción, como caso global que incluiría todas las fuentes de pérdida de confinamiento en el plano de aplicación de la carga. Finalmente se plantean una serie de ensayos con el objeto de validar el método y asegurar que siempre da resultados seguros (coeficiente de seguridad mayor que la unidad).

Las posibles aplicaciones del método propuesto en esta Tesis Doctoral van desde el diseño y la fabricación de componentes estructurales hasta el análisis de fallos, pasando por la evaluación de componentes en servicio. Es decir, su aplicación abarca todos los campos de actuación de las técnicas y procedimientos actuales de evaluación de la integridad estructural. Algunos ejemplos serían: la evaluación de perfiles laminados con defectos de fabricación tipo entalla, muchos de los cuales son rechazados en controles de calidad cuando realmente podrían ponerse en servicio en condiciones totalmente seguras; la evaluación de componentes con defectos provocados por corrosión; el análisis de componentes fisurados sometidos fundamentalmente a cargas de tracción (vasijas de centrales nucleares, tirantes y péndolas de puentes y edificios,...).

En definitiva, el análisis aquí realizado y la metodología de análisis propuesta pretenden ser un nuevo paso en el continuo avance en los aspectos básicos que cubre la Mecánica de la Fractura y sus aplicaciones que permita, desde un mayor conocimiento de la realidad tensional en el entorno de los defectos, la realización de evaluaciones de integridad estructural seguras, resultando más racionales y económicas.



## **CHAPTER 1**

### **INTRODUCTION**

*Fracture Mechanics is an engineering discipline whose origins date back to the nineteenth-twenties with the studies performed by Griffith [1]. More breakthroughs were made in the following decades: the fifties saw a great advance in the knowledge of stress and strain fields near the defect tip (Irwin [2], Williams [3], Elshelby [4],...), while in the sixties, Fracture Mechanics was applied to the problem of fatigue (Paris [5,6]) and its use was extended to elastoplastic situations (Burdekin [7], Dugdale [8], McClintock [9], ...).*

*Thus, it could be said that by the nineteen-eighties the general principles of this discipline had been established. It was possible to apply them to common problems in industry and allowed the safety of many civil and industrial structures to be improved, even though the safety factors were often excessively conservative, which was no more than evidence of a lack of a real understanding of the problem. Several questions were still unanswered and for many of the problems the engineers were faced with there was no fully satisfactory solution to be found in the application of the discipline.*

*However, once these main principles had been established, the last three decades have witnessed many important breakthroughs which have made it possible to overcome at least in part many of those failings. The procedures, codes and standards of design and/or assessment (ASME Code [10], BS7910 [11], R6 [12], SINTAP [13], FITNET [14],...) together with numerical simulation techniques through the use of finite elements have proven to be important tools in industry allowing the design of safer structures, the assessment of structures in working*

conditions and the analysis of failures as they arise. These procedures and standards incorporate in their successive versions the advances made in the world of scientific research, thus constituting not only an important working tool but also a significant source of improvement in industrial competitiveness.

In view of this continuous updating and the advances in Fracture Mechanics, it is now possible to reduce the excessively conservative safety factors applied in many cases in the past or to solve satisfactorily some of the problems that could not be addressed some years ago. Thus, it is now possible to use different procedures depending on the degree of knowledge of the mechanical behaviour of the material, procedures for crack analysis in 'mismatched' components, leak before break analysis, probabilistic risk assessment, or procedures which make it possible to take into account aspects such as residual stresses, interactions between defects, overloads or constraint conditions on the defect tip. This latter aspect is the one analysed in this Doctorate Thesis.

Constraint is a term used to refer to the degree of stress triaxiality at the defect tip, meaning that the greater the constraint, the greater the triaxiality. Structural integrity assessment procedures consider, by default, conditions of high constraint at defect tip, an assumption which leaves the subsequent analysis on the safe side. However, there are situations in which the geometry of the problem and the type of loads applied lead to a loss in constraint, which translates into an increase in the fracture resistance of the material. In these situations, the hypothesis of high constraint may prove excessively conservative. Some of the main sources of a reduction in constraint are:

- 1) Components of small thickness.
- 2) Tensile loads.
- 3) Superficial defects.
- 4) Finite radius defects (notches).

The first of these takes place outside the load application plane, has been analysed by numerous researchers and is not the object of study in this work. The rest of these sources generate losses of constraint on the load application plane. The second and third generate a loss of constraint that can now be analysed using the methodologies proposed in procedures such as R6, SINTAP or FITNET. Moreover, as shall be seen in this Thesis, several authors have quantified [15-17] the increase in fracture resistance produced by notch-type defects, but no analysis has been made of their effect on structural integrity assessment, nor has any analysis been made of the interaction between the different sources.

*The aim of this work is to make an in-depth overall analysis of constraint loss on the load application plane: its sources, its repercussions on the integrity assessment of structural components and, fundamentally, the interaction between these, something which has never been addressed previously. As a result of this analysis, a model will be proposed for the overall assessment of structural components with defects in low constraint conditions, so that a component with superficial notches subjected to tensile loads can be assessed satisfactorily and on the basis of a sound knowledge of the physics of the problem, as a general case which will include all of the sources of constraint loss on the load application plane. Finally, a series of tests are proposed in order to validate the method and to ensure that it always provides safe results (safety factor greater than the unit).*

*The possible applications of the method proposed in this Doctorate Thesis range from the design and manufacture of structural components to failure analysis, as well as the assessment of components in service. That is, its application takes in all of the fields of action of the current structural integrity assessment techniques and procedures. Some examples might be the assessment of laminated profiles with notch-type manufacturing defects, many of which are rejected in quality controls when they really might enter into service in totally safe conditions; the assessment of components with defects caused by corrosion; the analysis of cracked components subjected mainly to tensile loads (nuclear power plant vessels, braces of bridges and buildings,...)...*

*In short, the analysis made here and the analysis methodology proposed are intended to constitute a new step on the ladder of continuous advancement on the basic aspects that make up Fracture Mechanics and its applications allowing, thanks to an increased knowledge of the stress conditions around the defects, safe structural integrity assessments to be made which will prove to be more rational and more economical.*