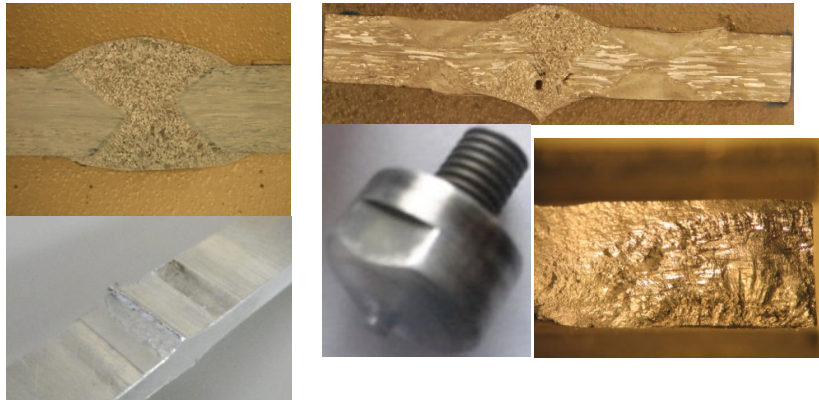




FCTUC FACULDADE DE CIÊNCIAS
E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA MECÂNICA



Aplicação do processo de fricção linear (FSP) na melhoria da resistência à fadiga de juntas soldadas por MIG

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica

Autor

Diogo Gonçalo Batista Verde

Orientadores

José Domingos Moreira da Costa

José António Martins Ferreira

Júri

Presidente Professor Doutor Ana Paula Bettencourt Martins Amaro

Orientadores Professor Doutor José Domingos Moreira da Costa

Professor Doutor José António Martins Ferreira

Vogal Professor Doutor Altino de Jesus Roque Loureiro

Coimbra, Setembro, 2011



Agradecimentos

O trabalho que aqui se apresenta só foi possível graças à colaboração e apoio de algumas pessoas, às quais não posso deixar de prestar o meu reconhecimento.

Ao professor José D.M. Costa, o meu orientador, agradeço toda a disponibilidade e empenho que foram uma constante, ao longo destes meses de trabalho, bem como o conhecimento que me transmitiu.

Ao professor Altino J.R. agradeço o apoio dado na área da Soldadura, que através da sua experiência permitiu proporcionar bons resultados.

Ao Carlos, ao Filipe e ao Ivan do grupo de tecnologia, pela disposição que apresentaram ao me ensinarem diversos procedimentos experimentais.

Agradeço à minha família e especialmente aos meus pais pelo seu esforço e apoio ao longo deste percurso.

Por último agradeço à Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT) e ao FEDER (Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional) pelo apoio financeiro (Projecto PTDC/EME-PME/114605/2009; COMPETE: FCOMP-01-0124-FEDER-015171).



Resumo

Hoje em dia, mais do que nunca a evolução tecnológica e de processos tornaram-se essenciais para o desenvolvimento e capacidade de resposta da indústria, tanto ao nível da qualidade como dos tempos de execução. Portanto, sempre que existam processos susceptíveis de melhoramento, devem ser estudados e desenvolvidos.

Neste âmbito surge o estudo de uma técnica recente, FSP, que se baseia no princípio da técnica de FSW. A FSW é uma técnica que permite a ligação de materiais no estado sólido através do calor gerado pela pressão e rotação de uma ferramenta. Por seu lado, a FSP aproveita este princípio e aplica-o com o objectivo não de ligar materiais mas sim com o de melhorar as suas propriedades. Neste trabalho vai ser estudada a eventual melhoria de resistência de juntas soldadas por MIG na liga de alumínio AA6082-T651 aplicando o pós-processamento por FSP.

Com o objectivo de estudar as alterações provocadas pelo uso do pós-processamento serão realizadas análises metalográficas, perfis de durezas, ensaios de tracção e ensaios de fadiga a provetes obtidos em quatro condições diferentes: soldadura MIG com reforço, soldadura MIG sem reforço, soldadura MIG pós-processada sem reforço e soldadura MIG pós-processada com reforço.

Para completar esta análise observou-se a superfície de fractura dos provetes de fadiga através de microscopia óptica.

Concluiu-se que o pós-processamento por FSP trouxe melhorias na resistência à fadiga comparativamente à soldadura MIG, sobretudo pela alteração de microestrutura e da eventual redução de tensões residuais existentes no material.

Palavras-chave: Soldadura MIG, soldadura FSW, FSP, alumínio 6082-T651

Abstract

Nowadays, more than ever the technological evolution and processes became essential for the development and capacity of industry response, both in terms of quality and runtimes. Hence, every time processes are susceptible of improvement they should be studied and developed.

In this context, the study of a new technique, FSP, arises, based on the principle of FSW technique. FSW is a technique that allows the connection of materials on solid state through the heat generated by the pressure and rotation of the tool. Thus, the FSP uses this principle and applies it, not with the objective of connecting all materials but, with the objective of improving their own properties. This thesis will cover the possibility of improvement of the welded joints resistance by MIG in aluminium alloy AA 6082-T651 and post-processed by FSP.

Considering the goal of study the changes caused by the use of post-processing, will be made metallographic analysis, hardness profiles, tensile tests and fatigue tests on specimens obtained in four different conditions: MIG-reinforced, unreinforced MIG, MIG post-processed without reinforcement and MIG welding with post-processed with reinforcement.

To complete this analysis the fracture surface of fatigue specimens was observed using optical microscopy.

As a conclusion, the post-processing by FSP brought improvements in fatigue resistance relatively to MIG welding, mostly by changing the microstructure and the eventual reduction of residual stresses presented in the material.

Keywords: MIG welding, FSW, FSP, aluminium alloy AA 6082-T651.

Índice

Índice de figuras	vi
Índice de tabelas	ix
1. Introdução.....	1
1.1 Introdução e objectivos.....	1
1.2 Estrutura.....	2
2. Estado da arte dos temas do trabalho	4
2.1 Introdução	4
2.1.1 Ligas de alumínio e suas propriedades.....	4
2.1.2 Defeitos de soldadura	6
2.2.1 Processo de soldadura MIG	7
2.3.1 Processo de FSW.....	9
2.3.2 Processo de FSP	11
2.4 Fadiga dos metais e de juntas soldadas	12
2.5 Resistência à fadiga de juntas soldadas em ligas de alumínio	14
3. Equipamento e procedimentos experimentais	20
3.1 Introdução	20
3.2 Optimização da soldadura MIG	20
3.3 Obtenção das chapas pós-processadas por FSP	26
3.4 Preparação e dimensões dos provetes para os ensaios de tracção e de fadiga.....	28
3.5 Ensaio de Tracção	29
3.6 Ensaio de Fadiga	30
4. Apresentação e discussão de resultados	32
4.1 Ângulo médio do cordão de soldadura e raio de curvatura	32
4.2 Microestrutura das amostras	34
4.3 Microdurezas	37
4.3 Ensaio de tracção	45
4.4 Resistência à Fadiga	48
4.5 Análise da fractura dos ensaios	54
5. Conclusões.....	58
6. Referências bibliográficas	60
7. Anexos.....	62
7.1 Procedimento para obtenção das soldaduras MIG.....	62
7.2 Procedimento para pós-processar as soldaduras MIG.....	62
7.3 Procedimento para realização da análise metalográfica	63

7.4 Procedimento para o ensaio de tracção	64
7.5 Procedimento e técnica para realização do ensaio de microdurezas.....	65
7.6 Procedimento para o ensaio de fadiga.....	67
7.7 Desenho técnico da ferramenta de FSP para MIG com reforço	68
7.8 Desenho técnico da ferramenta de FSP para MIG sem reforço.....	69
7.9 Representação do ângulo e raio de curvatura	69
7.9 Imagens da zona de fractura nos ensaios de tracção	70
7.10 Resultados do ensaio de fadiga	70
7.11 Vida à fadiga da série MIG pós-processada e sem reforço	71
7.12 Posicionador para CNC	72

Índice de figuras

Figura 1. Fractura de uma soldadura com fusão incompleta.....	6
Figura 2. Fractura de uma soldadura com excesso de porosidade.....	6
Figura 3. Radiografia mostrando fissuração	7
Figura 4. Radiografia mostrando falta de penetração	7
Figura 5. Processo de Soldadura MIG	8
Figura 6. Representação do processo de soldadura por fricção linear	10
Figura 7. Zonas características da soldadura por fricção linear	11
Figura 8. Esquema Friction Stir Processing: a) Ferramenta rotativa sem estar em contacto com a placa; b) Pino da ferramenta entra em contacto com a placa, gerando calor; c) Shoulder faz o contacto; d) Placa move-se relativamente á ferramenta rotativa	12
Figura 9. Modo de rotura por fadiga numa junta soldada topo a topo.....	13
Figura 10. Distribuição de tensões numa soldadura topo a topo transversal solicitada à tracção	13
Figura 11. Influência do ângulo de tangencia (θ) na resistência à vida de uma junta topo a topo [9]	14
Figura 12. Perfil de durezas numa liga de alumínio 6082. Representação do perfil obtido para FSW e para MIG [10].....	15
Figura 13. Curva vida à fadiga para MIG,TIG e FSW numa liga de alumínio 6082 [10]	16
Figura 14. Perfil de durezas FSW [15]	16
Figura 15. Curva S-N de vários autores representando as técnicas de FSW,MIG com reforço e MIG sem reforço para uma liga de alumínio 6082	17
Figura 16. Macrografia da soldadura da liga de alumínio 6082 de P.M.G.P. Moreira <i>et al</i> [17] representando desalinhamento	18
Figura 17. Microestrutura da soldadura da liga de alumínio 6082 de P.M.G.P. Moreira <i>et al</i> [17], representando elevada porosidade	18
Figura 18. Perfil de durezas ref.[11]	18
Figura 19. Representação da preparação de junta	21
Figura 20. Macrografia da Soldadura 1 MIG	22
Figura 21. Macrografia da Soldadura 2 MIG	22
Figura 22. Macrografia da Soldadura 3 MIG	23
Figura 23. Macrografia da Soldadura 4 MIG	23

Figura 24. Macrografia da Soldadura 5 MIG	24
Figura 25. Microestrutura da Zona Fundida da Soldadura 5 com ampliação 50x	24
Figura 26. Macrografia da Soldadura 7 MIG	25
Figura 27. Macrografia da Soldadura 6 MIG	25
Figura 28. Macrografia da Soldadura 8 MIG	26
Figura 29. Macrografia da Soldadura 9 MIG	26
Figura 30. Macrografia da Soldadura 10 MIG	26
Figura 31. Representação tridimensional da ferramenta de FSP da série MIG pós-processada com reforço.....	27
Figura 32. Representação tridimensional da ferramenta de FSP da série MIG pós-processada sem reforço	27
Figura 33. Perfil MIG com reforço e pós-processado.....	27
Figura 34. Representação esquemática em vista de topo do pós-processamento da série MIG pós-processada sem reforço	28
Figura 35. Representação esquemática em vista de topo do pós-processamento da série MIG pós-processada com reforço.....	28
Figura 36. Fresadora, marca Cincinnati	28
Figura 37. Dimensões dos provetes	29
Figura 38. Máquina de Ensaio Tracção, marca Instron	30
Figura 39. Máquina ensaio de fadiga, marca Instron.....	31
Figura 40. Distribuição dos ângulos de soldadura MIG com reforço.....	33
Figura 41. Distribuição de frequências do raio de curvatura da soldadura MIG com reforço	33
Figura 42. Distribuição de frequências do raio de curvatura da soldadura MIG pós-processada com reforço.....	34
Figura 43. Análise metalográfica da soldadura MIG.....	34
Figura 44. Elevada porosidade na zona fundida de uma soldadura MIG	35
Figura 45. Falta de fusão entre a zona fundida e o material de base numa soldadura MIG	35
Figura 46. Análise metalográfica da soldadura MIG sem reforço e pós-processada em cada pé do cordão	36
Figura 47. Perfil de durezas da soldadura MIG.....	37
Figura 48. Perfil de durezas da soldadura MIG ao longo da espessura do material.....	38
Figura 49. Perfil de durezas de uma soldadura MIG sem reforço e pós-processada segundo o pé do cordão.....	39
Figura 50. Perfil de durezas de uma soldadura MIG (início da chapa) com reforço e pós-processada segundo o pé do cordão	41

Figura 51. Perfil de durezas de uma soldadura MIG (fim da chapa) com reforço e pós-processada segundo o pé do cordão	41
Figura 52. Comparação de perfis de durezas das técnicas MIG, MIG+FSP+CR, MIG+FSP+SR e híbrido MIG/Laser[11]	43
Figura 53. Comparação de perfis de dureza das técnicas MIG+FSP+CR, MIG+FSP+SR, FSW[11], FSP+SR[11] e FSW[15]	44
Figura 54. Gráfico σ/ϵ das técnicas de MIG com reforço. MIG sem reforço, MIG pós-processado sem reforço e MIG pós-processado com reforço.....	46
Figura 55. Vida à fadiga dos ensaios realizados (MIG com reforço, MIG sem reforço, MIG+FSP sem reforço, MIG+FSP com reforço, MIG_CR+FSP* e MIG_CR+FSP**)	48
Figura 56. Comparação de diferentes soldaduras MIG com e sem reforço na vida à fadiga.....	52
Figura 57. Comparação de diferentes soldaduras por FSW e MIG pós-processadas com e sem reforço na vida à fadiga	53
Figura 58. Superfície de fractura do ensaio de tracção da série MIG_SR+FSP (com defeito)	56
Figura 59. Superfície de fractura do ensaio de tracção da série MIG_SR+FSP (sem defeito)	56
Figura 60. Zona de iniciação à fadiga por defeitos à superfície (MIG_SR)	57
Figura 61. Zona de iniciação à fadiga pelo efeito de concentração de tensões do reforço (MIG_CR)	57
Figura 62. Zona de iniciação à fadiga por defeitos à superfície (MIG_CR+FSP)	57
Figura 63. Fotografia do microscópio óptico, modelo axiotech 100HD marca Carl Zeiss	64
Figura 64. Esquema ensaio de Vickers[14].....	66
Figura 65. Máquina de medição de microdurezas, marca Shimadzu	67
Figura 66. Desenho técnico da ferramenta de FSP para MIG com reforço	68
Figura 67. Desenho técnico da ferramenta de FSP para MIG sem reforço.....	69
Figura 68. Representação do ângulo e raio de curvatura	69
Figura 69. Vida à fadiga da série MIG pós-processada sem reforço.....	72
Figura 70. Posicionador para junta soldada numa CNC	73

Índice de tabelas

Tabela 1. Classificação das ligas de alumínio forjadas (2)	5
Tabela 2. Valores de tensão (K. V. Mjali,2007).....	19
Tabela 3. Parâmetros da soldadura MIG.....	21
Tabela 4. Frequência dos ângulos de soldadura MIG com reforço	32
Tabela 5. Resultados dos diversos ensaios de tracção	46
Tabela 6. Comparação das várias zonas de fractura do pós-processamento sem reforço	55
Tabela 7. Zona de fractura nos ensaios de tracção	70
Tabela 8. Resultados do ensaio de fadiga	70

1. Introdução

1.1 Introdução e objectivos

Como se sabe, as soldaduras hoje estão presentes em numerosas aplicações, e representam cada vez mais um papel importante na ligação de elementos. Estas estão presentes em áreas como, a indústria automóvel, aeronáutica, metalomecânica, entre outras. Por este facto, se torna cada vez mais importante que a soldadura constitua um processo de ligação que transmita confiança, nas condições de uso a que são submetidas. No entanto, existem outros factores importantes, como é o caso da substituição de ligações mecânicas por ligações soldadas. Um exemplo muito prático disto são os rebites, que antigamente eram o modo mais utilizado de unir estruturas metálicas, por exemplo em treliças de pontes e que agora foram substituídos por soldaduras. Felizmente a soldadura veio revolucionar as ligações e portanto surge como um processo que é de todo o interesse que possa ser aperfeiçoado. Pode-se perguntar como aperfeiçoar este processo e o porquê. O porquê é facilmente respondido porque através de soldaduras pode-se ligar diferentes materiais com facilidade o que é uma resposta importante às exigências da indústria. A título de exemplo pode citar-se a indústria aeronáutica, uma indústria em que o peso tem factor determinante, e em que a soldadura surge como resposta a isso mesmo.

Em relação ao aperfeiçoar este processo, nos casos onde esta utilize uma fonte de calor, pode-se aperfeiçoar ao nível da microestrutura da soldadura, visto que devido ao calor produzido na soldadura as microestruturas são alteradas para pior e portanto é uma área onde pode haver um melhoramento. Como resposta a isto surgiu em 1991, uma técnica relativamente recente denominada por Friction Stir Welding (FSW) patenteada e inventada pelo The Welding Institute(TWI), Cambridge, Inglaterra.

Esta técnica apresenta-se como uma ligação no estado sólido onde a fonte de energia utilizada para gerar o calor necessário ao desenvolvimento do processo é a fricção entre as peças a unir e uma ferramenta rotativa, que se desloca ao longo da soldadura. A energia calorífica resultante da fricção provoca um amaciamento dos materiais a ligar, que por sua vez sofrem deformação plástica intensa sob a acção de uma ferramenta rotativa. Através da ferramenta rotativa promove-se o escoamento dos

materiais e conseqüentemente a sua mistura no estado sólido, originando-se a soldadura no estado sólido.

No seguimento da FSW, surge a Friction Stir Processing (FSP), que resulta no facto de se usar a fricção linear como processo para melhoria da resistência dos materiais.

É neste contexto que surge o tema desta Tese de Mestrado com o objectivo de estudar as possíveis melhorias em juntas topo a topo soldadas por MIG aplicando a técnica FSP. Portanto os objectivos deste trabalho são:

- Estudar as alterações da microestrutura em termos de eliminação de defeitos, porosidades, em juntas previamente soldadas por MIG e pós-processadas pelo processo de fricção linear, segundo o pé do cordão, em soldaduras com e sem reforço.
- Obter e comparar os perfis de dureza em juntas obtidas por soldadura MIG e em juntas sujeitas ao pós-processamento por fricção linear em juntas com e sem reforço.
- Estudar a influência do pós-processamento por fricção linear, aplicado a juntas obtidas por soldadura MIG, relativamente à resistência à tracção, em soldaduras com e sem reforço.
- Estudar a influência do pós-processamento por fricção linear, aplicado a juntas obtidas por soldadura MIG, relativamente à resistência à fadiga, em soldaduras com e sem reforço.

1.2 Estrutura

O capítulo 2 inicia-se com uma abordagem aos vários temas tratados no trabalho, para facilitar a sua compreensão. Este começa por abordar as ligas de alumínio na sua globalidade e problemas habituais que surgem devido à soldadura por fusão. De seguida apresentam-se as técnicas de soldadura MIG, Fricção linear e a técnica de pós-processamento que é uma derivação da soldadura por fricção linear. Caracterizadas as diferentes técnicas passa-se a abordar a vida à fadiga dos metais e das juntas soldadas. Por fim apresenta-se uma revisão de resultados para as técnicas acima descritas a que diversos autores chegaram, para microdurezas e vida à fadiga do alumínio 6082.

No *capítulo 3*, abordam-se os equipamentos e procedimentos utilizados, dando-se maior destaque à optimização da soldadura MIG, visto que absorveu uma parte importante do tempo utilizado neste trabalho.

No *capítulo 4*, analisam-se os diversos resultados obtidos e comparam-se com os de outros autores. Estes abordam, geometria do reforço da soldadura MIG, microestruturas da soldadura MIG e pós-processamento, microdurezas, resultados do ensaio de tracção, resultados do ensaio de fadiga e análise da fractura dos provetes ensaiados.

Para o *capítulo 5*, são apresentadas as principais conclusões retiradas do trabalho.

2. Estado da arte dos temas do trabalho

2.1 Introdução

Neste trabalho são realizadas ligações por soldadura MIG de placas de alumínio AA6082-T651 com 6 mm de espessura. Posteriormente estas placas serão pós-processadas segundo o pé do cordão da soldadura através da técnica FSP que é derivada da técnica FSW.

Características como a resistência à fadiga e resistência à tração serão estudadas e discutidas neste trabalho. Para tornar o enquadramento do leitor mais fácil dentro do trabalho vai apresentar-se cada um dos seguintes temas mais detalhadamente:

- Soldadura em ligas de alumínio e defeitos característicos da zona fundida;
- Processo de soldadura MIG;
- Processo de FSW;
- Processo de FSP;
- Resistência à Fadiga de juntas soldadas;
- Resultados obtidos em trabalhos realizados por vários autores;

2.1.1 Ligas de alumínio e suas propriedades

O alumínio é um metal leve e resistente. Apresenta um aspecto cinza prateado, devido à alumina (Al_2O_3) que se forma quando está em contacto com o ar. É largamente usado em várias aplicações e o que faz dele ser tão usado é o facto das ligas de alumínio terem um baixo peso (um terço do peso do aço) e serem relativamente resistentes o que faz com que sejam largamente utilizados em automóveis de passageiros, camiões e em aviões.

Neste trabalho a liga de alumínio utilizada é a AA6082-T651.

Para se entender melhor o alumínio, deve-se primeiro compreender alguns dos princípios sobre a sua metalurgia. O alumínio pode ser ligado com um número de elementos diferentes, para obter uma melhor resistência, uma melhor resistência à corrosão e geralmente uma melhor soldabilidade. Os principais elementos que se ligam com o alumínio são o cobre, o silício, o manganês, o magnésio e o zinco.

De realçar que as ligas de alumínio se dividem em duas classes: as tratáveis e não tratáveis termicamente.

Na tabela 1 apresenta-se as diversas ligas de alumínio forjadas que existem.

Tabela 1. Classificação das ligas de alumínio forjadas (2)

Série	Elementos de liga principais	Tratáveis termicamente
1xxx	Alumínio puro (mínimo 99%)	Não
2xxx	Cobre (por vezes com magnésio)	Sim
3xxx	Manganês (por vezes com magnésio)	Não
4xxx	Silício	Não
5xxx	Magnésio	Não
6xxx	Magnésio e Silício	Sim
7xxx	Zinco (por vezes com magnésio e cobre)	Sim
8xxx	Todas as outras	Normalmente sim

No caso da liga utilizada neste trabalho, liga da série 6xxx (tratáveis termicamente), estas têm o magnésio e o silício como elementos principais de liga, nomeadamente com percentagem até 1%.

Pode dizer-se que esta é uma liga de média resistência, das séries tratáveis termicamente, e que é muito utilizada na indústria automóvel, e é sobretudo muito utilizada para aplicações soldadas. Nestas ligas obtém-se a máxima resistência em resultado de tratamentos precisos, os quais favorecem fenómenos de precipitação que endurecem as mesmas. O tratamento a que são sujeitas consiste, num aquecimento até à temperatura de 400 – 500 °C durante 1-2 horas, seguido de têmpera até à temperatura ambiente, seguida dum tratamento de precipitação cuja duração pode ir desde algumas horas até alguns dias com temperaturas na ordem dos 150 – 180 °C.

Em soldaduras por fusão, parte do tratamento térmico é anulado à custa da redistribuição de precipitados na ZAC, o que provoca uma diminuição da resistência mecânica nessa zona. Esta redução ocorre só numa zona muito estreita próxima da junta. No caso das ligas 6xxx o posterior envelhecimento natural ou artificial não resulta e portanto, só com tratamentos a alta temperatura seria possível restabelecer as propriedades da ZAC [1].

Esta é uma liga propensa a fissurar a quente. Este problema resolve-se considerando uma junta correcta e um material de adição também correcto (elevado teor em silício para evitar a fissuração a quente).

Nas ligas tratáveis termicamente, a zona da soldadura terá uma dureza menor que o material de base. Contudo, as propriedades da zona soldada são fortemente dependentes da dureza do material antes de ser soldado e também dos tratamentos térmicos realizados depois da soldadura.

2.1.2 Defeitos de soldadura

Alguns defeitos de soldadura podem ser pequenos o suficiente para não afectar realmente as propriedades mecânicas da junta soldada. No entanto, existem outros defeitos que podem reduzir muito a vida à fadiga, por isso nesta secção apresentar-se-ão alguns dos defeitos mais comuns.

Tipicamente os defeitos mais comuns são, [2]:

- Fusão incompleta – Intervalos de juntas não preenchidos na totalidade, normalmente devido há existência de óxidos densos, limpeza insuficiente e existência de um talão insuficiente.

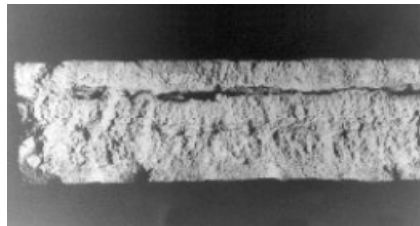


Figura 1. Fractura de uma soldadura com fusão incompleta

-Porosidade – Causada por bolhas de gás de hidrogénio que ficam retidas na soldadura quando esta arrefece. A fonte de hidrogénio é variada, podendo ser devida a óleos, gorduras, etc.

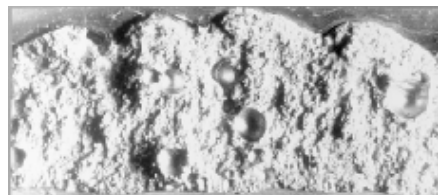


Figura 2. Fractura de uma soldadura com excesso de porosidade

-Fissuração – Interior ou exterior da peça, provocadas pela contracção na solidificação e essencialmente pela composição química da liga.

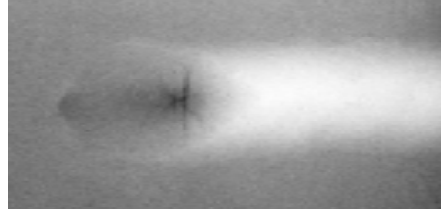


Figura 3. Radiografia mostrando fissuração

-Falta de Penetração – Penetração insuficiente em profundidade na soldadura e pode dever-se a uma corrente de soldadura insuficiente, ou uma velocidade de soldadura elevada.

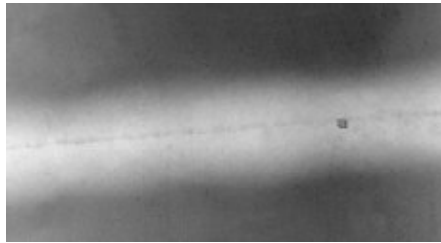


Figura 4. Radiografia mostrando falta de penetração

2.2.1 Processo de soldadura MIG

A soldadura MIG, é um processo de soldadura por arco eléctrico no qual se utiliza um fio eléctrodo consumível de alimentação contínua, na ponta do qual se estabelece o arco eléctrico e uma protecção gasosa. O eléctrodo, o arco, a zona fundida e a peça a soldar são protegidos da contaminação atmosférica por um fluxo de gás inerte que passa através da tocha de soldadura. Este processo permite a obtenção de elevada densidade de corrente dado o pequeno diâmetro do fio eléctrodo consumível, o que também ocasiona uma elevada taxa de fusão do fio. A representação do processo é mostrada na figura 5 [3].

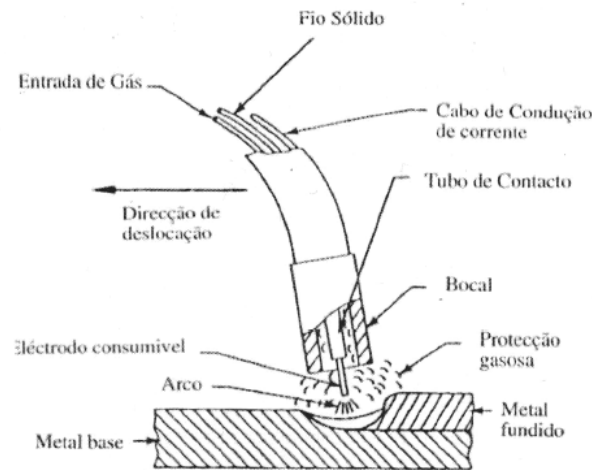


Figura 5. Processo de Soldadura MIG

Este processo possui a vantagem de ter um comprimento do arco eléctrico constante garantido pelo mecanismo de auto-regulação, pois o arco é alimentado por um fio a uma velocidade constante.

Através deste processo de soldadura consegue-se soldar uma vasta gama de materiais como são o exemplo do aço carbono, aço de alta resistência, aço inoxidável, alumínio, cobre, titânio, níquel e suas ligas.

As variáveis que influenciam a qualidade do cordão da soldadura são:

- Intensidade de corrente
- Tensão do arco (comprimento do arco)
- Velocidade de soldadura
- Extensão do eléctrodo
- Posição da tocha
- Diâmetro do eléctrodo
- Tipo de gás de protecção

Analizado que está, de forma breve, o processo MIG, passa-se a especificar as consequências ou as implicações do processo a nível da resistência mecânica do material soldado.

Devido à fusão de material, inerente a esta técnica, dá-se um grande amaciamento do material na zona fundida. A alteração da microestrutura é função dos ciclos térmicos a que o material está sujeito durante a soldadura. O amaciamento da

zona fundida e da zona termicamente afectada desempenha um papel importante na resistência mecânica, pois normalmente a rotura do material ocorre na zona menos dura.

Na secção [2.5], apresentam-se e comparam-se vários perfis de durezas de vários autores, que servirão de aprofundamento sobre esta matéria.

O tamanho da zona afectada pelo calor e portanto, da zona que sofreu uma diminuição de dureza é função de muitos parâmetros. Os mais importantes são a espessura do material, a quantidade de calor transferida para dentro do material e o número de passagens.

Embora o comportamento da vida à fadiga das soldaduras seja negativamente afectado pelo amaciamento do material, esta é mais afectada por defeitos de soldadura e pela geometria da junta [4].

2.3.1 Processo de FSW

O processo de Friction Stir Welding é recente, aliás foi criado em 1991 e consiste num processo de soldadura no estado sólido, em que basicamente uma ferramenta cilíndrica, penetra na área da junta a soldar através de um pino roscado na base que através de um movimento de rotação possibilita a sua penetração. Devido ao calor produzido pelo atrito entre a ferramenta de soldadura (com elevada resistência ao desgaste) e as peças a soldar provoca-se o amolecimento desse material. Como o pino se desloca para a frente, em consequência da rotação, o material amolecido desloca-se para trás e mistura-se. Devido á geometria da ferramenta e à pressão exercida por esta, forma-se a junta soldada, sem, contudo, se atingir a temperatura de fusão.

Como é um processo com ausência de arco eléctrico, não se formam fumos ou salpicos [5].

Na figura 6, mostra-se esquematicamente o processo.

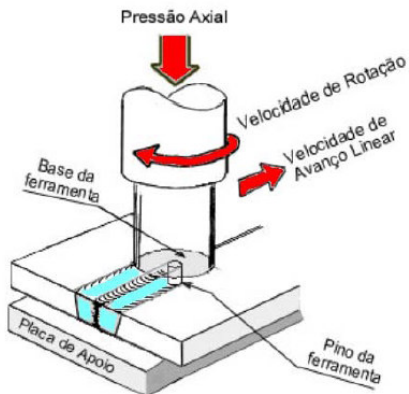


Figura 6. Representação do processo de soldadura por fricção linear

Esta técnica de soldadura tem uma vantagem relativamente a algumas técnicas de soldadura por fusão, pois numa soldadura por fusão normalmente existe uma maior quantidade de parâmetros a controlar como por exemplo, o gás de protecção, tensão, corrente, alimentação do fio, velocidade de soldadura e abertura do arco, enquanto na FSW, os parâmetros a controlar apenas são 3 e são estes, velocidade de avanço, velocidade de rotação e pressão aplicada. Pode considerar-se um quarto como sendo o ângulo de ataque [6].

Em termos gerais, pode afirmar-se que o parâmetro de velocidade de rotação e velocidade de avanço são parâmetros que influenciam a temperatura da soldadura e que quanto maior a velocidade de rotação ou menor a velocidade de avanço, maior será o aumento de temperatura na soldadura [7].

Acerca do parâmetro de pressão aplicada na ferramenta de fricção linear, pode dizer-se que este é muito importante pois se não for suficiente a soldadura apresentará defeitos.

Tipicamente a microestrutura de uma soldadura por fricção linear apresenta 4 regiões:

- Nugget, zona D
- ZTAM (zona termo-mecanicamente afectada), Zona C
- ZAC (zona afectada pelo calor), Zona B
- MB (material de base), Zona A

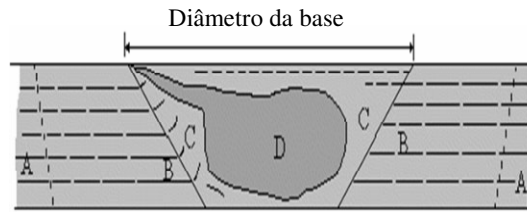


Figura 7. Zonas características da soldadura por fricção linear

Este processo tem como vantagens:

- Conservar aproximadamente as propriedades do material de base, especialmente resistência e ductilidade.
- Soldar materiais diferentes que não podem ser ou que são difíceis de soldar com os outros processos.
- Qualidade de soldadura excelente (sem porosidade).
- Evita defeitos causados por reacções metalúrgicas porque não existe fusão de material.
- Baixas tensões residuais.

Como em todos os processos também este tem as suas desvantagens, enumerando-se de seguida algumas delas.

- Formação de um buraco no final da solda, que necessita de ser preenchido através de outros métodos de soldadura.
- Menos flexível que os processos de soldadura por arco, sobretudo porque tem dificuldade em lidar com variações de espessura e com perfis não lineares.
- Elementos de fixação das juntas a soldar.

2.3.2 Processo de FSP

A técnica de Friction Stir Processing, ou pós-processamento é uma tecnologia, emergente da engenharia de superfície, que pode localmente eliminar defeitos de fusão e refinar microestruturas, melhorando assim a resistência e ductilidade dos materiais [8].

Esta aumenta a resistência à fadiga, melhorando também outras propriedades. O pós-processamento também pode produzir microestruturas de grão fino para dar superplasticidade.

A tecnologia é semelhante à técnica de FSW, técnica que lhe deu origem. A diferença essencial entre ambas reside no facto de a FSW servir para soldar componentes

e a FSP servir para melhorar as microestruturas locais. Por este facto, introduziu-se a técnica de FSW antes da FSP para melhor se compreender o porquê da sua utilização. As gamas de espessuras a que esta técnica pode ir vai de 0,5 a 50 milímetros, com uma transição gradual de uma microestrutura de grão fino [8].

Na figura 8 apresenta-se esquematicamente a técnica FSP,

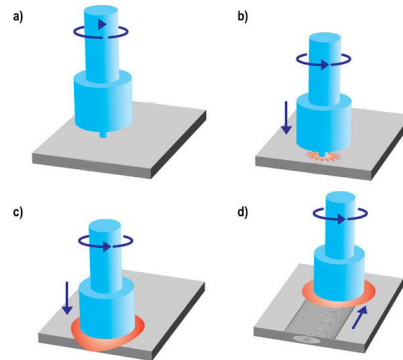


Figura 8. Esquema Friction Stir Processing: a) Ferramenta rotativa sem estar em contacto com a placa; b) Pino da ferramenta entra em contacto com a placa, gerando calor; c) Shoulder faz o contacto; d) Placa move-se relativamente á ferramenta rotativa

2.4 Fadiga dos metais e de juntas soldadas

A fadiga de um material define-se como um fenómeno de rotura progressiva desse material quando sujeito a ciclos repetidos de tensão ou deformação. Portanto, devido ao uso dos materiais, determinar o modo de ruína por fadiga torna-se essencial.

Tipicamente, o comportamento à fadiga de juntas soldadas pode depender de vários parâmetros, sendo os de maior importância:

- Geometria da junta (topo a topo, canto, etc);
- Distribuição de tensões;
- Material e estado metalúrgico;
- Nível de tensões de ciclo;
- Tensão média do ciclo de tensões;
- Espectro de cargas ou de tensões;
- Meio ambiente;
- Tensões residuais;
- Defeitos de soldadura;

Em juntas topo a topo transversais, onde a solicitação a que é sujeita, é perpendicular ao cordão de soldadura, verifica-se que a fenda de fadiga se inicia no pé do cordão da soldadura e propaga-se na direcção da espessura da peça, figura 9.

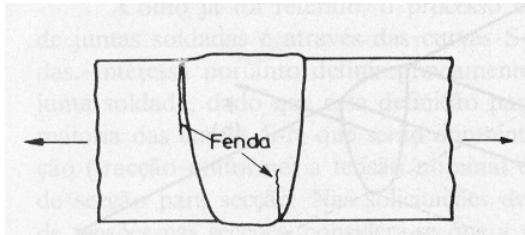


Figura 9. Modo de rotura por fadiga numa junta soldada topo a topo

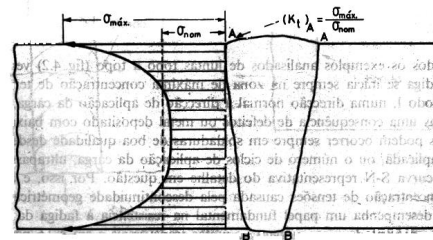


Figura 10. Distribuição de tensões numa soldadura topo a topo transversal solicitada à tracção

Analisando a figura 9 e 10, observa-se, que a fenda se inicia na zona de máximas concentração de tensões e que se propaga numa direcção normal à direcção de aplicação da carga.

Através das figuras anteriores verifica-se, que a máxima concentração de tensões ocorre no pé e na raiz do cordão.

Para melhor se perceber a influência do ângulo de tangencia (θ) que o reforço faz com o material, mostra-se o gráfico da figura 11, onde estão resultado de ensaios obtidos por vários investigadores. Segundo a referência [9], estes resultados foram obtidos por Gurney, por Garcia-Martinz, por Newman e por Wilson. Estes representam a resistência à fadiga para 2×10^6 ciclos em função do ângulo de tangencia θ . Pela análise dos resultados facilmente se conclui que o ângulo de tangencia é um dos parâmetros geométricos mais importantes da resistência à fadiga da junta. De notar que $\theta = 180^\circ$ corresponde a uma soldadura sem reforço e que a vida à fadiga aumenta com o aumento do ângulo θ [9]. Esta conclusão é confirmada pelos resultados obtidos por Kobayashi, que serão apresentados na secção seguinte.

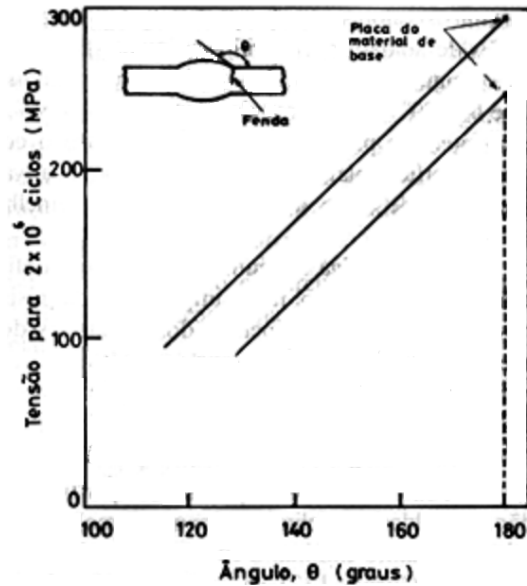


Figura 11. Influência do ângulo de tangência (θ) na resistência à vida de uma junta topo a topo [9]

2.5 Resistência à fadiga de juntas soldadas em ligas de alumínio

Através de ensaios de dureza consegue traçar-se um perfil de durezas de determinado material, ou seja, como o material se encontra em determinada zona.

Sabendo que o material possui uma determinada dureza e que esta está intimamente ligada com a sua resistência mecânica, pode, portanto caracterizar-se o material e assim ter uma noção de como ele se comportará quando sujeito a esforços. Posto isto é importante apresentar gráficos de dureza obtidos por vários autores e consequentemente, ter uma base de dados para comparar com os resultados que irão ser obtidos neste trabalho.

Como este trabalho consiste basicamente, na aplicação do pós-processamento (FSP) para melhoria da vida à fadiga, a pesquisa reflectiu-se sobretudo, na área da fricção linear e do pós-processamento.

Apresenta-se o estudo realizado por Mats Ericsson e Rolf Sandstrom[10], que consistiu na análise da influência da velocidade de soldadura, na fadiga de juntas soldadas por fricção linear em alumínio 6082, quando comparadas com MIG. A espessura das chapas é de 4 mm.

No gráfico da figura 12 mostra-se o perfil de durezas obtido.

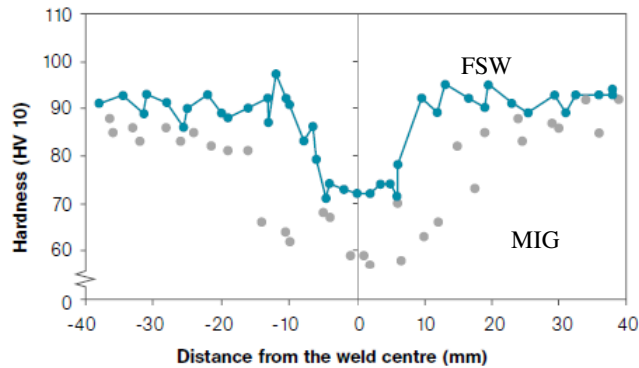


Figura 12. Perfil de durezas numa liga de alumínio 6082. Representação do perfil obtido para FSW e para MIG [10]

Segundo os autores, a dureza na zona fundida na soldadura MIG é menor que a dureza da fricção linear. Esta é próxima dos 60HV no centro da soldadura. A razão a que isto se deve tem a ver com as altas temperaturas envolvidas no processo de soldadura, a adição de material exterior e a uma estrutura menos favorável na zona fundida. Ainda segundo os autores, na zona fundida e na zona termicamente afectada, a alteração do perfil de durezas por fricção linear não é relevante, para velocidades de soldadura de 700 e 1400 mm/min.

Apresenta-se de seguida os resultados em termos de tensão de cedência e de ruptura a que estes autores também chegaram.

O material de base apresenta uma tensão de cedência de 291MPa e uma tensão rotura de 317MPa.

Pela comparação dos resultados de fricção linear para ambas as velocidades já acima referidas, curiosamente, os autores afirmam que chegam aos mesmos valores, ou seja, chegam a uma tensão de cedência de 150MPa e a uma tensão de rotura de 245MPa.

Em termos de resultados de MIG, a tensão de cedência e a tensão máxima são respectivamente, 147MPa e 221MPa.

Noutro trabalho realizado por estes autores estes obtiveram uma tensão de cedência de 132MPa e uma tensão de rotura de 221 MPa, considerando uma espessura 6 mm e uma velocidade de 350 mm/min.

O gráfico de vida à fadiga ($R=0,5$) afecto aos processos MIG, TIG e fricção linear obtidos por Mats Ericsson e Rolf Sandstrom[10] encontra-se na figura 13.

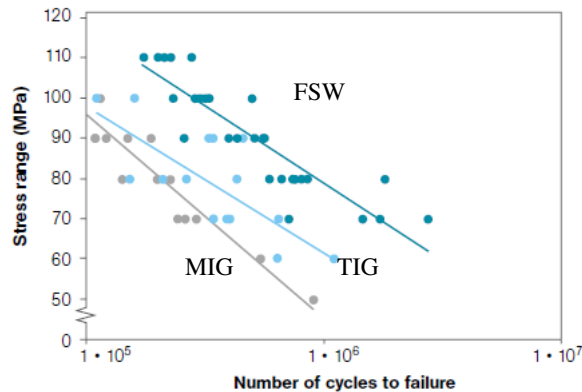


Figura 13. Curva vida à fadiga para MIG, TIG e FSW numa liga de alumínio 6082 [10]

Conforme era de esperar a recta superior corresponde à soldadura por fricção linear e a recta inferior à MIG. A recta intermédia é a soldadura TIG.

Em termos comparativos a variação de tensão para 500 mil ciclos é a seguinte:

- 60 MPa para MIG
- 70 MPa para TIG
- 90 MPa para Fricção Linear com velocidade de avanço de 700 e 1400 mm/min

(ligeiramente mais alta para 1400 mm/min).

Num trabalho recente realizado por J.D.Costa, J.A.M. Ferreira e L.P.Borrego na liga 6082 [15], o perfil de durezas obtido para fricção linear, com 300mm/min de velocidade de avanço da ferramenta e uma velocidade de rotação de 1500rpm encontra-se representado na figura 14.

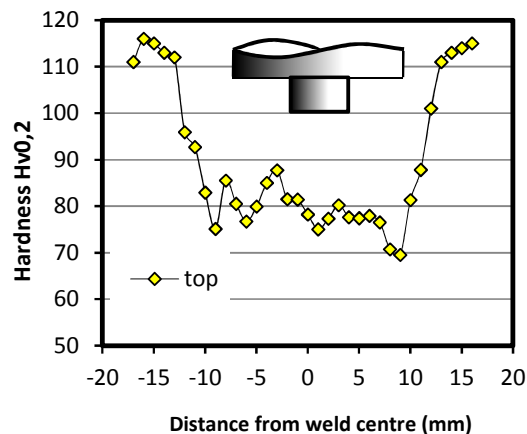


Figura 14. Perfil de durezas FSW [15]

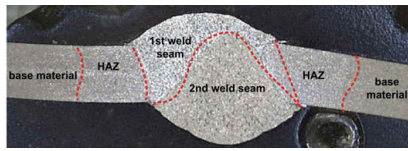


Figura 16. Macrografia da soldadura da liga de alumínio 6082 de P.M.G.P. Moreira *et al* [17] representando desalinhamento

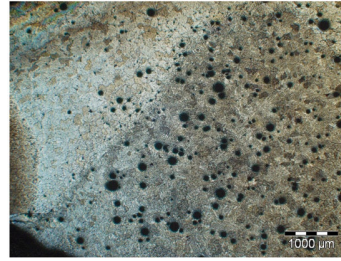


Figura 17. Microestrutura da soldadura da liga de alumínio 6082 de P.M.G.P. Moreira *et al* [17], representando elevada porosidade

Por último serão apresentados os resultados de K. V. Mjali [11], que é um trabalho recente que tem relativas proximidades ao trabalho apresentado nesta tese e portanto constitui uma boa base de comparação.

Este consistiu em soldar chapas por dois processos, o híbrido MIG/Laser sem reforço e o FSW. Os provetes soldados por MIG/Laser, eram depois pós-processados fazendo passar a ferramenta de fricção linear com o pino a meio da soldadura.

Na figura 18 apresenta-se o perfil de durezas obtido por K. V. Mjali [11].

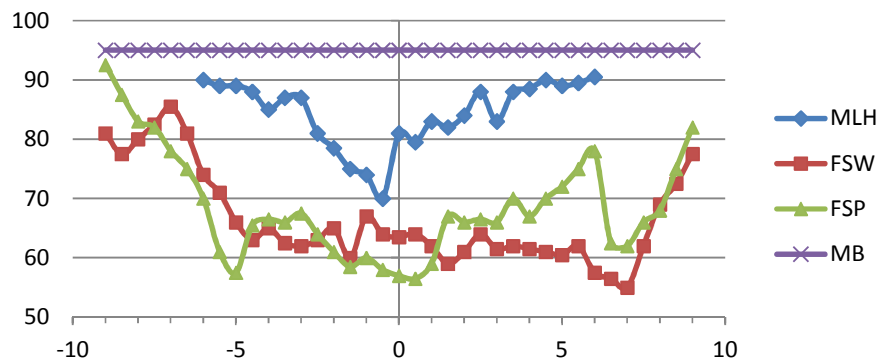


Figura 18. Perfil de durezas ref.[11]

Em termos de material de base o autor obteve uma tensão de cedência de 303 MPa e uma tensão máxima de 326 MPa. Na tabela 2, apresentam-se os diferentes valores de tensão de cedência e tensão máxima, a que o autor chegou, para as diferentes técnicas.

Tabela 2. Valores de tensão (K. V. Mjali,2007)

Processo	Tensão Cedência (MPa)	Tensão Rotura (MPa)
MIG/laser	146	245
MIG/Laser + FSP	147	219
FSW	148	228

De notar que o autor fez ensaios de fadiga para uma gama de tensões de 170 MPa e uma razão de tensões de 0,1. Os valores médios de vida a que chegou foram de 136731 ciclos para MIG/Laser, 243555 ciclos para pós-processamento e 175445 para FSW. Verificou-se assim que apesar de uma ligeira redução de dureza dos provetes FSP relativamente aos FSW, obteve-se um aumento na sua resistência à fadiga.

3. Equipamento e procedimentos experimentais

3.1 Introdução

A liga de alumínio utilizada neste trabalho foi a liga 6082-T651 com 6 mm de espessura. A sua composição química é constituída por: 0,8% Mg; 0,7 Mn, 1,0% Si e o restante alumínio. Pelo código T651 sabe-se que esta é uma liga tratada termicamente, sujeita a solubilização e a envelhecimento artificial. Relativamente às propriedades mecânicas esta tem uma tensão de cedência de 303 MPa, uma tensão de rotura de 326MPa e um alongamento à rotura de 0,141.

A liga encontrava-se em placas de 1000x80 mm que foram cortadas em placas de 333x80 mm para possibilitar a sua soldadura por MIG.

3.2 Optimização da soldadura MIG

Na soldadura MIG recorreu-se a uma máquina SAFMIG 480, a um carro de soldadura e a uma mesa para fixação das chapas de alumínio. O material adicionado na soldadura foi o fio AWS A5.10-80:ER 5356, com 5% magnésio e o débito de gás (Argon puro) utilizado foi de 27 l/min. A soldadura realizou-se perpendicularmente à orientação de laminagem do material.

Os valores da tensão e intensidade de corrente foram observados no voltímetro e amperímetro da máquina de soldadura. Por outro lado, a velocidade de soldadura foi observada no velocímetro do carro de soldadura.

Neste ponto abordam-se os resultados obtidos pela soldadura MIG, de forma a garantir soldaduras de boa qualidade.

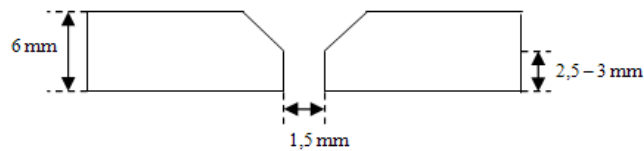
Como se irá observar de seguida, as soldaduras em alumínio apresentam vários problemas que estão bem evidentes nas imagens seguintes, obtidas na lupa.

Outro problema verificado foi a distorção das placas soldadas, ou por outras palavras, o empeno que algumas apresentaram. Isto deveu-se às elevadas temperaturas atingidas durante a soldadura.

Para facilitar a apresentação dos vários parâmetros de soldadura recorre-se à tabela 3.

Tabela 3. Parâmetros da soldadura MIG

Soldadura	I(A)	U(V)	Folga(mm)	Vel.Soldadura (cm/min)	Dist. tocha à peça(mm)	Preparação de junta	Argon na raiz
1	120	25	1	55	20	Não	Não
2	130	26,2	2	55	20	Não	Não
3	150	25,8	0	55	20	Não	Não
4	166	26,4	1,5	50	20	Sim	Não
5	168	26,4	1,5	50	17	Sim	Não
6	168	26,6	1,5	45	17	Sim	Não
7	166	26,6	1,5	45	17	Sim	Não
8	164	26,6	1,5	50	17	Sim	Sim
9	160	26,6	1,5	50	16	Sim	Sim
10	160	26,6	1,5	50	15	Sim	Sim

**Figura 19.** Representação da preparação de junta

Na primeira soldadura realizada observa-se que esta tem uma enorme falta de penetração e muita distorção, como se vê na figura 20.

Os parâmetros de soldadura utilizados foram: intensidade de corrente de 120 A, tensão de 25 V, 1mm de folga, velocidade de soldadura de 55 cm/min, distância da tocha à peça de 20 mm e sem preparação de junta.

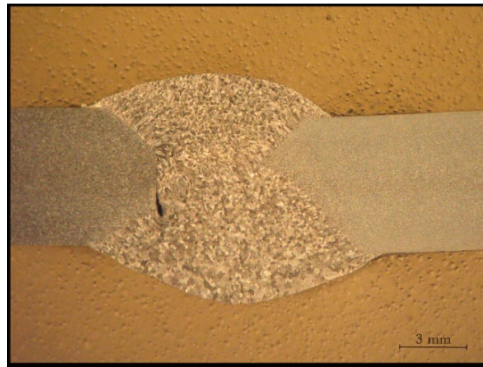


Figura 20. Macrografia da Soldadura 1 MIG

Obtida a primeira soldadura e verificando-se que esta apresentava uma grande falta de penetração aumentou-se a folga para 2 mm, de forma a tentar obter penetração suficiente. A tensão e a intensidade também foram aumentadas, sendo os respectivos valores de 26,2 V e 130 A.



Figura 21. Macrografia da Soldadura 2 MIG

Com o aumento da tensão, intensidade e folga obteve-se uma penetração total da soldadura que era a pretendida. Porém, nesta soldadura verificou-se a ocorrência de uma elevada porosidade, conforme figura 21.

Na soldadura número 3 apareceu novamente o problema da falta de penetração, como se vê na figura 22. Este foi causado pela ausência de folga. A intensidade e a tensão utilizadas foram de: 150 A e 25,8 V, respectivamente.

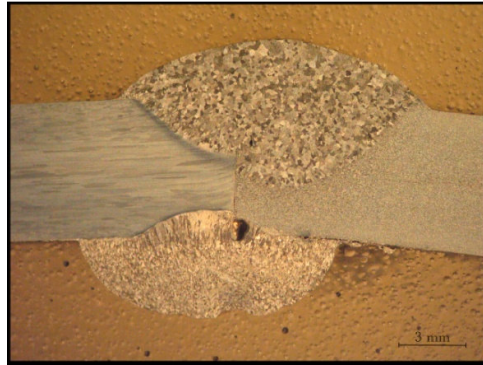


Figura 22. Macrografia da Soldadura 3 MIG

Pelos resultados das soldaduras 1, 2 e 3, concluiu-se que a folga ideal seria entre 1 e 2mm. Portanto na soldadura subsequente considerou-se uma folga de 1,5 mm, juntando-se também o cuidado de efectuar a preparação de junta, conforme figura 19. A intensidade utilizada foi de 166 A e a tensão 26,4 V.

Com a preparação de junta esperava-se uma melhor penetração, facto este que se verificou relativamente à soldadura anterior, como se vê na figura 23 mas que ainda não corresponde à qualidade pretendida.

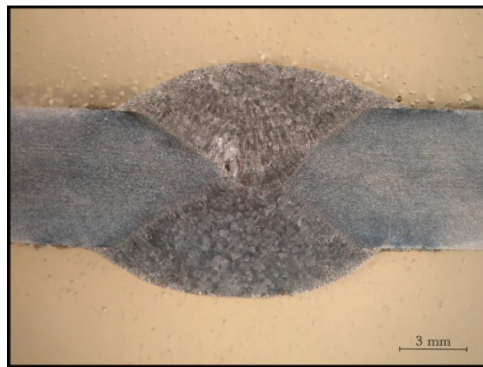


Figura 23. Macrografia da Soldadura 4 MIG

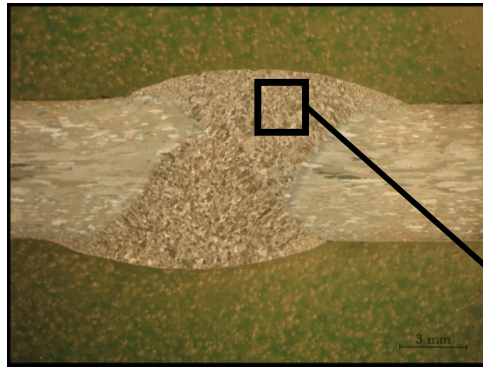


Figura 24. Macrografia da Soldadura 5 MIG

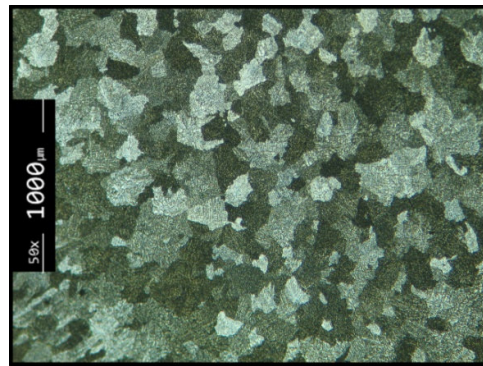


Figura 25. Microestrutura da Zona Fundida da Soldadura 5 com ampliação 50x

Em relação à soldadura 5, figura 24, o único parâmetro que se alterou foi o da distância da tocha à peça, em que nos casos anteriores era de 20 mm e que neste passou para 17 mm. O facto de se diminuir esta altura tem a vantagem do arco criado ter menor comprimento e largura e portanto aumentar a protecção da soldadura diminuindo a sua porosidade.

De forma a mostrar que esta é uma soldadura que não apresenta defeitos na zona da soldadura e que simultaneamente também apresenta pouca porosidade, mostra-se a figura 25, em que se ilustra a zona fundida, numa fotografia tirada no microscópio óptico usando uma ampliação de 50x.

Obtida que estava a primeira soldadura com a qualidade desejada, passou-se a soldar os perfis 6 e 7 representados nas figuras 26 e 27 respectivamente, com os parâmetros anteriores, sendo apenas optimizado o parâmetro da velocidade de soldadura que foi ligeiramente reduzido de 50 para 45 cm/min. O objectivo foi o da soldadura ser efectuada mais lentamente, o que consequentemente implica uma maior energia

específica adicionada, aumentando a temperatura e por conseguinte, permitiu obter uma menor porosidade, porque deu mais tempo para que o hidrogénio que estava dentro da soldadura pudesse libertar-se.

Contrariamente às expectativas, a soldadura 6 e 7 que foram soldadas com os parâmetros anteriores apresentavam elevada porosidade, tal como se verifica nas figuras 26 e 27.

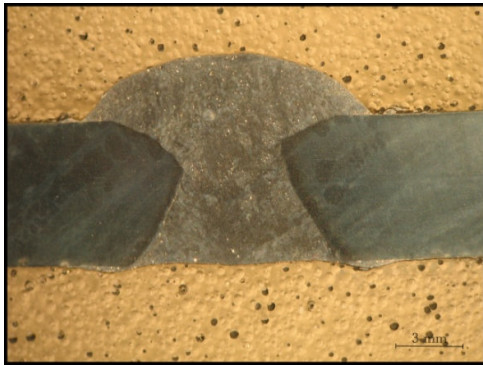


Figura 27. Macrografia da Soldadura 6 MIG

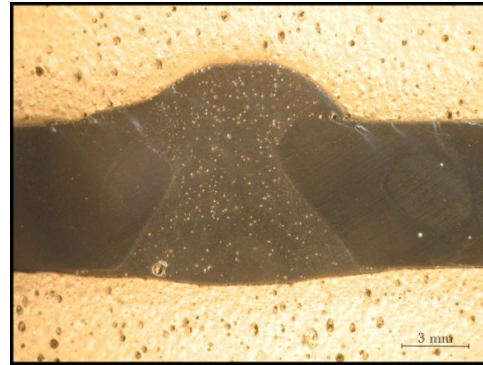


Figura 26. Macrografia da Soldadura 7 MIG

Com as duas últimas soldaduras voltou novamente a ocorrência de porosidade. Para tentar eliminar a porosidade eliminou-se ao máximo qualquer tipo de contaminação, através de uma limpeza com álcool das chapas e introduziu-se Argon na raiz.

As melhorias são evidentes nas soldaduras oito, nove e dez, onde se verifica que a porosidade é reduzida ou não existente. Os parâmetros utilizados na soldadura 8 são iguais aos anteriores, enquanto os das soldaduras 9 e 10 têm uma ligeira diminuição da intensidade que agora é de 160 A, contra os 164 A anteriores. Na soldadura 9 houve uma diminuição para 16 mm da distância da tocha à peça e na soldadura 10 houve uma diminuição para 15 mm.

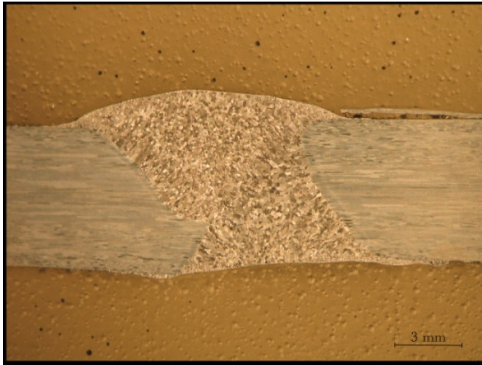


Figura 28. Macrografia da Soldadura 8 MIG

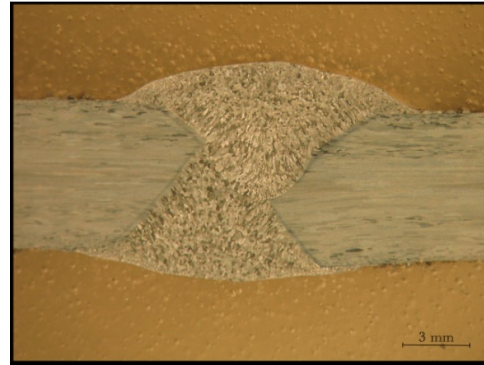


Figura 29. Macrografia da Soldadura 9 MIG

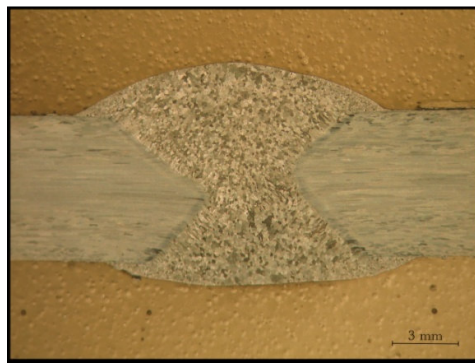


Figura 30. Macrografia da Soldadura 10 MIG

3.3 Obtenção das chapas pós-processadas por FSP

Neste ponto especificam-se os parâmetros utilizados no pós-processamento das juntas soldadas por MIG e a forma como o pós-processamento foi realizado.

Em termos de fresadora, figura 36, esta é uma fresadora universal da marca Cincinnati e permitia controlar a velocidade de rotação da ferramenta e a velocidade de avanço da mesa, não permitindo o controlo de carga ao longo do ensaio. Através da rotação simultânea de dois eixos da fresadora esta permitia colocar a ferramenta com a inclinação desejada.

Em relação aos parâmetros utilizados para o pós-processamento da soldadura MIG sem reforço, utilizou-se uma velocidade de rotação da ferramenta de 500 rpm e uma velocidade de avanço da mesma de 120 mm/min, como se observa na figura 34.

Neste caso utilizou-se uma passagem de FSP em cada um dos pés dos cordões de soldadura, realçando-se o facto de que se efectuou apenas um movimento de

translação na mesa da máquina quando se passou de um para outro cordão a pós-processar. Para os cordões de soldadura do outro lado da chapa, efectuou-se o mesmo procedimento e começou-se com o pós-processamento no início do pós-processamento do primeiro lado da chapa.

Para a soldadura MIG pós-processada com reforço, figura 33, utilizou-se uma velocidade de rotação de 1500rpm e uma velocidade de avanço de 500 mm/min. A representação desta série encontra-se na figura 35.

Em termos de pós-processamento o lado de avanço da ferramenta situava-se no lado do cordão de soldadura e o pino situava-se ligeiramente ao lado do centro do cordão da soldadura de modo a que a ferramenta interferisse numa área de 5 mm com o flanco do reforço.

Em termos de passagens, este perfil foi sujeito a duas em cada pé do cordão sendo que o início e o fim da primeira passagem coincidiam com o princípio e com o fim da segunda passagem.

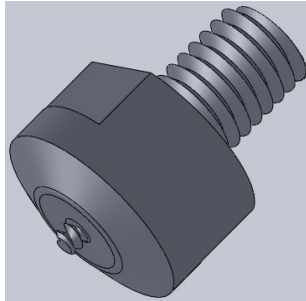


Figura 31. Representação tridimensional da ferramenta de FSP da série MIG pós-processada com reforço

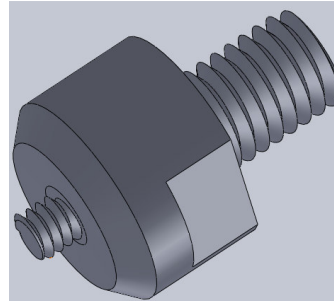


Figura 32. Representação tridimensional da ferramenta de FSP da série MIG pós-processada sem reforço



Figura 33. Perfil MIG com reforço e pós-processado

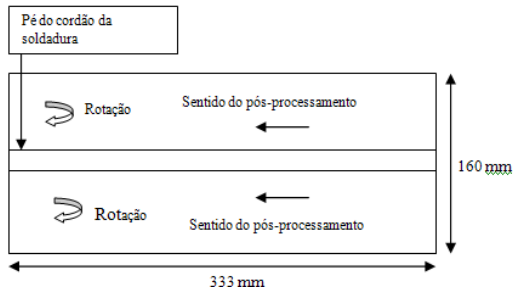


Figura 34. Representação esquemática em vista de topo do pós-processamento da série MIG pós-processada sem reforço

Parâmetros:

- 1 Passagem em cada pé do cordão;
- Velocidade de rotação = 500 rpm;
- Velocidade de avanço = 120 mm/min.

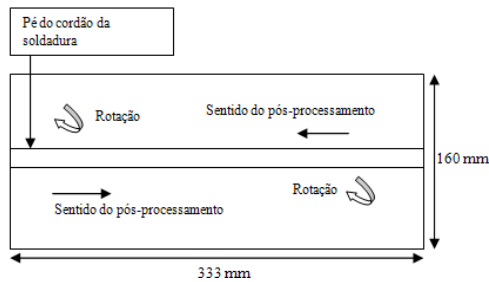


Figura 35. Representação esquemática em vista de topo do pós-processamento da série MIG pós-processada com reforço

Parâmetros:

- 2 Passagens em cada pé do cordão;
- Velocidade de rotação = 1500 rpm;
- Velocidade de avanço = 500 mm/min.



Figura 36. Fresadora, marca Cincinnati

3.4 Preparação e dimensões dos provetes para os ensaios de tracção e de fadiga

Visto que a preparação dos provetes para as diversas técnicas foi feita de forma semelhante passa-se a descrever a forma como foram obtidos.

1. Corte da chapa em provetes com as dimensões 20 x 160 mm, na serra de fita;

2. Maquinagem dos provetes num centro de maquinagem CNC, para os uniformizar com uma largura de 18mm;
3. Afagamento das arestas dos provetes.

De forma a simplificar o nome de cada série, define-se desde já que a série MIG com reforço será representada pela sigla MIG_CR. A série MIG sem reforço pela sigla MIG_SR. A série MIG com reforço e pós-processada pela sigla MIG_CR+FSP e a série MIG sem reforço e pós-processada pela sigla MIG_SR+FSP.

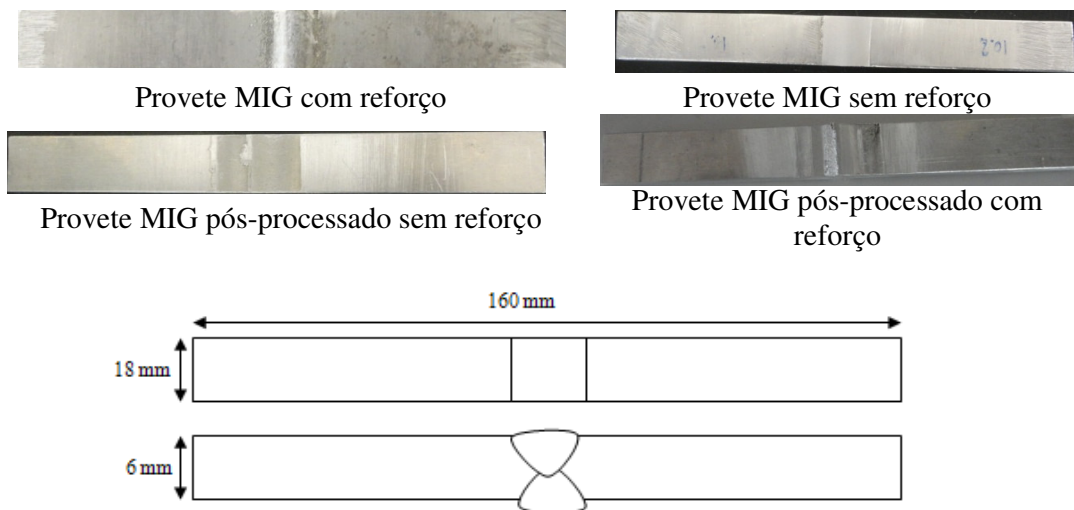


Figura 37. Dimensões dos provetes

3.5 Ensaio de Tracção

Para a realização do ensaio de tracção teve que se definir as dimensões do provete, ou seja, a sua secção, para o programa determinar a carga a aplicar. Durante a realização do ensaio, sabendo que o ensaio ocorreu com uma velocidade de tracção de 1mm/min, através de um programa foram adquiridos os sinais de carga e alongamento do provete. Com os pontos na folha de Excel fez-se o gráfico tensão/deformação que permite obter a tensão de cedência pelo critério dos 0,2% de deformação plástica, a tensão de rotura e o alongamento à rotura. Durante o ensaio observou-se a estricção que os provetes apresentavam a partir de um certo alongamento até à sua rotura.



Figura 38. Máquina de Ensaio Tracção, marca Instron

3.6 Ensaio de Fadiga

Nos ensaios de fadiga utilizou-se a máquina servohidraulica, marca Instron, modelo 1341 e os ensaios realizaram-se em controlo de carga. Recorreu-se a uma onda sinusoidal relativa aos ciclos de tensão aplicados aos provetes, a uma frequência de 30 Hz, a uma razão de tensões de 0,02 e a gamas de tensão entre 75 e 180 MPa. Visto que para a realização dos ensaios de fadiga é necessário introduzir a carga média e a alternada no software, de seguida apresentam-se as equações que explicam a forma como se obtiveram:

$$\Delta P[kN] = \frac{\Delta\sigma[MPa].B[mm].W[mm]}{(1 - R).1000} \quad (1)$$

B – é a espessura do provete na zona soldada em mm.

W – é a largura do provete na zona soldada em mm.

R – Razão de tensões.

$\Delta\sigma$ – Gama de tensão a que se pretende determinar o número de ciclos até à rotura em MPa.

ΔP – Gama de carga aplicada expressa em kN.

$$P_{m\acute{a}x}[KN] = \Delta P + P_{min} \quad (2)$$

$$P_m[KN] = \frac{P_{m\acute{a}x} + P_{min}}{2} \quad (3)$$

$$P_a [KN] = \frac{P_{m\acute{a}x} - P_{m\acute{i}n}}{2} \quad (4)$$

$P_{m\acute{a}x}$ – Carga máxima em kN.

$P_{m\acute{i}n}$ – Carga mínima em kN.

P_m – Carga média em kN.

P_a – Carga alternada.

Tendo os provetes preparados, realizaram-se ensaios de fadiga segundo solicitações uniaxiais de fadiga.



Figura 39. Máquina ensaio de fadiga, marca Instron

4. Apresentação e discussão de resultados

4.1 Ângulo médio do cordão de soldadura e raio de curvatura

Segundo uma análise estatística realizada às soldaduras 8,9 e 10, estas têm um ângulo médio do cordão de $22,7^\circ$ sendo o seu desvio padrão de $5,3^\circ$ para uma população de 248 ângulos medidos. A representação do ângulo e raio de curvatura estão presentes no anexo 7.9, figura 68. Esta informação será útil para caracterizar o cordão e também para definir a geometria ideal da ferramenta para o pós-processamento. Os ângulos máximos e mínimos observados foram de 6° e 33° , respectivamente.

Para facilitar a apresentação de resultados apresenta-se na tabela 4 as frequências de ocorrência e na fig. 40 o respectivo gráfico de colunas.

Tabela 4. Frequência dos ângulos de soldadura MIG com reforço

Ângulo	Ocorrência	Ângulo	Ocorrência
8-10	4	22-24	43
10-12	5	24-26	35
12-14	7	26-28	28
14-16	6	28-30	21
16-18	22	30-32	11
18-20	28	32-34	9
20-22	29		

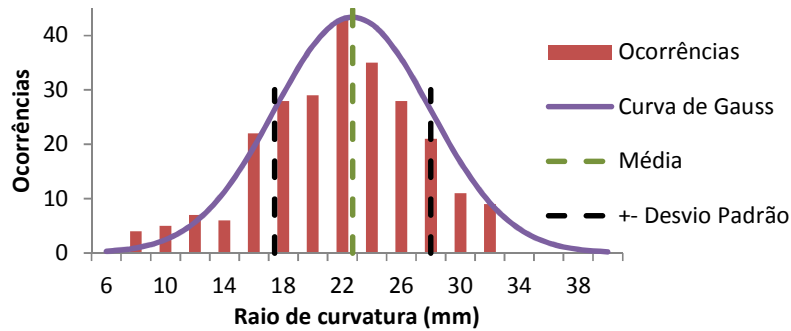


Figura 40. Distribuição dos ângulos de soldadura MIG com reforço

Na figura 40 estão representados a média e o intervalo a que corresponde um desvio padrão, ou seja, 68% dos pontos, visto que segue uma distribuição de Gauss como se observa no gráfico de colunas.

À semelhança da análise realizada para a obtenção do ângulo médio do cordão de soldadura, efectuou-se também uma para o raio médio de curvatura do cordão da soldadura MIG e da soldadura MIG pós-processada com reforço para assim se determinar e quantificar a influência da concentração de tensões. Nas figuras 41 e 42 mostra-se a distribuição de raios de curvatura com a curva de Gauss sobreposta. A série MIG com reforço tem um raio de curvatura médio de 0,43 mm e um desvio padrão de 0,12 mm. Por outro lado, o raio médio de curvatura da série MIG pós-processado com reforço aumentou para 1,33 mm e o desvio padrão é de 0,32 mm. Estes resultados foram obtidos para uma população de 74 raios de curvatura, em cada um dos casos.

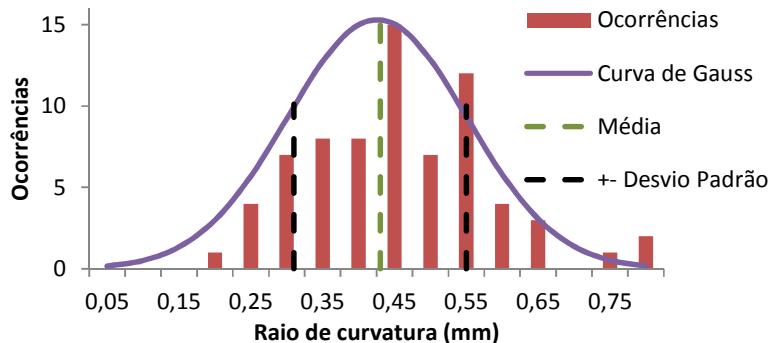


Figura 41. Distribuição de frequências do raio de curvatura da soldadura MIG com reforço

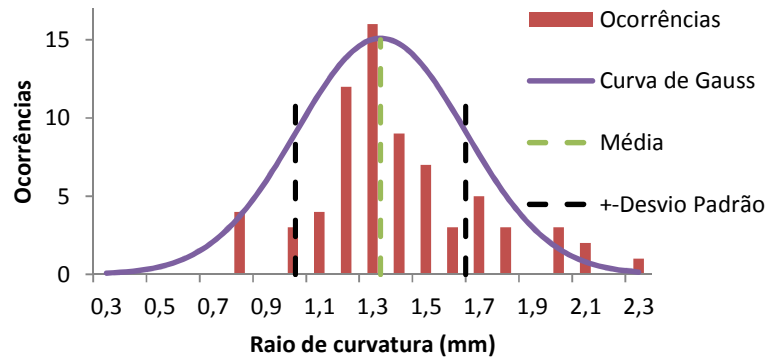


Figura 42. Distribuição de frequências do raio de curvatura da soldadura MIG pós-processada com reforço

4.2 Microestrutura das amostras

Nesta secção serão apresentadas as diferentes microestruturas relativas à soldadura por MIG e soldadura MIG com pós processamento por FSP.

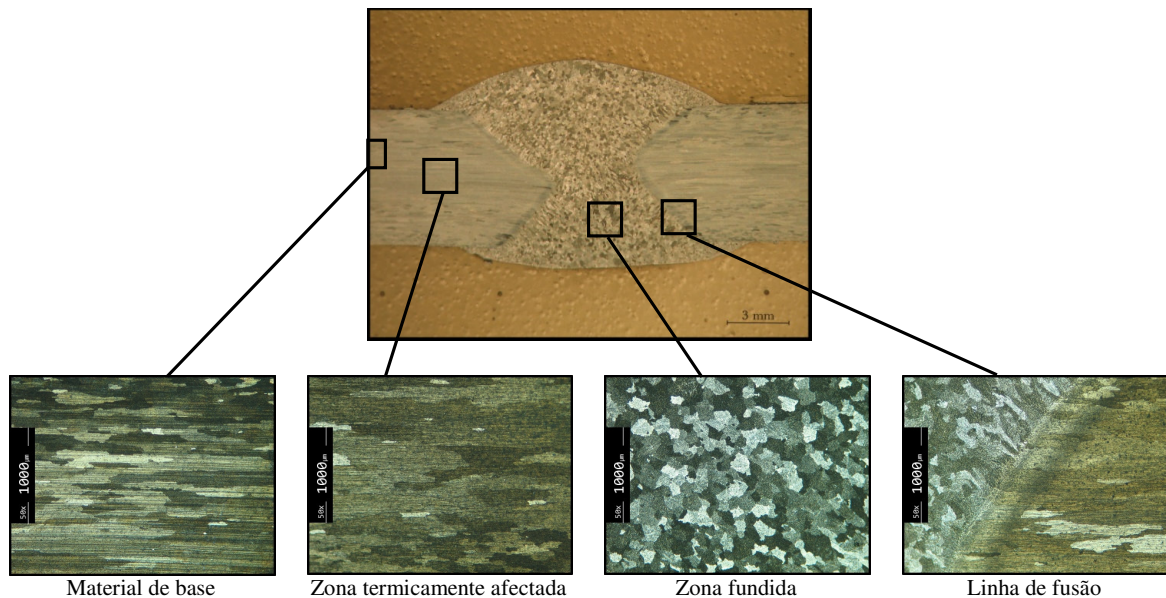


Figura 43. Análise metalográfica da soldadura MIG

Na figura 43, mostram-se as diferentes microestruturas da soldadura MIG.

O material de base é constituído por grãos dispostos de forma paralela, uma vez que o material foi sujeito ao processo de laminagem no seu fabrico.

A região que surge a seguir ao material de base, denomina-se por zona termicamente afectada, que como o próprio nome indica, é uma zona que foi afectada pelo calor proveniente da soldadura e portanto, é uma zona em que o tamanho de grão é

maior que o tamanho de grão do material de base. Em consequência do crescimento do tamanho de grão e perda de precipitados, surge uma degradação das propriedades mecânicas do material nesta zona, em virtude de a liga AA6082-T65 pertencer às ligas tratáveis termicamente e portanto, o calor degrada as suas propriedades.

A linha de fusão separa a zona termicamente afectada, da zona fundida. Esta é uma zona que apresenta grãos epitaxiais de ambos os lados, ou seja, na zona fundida e na zona termicamente afectada. Este facto deve-se à fusão parcial dos grãos nesta zona.

Por último a zona fundida, é caracterizada por grãos epitaxiais junto à linha de fusão e por grãos equiaxiais no centro da zona fundida, grãos estes que têm uma forma arredondada.

Apresentadas as várias microestruturas características da soldadura MIG, faz sentido referenciar problemas que possam ocorrer durante a soldadura de alumínio, tal como ocorreram neste trabalho. Para se perceber que nem sempre as soldaduras estão em boas condições, apesar do aspecto exterior parecer bom, apresentam-se dois tipos de defeitos que surgiram aquando da sua realização. Na figura 44, apresenta-se um defeito muito típico no alumínio que é a elevada porosidade e na figura 45 uma falta de fusão.

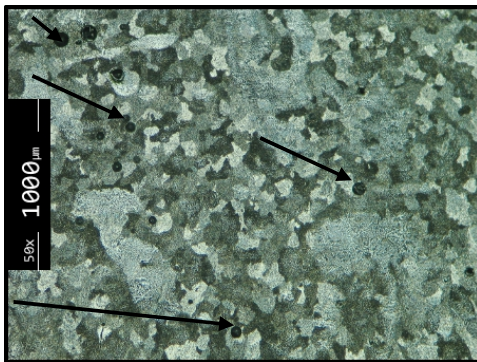


Figura 44. Elevada porosidade na zona fundida de uma soldadura MIG

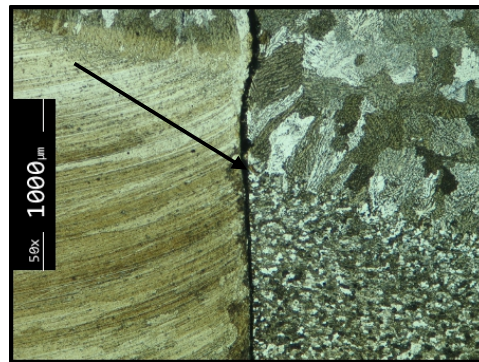


Figura 45. Falta de fusão entre a zona fundida e o material de base numa soldadura MIG

De forma a tentar melhorar a vida à fadiga do material, utilizou-se a técnica de pós-processamento por FSP.

Com o pós-processamento, o objectivo passa por aumentar a vida à fadiga, eliminando para isso defeitos internos que possam existir (figura 44), bem como a redução de tensões residuais provenientes do processo de soldadura MIG.

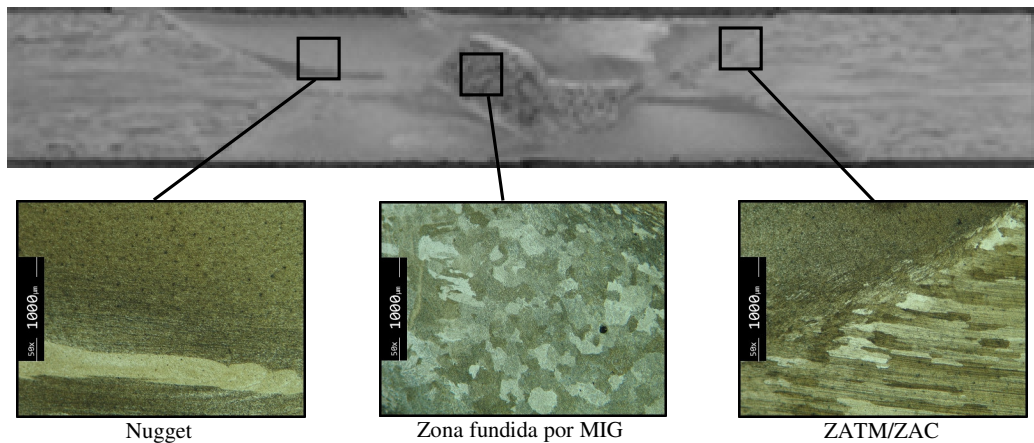


Figura 46. Análise metalográfica da soldadura MIG sem reforço e pós-processada em cada pé do cordão

Na figura 46, representa-se uma amostra que foi inicialmente soldada por MIG, seguida do afagamento do reforço e por último sujeita a pós-processamento por FSP.

Nesta figura apresentam-se as diversas zonas afectadas, onde se realçam as zonas que foram sujeitas ao pós-processamento, caracterizadas por grãos finos, zonas termo-mecanicamente afectadas/zonas termicamente afectadas e a zona fundida pelo processo MIG no centro da amostra e de grão grosseiro.

Como se mostra na figura 46, formam-se 3 zonas distintas devido ao pós-processamento. Serão elas a zona do *nugget*, a zona afectada termo-mecanicamente (ZATM) e a zona afectada pelo calor (ZAC).

O *nugget* é a zona de grão fino consequência de uma recristalização provocada pelas elevadas temperaturas e taxas de deformação inerentes ao processo FSP. Este encontra-se dentro da ZATM, e tem a forma de anéis concêntricos. A ZATM é a zona exterior ao *nugget* onde o material foi sujeito à deformação por parte da ferramenta de

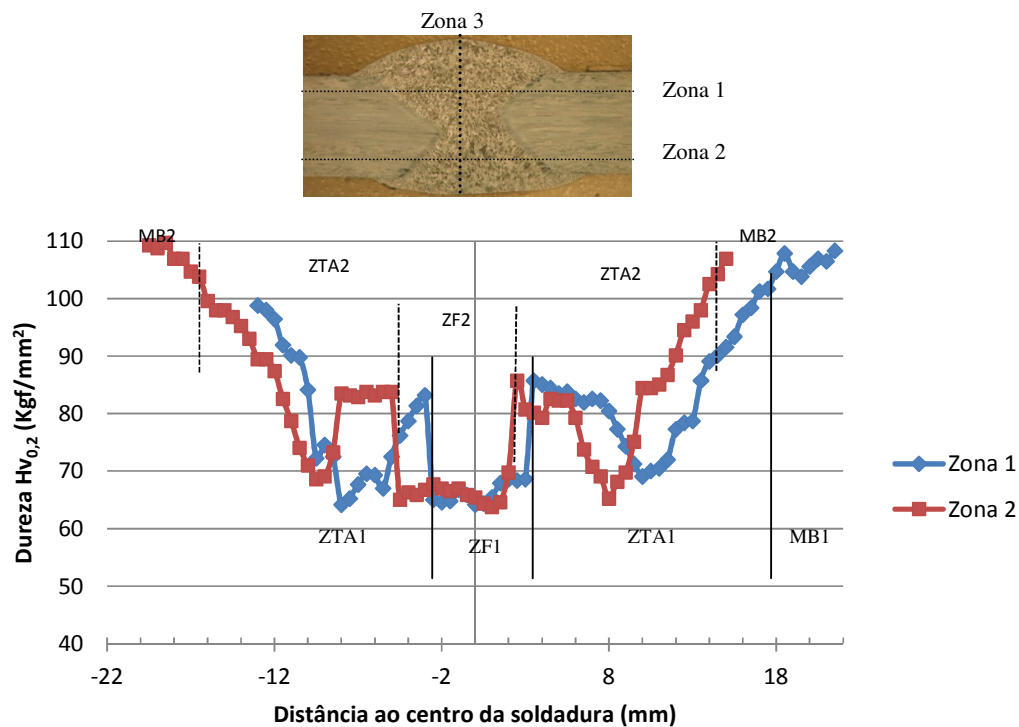
pós-processamento. A ZAC é a zona seguinte à ZATM e tem uma estrutura idêntica à do material de base.

4.3 Microdurezas

Através de ensaios de dureza, consegue-se avaliar aproximadamente a resistência do material em determinada zona, visto que no ensaio de dureza sujeita-se o material a uma deformação plástica.

Como se sabe a dureza e a resistência mecânica do material estão intimamente ligadas, portanto caracterizando-se uma caracteriza-se também a outra. Em suma, se a dureza for baixa a resistência mecânica também será baixa e vice-versa.

Seguidamente apresentam-se diferentes perfis de dureza obtidos nas diversas soldaduras. Para facilitar a interpretação do perfil de durezas, são delimitadas as diferentes zonas térmicas e a sua distância ao centro da soldadura.



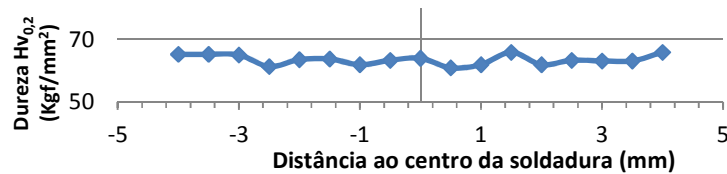


Figura 48. Perfil de durezas da soldadura MIG ao longo da espessura do material

Analisando a figura 47, nota-se claramente três zonas distintas. A primeira é a zona fundida, a segunda a zona termicamente afectada e a terceira o material de base.

Começando pela zona fundida, esta apresenta as menores durezas com um intervalo de durezas desde 64 a 69 HV. Isto é consequência da dissolução total de precipitados devido à fusão do material inerente ao processo MIG. Quando comparado com o material de base, em que a sua dureza é superior a 110 HV, verifica-se que esta é a zona mais macia do perfil. Em termos quantitativos existe uma diminuição da dureza cerca de 40% relativamente à dureza do material de base.

Saindo da zona fundida a dureza aumenta para valores da ordem dos 80 HV, isto porque na zona termicamente afectada pelo calor existe apenas dissolução parcial dos precipitados, o que provoca um aumento da dureza em relação à zona fundida mas inferior à dureza do material de base. Após este aumento de dureza, existe uma nova diminuição numa região muito estreita e possivelmente devido ao engrossamento de alguns precipitados parciais.

O engrossamento dos precipitados cria um menor obstáculo às deslocações, fazendo diminuir a dureza.

Após esta diminuição localizada, a dureza aumenta gradualmente até à dureza do material de base, pois à medida que nos afastamos do centro da soldadura, o efeito causado pelo calor diminui, até se chegar à zona que não foi afectada, chamada de material de base.

Analisando o perfil de durezas na vertical figura 48, correspondente à zona 3, ou seja, ao longo da espessura, observa-se que esta não varia consideravelmente, ou seja o perfil de durezas é praticamente constante ao longo da espessura do material. Os seus valores estão entre os 61 e 65 HV.

O perfil de durezas de uma soldadura MIG seguida do pós-processamento a que cada um dos pés do cordão da soldadura MIG sem reforço foi sujeito é apresentado na figura 49 para as zonas 1 e 2, respectivamente.

Analisando a figura 49, e comparando com a figura 47, observa-se que o material de base sofreu também um amaciamento, porque para a mesma distância ao centro da soldadura, ou seja, para distâncias de 15 a 20 mm numa soldadura MIG obtinham-se durezas acima de 100HV, e para estes dois últimos gráficos obtêm-se durezas entre 89,5 e 96 HV, consequência de um alargamento da zona pós-processada.

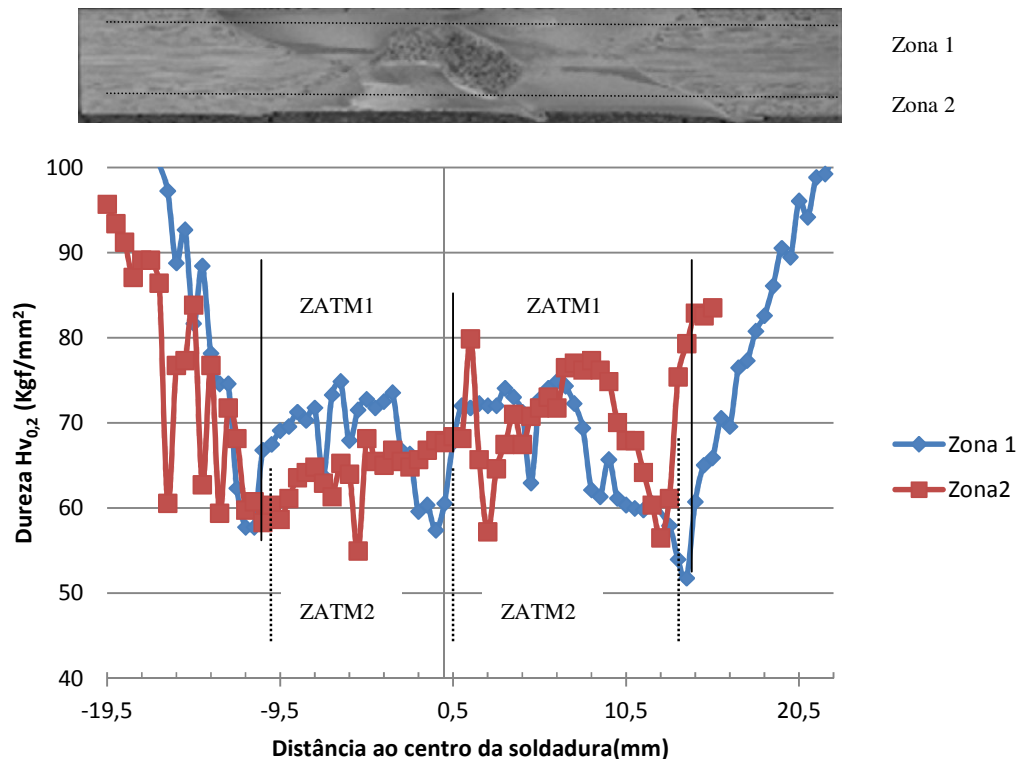


Figura 49. Perfil de durezas de uma soldadura MIG sem reforço e pós-processada segundo o pé do cordão

Analisando os picos inferiores e a sua localização, vê-se que estes são coincidentes com o lado de retrocesso do material deslocado pelo pino. Pelo facto de estarem no lado de retrocesso estão sujeitos a maior temperatura, o que em termos práticos provoca uma diminuição da dureza. Observando os valores destes picos, na figura 49 eles valem 51,8 e 57,4 HV para a linha da zona 1 e respectivamente 55 e 59 HV para a linha da zona 2.

Comparando estes valores com o valor da zona fundida numa soldadura MIG, com valores entre 64 a 69HV, conclui-se que existiu um amaciamento do material, porque se analisarmos os valores máximos e mínimos de dureza dessa zona, ou seja os 69 HV para MIG e 51,8HV para pós-processamento, vê-se que existiu um decréscimo de 17 HV. Esta redução de dureza poderá indicar que os parâmetros escolhidos para o pós-processamento não foram os mais correctos, e que se devia ter escolhido uma maior velocidade de avanço, para se gerar menos calor específico de modo a reduzir o amaciamento nestas zonas.

Para se comprovar que existiu amaciamento exagerado no perfil MIG sem reforço e pós processado, considera-se a dureza média da zona fundida MIG como sendo 67 HV e traçando uma linha horizontal a 67HV no perfil pós-processado, vê-se que 44% dos pontos estão abaixo deste valor. Além do objectivo de eliminar defeitos existentes no material, eliminar tensões residuais através da remistura do material e refinar alguma estrutura, é também critério não baixar demasiado a dureza do material, de modo a não ocorrer uma redução significativa da resistência mecânica.

O perfil de durezas ao longo da espessura do perfil tem um máximo cerca de 76HV numa das faces, sendo a da outra face 69 HV. A meio da espessura obteve-se 70HV. O mínimo de dureza é 51HV e localiza-se a 2 mm do topo. Simetricamente a este ponto de 51HV obtém-se um ligeiramente superior a este, que vale 60,5HV.

O perfil de durezas de uma soldadura MIG com reforço e pós-processada por FSP encontra-se apresentado nas figuras 50 e 51. A figura 50 corresponde ao início da chapa e a figura 51 ao final desta.

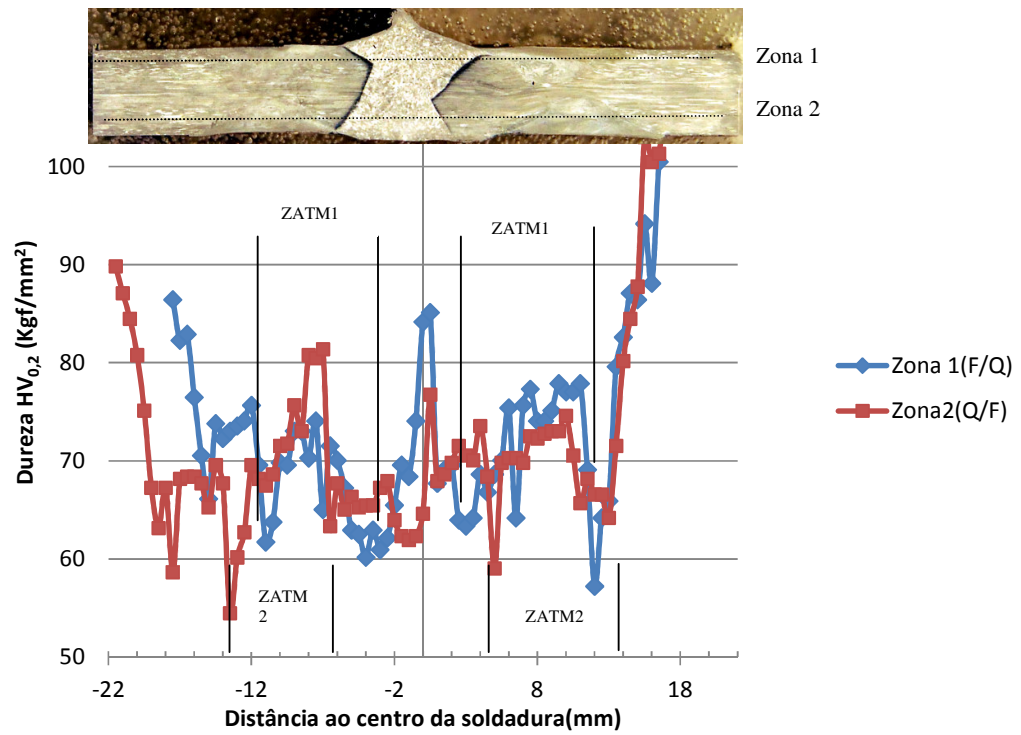


Figura 50. Perfil de durezas de uma soldadura MIG (início da chapa) com reforço e pós-processada segundo o pé do cordão

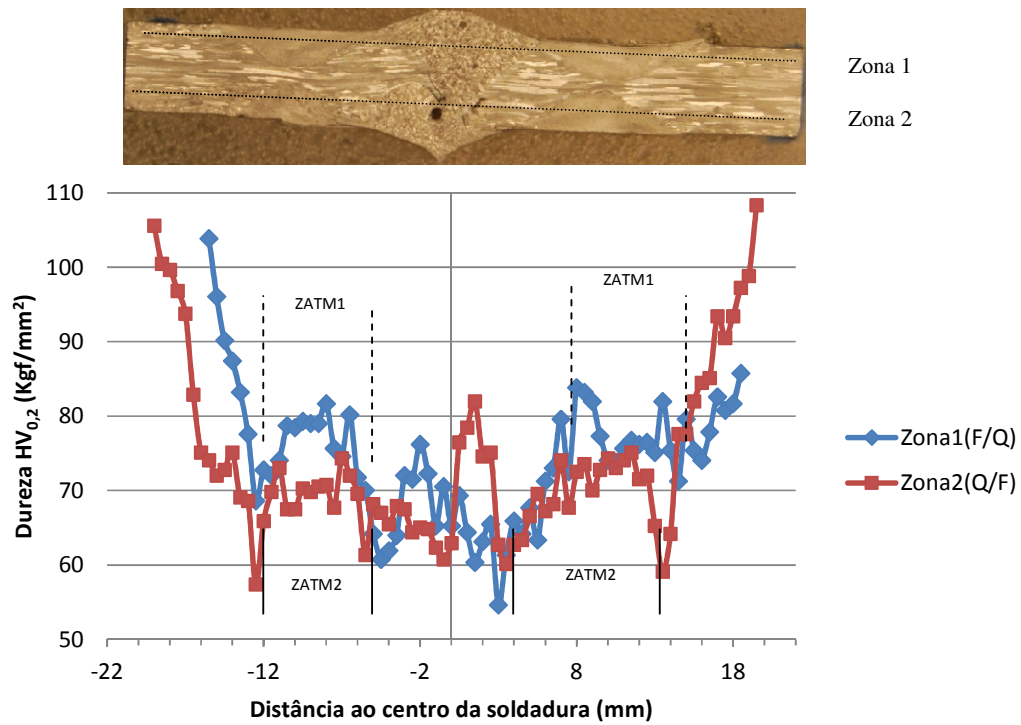


Figura 51. Perfil de durezas de uma soldadura MIG (fim da chapa) com reforço e pós-processada segundo o pé do cordão

Um dos objectivos é verificar se existe alteração de dureza do material relativamente ao seu início e ao seu fim.

Comparando as figuras 50 e 51, sabendo que esta corresponde à soldadura MIG com reforço e pós-processada com uma velocidade de rotação da ferramenta de 1500 rpm e com uma velocidade de avanço de 500 mm/min, verifica-se que não existe uma variação significativa de dureza do início para o fim da chapa, sabendo que a figura 50 corresponde ao início e a 51 ao fim. Em relação às durezas na zona fundida estas têm a maioria dos pontos entre os 60 e os 70 HV, durezas que tipicamente correspondem às durezas da zona fundida por MIG. Deslocando a análise do perfil de durezas, para a zona termo-mecanicamente afectada, zona alterada sob a acção da ferramenta de FSP, verifica-se que esta possui uma dureza mínima de 54,5HV no início da chapa e de 54,6HV no fim da chapa. Estes pontos encontram-se na zona limite da zona termo-mecanicamente afectada, zona onde as durezas são tipicamente mais baixas. Sabendo que a ferramenta de FSP se desloca ao longo do pé do cordão da soldadura, surge um caso interessante de estudo que consiste no facto de comparar as zonas quentes e zonas frias da chapa. Isto é, as zonas frias correspondem ao início do pós-processamento e as zonas quentes ao fim do processo. Observando as figuras 50 e 51 verifica-se que as zonas quentes são as zonas em que a dureza é menor. Chama-se a atenção que a zona fria ou quente está identificada na legenda do gráfico. Por exemplo, Zona 1 (F/Q), significa que a zona negativa da distância ao centro da soldadura corresponde a uma zona fria e que a zona positiva corresponde a uma zona quente.

Na figura 52, mostra-se a curva obtida por K.V.Mjali [11] sobreposta às deste trabalho permitindo a comparação de diferentes resultados. A figura 52 será composta pela curva MIG, MIG com FSP sem reforço, MIG com FSP com reforço e com a curva do processo híbrido MIG/Laser da referência [11]. A liga da referência [11] é uma liga de alumínio AA 6082-T6 com 6 mm de espessura.

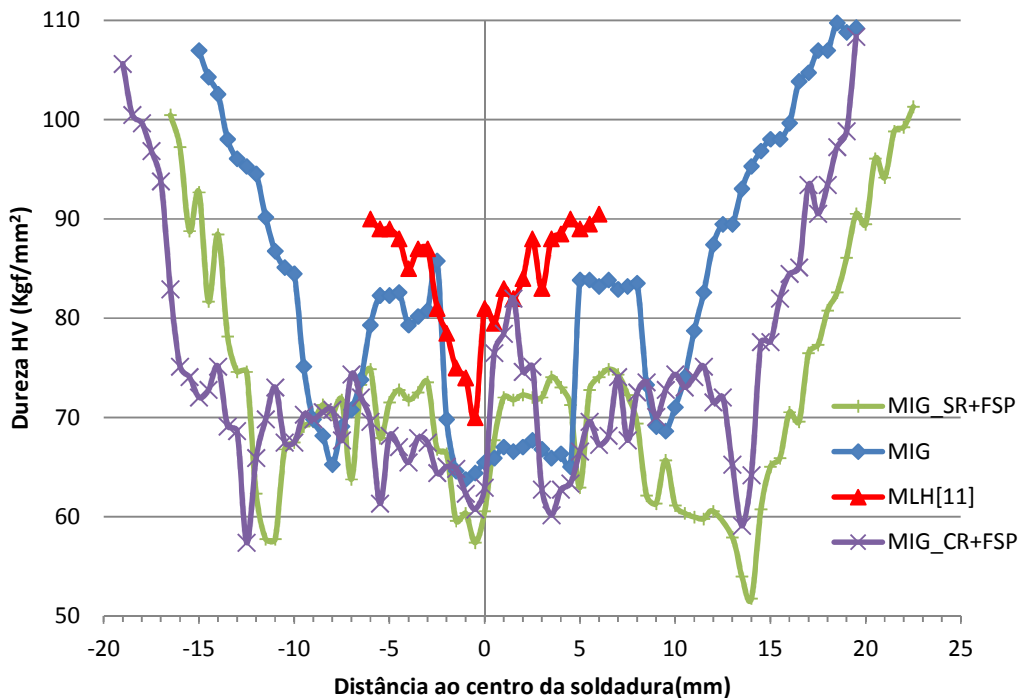


Figura 52. Comparação de perfis de durezas das técnicas MIG, MIG+FSP+CR, MIG+FSP+SR e híbrido MIG/Laser[11]

A figura 52, mostra que os resultados da soldadura MIG têm dureza ligeiramente inferior à soldadura híbrida MIG/Laser, pois a híbrida tem 70HV de dureza mínima, enquanto a MIG tem cerca 64,6HV.

Comparando as curvas de MIG com reforço e pós-processadas com as curvas MIG sem reforço e pós-processadas, verifica-se que a curva MIG sem reforço e pós-processada tem um pico de dureza inferior à com reforço, pois tem dureza mínima de 51.8HV enquanto com reforço tem 57,4 HV. Em termos de perfis são semelhantes, pois as durezas de uma e de outra para o mesmo ponto são próximas. Sabendo que o perfil sem reforço foi obtido com uma velocidade de avanço de 120 mm/min e uma rotação de 500 rpm, e que o perfil com reforço foi obtido com velocidade de avanço de 500 mm/min e com velocidade de rotação de 1500 rpm conclui-se que o facto de se ter aumentado significativamente ambos os parâmetros não trouxe consequências ao nível do perfil de durezas. Isto significa que as velocidades mais elevadas são preferíveis às mais baixas pois nestas o processo consome menos tempo.

Comparando as curvas de pós-processamento com a curva MIG, sobressai que as curvas têm perfis semelhantes e que a curva do pós-processamento está mais abaixo que a MIG, consequência do amaciamento do material. Esta redução de dureza pode dever-se ao facto de a liga ser da série 6000, série das ligas tratadas termicamente, e como se sabe o facto de esta ser submetida a novo aquecimento acima de um certo limite devido ao pós-processamento, faz com que os precipitados cresçam resultando numa diminuição da sua dureza.

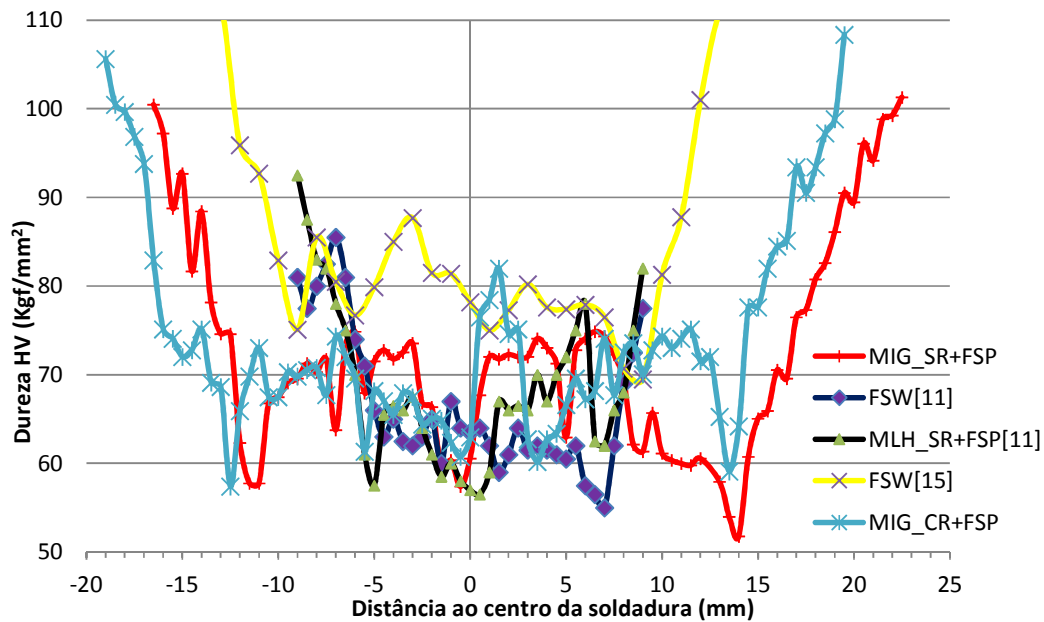


Figura 53. Comparação de perfis de dureza das técnicas MIG+FSP+CR, MIG+FSP+SR, FSW[11], FSP+SR[11] e FSW[15]

Posto isto, apresentou-se na figura 53 o gráfico que compara a curva MIG com reforço pós-processada e MIG sem reforço pós-processada obtida neste trabalho, com a curva FSP sem reforço e FSW da ref. [11] e FSW da ref. [15], L.P. Borrego *et al.*

Começando por correlacionar as curvas de pós-processamento por FSP, obtidas neste trabalho e as de K.V.Mjali [11], vê-se que as curvas têm andamentos semelhantes e que o facto dos picos inferiores da curva deste trabalho com a outra estarem mais afastados, se deve ao facto de neste trabalho se ter passado com a ferramenta uma vez em cada pé da soldadura e em [11] ter sido uma única passagem com o pino no centro da soldadura.

Sabendo que as curvas de pós-processamento são função da geometria da ferramenta de pós-processamento é conveniente comparar ambas.

Em termos da ferramenta utilizada neste trabalho para o caso de MIG_SR+FSP esta tem um pino com 5 mm de diâmetro e uma base de diâmetro com 16mm. Para a ferramenta utilizada para MIG_CR+FSP esta possui uma base cônica de 10 mm com um ângulo do cone de 22° (ângulo este que é o ângulo médio da soldadura) e um pino de 2mm de diâmetro. Ambos os pinos se encontram especificados no anexo 7.7 e 7.8. Por sua vez a ref.[11] utiliza um pino de 6 mm de diâmetro e uma base de 15 mm. Segundo isto, os picos da ref. [11] estão localizados a 7,5 mm do centro da soldadura como se confirma no gráfico, figura 53, os MIG_SR+FSP localizados a cerca de 14 mm aproximadamente, também confirmado pelo gráfico da figura 53 e os MIG_CR+FSP não se encontram todos à mesma distância pois foram efectuadas duas passagens em cada cordão o que conseqüentemente provoca algum deslocamento relativo ao centro da soldadura.

Comparando estes resultados com os resultados de fricção linear da ref. [11], dentro da zona termo-mecanicamente afectada, tanto o pós-processamento sem reforço como o pós-processamento com reforço efectuado neste trabalho têm em geral maiores durezas. Em ambos os lados de retrocesso, a fricção linear tem um valor de 55 HV maior que os 51,8HV do pós-processamento sem reforço mas menor que os 57,4 do pós-processamento com reforço.

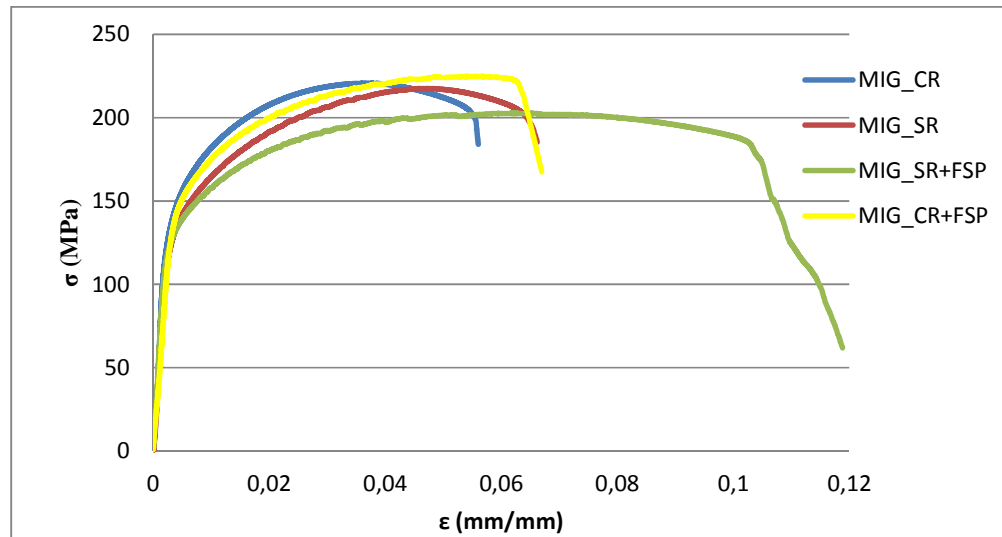
Por último a curva de fricção linear obtida por L.P. Borrego *et al* [15], apresenta durezas maiores quando comparadas às restantes. Do lado de retrocesso a dureza é de 69,5 HV, dureza muito superior às restantes para o mesmo lado, como analisado no parágrafo anterior.

4.3 Ensaio de tracção

Os ensaios de tracção realizados aos provetes MIG com reforço, MIG sem reforço, MIG com reforço pós-processados e MIG sem reforço pós-processados, são apresentados na tabela 5, como a média dos três ensaios. Esta tabela inclui também os resultados por K.V.Mjali [11], que se encontram na tabela 2.

Tabela 5. Resultados dos diversos ensaios de tracção

	σ_{ced} (MPa)	σ_{rot} (MPa)	$\epsilon_{(carga\ máxima)}$	E (GPa)	Local da rotura
MIG_CR	153	221	0,037	67,4	ZTA
MIG_SR	137	217	0,047	62,6	ZTA
MIG_SR+FSP SemDefeitos	135	203	0,062	60,0	Lado Retrocesso
MIG_SR+FSP ComDefeitos	129	135	0,008	38,6	ZF
MIG_CR+FSP	154	225	0,0556	46,2	Lado Retrocesso
MIG/laser[11]	146	245	0,032	xxx	xxx
FSP_SR[11]	147	219	0,064	xxx	xxx
FSW[11]	148	228	0,072	xxx	xxx
Material Base[11]	303	326	0,141	xxx	xxx

**Figura 54.** Gráfico σ/ϵ das técnicas de MIG com reforço. MIG sem reforço, MIG pós-processado sem reforço e MIG pós-processado com reforço

Comparando os resultados do ensaio MIG com reforço deste trabalho, com os do material de base retirados da fonte [11], da tabela 5, vê-se que houve uma diminuição de 49% da tensão de cedência e de 32 % na tensão de rotura.

O facto da tensão de cedência e de rotura dos provetes MIG sem reforço ter diminuído quando comparados com os MIG com reforço, deve-se simultaneamente ao facto de se ter retirado o reforço e conseqüentemente se ter diminuído a espessura e também porque o reforço estava situado na zona mais macia do material.

Estes dois efeitos simultâneos traduziram-se numa perda de tensão de cedência em relação aos MIG com reforço de 11% e de 1,5 % para a tensão de rotura.

Relativamente aos resultados de tracção para o ensaio MIG com reforço pós-processado obteve-se uma melhoria relativamente às curvas de MIG sem reforço pós-processado, MIG sem reforço e MIG com reforço apesar desta última ter sido uma pequena melhoria. Relativamente aos MIG sem reforço pós-processado a melhoria foi de 12,3% tensão de cedência e de 9,8% tensão de rotura. Em relação aos MIG sem reforço a melhoria foi de 11% tensão de cedência e 3,6% tensão rotura. Por último obteve-se uma pequena melhoria para a tensão de cedência e de rotura quando comparados com a série MIG com reforço, sendo a melhoria de 0,6 % na tensão de cedência e 1,8 % na tensão de rotura.

Com a aplicação do pós-processamento nos provetes MIG sem reforço é de salientar que se obteve resultados muito dispersos, consequência dos provetes apresentarem muitos defeitos, na zona da soldadura. Devido a isto obtiveram-se duas curvas de tracção muito díspares em provetes desta série. Para efeito de comparação com os outros processos, serão apenas utilizados os resultados do ensaio do pós-processamento sem defeitos. Comparativamente com os resultados de K.V.Mjali [11] , a tensão de cedência e de rotura do pós-processamento, foram menores. Neste trabalho obteve-se uma diminuição de 8% na cedência e de 7% na rotura.

Comparando a técnica da soldadura por fricção linear ref.[11] com os resultados MIG sem reforço, comprova-se que através da fricção linear se obtém uma maior tensão de rotura, resultado que já era de esperar, pois na fricção linear as temperaturas durante o processo de soldadura são substancialmente mais baixas, fazendo com que não se degradem tanto as propriedades do material na zona soldada pelo facto de ser esta uma liga das tratáveis termicamente.

Comparando agora a fricção linear K.V.Mjali [11] com os provetes MIG com reforço e pós-processado, observa-se que a tensão de cedência aumentou 3,89% relativamente aos resultados da ref[11]. Pelo contrário, a tensão de rotura da fricção

linear de K.V.Mjali [11] é maior em 1,3%. Estes resultados mostram que existe um maior encruamento na fricção linear.

4.4 Resistência à Fadiga

Concluída que está a análise de microdurezas, análise metalográfica e caracterização da resistência à tracção dos provetes obtidos pelos vários processos, nesta secção aborda-se a resistência à fadiga do material segundo cada processo, tendo como base de apoio os resultados das diferentes análises anteriores.

Os ensaios de fadiga realizados foram para uma razão de tensões de $R=0,02$.

A figura 53 representa a vida à fadiga do material, mostrando a gama de tensões aplicada em função do número de ciclos até à rotura.

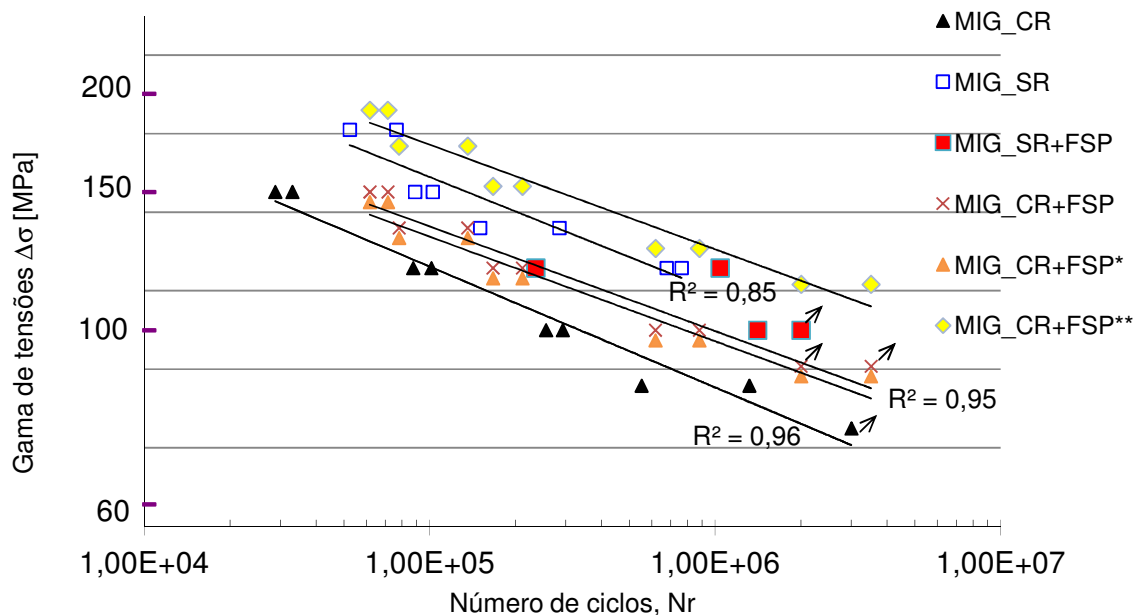


Figura 55. Vida à fadiga dos ensaios realizados (MIG com reforço, MIG sem reforço, MIG+FSP sem reforço, MIG+FSP com reforço, MIG_CR+FSP* e MIG_CR+FSP**)

Antes de analisar a figura 55 é de referir que os resultados obtidos tiveram por base o seguinte:

Primeiro soldou-se uma placa por MIG e testaram-se os provetes à fadiga (série MIG_CR), depois uma outra placa soldada por MIG foi afagada e ensaiada (série

MIG_SR). A terceira série (MIG_SR+FSP) corresponde a provetes soldados por MIG e afagados sujeitos a pós-processamento na zona do pé do cordão da soldadura. A quarta série (MIG_CR+FSP) foi obtida por soldadura MIG com pós-processamento no pé do cordão da soldadura. A série MIG_CR+FSP * foi obtida analiticamente com base nos resultados MIG_CR+FSP, ou seja, a série MIG_CR+FSP* corresponde à série MIG+FSP+CR compensada pela razão dos factores dinâmicos de tensões, K_f , das duas geometrias. Isto é, com a aplicação da equação 9, fez-se corresponder a série MIG_CR+FSP com um raio de curvatura de 1,33mm a uma nova série MIG_CR+FSP* com um raio de curvatura de 0,4mm. Com esta nova série MIG_CR+FSP*, raio de curvatura 0,4mm, pode-se comparar os resultados da vida à fadiga desta com os da série MIG_CR e assim analisar se a melhoria obtida foi por alteração do raio de curvatura ou se foi por melhoria de microestrutura e de tensões residuais existentes.

À semelhança da série MIG_CR+FSP* criou-se também a série MIG_CR+FSP** em que se aplica a equação 9, multiplicada pelo K_f do raio de curvatura de 1,33 para se obter uma série sem o efeito do reforço e assim comparar com a série MIG_SR.

Ambas as séries MIG_CR+FSP* e MIG_CR+FSP** foram obtidas analiticamente com base na equação de Lawrence para soldadura topo a topo, ref.[18]. Esta encontra-se na equação 7, aplicada às séries MIG_CR+FSP e MIG_CR+FSP*.

$$K_t = 1 + 0,27(\tan \theta)^{\frac{1}{4}} * \left(\frac{t}{\rho}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

onde:

- θ – Ângulo que o reforço da soldadura faz com o perfil
- ρ – Raio de curvatura do pé do reforço
- t – Espessura da chapa
- K_t – Factor geométrico de concentração de tensões

Em que o valor de ρ para a série MIG_CR+FSP é 1,33 e para a série MIG_CR é 0,43. Por sua vez θ é 22,7°.

A equação de Peterson, equação 8, ref[18], permitiu relacionar o factor dinâmico de tensões K_f com o factor geométrico de concentração de tensões, K_t , onde a^* é 0,635 mm para ligas de alumínio.

$$K_f = 1 + \frac{K_t - 1}{1 + \frac{a^*}{\rho}} \quad (8)$$

Os valores de $\Delta\sigma$ para a série MIG_CR+FSP*, com $\rho=0,43$ mm, são calculados a partir dos valores de $\Delta\sigma$ para a série MIG_CR+FSP, com $\rho=1,33$, usando a equação 9, onde $\Delta\sigma$ representa a gama de tensões.

$$\Delta\sigma_{(MIG+FSP_CR)}^* = \Delta\sigma_{(MIG+FSP_CR)} * \frac{K_f^*}{K_f} \quad (9)$$

Os resultados obtidos para K_t^* e K_f^* da série MIG_CR+FSP foram de 1,46 e 1,31 respectivamente. Para a série MIG_CR o K_t é 1,86 e o K_f 1,35. Estes resultados encontram-se representados na figura 55.

Comparando a recta obtida para MIG com reforço com a recta MIG sem reforço vê-se claramente que a primeira está mais abaixo. Em termos práticos, a vida à fadiga resultante do MIG sem reforço é superior como era esperado. A eliminação do reforço eliminou o efeito da concentração de tensões e portanto a posição relativa das duas curvas S-N permite quantificar o efeito da concentração de tensões na resistência à fadiga das juntas soldadas por MIG.

Em termos de tensões observa-se que, para uma vida de 200 mil ciclos obteve-se uma gama de tensões de 135MPa para a soldadura MIG sem reforço, enquanto para a MIG com reforço se obteve a tensão de 100MPa. Isto traduz-se num aumento de resistência à fadiga da soldadura MIG sem reforço de 35MPa relativamente à MIG com reforço, apenas pela eliminação da concentração de tensões devido à presença do reforço da soldadura, ou seja, um ganho de 26%.

Para uma vida de 700 mil ciclos o MIG sem reforço tem um aumento de 27MPa relativamente ao MIG com reforço. Como para MIG sem reforço se obteve 119 MPa e para MIG com reforço 92 MPa observa-se que existiu um aumento na gama de tensões do MIG sem reforço em relação ao MIG com reforço de 23%. Portanto à medida que se aumenta a vida do provete vê-se que existe uma ligeira diminuição da contribuição do efeito da concentração de tensões. Em teoria sabe-se que esta tendência deveria ser contrária à observada mas não é importante pois apenas são 3% e provavelmente são resultado de alguma dispersão de resultados que existiu.

Analisado o efeito da concentração de tensões, este trabalho tinha como um dos seus objectivos estudar o efeito do pós-processamento numa junta soldada por MIG com e sem reforço para desta forma se analisar o efeito da alteração da microestrutura, através da eliminação de porosidades e defeitos existentes no material depois de soldado e um eventual refinamento do grão.

Os pontos representativos do MIG sem reforço pós-processado ao contrário das outras séries não possuem uma recta de ajuste, pois apenas se obtiveram 4 pontos originados a partir de resultados aceitáveis uma vez que esta é uma série em que parte dos provetes possui defeitos graves criados durante a soldadura MIG. No capítulo seguinte, na análise da fractura dos provetes observa-se a existência destes defeitos. Analisando-se os 4 pontos representados na figura 55, vê-se que estes em geral se encontram abaixo da série MIG sem reforço. Assim não se pode tirar grandes conclusões uma vez que existe uma grande dispersão de resultados. Por exemplo para uma gama de tensões testadas de 120MPa obteve-se um ensaio com 235279 ciclos e outro de 1040305 ciclos, o que significa uma elevada dispersão de resultados. Salienta-se também que o facto de estarem apenas representados pontos até 120 MPa se deve à falta de qualidade dos provetes pois os provetes com defeitos apresentaram no ensaio de tracção uma tensão de rotura de 135 MPa, tabela 5. Para valores maiores que este limite os provetes fracturaram para um número de ciclos muito baixo.

Na série MIG com reforço e pós-processada obtiveram-se resultados esperados (ver figura 55). Segundo a recta de tendência obtida para estes pontos vê-se que esta está acima da MIG com reforço mas abaixo da MIG sem reforço e dos pontos da série MIG sem reforço e pós-processada. Para melhor perceber esta série, a realização do pós-processamento permitiu melhorar a microestrutura, eliminar possíveis defeitos e aumentar o raio de curvatura aumentando assim a resistência à fadiga. Da figura 55 observa-se que o efeito da concentração de tensões é importante na resistência á fadiga visto que as séries sem reforço estão acima desta. Também se observa que o efeito simultâneo da diminuição da concentração de tensões com a melhoria da microestrutura corresponde a uma melhoria na resistência à fadiga, pois esta é uma recta acima da série MIG com reforço.

Na figura 55, está representada a série MIG_CR+FSP*, que pretende ser uma série que permite caracterizar qual dos efeitos mais contribui para a resistência à fadiga

com o pós-processamento efectuado, se a concentração de tensões ou se a melhoria da microestrutura.

Estes resultados encontram-se representados na figura 55 e da sua análise conclui-se que a melhoria dos resultados da série MIG com reforço e pós-processado se deveu sobretudo à melhoria da microestrutura e/ou redução de tensões residuais, sendo cerca de 25%, devido à melhoria do raio de curvatura.

À semelhança da série MIG_CR+FSP* encontra-se representada na figura 55 a série MIG_CR+FSP** que corresponde a uma soldadura MIG sem reforço e pós-processada. Observa-se que esta é a curva que está mais acima e daqui se conclui que esta é a série que tem maior resistência à fadiga. A melhoria em relação à série MIG_SR mais uma vez deveu-se principalmente à melhoria de microestrutura e/ou redução de tensões residuais e não pela remoção do reforço e conseqüente eliminação de concentração de tensões. A eliminação do reforço da soldadura apenas foi responsável por cerca de 38% da melhoria obtida.

Na figura 56 comparam-se os resultados deste trabalho com os de outros autores, já introduzidos na secção 2.5.

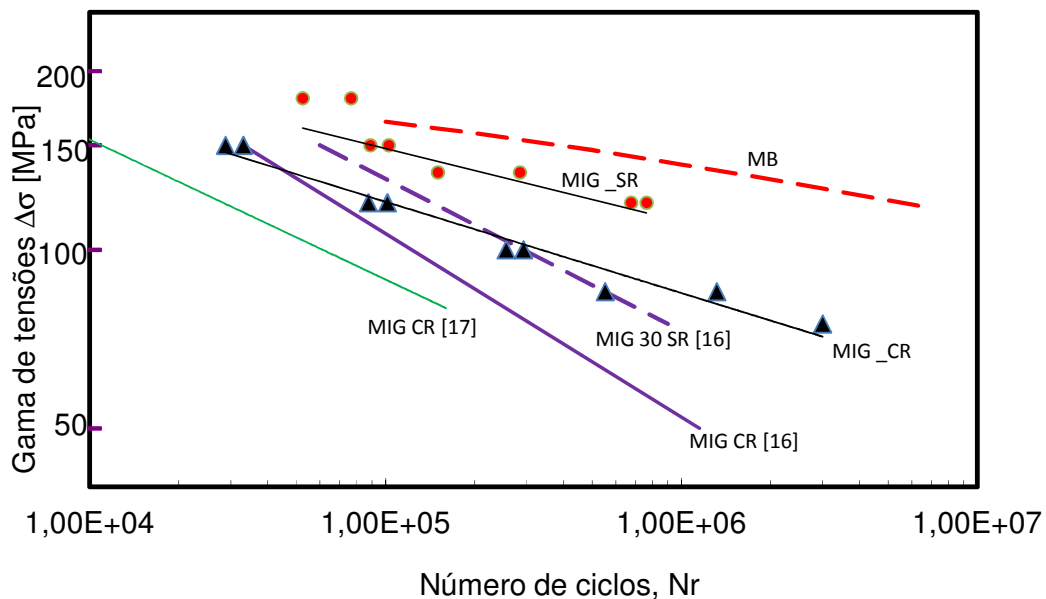


Figura 56. Comparação de diferentes soldaduras MIG com e sem reforço na vida à fadiga

Analisando a figura 56, vê-se que não há nenhuma recta, a não ser a do material de base, que esteja acima da recta de MIG sem reforço obtida neste trabalho. Isto revela

ter-se obtido uma soldadura de boa qualidade. A soldadura MIG com reforço obtida por Tavares Castro *et al* [17] está abaixo da obtida neste trabalho, consequência do desalinhamento e elevada porosidade apresentada na soldadura, figuras 16 e 17. Observa-se também que a soldadura MIG com reforço de Y.Kobayashi *et al* [16] está abaixo da obtida neste trabalho mas acima da curva da ref.[17].

Comparando a série MIG sem reforço [16] com a deste trabalho, observa-se que os resultados da série deste trabalho são muito superiores às da ref[16]. Isto pode querer indicar que os parâmetros de soldadura MIG influenciam muito a resistência à fadiga deste tipo de juntas soldadas, bem como a ausência de defeitos.

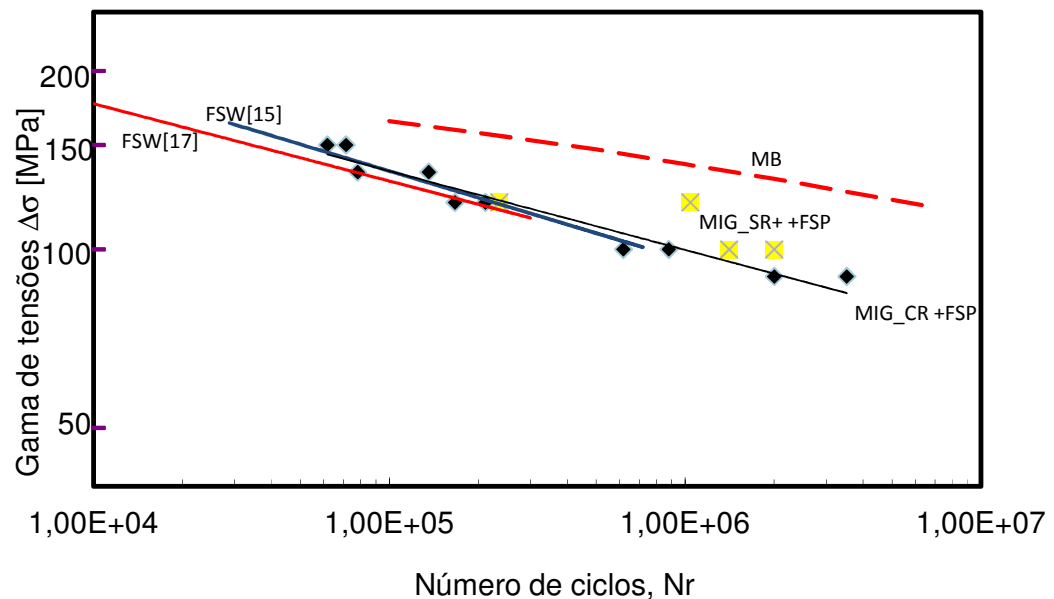


Figura 57. Comparação de diferentes soldaduras por FSW e MIG pós-processadas com e sem reforço na vida à fadiga

Na figura 57, observa-se também que as soldadura por fricção linear obtidas em [15] e [17] apresentam resultados muito semelhantes. Comparando estas com a série MIG com reforço e pós-processada observa-se que a recta FSW [15] está praticamente sobreposta a esta e que a da ref. [17] também está próxima, o que indica que a técnica de fricção linear e o pós-processamento são técnicas que conduzem a resultados idênticos e que portanto o factor que influencia a resistência à fadiga será nestes casos a alteração da microestrutura e o nível de tensões residuais que no entanto, não foram quantificadas neste trabalho.

4.5 Análise da fractura dos ensaios

A análise da fractura permite observar qual o mecanismo responsável pela rotura dos provetes ensaiados à fadiga. Através da visualização da fractura, pode verificar-se que os provetes ensaiados à fadiga partiram por porosidades existentes no material, por defeitos internos ou por defeitos à superfície.

Isto de facto é importante para analisar a qualidade dos resultados obtidos no presente trabalho, pois a vida à fadiga é função dos parâmetros atrás mencionados para além de outros.

Os provetes ensaiados à fadiga para soldaduras MIG com reforço, fracturaram sempre na zona do pé do cordão da soldadura. Devido à concentração de tensões causada pelo reforço a iniciação de fendas originava-se sempre a partir dessa zona e à superfície.

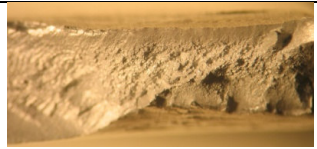
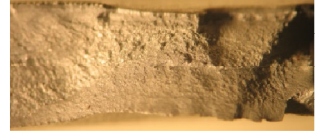

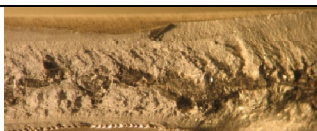
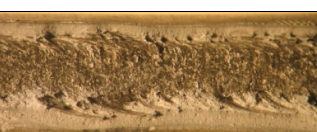

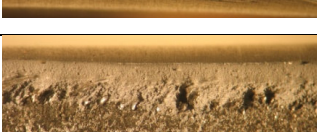
À semelhança dos provetes MIG com reforço, os provetes MIG sem reforço também são caracterizados pela iniciação de fendas à superfície do material. Como neste caso, não existe concentração de tensões no pé do cordão, os provetes iniciam a propagação da fenda na superfície do material por defeitos que esta possa conter. Pela análise de durezas realizada, pode concluir-se que a fractura ocorreu em duas zonas. Uma das zonas é a zona fundida e a outra é a zona de durezas semelhantes à zona fundida mas fora desta, o que equivale a dizer que os provetes fracturaram sempre na zona de material mais macio.

Pelo facto de no MIG com reforço, no MIG sem reforço e no MIG pós-processado com reforço os provetes fracturarem sempre devido à iniciação à superfície, pode dizer-se que a qualidade das soldaduras é aceitável pois os provetes não fracturam por defeitos internos ou por outro tipo de defeitos. Isto é também comprovado com o factor de correlação dos pontos, em que no primeiro é de 96%, no segundo de 85% e no terceiro de 95%.

Como já foi explicado na secção anterior a curva de fadiga para os provetes MIG sem reforço e pós-processados contém poucos resultados, sendo consequência directa de defeitos graves que os provetes apresentaram.

Na tabela 6 mostram-se imagens das fracturas dos provetes onde se observa que poucos foram os que não partiram pela zona da soldadura.

Tabela 6. Comparação das várias zonas de fractura do pós-processamento sem reforço

Provete	$\Delta\sigma$	Nº Ciclos	Zona da fractura	Fotografia (Lupa 1x)
13.4	100	2000000	Não fracturou	xxxxxxx
13.1	120	235279	Iniciação lado em retrocesso	
13.5	120	1040305	Iniciação lado em retrocesso	
13.3	100	1408453	Iniciação na zona fundida	
13.2	120	52072	Iniciação na zona fundida	
13.6	135	57	Iniciação na zona fundida	
13.7	135	5013	Iniciação na zona fundida	
13.0	150	60	Iniciação na zona fundida	

Da análise da tabela 6, verifica-se que à excepção dos 4 primeiros provetes, todos os outros fracturaram demasiado cedo. Estes têm em comum o facto de fracturarem na zona fundida e também o facto de esta apresentar uma zona escura no centro do provete.

Com base nos dados do ensaio de tracção, tabela 3, uma explicação para isto é o facto de as soldaduras terem tensão de cedência e de rotura baixas juntamente com defeitos graves na zona fundida. Se analisarmos a tabela 5, verifica-se que existem dois resultados distintos para o ensaio de tracção para o pós-processamento. O primeiro resultado foi obtido num provete sem defeitos, figura 59 e o outro foi obtido através de um provete com defeitos figura 58.

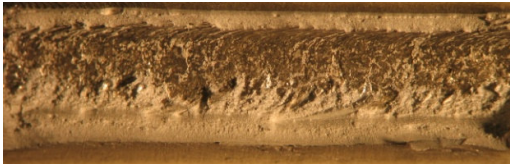


Figura 58. Superfície de fractura do ensaio de tracção da série MIG_SR+FSP (com defeito)

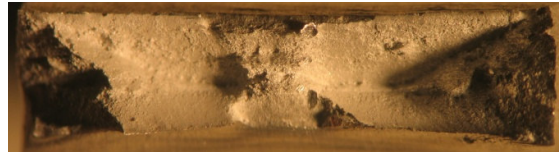


Figura 59. Superfície de fractura do ensaio de tracção da série MIG_SR+FSP (sem defeito)

No caso em que o provete apresentou muitos defeitos na zona fundida, a tensão de rotura é de 135 MPa levando a que todos os provetes ensaiados para uma gama de tensão superior a 135 MPa fracturassem ao fim de poucos ciclos, dependendo do grau de defeitos que apresentassem e da gama de tensão aplicada.

Como se vê na tabela 6, concluiu-se que quanto maior for a zona escura menor a vida que o provete apresenta, devido aos defeitos que esta zona possui.

Nos 4 ensaios em que os provetes não partiram por estes defeitos, torna-se evidente que a sua maior duração não foi devido à gama de tensões aplicada ser baixa mas por apresentarem uma maior tensão de cedência e de rotura comparativamente aos provetes com defeitos. A tabela 5 comprova que os provetes sem defeito têm propriedades mecânicas superiores aos provetes com defeito.

De realçar que para o ensaio de tracção que possuía defeitos, se obteve uma zona de fractura exactamente igual à da imagem correspondente ao provete 13.0. Ou seja, apesar do provete 13.0 entre outros, terem sido ensaiados à fadiga estes fracturaram por mecanismos característicos de ensaios estáticos.

Na figura 60, mostra-se a iniciação da fenda através de um defeito à superfície num provete soldado por MIG sem reforço, na figura 61 a fractura de um provete MIG com reforço e na 62 a fractura de um provete MIG pós-processado e com reforço.

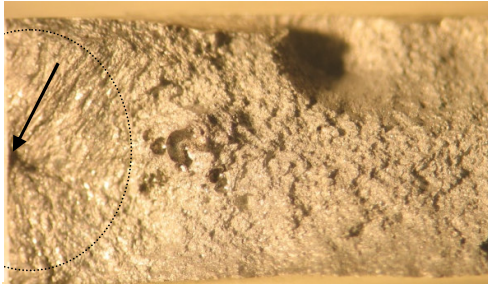


Figura 60. Zona de iniciação à fadiga por defeitos à superfície (MIG_SR)

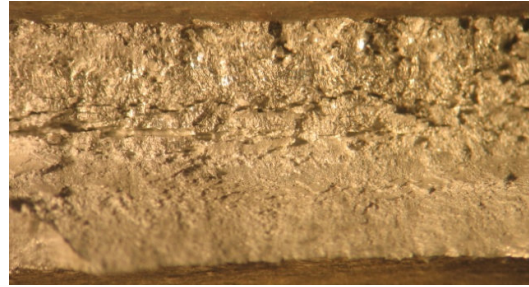


Figura 61. Zona de iniciação à fadiga pelo efeito de concentração de tensões do reforço (MIG_CR)

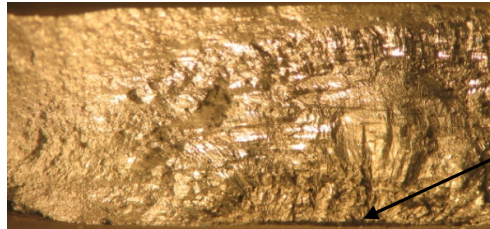


Figura 62. Zona de iniciação à fadiga por defeitos à superfície (MIG_CR+FSP)

Como se comprova nestas figuras a iniciação de fendas por fadiga, ocorre a partir de locais de maior concentração de tensões. No caso da figura 60 e 62 a partir de um poro à superfície e na fig. 61 por multinucleação de fendas causadas por concentração de tensões no pé do cordão da soldadura.

5. Conclusões

Este tópico final surge para sintetizar os principais resultados do trabalho, de maneira a que se consiga apresentar de forma breve as conclusões mais importantes a que se chegou.

Como tal e começando pelo início do trabalho a primeira conclusão a retirar é a grande dificuldade de soldar alumínio através do processo MIG. Torna-se fácil de verificar esta conclusão pois a optimização da soldadura MIG, para que esta não possuísse nem porosidade nem penetração insuficiente, abrangeu grande parte da secção de procedimentos utilizados. Apesar deste esforço a soldadura MIG que foi usada para obter os provetes pós-processados sem reforço, foi feita com os mesmos parâmetros das soldaduras que apresentavam bom aspecto microscópico e mesmo assim obteve-se com muitos defeitos. O cuidado com a limpeza da junta a soldar foi factor determinante para evitar porosidade na soldadura.

A soldadura MIG apresentava as durezas mais baixas na zona fundida e estas tinham o valor médio de 67HV.

Em relação ao pós-processamento para MIG sem reforço, conclui-se que este foi feito com velocidades de rotação e de avanço demasiado baixas, o que provocou um amaciamento excessivo no material, pois este apresenta durezas inferiores ao MIG na zona termomecanicamente afectada, e possui uma dureza de apenas 51,8 HV num dos lados do retrocesso do pino. Os ensaios de tracção vieram confirmar os resultados de dureza obtidos pois os provetes pós-processados sem reforço apresentavam apenas uma tensão de rotura de 135MPa para os provetes com defeitos e uma tensão de rotura de 203 MPa para os sem defeitos o que significa que o material se encontrava demasiado macio. De salientar que o material de base possuía 303MPa. O MIG com reforço por sua vez teve uma tensão de rotura 221MPa e o MIG com reforço pós-processado uma tensão de rotura de 225 MPa.

Como conclusão dos resultados obtidos para os provetes MIG pós-processados com reforço, verifica-se que o pós-processamento e a conseqüente alteração da

microestrutura tem vantagens na resistência à fadiga, pois apesar de possuir o reforço da soldadura conseguiu-se aumentar significativamente a vida à fadiga do material comparativamente aos resultados de MIG com reforço. Pela análise analítica realizada a ambas as séries com e sem reforço, concluiu-se que a melhoria da resistência à fadiga se deveu sobretudo à alteração de microestrutura e de eventual redução de tensões residuais existentes no material.

Ainda assim a vida à fadiga dos provetes está intimamente ligada com a sua concentração de tensões. Prova disto é o facto dos provetes que não tinham reforço, terem apresentado a maior gama de tensões de todas as séries para a mesma vida não contabilizando as séries analíticas.

Os provetes soldados por MIG sem reforço e pós-processados apresentaram vidas similares aos dos MIG sem reforço. Porém esperava-se que estes fossem superiores, tal como a recta da série MIG_CR+FSP** que foi obtida analiticamente o demonstra. Isto porque com o pós-processamento pretendia-se melhorar a microestrutura e eliminar defeitos. Uma possível explicação para os resultados obtidos prendeu-se com o facto de em pós-processamento as velocidades não poderem ser tão baixas como as que foram utilizadas neste trabalho ($v=120$ mm/min, $\Omega=500$ rpm), com o risco do material amaciar demasiado. Outra explicação e que neste caso é a que se assume como a de maior importância é o facto da zona fundida apresentar muitos defeitos, o que provoca uma ruína do material a partir dos defeitos dessa zona.

6. Referências bibliográficas

- [1] <http://pt.scribd.com/doc/8501227/Aspectos-de-Metalurgia-da-Soldagem-do-Aluminio-e-Suas-Ligas>, 01/06/2011.
- [2] Aluminum GMAW Welding Guide, Lincoln Electric, C8.100, 2006.
- [3] J. F.Oliveira Santos e L. Quintino, “Processos de soldadura”, 2ª edição, Edições Técnicas, 2006.
- [4] Mats Ericsson, 2005, “ Fatigue Strength of friction stir welded, joints in aluminium”, Tese de Doutorado, Department of Material Science and Engineering, Royal Institute of Technology, Stockholm.
- [5] J.R. Dias, “Terminologia da Soldadura em Português Europeu”, CONFLUÊNCIAS – Revista de Tradução Científica e Técnica, N.º 2,pág. 112-148, Maio 2005.
- [6] Friction Stir Welding, “Space ShuttleTechnology Summary”, pub 8-1263.
- [7] wikipedia.org/wiki/friction_stir_welding, 25/05/2011.
- [8] M.W. Mahoney and S.P.Lynch, “Friction Stir Processing”. Manager Senior Scientist, Rockwell Scientific Co.LLC, 2006.
- [9] C.M. Branco, A. A. Fernandes; P. M.S.T. Castro, “Fadiga de estruturas soldadas”, 2ª edição, Fundação Calouste Gulbenkian, 2000.
- [10] Friction Stir Welding, “Strength of FSW-joints. Comparison with MIG and TIG welds.Reference: KTH – Royal Institute of Technology”, 2001.

- [11] K.V. Mjali, *Analysing, 2007, The Effect Of Friction Stir Processing On Mig-Laser Hybrid Welded AA 6082-T6 Joints*, Tese de Mestrado em Eng. Mecânica, Faculty of Engineering, the Built Environment and InformationTechnology, Nelson Mandela Metropolitan University.
- [13] Branco, C.M, “Mecânica dos materiais”, Fundação Calouste Gulbenkian, 1985.
- [14] http://pt.wikipedia.org/wiki/Dureza_Vickers, 25/05/2011.
- [15] J.D. Costa, J.A.M. Ferreira, L.P. Borrego, “Influence of spectrum loading on fatigue resistance of AA6082 friction stir welds”, *International Journal of structural Integrity*, Vol.2 No.2, 2011.
- [16] Y. Kobayashi, M. Sakuma, Y. Tanaka; K. Matsuoka, “Fatigue strength of friction stir welding joints of aluminium alloy 6082 extruded shape”, *Welding International*, 21:1, 18-24, 2007.
- [17] P.M.G.P. Moreira, M.A.V. Figueiredo, P.M.S.T. Castro, “Fatigue behaviour of FSW and MIG weldments for two aluminium alloys”, 169-177, Elsevier, 2007.
- [18] D.Radaj, C.M.Sonsino, “Fatigue assessment of weld joints by local approaches”, Abington Publishing, 1ª publicação, 1998.

7. Anexos

7.1 Procedimento para obtenção das soldaduras MIG

O procedimento para realização das soldaduras consistiu no seguinte:

1. Realizar a lixagem das placas na zona a soldar;
2. Abrir um chanfro com um talão de 3mm nas juntas a soldar;
3. Distanciar as placas a soldar com a distância previamente definida;
4. Pingar o topo das placas a soldar utilizando para isso umas rampas de apoio;
5. Limpar a junta a soldar com álcool;
6. Meter as placas já pingadas na mesa de soldadura e fixá-las;
7. Definir parâmetros de soldadura na máquina MIG;
8. Definir a velocidade do carro de soldadura;
9. Abrir o gás de protecção na raiz das placas a soldar;
10. Iniciar soldadura;
11. Fim da soldadura;
12. Desligar o gás de protecção da raiz e o carro de soldadura;
13. Limpar através de uma escova, a soldadura realizada;
14. Abrir novo chanfro no novo lado a soldar;
15. Limpar com álcool a zona chanfrada;
16. Seguir o ponto 6 até ao ponto 13, para realizar a soldadura no lado não soldado.
A excepção é que neste lado não se liga o gás de protecção da raiz.

7.2 Procedimento para pós-processar as soldaduras MIG

O procedimento utilizado para o pós-processamento por FSP foi o seguinte:

1. Colocar a ferramenta de FSP na árvore da fresadora;
2. Colocar a chapa correspondente na mesa de fixação e apertar a mesma com o auxílio dos fixadores;
3. Verificar o aperto da chapa;
4. Ajustar os ângulos da árvore da fresadora;
5. Seleccionar a velocidade de avanço da mesa;
6. Seleccionar a velocidade de rotação da ferramenta;

7. Iniciar o movimento de rotação da ferramenta;
8. Fazer o zero da posição vertical da máquina quando a ferramenta estiver tangente à chapa;
9. Passar com a ferramenta ao longo do cordão da soldadura para garantir que está paralelo à mesa;
10. A partir do ponto pretendido iniciar a penetração da ferramenta na chapa até à profundidade desejada;
11. Iniciar o avanço da mesa;
12. Parar o movimento de avanço da mesa quando atingido o ponto pretendido;
13. Subir a ferramenta para que não fique em contacto com a chapa;
14. Parar a rotação da ferramenta;
15. Desapertar os fixadores e retirar a chapa da mesa de fixação;
16. Identificar o sentido do pós-processamento.

7.3 Procedimento para realização da análise metalográfica

Para que a análise metalográfica fosse possível recorreu-se a um microscópio óptico, modelo axiotech 100HD da marca Carl Zeiss.

O procedimento utilizado para a análise metalográfica consistiu nos seguintes passos:

1. Cortar as amostras com dimensões previamente estabelecidas;
2. Limpar as arestas das amostras para remover as rebarbas;
3. Identificar cada amostra através de um identador;
4. Meter as amostras em resina e esperar até que esta seque;
5. Fazer o polimento das amostras, usando lixas com as seguintes granulometrias, 600, 1000 e 2500;
6. Limpar as amostras com água, seguidas de uma limpeza com álcool e respectiva secagem. Este passo repete-se no fim de cada lixagem;
7. Realizar o polimento das amostras utilizando primeiro a pasta de diamante de 3 micrómetros num pano lubrificado, e de seguida fazer um polimento semelhante mas com uma pasta de diamante de 1 micrómetro;
8. Limpar as amostras com um produto de limpeza e água, seguido da passagem com álcool e consequente secagem;

9. Verificar ao microscópio a ausência de riscos na amostra;
10. Atacar a amostra com o reagente Pulton, durante 15 segundos;
11. Lavar bem a amostra com água corrente, seguida da passagem com álcool e respectiva secagem;
12. Observar ao microscópio a amostra;
13. Tirar fotografias às várias zonas da microestrutura da amostra com as seguintes ampliações: 50x e 100x;
14. Tirar fotografia à lupa com a ampliação de 0,65x.



Figura 63. Fotografia do microscópio óptico, modelo axiotech 100HD marca Carl Zeiss

7.4 Procedimento para o ensaio de tracção

O procedimento utilizado para o ensaio de tracção foi o seguinte:

1. Obtenção dos provetes;
2. Limar as faces laterais dos provetes, retirando rebarbas;
3. Introduzir os parâmetros e forma geométrica do provete no software;
4. Introduzir o provete na máquina;
5. Fechar as amarras;
6. Colocar o extensómetro no provete;
7. Iniciar o ensaio;
8. Finalizar o ensaio quando existir a rotura do provete;
9. Extrair os dados do ensaio gravados no software do computador.

7.5 Procedimento e técnica para realização do ensaio de microdurezas

Esta é uma técnica que permite a determinação da dureza do material, sujeitando este a uma indentação. Baseia-se assim, na resistência que o material oferece à penetração de uma pirâmide quadrangular, em que o ângulo de diedro das faces opostas é de 136°. Esta pirâmide é comprimida com uma determinada força contra a superfície do material, permitindo calcular a área de impressão imposta por esta segundo a equação:

$$A = \frac{d^2}{2 \sin\left(\frac{136^\circ}{2}\right)} \quad (5)$$

em que d é o comprimento médio das diagonais do losango da impressão.

A dureza Vickers é calculada com a seguinte equação:

$$HV = \frac{F}{A} = \frac{F}{\frac{d^2}{2 \sin 68^\circ}} = 1,854 \frac{F}{d^2} \quad (6)$$

onde F é a força expressa em Kgf e d expressa em milímetros [13].

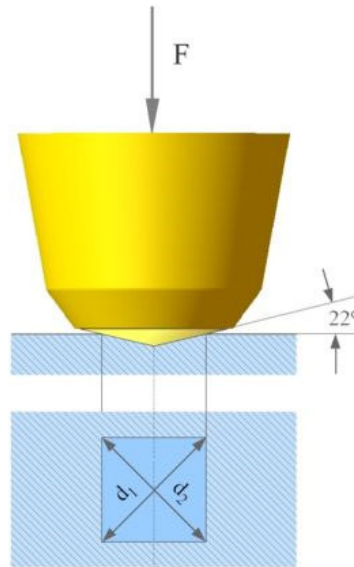


Figura 64. Esquema ensaio de Vickers[14]

O procedimento utilizado para a análise de durezas consistiu nos seguintes passos:

1. Seguir o procedimento, realização da análise Metalográfica, até ao ponto 8;
2. Proceder à marcação do centro do cordão na amostra;
3. Verificar o alinhamento entre faces da amostra;
4. Ligar o equipamento, e iluminação auxiliar;
5. Colocar uma carga de 200g na máquina e definir um tempo de indentação de 15 segundos;
6. Posicionar a amostra na base da máquina;
7. Fazer a focagem da amostra;
8. Fazer indentações de 0,5 em 0,5 milímetros;
9. Iniciar o teste;
10. Medir as diagonais do losango feito pela indentação, através das escalas que se encontram na objectiva e registar os valores em Excel;
11. Fazer as várias indentações voltando ao ponto 6;
12. Desligar o equipamento.



Figura 65. Máquina de medição de microdurezas, marca Shimadzu

7.6 Procedimento para o ensaio de fadiga

O procedimento utilizado para o ensaio de fadiga consistiu nos seguintes passos:

1. Obtenção dos provetes;
2. Limar as faces laterais dos provetes, retirando rebarbas;
3. Calcular tensão alternada e tensão média, de acordo com dimensões dos provetes e gama de tensões previamente definidas;
4. Introduzir a tensão alternada, tensão média e frequência do ciclo num software do computador ligado à consola da máquina;
5. Estabelecer e colocar os limites de segurança no software;
6. Fazer o zero da célula de carga;
7. Posicionar o provete na máquina e verificar que está vertical centrado nas amarras;
8. Fechar as amarras da máquina;
9. Iniciar o ensaio;
10. Fim do ensaio quando se atingirem as condições limite impostas à máquina.

7.7 Desenho técnico da ferramenta de FSP para MIG com reforço

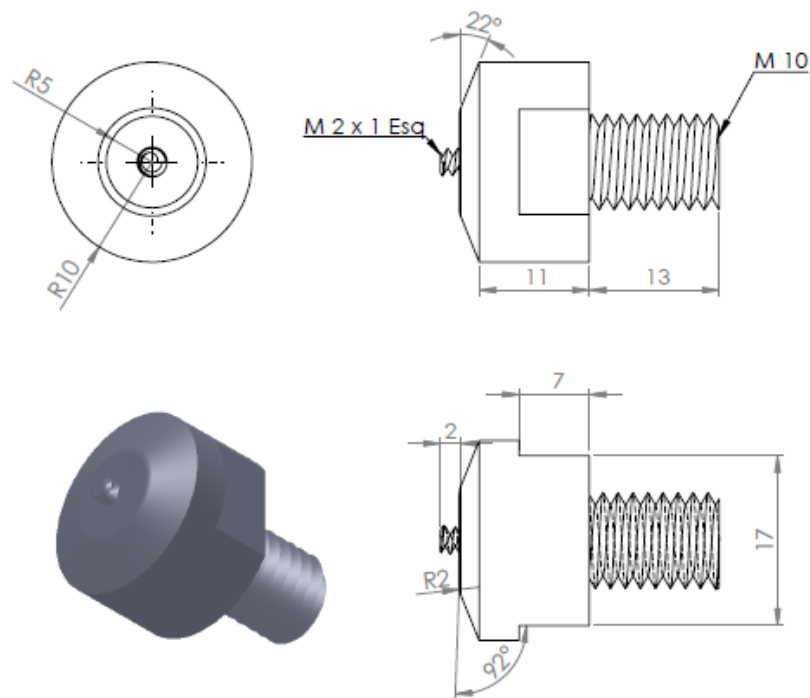


Figura 66. Desenho técnico da ferramenta de FSP para MIG com reforço

7.8 Desenho técnico da ferramenta de FSP para MIG sem reforço

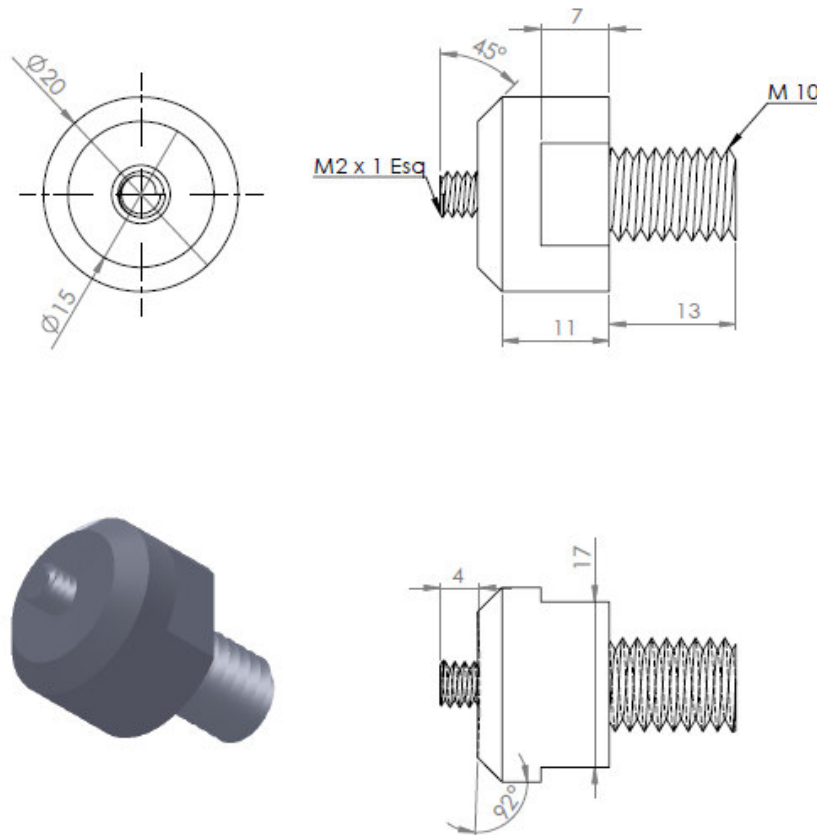


Figura 67. Desenho técnico da ferramenta de FSP para MIG sem reforço

7.9 Representação do ângulo e raio de curvatura

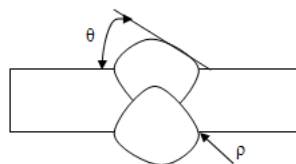






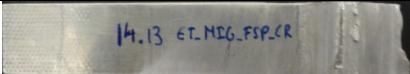
Figura 68. Representação do ângulo e raio de curvatura

7.9 Imagens da zona de fractura nos ensaios de tracção

Legenda da tabela:

- A – Iniciação na Zona Fundida;
- B – Iniciação no Pé do Cordão;
- C – Iniciação na Zona Termicamente Afectada;
- D – Sem Fractura;
- E – Iniciação do Lado do Retrocesso da Ferramenta de FSP

Tabela 7. Zona de fractura nos ensaios de tracção

Provete	Zona Fractura	Imagem
MIG Com Reforço	C	
MIG Sem Reforço	C	
MIG Sem Reforço Com Defeitos+FSP	E	
MIG Sem Reforço Com Defeitos+FSP	A	
MIG Com Reforço FSP	E	

7.10 Resultados do ensaio de fadiga

Tabela 8. Resultados do ensaio de fadiga

R= 0,02			
Série MIG Com Reforço			
Ref. ^a Provete	$\Delta\sigma$	Nr	Local de Fractura
12.1	150	33045	B
12.2	120	101339	B
12.3	100	255575	B
12.4	85	552271	B
12.5	150	28776	B
12.6	120	87513	B

12.7	100	292492	B
12.8	75	2999964	D
12.9	85	1316970	B
Série MIG Sem Reforço			
10.3	180	52458	A
10.7	180	76447	A
10.5	150	102489	A
10.4	120	675594	A
10.1	120	762385	A
10.6	150	88825	A
10.8	135	150229	A
10.9	135	284469	A
Série MIG Pós-processado Sem Reforço			
13.0	120	235279	E
13.3	100	1408453	A
13.4	100	2000000	D
13.5	120	1040305	E
13.1	150	60	A
13.2	120	52072	A
13.6	135	57	A
13.7	135	5013	A
Série MIG Pós-processado Com Reforço			
14,2	120	166658	B
14,3	120	211212	B
14,4	100	617873	A
14,5	135	78118	C
14,6	135	135834	B
14,7	100	879919	C
14,8	90	2000000	D
14,9	150	61713	B
14,10	150	71374	B
14,11	90	3515000	D

7.11 Vida à fadiga da série MIG pós-processada e sem reforço

Como esta é uma série particular em termos de resultados surge a necessidade de representar os pontos graficamente, visto que existem resultados muito díspares. Para se perceber a razão porque não se podem retirar conclusões importantes desta série apresenta-se a figura 69.

A figura traduz exactamente o que foi dito sobre este assunto no capítulo 4, pois existiram ensaios que fracturaram demasiado cedo. Por este facto não se incluíram no capítulo 4, pois como estão representados em escala logarítmica para dar importância a estes pontos iria dar-se menos aos outros que eram os que realmente interessavam, por este motivo apenas se encontram apresentados em anexo.

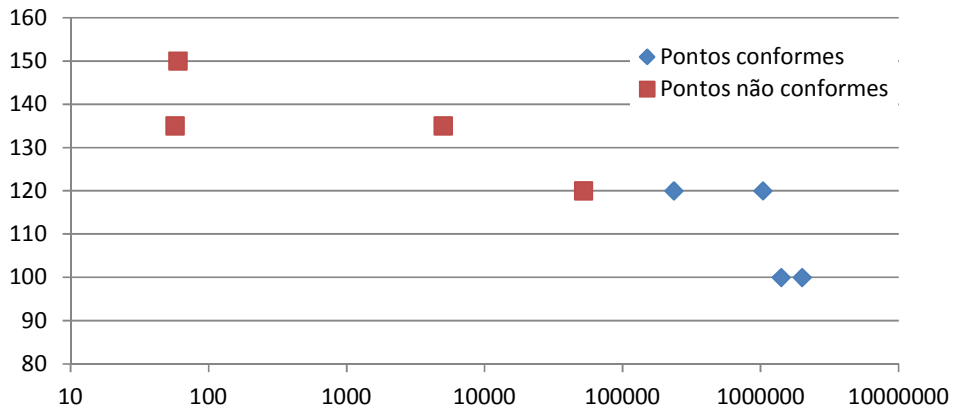


Figura 69. Vida à fadiga da série MIG pós-processada sem reforço

7.12 Posicionador para CNC

O posicionador para a CNC de 3 eixos, consiste numa mesa que possui dois graus de liberdade, permitindo assim colocar a ferramenta de pós-processamento na posição pretendida. Assim com os 3 eixos da CNC mais os dois extra do posicionador torna-se este posicionamento possível.

Na figura 70 encontra-se fixada ao posicionador uma junta de canto apenas para efeito ilustrativo.

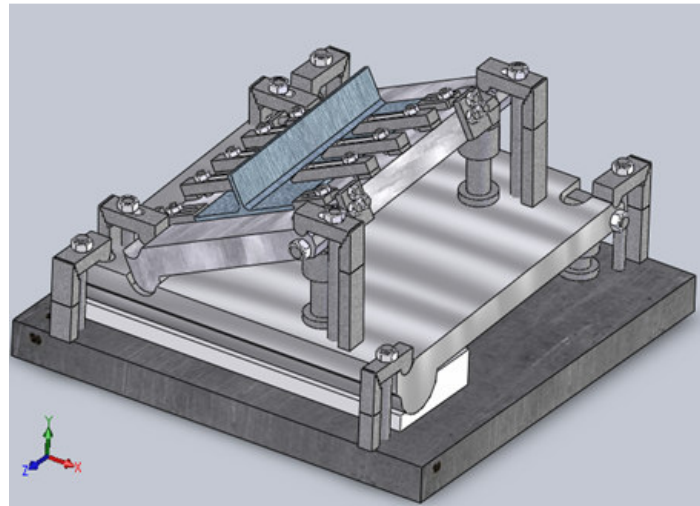


Figura 70. Posicionador para junta soldada numa CNC