

Abstract

The increasing use of aluminium alloys in the transportation industry, *e.g.* in aeronautics, creates the need for research on more efficient and reliable welding processes to be used. In order to allow the industry to use novel manufacturing techniques as Laser Beam Welding and Friction Stir Welding, which promise high efficiency but still lack dedicated research, there is a need for further experimental and numerical work. The present dissertation, with a predominant experimental focus, aims to contribute:

- to the assessment of the mechanical behaviour of structural connections manufactured using these new processes, and
- to fundamental knowledge and to damage tolerance criteria of modern lightweight monolithic stiffened panels.

Since heat generation is a fundamental aspect of any welding technique, an effective temperature measurement procedure that could be applied to any welding process was developed. Gas Metal Arc Welding, an aggressive and well known welding method, was used as a basis for the development of an accurate temperature measurement procedure. Fibre Bragg grating sensors proved to be a convenient, novel means of temperature field acquisition, validated in this thesis using other techniques. Also, a comparison of temperature fields of Metal Inert Gas welding, Laser Beam and Friction Stir Welding was carried out.

Residual stresses are locked-in stresses which exist in a structural part in the absence of any service or other external loads. Residual stresses may be detrimental, *e.g.* in fatigue, and promote structural failures. They are caused by mechanically induced plasticity or by thermal effects which arise from a production process as welding. A comparative study of several residual stress measuring techniques is presented, since quantitative estimation of residual stresses is important for the safe performance of structural components.

The mechanical behaviour of Friction Stir Welded and Laser Beam Welded joints was the object of three separate but complementary studies.

Due to design constraints, friction stir welded components may include notches in the weldment and so far there is no available information on the fatigue behaviour of such

structural details. Therefore, in a first study the effect of notches on friction stir weldments was investigated.

In the second study an experimental characterization and computational modelling analysis of dissimilar friction stir welded butt joints performed between aluminium alloys 6061-T6 and 6082-T6 was carried out. Bending tests were performed to characterize this example of multimaterial joint, a type of connection made possible by Friction Stir Welding. An approximate finite element modelling of a bending test of a weldment, taking into account the spatial dependence of the tensile strength properties, was made. Notwithstanding the widespread interest in the possibilities offered by Friction Stir and Laser Beam Welding, data concerning the fatigue behaviour of joints obtained using these processes is still needed. Research work on S-N and fatigue crack growth data concerning the weld zone is required to provide tools to assess fatigue behaviour. The third study is a contribution to this effort, contrasting the fatigue behaviour of joints made using a traditional process, Metal Inert Gas welding, with those made with Laser Beam and Friction Stir Welding.

An aircraft fuselage structure includes, among other parts, the external skin and longitudinal stiffeners. Most commonly stiffeners are connected to the skin by means of fasteners (rivets). Stiffeners improve the strength and stability of the structure and provide means of slowing down or arresting the growth of cracks in a panel. Riveted stiffeners remain intact as a crack propagates under them, providing an alternative path for the panel load to pass. The continuous need for lower costs and the emergence of new welding technologies as Laser Beam and Friction Stir Welding has brought interest on large integral metallic structures for aircraft applications. However, studies show that a crack approaching a stiffener propagates simultaneously in the skin and into the stiffener and breaks it.

Damage tolerance analysis for these structures is performed using linear elastic fracture mechanics concepts where the stress intensity factor plays a fundamental role. Fracture mechanics in conjunction with the Paris and other propagation laws are widely used to analyze and predict crack growth and fracture behaviour of aircraft panels. To study crack growth, and predict remaining life of stiffened panels, rigorous numerical analyses have to be performed to compute stress intensity factors. A study on three-dimensional

stress intensity factor solutions for a cracked stiffened plate using the Finite Element Method was carried out.

The European Union DaToN project aims to provide missing fundamental knowledge and assessment tools for the damage tolerance of integrally stiffened structures produced by means of three novel production methods: Laser Beam and Friction Stir Welding and High Speed Cutting or High Speed Machining. A testing programme which included fatigue crack growth rate of High Speed Machining, Laser Beam and Friction Stir welded stiffened panels was performed.

This test programme was complemented by a Scanning Electron Microscopy analysis of the fractured specimens.

Resumo

O aumento do uso de ligas de alumínio nas indústrias de transporte, como por exemplo na aeronáutica, fomenta a necessidade de investigação relativa a técnicas de soldadura eficientes e aplicáveis nesse contexto. Esta tese pretende ser um contributo, com enfoque predominantemente experimental, para o estudo do comportamento mecânico de juntas realizadas por técnicas de soldadura inovadoras com elevado potencial mas que, porém, necessitam ainda de um maior conhecimento. Entre estas encontram-se a soldadura laser (*Laser Beam Welding*) e a soldadura por fricção linear (*Friction Stir Welding*). O trabalho agora apresentado pretende dar um contributo para uma melhor compreensão:

- do comportamento mecânico de juntas soldadas por estes processos, e
- do comportamento à fadiga e da tolerância ao dano de estruturas fabricadas utilizando estas novas técnicas de soldadura.

Tendo em conta que a geração de calor é um aspecto fundamental em qualquer tipo de soldadura, foi desenvolvida uma técnica eficiente para a medição de temperatura durante a sua execução. Este estudo, visando o desenvolvimento de um método capaz de medições precisas de temperatura, foi realizado para um ambiente agressivo como o existente na soldadura por arco eléctrico. Foi desenvolvido um processo conveniente

para medir campos de temperatura usando sensores de Bragg, e esta aplicação inovadora destes sensores foi validada usando outros processos mais usuais de medição de temperatura. Foram ainda comparados os campos de temperatura desenvolvidos em soldadura *Metal Inert Gas*, por *Friction Stir Welding* e por laser.

As tensões residuais são tensões existentes numa estrutura sobre a qual não actua nenhuma carga externa. Este tipo de tensões pode contribuir negativamente para falhas estruturais. As tensões residuais podem ser criadas por plasticidade mecanicamente induzida ou por efeitos térmicos resultantes do processo de fabrico, como por exemplo durante o processo de soldadura. O conhecimento do campo de tensões residuais existente é portanto muito importante para o correcto funcionamento de uma estrutura. Assim sendo, foi realizado um estudo comparativo de diferentes técnicas para medição do campo dessas tensões.

Nesta tese é apresentado um estudo, composto por três trabalhos complementares, sobre o comportamento mecânico de soldaduras laser e soldadura por *Friction Stir Welding*.

Devido a restrições de *design*, os componentes soldados por *Friction Stir Welding* podem incluir entalhes no próprio cordão, e até ao momento ainda não existe informação disponível sobre o comportamento de estruturas com estas particularidades. Assim, no primeiro trabalho é realizado um estudo sobre o comportamento de estruturas contendo entalhes em cordões criados por *Friction Stir Welding*.

No segundo trabalho é apresentado um estudo sobre a caracterização experimental de juntas dissimilares, compostas pelos alumínio 6082-T6 e 6061-T6 soldados por *Friction Stir Welding*. Para caracterizar este tipo de juntas multimaterial foram realizados ensaios de dobragem, um tipo de ensaio ainda não documentado na literatura, neste contexto. O ensaio de dobragem foi modelado através de um modelo simplificado de elementos finitos, tendo em conta a variação das propriedades mecânicas do material nas diferentes zonas de um provete soldado.

Apesar do elevado interesse nas técnicas de soldadura laser e *Friction Stir Welding*, ainda existe a necessidade de mais informação sobre o comportamento à fadiga das respectivas juntas, nomeadamente através de ensaios S-N e de propagação de fendas. Assim, o terceiro trabalho é uma contribuição neste sentido, contrastando o

comportamento à fadiga de juntas soldadas por um processo tradicional, soldadura por arco eléctrico com gás inerte, e juntas obtidas por soldadura laser e *Friction Stir Welding*.

Na indústria aeronáutica a fuselagem de um avião inclui, entre outros componentes, o painel externo e reforços longitudinais. Presentemente os reforços são ligados ao painel da fuselagem por meio de rebites. Estes reforços melhoram a resistência e estabilidade da estrutura e são um meio para desacelerar ou mesmo deter o crescimento de fendas. Os reforços rebitados podem permanecer intactos quando uma fenda se propaga no painel, e funcionam como um caminho alternativo para a distribuição de forças. No caso de uma estrutura integral, que pode ser obtida por exemplo por *Friction Stir Welding*, uma fenda irá propagar simultaneamente no painel e no reforço, causando a fractura do mesmo.

O estudo da tolerância ao dano pode ser efectuado usando conceitos de mecânica da fractura linear elástica, sendo o factor de intensidade de tensão um dos principais. A mecânica da fractura pode ser usada em conjunto com a lei de Paris ou outra lei de propagação para prever a vida à fadiga de fuselagens aeronáuticas.

De modo a estudar a propagação de fendas e prever a vida residual à fadiga de painéis aeronáuticos reforçados é necessário realizar simulações numéricas complexas, e nesta tese é apresentado um estudo numérico tridimensional do factor de intensidade de tensão em painéis fissurados contendo reforços.

O projecto da DaToN, da União Europeia, tem como objectivo estudar e desenvolver ferramentas que permitam o conhecimento da tolerância ao dano de estruturas integrais que contenham reforços. As estruturas integrais estudadas neste projecto (painéis com dois reforços) foram produzidas através de três diferentes processos: maquinagem de alta velocidade, soldadura laser e *Friction Stir Welding*.

Foi realizado um programa de ensaios que inclui o estudo da velocidade de propagação de fendas em cada tipo de painel. Este estudo foi completado pela análise das diferentes superfícies de fractura usando microscopia electrónica de varrimento.