

**Tesista:** Ceferino Steimbregger

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

**Tema:** "Modelos fractomecánicos para el análisis del comportamiento a fatiga de uniones soldadas"

**Director:** Dr. Mirco Chapetti

**Jurados:**

Dr. Nicolás Larrosa (University of Bristol, Reino Unido)

Dr. Nenad Gubelj (University of Maribor, Eslovenia)

Dr. Adrián Cisilino (CDS, CONICET – UNMdP)

**Resumen**

La importancia de la integridad estructural de elementos mecánicos es indiscutida en nuestros días. El esfuerzo conjunto de la industria y del ámbito científico en post de métodos eficientes, confiables y económicos que permitan evaluar el desempeño de dichos componentes, ha conducido a un sinnúmero de metodologías que varían en fundamento y complejidad. En relación con el comportamiento a fatiga, la mayoría de los métodos actualmente utilizados refieren a curvas de diseño que relacionan la tensión admisible con un determinado número de ciclos a la falla. La diferencia entre ellos radica en la definición de la tensión empleada en el análisis, la cual puede ser más o menos rigurosa respecto a la habilidad para contemplar variaciones de diversos parámetros geométricos. Sin embargo, la desventaja que concierne a todos ellos es su fundamento semi-empírico, puesto que las curvas de diseño se obtienen a partir de una gran cantidad de datos experimentales que enmascaran los efectos individuales de los factores intervinientes. A pesar que estas técnicas logran describir algunos fenómenos observados en piezas sometidas a cargas cíclicas, no permiten realizar un análisis integral que contemple las variables más importantes, en forma cuantitativa. Como alternativa, se desarrollaron métodos basados en mecánica de fractura que consideran la longitud de fisura como variable adicional del problema. Esto otorga ciertas ventajas a la hora de evaluar uniones soldadas, dado que las mismas se caracterizan por tener defectos que reducen enormemente la etapa de iniciación de fisuras. Las opciones disponibles actualmente no logran predecir adecuadamente el comportamiento a fatiga de soldaduras, debido a que desprecian generalmente la variación del umbral de propagación con la longitud de fisura.

El objetivo de esta tesis es estudiar el comportamiento a fatiga de alto número de ciclos en componentes mecánicos, utilizando una metodología fractomecánica propuesta para uniones soldadas. La misma se basa en el concepto de la curva de resistencia y considera la influencia de concentradores de tensiones, defectos de soldadura, tensiones residuales y otras variables microestructurales, geométricas y mecánicas. Mediante la comparación de la fuerza impulsora para el crecimiento de fisura con el umbral de propagación, expresados ambos a través del factor de intensidad de tensiones, es posible determinar una condición límite que corresponde al límite de fatiga de la configuración. El modelo predictivo demostró ser una herramienta útil para cuantificar el efecto de diferentes variables como las dimensiones de defectos, espesor de la chapa base, condiciones generales de carga de la estructura y tensiones residuales. Se encontró que la profundidad del

socavado es el principal parámetro que afecta la resistencia a fatiga y se pudieron justificar además las tolerancias establecidas para *undercuts* en documentos de diseño relevantes. Por otro lado, se estudió también la influencia de la resistencia estática del material base, la cual se cree no afecta la vida a fatiga de la unión soldada. Se pudo demostrar que la existencia de defectos opaca la influencia que tiene esta propiedad en la resistencia cíclica. Este resultado permite explicar satisfactoriamente las mejoras observadas en soldaduras de aceros de alta resistencia, con tratamientos post-soldadura. El amolado del talón, u otras técnicas de modificación de la geometría local, eliminan o reducen el tamaño medio de defecto, haciendo factibles las mejoras producidas por el empleo de un metal base más resistente. En términos generales, el método propuesto posibilita la evaluación del comportamiento a fatiga de uniones soldadas de forma integral, y con fundamento científico en Mecánica de Fractura. Este aspecto constituye la principal diferencia con los métodos que emplean tensiones, los cuales se basan en curvas S-N empíricas.

Sin embargo, para la aplicación directa en la industria, aún se requieren simplificaciones que permitan la utilización del método por personal con conocimientos mínimos en Mecánica de Fractura. En este aspecto, se avanzó en el desarrollo de una propuesta simplificada, para soldaduras sin defectos, que comprende diversos tipos de junta. Los resultados preliminares son prometedores, y permiten estimar la resistencia a fatiga mediante tres parámetros mecánicos bien definidos: tamaño de defecto inicial, umbral de propagación de fisura, y factor de concentración de tensiones a lo largo del camino esperado de crecimiento de fisura. No obstante, se requiere un esfuerzo adicional para el estudio de uniones más complejas, y condiciones de carga múltiples, así como también para el desarrollo de simplificaciones asociadas al cálculo del umbral de propagación de fisuras.

Se espera que el procedimiento descrito pueda contribuir al entendimiento global del mecanismo de daño específico. De este modo, es posible establecer límites aceptables para diferentes tipos de defectos normalmente encontrados en uniones soldadas, que sean más razonables y menos conservativos. Asimismo, es factible su aplicación potencial en el desarrollo de recomendaciones para el diseño seguro de piezas soldadas, con metodologías actualmente reconocidas, como *Fitness for Purpose/Service*.

## **Abstract**

The importance of structural integrity in mechanical parts is currently undeniable. Industrial sector and scientific entities have put a lot of effort on searching new economic, efficient and trustful methods, which are able to assess mechanical performance of different components. This has led to countless methodologies that vary in their basics and complexity. In relation to fatigue behaviour, majority of methods currently used are referred to design curves that relate the admissible tension to the number of cycles until failure. Their main difference lays in the stress definition, which can be more or less rigorous with respect to its ability to account for different geometrical details. However, they all have a disadvantage in common that has to do with their semi-empirical basis. S-N curves are obtained from large experimental data sets in real parts, which hide the individual effects of involved factors. Although these techniques have proven to describe properly some phenomena observed in fatigue loaded components, they do not allow for integral analyses that consider the most important variables quantitatively. Alternatively, methods based on Fracture Mechanics have been developed. They take into account the influence of crack length, which constitutes an additional variable of the problem. Its inclusion in the analysis gives some advantages in the case of welded structures, since they are known to contain defects, which reduce considerably fatigue crack initiation life. On the other hand, options currently available are not able to predict thoroughly the fatigue behaviour of welded joints, due to the fact that they do not consider threshold for crack propagation as a function of crack length.

The main objective of the present thesis is to study the fatigue behaviour of welded components in the high cycle regime by means of a fracture mechanics based methodology. It is grounded on the resistance curve concept and it considers the influence of stress concentration factors, weld defects, residual stresses and other microstructural, geometrical and mechanical variables. By comparing the applied driving force for crack propagation with threshold for crack growth, expressed both in terms of the stress intensity factor range, it is possible to determine a limiting condition corresponding the fatigue strength of the assembly. This predictive model has demonstrated to be a powerful tool to quantify the effect of different variables like defect dimensions, plate thickness, overall loading configuration and residual stresses. It was found that undercut depth is the principal parameter that affects fatigue resistance. Moreover, tolerances adopted for undercuts in relevant design documents could be explained scientifically. In addition, the influence of the static strength of the base material was also analysed. It is known that this variable does not affect fatigue behaviour of the weld, and this could be proved, provided that defects are large enough. Detrimental effects of flaws compensate potential benefits of employing a high strength material. These results explain satisfactorily the improvements observed in high strength steel welds with modified toe geometry. Grinding and TIG-dressing can help to eliminate or reduce the size of defects, making it possible to obtain benefits from a stronger base metal. In general, proposed method allows for an integral evaluation of fatigue behaviour of welded joints, with scientific basis grounded on Fracture Mechanics. This aspect constitutes the main difference with other methods that employ stress analyses and empirical design S-N curves.

In spite of this, direct application of the method to industrial manufacturing processes still needs further development in relation to a simplified version. This will allow for its usage by personnel with little knowledge of fracture mechanics. With this aim, some advances were presented regarding a simplified proposal for welds without defects and several kinds of joints. Preliminary results are promising since the methodology predicts fatigue strength reasonably well, by means of three well-defined mechanical parameters: initial size of defect, fatigue crack propagation threshold and stress concentration factor along the expected crack path. However, more effort should be put on the study of more complex unions, multiaxial loading, and further simplifications associated with fatigue threshold.

It is expected that procedure described in the present thesis can pave the path to global understanding of specific damage mechanisms. Therefore, it would be possible to establish acceptable and less conservative limits to dimensions of different kind of defects, normally expected in welded structures. Furthermore, it is possible to potentially apply this methodology to the development of fatigue recommendations for safe designing of welded components, together with well-known Fitness-for-Purpose/Service methods.