

**Tesista:** Diego Fernandino  
Ingeniero Electromecánico, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Mar del Plata

**Título al que aspira:** Doctor en Ciencia de Materiales, UNMdP

**Tema:** “Fractura en fundición de hierro con grafito esferoidal. Análisis experimental y modelado multi-escala”

**Director de tesis:** Dr. Roberto Boeri

**Co-director:** Dr. Adrián Cisilino

**Lugar de Trabajo:** Facultad de Ingeniería, UNMdP

**Fecha de Defensa:** 30 de marzo de 2015

**Jurados:**

Dr. Sebastián Giusti (UTN - Córdoba)

Dr. Alberto Franklin Armas (Instituto de Física de Rosario, IFIR, UNR-CONICET)

Dr. Juan Miguel Massone (Fac. de Ingeniería - UNMDP)

**Resumen**

Esta tesis tiene como objetivo avanzar en el entendimiento de los procesos de fractura de las fundiciones de grafito esferoidal (FGE). El estudio se aborda de forma integral, cambiando trabajo experimental y de modelado computacional.

Las actividades desarrolladas se agrupan en tres secciones principales:

La primera sección, involucra una detallada caracterización experimental de la fractura de FE de diferentes matrices y ante sollicitaciones cuasi-estáticas y dinámicas. A partir de los resultados de análisis fractográficos se determinan los modos de fractura predominantes, y se genera una extensa base de datos experimentales que sirve para configurar y validar los modelos computacionales de la tercera sección. En esta etapa de estudio se comprueba que la heterogeneidad del material, que incluye una dispersión de partículas esferoidales de grafito de decenas de micrones de diámetro, microsegregación química, precipitados y microhuecos, conduce a mecanismos de fractura de características complejas. Se proponen metodologías para la determinación de la dirección de propagación de la fisura principal. El primer método es aplicable a las superficies que evidencian un modo de fractura predominantemente dúctil, en donde la dirección de propagación se identifica a partir de la deformación plástica de la matriz metálica que rodea a los nódulos de grafito. El segundo

método es aplicable a superficies que evidencian un modo de fractura frágil, en donde la dirección de propagación de la fisura principal se identifica mediante el examen cuidadoso de los cauces de río a lo largo de las facetas de clivaje. Los resultados de esta sección ponen en evidencia la complejidad del análisis de la fractura en FGE y la conveniencia de utilizar métodos numéricos para avanzar en la comprensión de este tema.

La segunda sección involucra una caracterización microestructural y mecánica detallada, tanto a nivel macroscópico como microscópico de FGE de matriz ferrítica. La caracterización microestructural comprende la identificación las zonas microsegregadas en la matriz y el relevamiento del tamaño, morfología y distribución espacial de los nódulos de grafito. La caracterización mecánica comprende el relevamiento de los parámetros constitutivos del comportamiento elasto-plástico de la FGE a nivel macroestructural y de sus micronstituyentes a nivel microestructural. La caracterización en la escala macroscópica se realiza utilizando ensayos de tracción estándar, mientras que en la escala micro se utilizan técnicas de micro y nanoindentación instrumentada y microscopia de fuerza atómica, en combinación con análisis de elementos finitos. Se analizan también los micromecanismos de daño, observándose que, la etapa temprana de daño es dominada por la decohesión matriz-nódulo. Por su parte, la falla final del material responde a mecanismos de nucleación y coalescencia de microhuecos.

La tercera sección de esta tesis involucra el modelado computacional multiescala del comportamiento mecánico de FGE ferríticas. En primer lugar se especializan e implementan herramientas de análisis multiescala para homogenizar el comportamiento en el rango elástico. Se utiliza para esto de un esquema de homogenización asintótico implementado con elementos finitos que se vale de modelos de la microestructura tomadas de micrografías para reproducir las geometrías reales. Las propiedades de las fases se especifican según los datos del análisis experimental. El elemento de volumen representativo (RVE) se dimensiona en términos de la anisotropía del tensor elástico macroscópico homogeneizado y la invariancia y dispersión de los valores homogeneizados para el módulo de Young y la relación de Poisson. Los resultados de la homogenización de los modelos, que no se valen de ningún parámetro de ajuste o calibración, están en excelente acuerdo con los resultados experimentales. En segundo lugar, se realiza un modelado multiescala de la evolución del

daño temprano de FGE ferrítica, el que considera el comportamiento elastoplástico de la matriz y la decohesión del nódulo de grafito. Este análisis se realiza utilizando una novedosa Formulación Multiescala Orientada a Falla que incorpora interfaces cohesivas para modelar la decohesión de los nódulos en la microescala. Como en el caso del análisis elástico, la geometría de los modelos y las propiedades de sus microconstituyentes se especifican a partir de los resultados experimentales. El análisis multiescala se utiliza para estimar las propiedades cohesivas de la interface matriz-nódulo. Como resultado, se especifican rangos de valores para la tensión crítica y la energía de fractura de la interface, para los que el modelo reproduce los comportamientos micro y macro mecánicos observados en el análisis experimental. De esta forma, el modelado contribuye no solo a un mejor entendimiento del mecanismo de daño, sino a estimar propiedades que no pueden ser medidas experimentalmente.

Los resultados de la tesis permiten avanzar en la comprensión de los procesos de fractura en FGE. No se encuentran en la bibliografía antecedentes sobre estudios la fractura de FGE como los realizados en este trabajo, el que resulta en contribuciones originales tanto en el campo de materiales como en el campo de la mecánica computacional. Se demuestra la viabilidad de combinar de forma sinérgica, herramientas experimentales y computacionales de análisis multiescala para estudiar los micromecanismos de daño y fractura. Las metodologías experimentales y computacionales desarrolladas cuentan con un importante potencial para ser aplicadas y extendidas a la etapa avanzada de daño de FGE ferrítica, así como a otros tipos de FGE y materiales.

## **Abstract**

The aim of this thesis is to advance in the understanding of the complex process of fracture of spheroidal graphite cast irons (SGI). The study combines the experimental analyses and computational modelling tools.

The activities are grouped into three main sections:

The first section involves a careful experimental characterization of the fracture of SGI of different microstructures generated under quasi-static and dynamic loading conditions. Predominant fracture modes are identified and an extended database is generated, that serves

to set-up and to validate the numerical calculations carried out in the third section. This stage of the study highlights the marked heterogeneity of SGI, characterized by the presence of a dispersion of spheroidal graphite precipitates of tenths of microns in diameter, chemical microsegregation and other precipitates and microvoids. After the fractographic analysis two specific methods to identify the direction of propagation of the main crack are proposed. The first method is applicable to fractures showing predominantly ductile failure mode, and identifies the propagation direction based on the analysis of the plastic deformation of the matrix areas enveloping the graphite nodules. The second method is applicable to brittle fractures and identifies the propagation direction of the main crack by carefully examining the river patterns along the cleavage facets. The results of this section remark the complexity of the analysis of the fracture of SGI and the convenience of the use of numerical methods to advance in the understanding of this subject.

The second stage involves a detailed characterization of the microstructure and the mechanical properties at the macroscopic and microscopic levels. The study is focused on ferritic SGI. The microstructural characterization involves the identification of microsegregated zones of the metallic matrix and a careful characterization of the size, shape and distribution of the graphite nodules. The mechanical characterization involves the determination of constitutive parameters of elastoplastic behaviour of SGI at macroscopic level and of its microconstituents at microscopic level. The macroscopic characterization is carried out using standard tensile tests, while at the microscale, micro and nano indentation techniques combined with atomic force microscopy and finite element analysis are used. The damage micromechanisms are also analysed. It is observed that the matrix-nodule debonding dominates the early-stage of damage, while the final failure mechanism is related to nucleation and coalescence of microvoid.

The third stage of this thesis involves the multiscale computational modelling of the mechanical behaviour of SGI. At first, and as a basis for the forthcoming elastoplastic analysis, multiscale analysis tools are implemented and specialized for the homogenization of the mechanical behaviour of SGE at the elastic strain range. With this purpose, an asymptotic homogenization scheme implemented with finite elements, which uses models of the microstructure taken from micrographs to reproduce the actual geometries, is used. The properties of the different phases are specified following the results of the experimental

analysis. The size of the representative volume element (RVE) is assessed in terms of the invariance and isotropy of the homogenized elastic responses. The results of the homogenization of the models, which do not make use of any adjustment or calibration coefficients, agree excellently with the experimental analysis.

Secondly, a multiscale modelling of the early-stage damage evolution on SGI, which considers the elastoplastic behaviour of the matrix and the matrix-nodule debonding, is implemented. The analysis uses a novel Failure-Oriented Multiscale Formulation that incorporates cohesive elements at the interfaces for modelling the nodule decohesion at the microscale. In the same way that in the case of the elastic analysis, the model geometries and the properties of the microconstituents are specified from the experimental results. The multiscale analysis is used to estimate the cohesive properties of matrix-nodule interface. As a result, ranges of the critical stress and fracture energy of the interface, for which the model reproduces the mechanical behavior observed in the experimental analysis in both macro and micro level, are specified. Thereby, the modelling not only contributes to a better understanding of the damage mechanisms, but also to estimate properties that cannot be measured from the experimental methods.

The results of this thesis allow advancing in the understanding of the fracture processes in SGI. SGI fracture studies such as those conducted in this work are not found in the literature, resulting in original contributions both in the field of materials science and computational mechanics. The feasibility of combining synergistically, experimental and computational multiscale analysis tools to study the damage micromechanisms and failure on SGI is demonstrated. The experimental and computational methods developed have significant potential to be applied and extended to the advanced-stage of damage in ferritic SGI, as well as other kinds of SGI and heterogeneous materials.