



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 T soldadas por MIG na liga AA6082**

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica na Especialidade de Sistemas de Produção

**Autor**

**João Pedro Vieira Rangel**

**Orientadores**

**José Domingos Moreira da Costa**

**José António Martins Ferreira**

**Júri**

<b>Presidente</b>	<b>Professora Doutora Ana Paula Bettencourt Amaro</b> Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra <b>Professor Doutor José Domingos Moreira da Costa</b> Professor Associado com Agregação da Universidade de Coimbra <b>Professor Doutor José António Martins Ferreira</b>
<b>Vogais</b>	<b>Professor Catedrático da Universidade de Coimbra</b> <b>Professor Doutor Altino de Jesus Roque Loureiro</b> Professor Associado com Agregação da Universidade de Coimbra

**Coimbra, Julho, 2012**

## Agradecimentos

O trabalho realizado só foi possível devido ao empenho e apoio de algumas pessoas a quem não posso deixar de agradecer.

Aos Professores José D. M. Costa e José António Martins Ferreira, meus orientadores, pelo apoio e disponibilidade, bem como pelo conhecimento que me transmitiram.

Ao Professor Altino J. R. Loureiro, pelo apoio dado na área da soldadura.

Aos meus colegas Joel Silva e Bruno Quintino pela companhia e ajuda.

À Rita um especial obrigado.

Agradeço à minha família por tudo e especialmente pelo seu apoio.

Este trabalho é financiado por fundos FEDER – através do Programa Operacional Factores de Competitividade – COMPETE e por Fundos Nacionais através da FCT – Fundação para a Ciência e a Tecnologia no âmbito do Projecto “PTDC/EME-PME/114605/2009; COMPETE: FCOMP-01-0124-FEDER-015165”



## Resumo

A soldadura por fricção linear, FSW, surge nos dias de hoje como um processo de ligação, de grande utilidade e futuro. A sua principal utilização é na união de chapas de alumínio, onde se regista um elevado sucesso da técnica.

Existem algumas limitações a este processo, o que levou ao aparecimento da técnica de processamento por fricção linear, FSP. Deste modo, é possível obter alguns dos efeitos benéficos do FSW através do pós processamento de juntas previamente soldadas.

Neste trabalho irá ser estudada a possível melhoria da resistência à fadiga de juntas T, de alumínio AA6082-T651, soldadas a MIG, e posteriormente processadas por FSP. Para tal, serão realizadas análises morfológicas, ensaios de dureza, ensaios de tração e ensaios de fadiga para  $R=0$  e  $R=0,4$ , em provetes soldados a MIG e provetes soldados a MIG e pós processados.

Concluiu-se que o pós processamento aumenta a resistência à fadiga das juntas soldadas a MIG, através da modificação da microestrutura e da eventual redução de tensões residuais existentes.

**Palavras-chave:** FSP, FSW, AA6082-T651, MIG, Resistência à fadiga.

## Abstract

Friction stir welding, FSW, is nowadays a bonding technique with great utility and future. Its main utilization is the aluminium plate bonding since its very effective.

The limitations of the friction stir welding led to the invention of the friction stir processing, FSP. With this technique it is possible to obtain some of the benefic effectes of FSW with post processing of previously welded joints.

This thesis will study the possible improvement in fatigue resistance of T joints, made in AA6082-T651 aluminium, welded by MIG process and post processed by FSP. Aiming at this, morphological analysis, hardness tests, tension tests and fatigue tests with  $R=0$  and  $R=0,4$  will be performed in MIG welded and MIG welded and post-processed specimens.

It was concluded that the fatigue resistance of the post-processed specimens was enhanced by the microstructural modification and by the reduction of probable existing residual stresses.

**Keywords** FSP, FSW, AA6082-T651, MIG, Fatigue resistance.

## Índice

Índice de Figuras .....	vi
Índice de Tabelas .....	viii
Simbologia e Siglas .....	ix
Simbologia.....	ix
Siglas .....	ix
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Introdução .....	1
1.2. Objetivos.....	2
1.3. Estrutura.....	2
2. Estado da arte.....	3
2.1. Alumínio .....	3
2.2. Ligas de alumínio.....	3
2.3. Série 6XXX.....	4
2.4. Soldadura de alumínio.....	5
2.4.1. Defeitos de soldadura .....	6
2.5. Soldadura MIG .....	8
2.5.1. Vantagens .....	8
2.6. Soldadura por fricção linear FSW .....	9
2.7. Pós processamento por fricção linear, FSP.....	11
2.7.1. Zona processada .....	11
2.8. Fadiga.....	13
2.8.1. Factor de concentração de tensões.....	13
2.8.2. Fadiga na liga AA6082.....	14
3. Procedimento experimental .....	16
3.1. Soldadura MIG .....	16
3.2. Pós processamento por fricção linear .....	17
3.3. Análise de durezas .....	18
3.4. Ensaio de tração e fadiga.....	19
3.4.1. Ensaio de tração .....	20
3.4.2. Ensaio de fadiga .....	21
4. Apresentação e Discussão de Resultados .....	23
4.1. Optimização de parâmetros .....	23
4.1.1. Parâmetros da soldadura MIG .....	23
4.1.2. Desenho da ferramenta para FSP.....	24
4.2. Análise morfológica.....	25
4.2.1. Análise morfológica da série MIG .....	25
4.2.2. Análise morfológica da série pós processada.....	26
4.3. Análise de microdureza .....	27
4.3.1. Microdurezas em MIG.....	28

---

4.3.2. Microdurezas em MIG+FSP .....	30
4.3.3. Comparação .....	33
4.4. Ensaio de tração .....	34
4.5. Ensaio de Fadiga .....	36
4.5.1. Transformação de tensões nominais em tensões locais .....	37
4.5.2. Ensaio de fadiga às juntas MIG .....	37
4.5.3. Ensaio de fadiga às juntas MIG+FSP .....	38
4.5.4. Comparação entre MIG e MIG+FSP .....	41
5. Conclusão .....	45
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	46
ANEXO A .....	48
ANEXO B .....	50

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Exemplo do defeito de porosidade.....	6
Figura 2.2. Exemplo de ângulo de concordância.....	7
Figura 2.3. Exemplo da propagação de uma fenda. ....	7
Figura 2.4. Exemplo de falta de penetração. ....	7
Figura 2.5. Esquema do processo de soldadura MIG[3]. ....	8
Figura 2.6. Esquema do processo de soldadura FSW.....	9
Figura 2.7. Zona processada por FSP. A- nugget, B - zona afetada termomecânicamente, C - zona afetada pelo calor.....	11
Figura 2.8. Nugget obtido por FSP.....	11
Figura 2.9. Zona termomecânicamente afetada obtida por FSP.....	12
Figura 2.10. Zona afetada pelo calor obtida por FSP. ....	12
<b>Figura 2.11.</b> Esquema representativo das variáveis no cálculo de $kt$ para uma junta em T com penetração total[15]. ....	14
Figura 2.12. Resultados de teste à fadiga[16].....	15
Figura 3.1. Preparação de junta utilizada na soldadura MIG. ....	16
Figura 3.2. Ferramenta A e B para FSP.....	18
Figura 3.3. Exemplo da geometria dos provetes utilizados. ....	19
Figura 3.4. Provetes com e sem rebarba. ....	20
Figura 3.5. Máquina Instron utilizada nos ensaios de tração. ....	20
Figura 3.6. Máquina Instron utilizada nos ensaios de fadiga. ....	21
Figura 4.1. Pormenor da zona do pé pós processado pela ferramenta A (em A) e B (em B). .....	24
Figura 4.2. Desenho 2D das modificações da ferramenta. ....	25
Figura 4.3. Micrografias da série MIG. ....	26
Figura 4.4. Micrografias da série pós processada.....	27
Figura 4.5. Zona 1 a azul, zona 2 a verde e zona 3 a vermelho.....	28
Figura 4.6. Perfil de durezas da zona 1 em MIG.....	28
Figura 4.7. Perfil de durezas da zona 2 em MIG.....	29
Figura 4.8. Perfil de durezas da zona 3 em MIG.....	30
Figura 4.9. Perfil de durezas para a zona 1 em MIG+FSP. ....	31

---

Figura 4.10. Perfil de durezas da zona 2 em MIG+FSP.....	32
Figura 4.11. Perfil de durezas da zona 3 em MIG+FSP.....	32
Figura 4.12. Comparação dos perfis de durezas na zona 1.....	33
Figura 4.13. Comparação dos perfis de durezas na zona 2.....	34
Figura 4.14. Comparação dos perfis de durezas na zona 3.....	34
Figura 4.15. Gráfico representativo dos ensaios de tração realizados.....	35
Figura 4.16. Resultados dos ensaios de fadiga realizados em juntas MIG, para tensões nominais. ....	37
Figura 4.17. Resultados dos ensaios de fadiga realizados em juntas MIG, para tensões locais.....	38
Figura 4.18. Ensaio de fadiga com R=0 para séries processadas pela ferramenta A e B, para tensões nominais.....	39
Figura 4.19. Ensaio de fadiga com R=0 para séries processadas pela ferramenta A e B, para tensões locais.....	39
Figura 4.20. Ensaio de fadiga para as séries processadas com a ferramenta B, para tensões nominais. ....	40
Figura 4.21. Ensaio de fadiga para as séries processadas com a ferramenta B, para tensões locais.....	41
Figura 4.22. Comparação entre as séries MIG e MIG+FSP para R=0 e tensões nominais. 41	
Figura 4.23. Comparação entre as séries MIG e MIG+FSP para R=0 e tensões locais. ....	42
Figura 4.24. Comparação entre as séries MIG e MIG+FSP para R=0,4 e tensões nominais. ....	43
Figura 4.25. Comparação entre as séries MIG e MIG+FSP para R=0,4 e tensões locais. ...	43



---

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1. Classificação das ligas de alumínio forjadas[1].....	4
Tabela 2.2. Propriedades mecânicas obtidas pelos autores referenciados acima [16] e [17]. .....	15
Tabela 3.1. Parâmetros finais de soldadura. ....	17
Tabela 4.1. Variação dos parâmetros de soldadura. ....	24
Tabela 4.2. Propriedades mecânicas obtidas por ensaios de tração.....	35
Tabela A.1. Parâmetros de soldadura utilizados nas várias séries.....	48
Tabela A.2. Parâmetros de soldadura utilizados nas várias séries.....	49

## SIMBOLOGIA E SIGLAS

### Simbologia

$\Delta\sigma$  – Gama de tensões aplicada

$\Delta\sigma_L$  – Gama de tensões locais aplicada

$\Delta P$  – Gama de forças aplicada

$\theta$  – Ângulo tangente ao cordão de soldadura

$\rho$  – Raio do pé do cordão de soldadura

$\sigma_n$  – Tensão nominal

$\sigma_s$  – Tensão máxima

$a$  – Constante de material

$B$  – Espessura do provete na junta soldada

$E$  – Módulo de Elasticidade

$K_f$  – Fator de concentração de tensões de fadiga

$K_t$  – Fator de concentração de tensões

$P_m$  – Carga média

$P_a$  – Carga alternada

$P_{m\acute{a}x}$  – Carga máxima

$P_{m\acute{i}n}$  – Carga mínima

$R$  – Razão de tensões

$s$  – Distância entre os dois pés da soldadura

$t$  – Espessura da chapa de alumínio

$W$  – Largura do provete na junta soldada

### Siglas

ASTM – American Society for Testing and Materials

DEM – Departamento de Engenharia Mecânica

FCTUC – Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra

FSP – Friction Stir Processing, Pós Processamento po Fricção Linear

FSW – Friction Stir Welding, Soldadura por Fricção Linear

MB – Material base

MIG – Metal Inert Gás

TIG – Tungsten Inert Gás

TWI – The Welding Institute

ZAC – Zona afetada pelo calor

ZF – Zona fundida

ZTMA – Zona termomecanicamente afetada

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1. Introdução

A soldadura é, atualmente, um dos mais importantes processos de ligação utilizado industrialmente. Este processo permite ligar dois componentes, de materiais semelhantes ou diferentes, de forma eficaz, sendo por vezes vantajoso em termos económicos em relação a outras formas de ligação. Com o aumento da competitividade em áreas como a indústria automóvel, aeronáutica ou metalomecânica, tornou-se imperativo o aperfeiçoamento deste método de ligação.

As técnicas e os equipamentos utilizados são alvo de constante aperfeiçoamento e mudança. No entanto, os métodos de soldadura mais comuns utilizam uma fonte de calor de forma a promover a ligação entre os materiais, o que leva à ocorrência de mudanças na micro estrutura do material base, adulterando as propriedades do mesmo. Surgem igualmente alguns defeitos difíceis de eliminar, como a porosidade durante a fusão e físsuras durante o arrefecimento. Em resposta a este problema, nasceu no The Welding Institute (TWI), em 1991, [1] a soldadura por fricção linear.

A soldadura por fricção linear é um processo que consiste na utilização de uma ferramenta giratória, de grande resistência mecânica, que aquece o material a unir tornando-o mais dúctil, sem originar a fusão do mesmo. Ocorre uma elevada deformação plástica que promove o escoamento do material e a sua mistura. No entanto, não existindo fusão as propriedades mecânicas dos elementos a unir mantêm-se. Este processo é muito utilizado em ligas de alumínio devido à sua difícil soldabilidade.

São reconhecidas algumas vantagens inerentes a este processo como a eliminação de defeitos, o refinamento do grão e mesmo a melhoria na geometria do cordão obtido. Existem igualmente algumas limitações, como o facto de alguns tipos de junta serem de difícil realização, grandes extensões serem difíceis de obter, grandes espessuras difíceis de soldar e locais de difícil acessibilidade trazerem grandes dificuldades à sua aplicação. Por este motivo, surgiu a técnica de FSP, ou seja, a utilização da técnica de FSW como pós-

processamento de juntas sodadas. Este processo permite utilizar as vantagens do FSW em juntas previamente soldadas por processos convencionais.

## **1.2. Objetivos**

O presente trabalho tem como principal objetivo analisar as possíveis melhorias na resistência à fadiga de juntas soldadas MIG quando são submetidas a pós processamento pela técnica do Processamento por Fricção Linear (PFL). Para alcançar este objectivo serão soldadas placas na liga de alumínio AA6082-T651 por MIG, adotando juntas T. Posteriormente serão efetuadas passagens FSP, nos pés dos cordões de soldadura, utilizando uma ferramenta especificamente fabricada para este processo. Este procedimento tem como objetivos:

Estudar as alterações promovidas pelo processo FSP, designadamente no que se refere á alteração de microestrutura, redução de porosidade, e melhoria no raio de curvatura do pé do cordão.

Comparar o perfil de durezas entre as juntas obtidas por MIG e as juntas obtidas por MIG e posteriormente processadas por FSP.

Comparar a resistência à tração entre as juntas obtidas por MIG e as juntas obtidas por MIG e posteriormente processadas por FSP.

Comparar a resistência à fadiga entre as juntas obtidas por MIG e as juntas obtidas por MIG e posteriormente processadas por FSP.

## **1.3. Estrutura**

O capítulo 2 introduzem-se os tópicos necessários para a compreensão do trabalho realizado através de uma breve revisão bibliográfica.

No capítulo 3 é descrito o procedimento experimental.

Já no capítulo 4 apresentam-se e discutem-se os resultados obtidos através de ensaios de dureza, tração e fadiga.

No capítulo 5 são tiradas as principais conclusões do trabalho realizado.

## 2. ESTADO DA ARTE

Neste capítulo irá realizar-se um breve enquadramento dos temas fulcrais para a realização do trabalho. É feita uma breve revisão bibliográfica de forma a que o leitor possa compreender todo o trabalho realizado. Abordar-se-á o material, alumínio, as suas ligas e tratamentos, os processos de soldadura utilizados, MIG, FSW e a variante FSP e alguns conceitos de fadiga.

### 2.1. Alumínio

O alumínio é o metal mais abundante na crosta terrestre. É um metal de baixa densidade, com cerca de um terço da densidade do aço. Tem um baixo ponto de fusão, 660°, o que torna mais fácil a obtenção de ligas a partir deste metal. A boa resistência que apresenta à corrosão, devido a formação de uma camada de alumina na sua superfície é também uma propriedade a ter em conta e torna-o impermeável à ação da humidade e do oxigénio. Para além disto é reciclável, não magnético e atóxico. Tem também uma boa capacidade refletora, acima de 80%. As propriedades aqui descritas, aliadas à sua relativa resistência, tornam-no num material muito desejável para a engenharia e a indústria em geral.

Este metal não é encontrado no seu estado puro mas sim sob a forma de bauxite, sendo que esta é, por sua vez, transformada em alumina através do método de Bayer ou lixiviação química. Por sua vez a alumina é transformada em alumínio através do processo de Hall-Héroult, descoberto em 1886 nos Estados Unidos por Hall e em França por Héroult. O processo consiste na eletrólise da alumina dissolvida em criolita.

### 2.2. Ligas de alumínio

O alumínio é utilizado na generalidade das suas aplicações sob a forma de liga. Os elementos adicionados ao alumínio são escolhidos consoante as propriedades que se querem obter da liga [2]. Os mais utilizados são:

O cobre, de forma a aumentar a condutibilidade térmica e a resistência a tração

O magnésio, para facilitar a sua soldabilidade e aumentar a resistência a corrosão e a sua dureza.

O manganês, que promove o aumento da resistência mecânica através do endurecimento por solução sólida.

O silício, para haver endurecimento da liga por tratamento térmico e ainda para melhorar a resistência à corrosão quando combinado com o magnésio.

O zinco, conjuntamente com o magnésio forma compostos intermetálicos que são responsáveis pelo endurecimento das ligas quando tratadas termicamente.

As ligas de alumínio para trabalho mecânico são classificadas, segundo a ANSI, por um sistema de quatro dígitos. O primeiro dígito indica o principal elemento de liga, que corresponde também ao número da série. O segundo dígito corresponde às modificações efetuadas na liga, sendo zero se for a liga original. Os dois últimos dígitos identificam as diferentes ligas dentro de cada série.

Estas são também divididas entre ligas termicamente tratáveis ou não tratáveis, como se pode ver na tabela 2.1.

**Tabela 2.1.** Classificação das ligas de alumínio forjadas[1].

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

### 2.3. Série 6XXX

No presente trabalho irá ser utilizada a liga de alumínio AA6082-T651.

Esta liga é termicamente tratável e os principais elementos de liga são o magnésio e o silício, com percentagens até 1%. É uma liga de média resistência, sendo a mais resistente da série 6XXX, é especialmente utilizada em aplicações soldadas, para máquina e em componentes estruturais.

O tratamento térmico dado a esta liga, T651, consiste na realização de um aquecimento na ordem dos 400 – 500°C durante 1-2 horas, solubilização, seguido de uma tempera até à temperatura ambiente. Em seguida realiza-se um tratamento de precipitação em temperaturas na ordem dos 150-180°C durante algumas horas ou até dias, denominado envelhecimento.

Esta liga é propensa a fissurar a quente, sendo que este problema pode ser ultrapassado através da escolha do metal de adição, com elevado teor em silício, e do tipo de junta utilizado.

## **2.4. Soldadura de alumínio**

O alumínio e as suas ligas podem ser soldados por diversos processos, no trabalho em questão iremos focar-nos no processo de soldadura MIG, Metal Inert Gás.

É necessário compreender algumas propriedades do alumínio e das suas ligas de forma a executar corretamente soldaduras com este material. O alumínio é facilmente oxidável, apresenta grande solubilidade de hidrogénio quando se encontra no estado líquido, é um metal não magnético e atóxico.

Devido à fácil oxidação e conseqüente formação de uma camada de óxido de alumínio, alumina, na superfície da peça a soldar é necessária a limpeza desta camada na zona onde se efetua a soldadura.

A solubilidade do hidrogénio quando o alumínio se encontra fundido é muito alta, já quando o alumínio se encontra no estado sólido é muito baixa. Este fenómeno proporciona a ocorrência de porosidade, uma vez que o hidrogénio se dissolve no banho de fusão que ocorre durante a soldadura mas acaba por sair na sua forma gasosa quando ocorre a solidificação, originando assim porosidades.

A elevada condutibilidade térmica do alumínio torna-o muito sensível a variações dos parâmetros de soldadura, ou seja, variações no calor fornecido à peça originam variações na penetração e fusão do material. Devido a este facto, embora a temperatura de fusão do alumínio seja relativamente baixa, é necessário fornecer bastante



calor no processo de soldadura, uma vez que a sua elevada condutibilidade térmica faz com que o calor se dissipe muito rapidamente por toda a peça.

O seu coeficiente de dilatação é o dobro do do ferro, o que torna o alumínio um metal difícil de soldar, uma vez que existe uma contração de cerca de 6% do volume, quando se dá a solidificação do banho de soldadura. É então necessário fixar as juntas a soldar, para não haver desalinhamentos e para minimizar o empeno.

### **2.4.1. Defeitos de soldadura**

Quando se efetuam soldaduras em alumínio é provável o aparecimento de defeitos inerentes a este processo. Estes defeitos induzem concentrações de tensões que podem ter uma influência negativa no comportamento à fadiga das juntas soldadas. Como principais defeitos que ocorrem durante a soldadura temos a porosidade, os defeitos de forma, as fendas e a falta de penetração.

#### **2.4.1.1. Porosidade**

Na figura 2.1 é apresentada uma fotografia que apresenta a zona fundida de uma soldadura MIG com o aparecimento de porosidade.

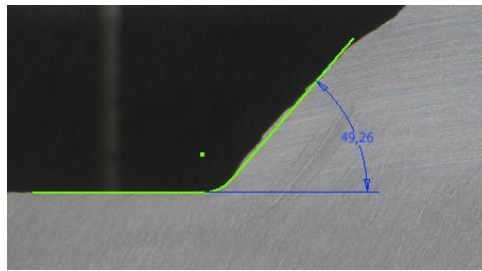


**Figura 2.1.** Exemplo do defeito de porosidade.

A porosidade é causada como já referido atrás pela existência de hidrogénio a mais quando se dá a solidificação do alumínio fundido. A posição das porosidades existentes é mais importante que o seu tamanho, tornando a junta soldada mais frágil se ocorrer a existência de porosidade na zona superficial da mesma.

#### **2.4.1.2. Defeitos de forma**

É apresentado na figura 2.2 um exemplo de um ângulo de concordância para uma soldadura MIG.

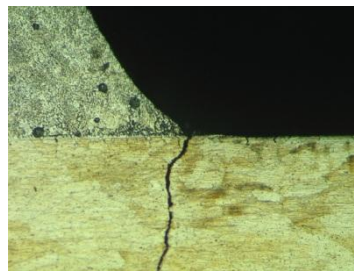


**Figura 2.2.** Exemplo de ângulo de concordância.

A forma que o reforço adquire tem grande influência na resistência da junta soldada. Esta é normalmente expressa através do ângulo de concordância entre a superfície do cordão e o material base.

#### **2.4.1.3. Fendas**

A figura 2.3 mostra uma fenda.

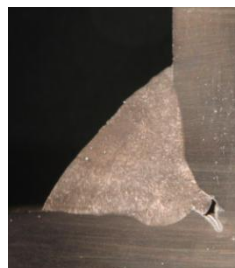


**Figura 2.3.** Exemplo da propagação de uma fenda.

Quando ocorre a solidificação é possível que, devido à contração, ocorram fendas no interior ou exterior da peça.

#### **2.4.1.4. Falta de penetração**

Na figura 2.4 é visível o defeito causado por falta de penetração da soldadura.

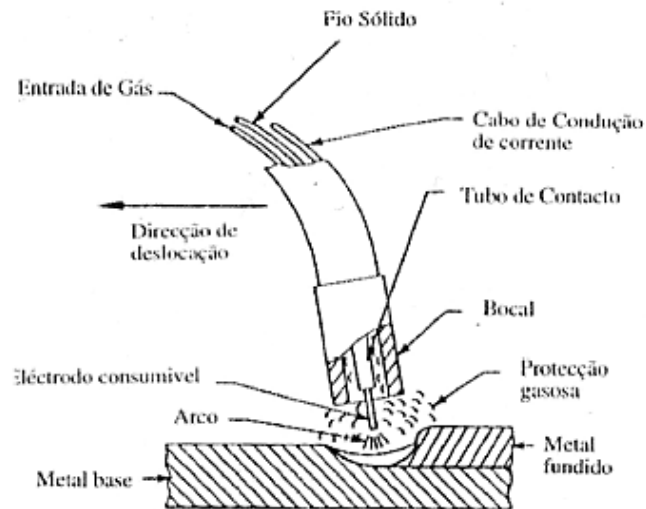


**Figura 2.4.** Exemplo de falta de penetração.

A corrente de soldadura insuficiente ou a utilização de uma velocidade de soldadura muito elevada pode levar ao aparecimento deste defeito, por falta de penetração em profundidade.

## 2.5. Soldadura MIG

Apresenta-se um esquema do processo de soldadura MIG na figura 2.5.



**Figura 2.5.** Esquema do processo de soldadura MIG[3].

A soldadura MIG é um dos processos mais utilizados na soldadura de ligas de alumínio. Este processo é assim denominado devido à existência de um gás de protecção na zona do arco eléctrico, que protege a zona fundida. É um processo semiautomático ou automático. A tocha é uma pistola com alimentação automática de arame consumível, o eléctrodo, isto torna o arco eléctrico estável uma vez que o fio é alimentado sempre à mesma velocidade. Este processo permite uma elevada densidade de corrente devido ao pequeno diâmetro do arame consumível, ou seja, uma elevada taxa de deposição de material.

É comum utilizar-se corrente contínua neste tipo de soldadura, sendo o arame consumível o polo positivo. A corrente utilizada em MIG pode variar entre os 50 A e os 600 A e as tensões entre os 15 V e os 32V.

### 2.5.1. Vantagens

Existem claras vantagens na utilização do processo MIG em soldadura:

- Possibilidade de automação da soldadura.
- Possibilidade de soldar em todas as posições.
- Elevada taxa de deposição de material.
- Grandes velocidades de soldadura.

- Não é necessária a remoção da escória no final.
- Menores perdas de elétrodo, quando comparado a outros processos.

## 2.6. Soldadura por fricção linear FSW

A soldadura por fricção linear, tem o seu início em 1991 no The Welding Institute [4], consiste numa das mais inovadoras formas de unir materiais. Tem como base um pino rotativo, de grande resistência mecânica, que ao girar dentro do material a unir, friccionando-o, aquece este mesmo material tornando-o mais macio devido à deformação plástica intensa, ao ponto de haver a “mistura” do material no estado sólido através do seu escoamento em torno do eixo de soldadura [5].

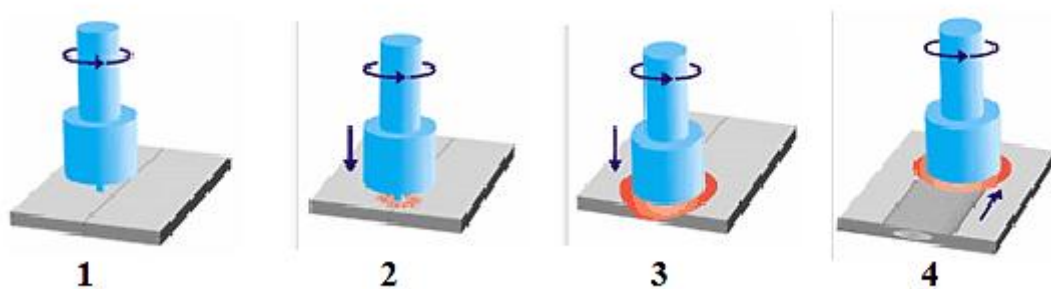


Figura 2.6. Esquema do processo de soldadura FSW.

A figura 2.6 demonstra o processo utilizado neste tipo de soldadura. A primeira imagem mostra o posicionamento inicial da ferramenta sobre a zona de ligação, estando a ferramenta já em rotação (1). É então que se pressiona a ferramenta com uma força axial (2), de forma a haver penetração de todo o pino roscado e o seu *shoulder*, base, pressiona a superfície da peça (3). A ferramenta é então deslocada linearmente, de forma a que seja executada a soldadura (4). No final da soldadura a ferramenta é elevada para sair da peça e nessa zona fica um furo do diâmetro do pino roscado da ferramenta. Este furo é chamado de furo remanescente.

Ao longo de todo o processo apenas a base e o pino estão em contacto com a peça a soldar. Assim sendo, é baixo o número de parâmetros a controlar neste tipo de soldadura quando comparado com outros processos convencionais.

É controlável a velocidade de rotação da ferramenta, a pressão axial de forjagem, a velocidade de avanço linear e o ângulo de ataque. Estes parâmetros são transmitidos à ferramenta através do seu corpo que também tem como função a dissipação do calor que ocorre deste processo.

A velocidade de rotação e a de avanço condicionam a temperatura de soldadura. O quociente entre elas é proporcional ao aumento da temperatura, ou seja, geralmente o aumento da velocidade de rotação ou a diminuição do avanço aumentam a temperatura de soldadura [6].

M. Ericsson et al. [7], apresenta um estudo na mesma liga que a utilizada neste trabalho, AA6082, onde através de diferentes velocidades de avanço conclui que a resistência à fadiga é independente deste parâmetro. Este facto pode levar a uma maior utilização industrial deste processo, uma vez que o aumento da produtividade poderá não ter influência na qualidade final da soldadura.

K. Kumar et al. [8], demonstra o efeito da pressão axial dizendo que o aumento da carga é benéfico para o desaparecimento de defeitos inerentes a este processo.

O ângulo de ataque permite aumentar a pressão aplicada pela base da ferramenta, tornando o acabamento da soldadura menos rugoso e consequentemente melhor.

É de referir ainda a ferramenta. A sua geometria pode ter influência sobre os resultados obtidos, uma vez que é esta que dá o acabamento final à soldadura e modifica a geometria associada ao cordão de soldadura. Este acabamento pode ser prejudicial, por poder induzir tensões na superfície da soldadura[9].

#### **2.6.1.1. Vantagens**

Algumas das vantagens apresentadas por este processo são:

- Composição química e propriedades mecânicas das ligas soldadas semelhantes às finais.
- Temperatura atingida mais baixa que a de fusão, não existem os defeitos inerentes à fusão, porosidade, fendas e inclusões.
- Baixo índice de empenamento e distorção.
- Não necessita de gás de proteção nem de material de adição.
- Não necessita de mão-de-obra especializada.

- Não existe a formação de fumos ou salpicos.

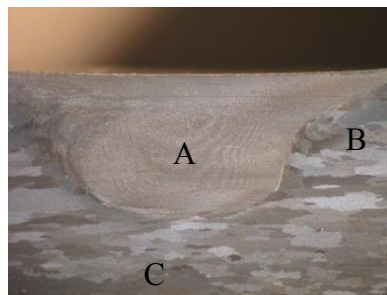
## 2.7. Pós processamento por fricção linear, FSP

A técnica de pós processamento por fricção linear ou FSP provém diretamente da técnica de FSW, no entanto, tem como intuito a modificação local da microestrutura da junta soldada e material base adjacente e não a sua ligação. Desta forma pode eliminar defeitos provenientes da soldadura, homogeneizar e refinar a microestrutura existente [10]. A resistência à fadiga e a ductilidade do material pós processado são assim aumentadas.

O funcionamento desta técnica é em tudo equivalente ao funcionamento do FSW.

### 2.7.1. Zona processada

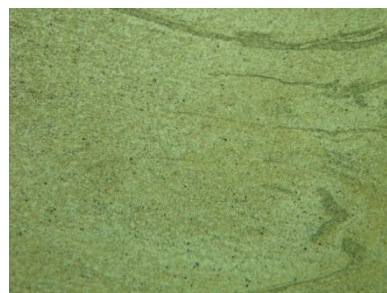
A zona processada por FSP pode dividir-se em três zonas distintas, como se indica na figura 2.7.



**Figura 2.7.** Zona processada por FSP. A- nugget, B - zona afetada termomecânicamente, C - zona afetada pelo calor.

#### 2.7.1.1. Nugget

Na figura 2.8 mostra-se o nugget formado através da utilização de FSP.

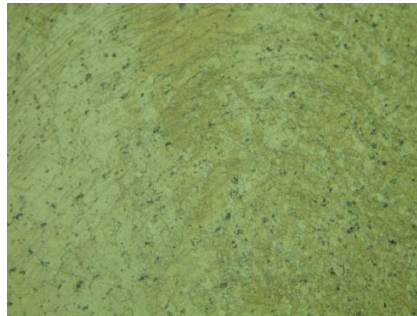


**Figura 2.8.** Nugget obtido por FSP.

Esta é a zona onde o pino roscado melhor misturou o material, uma zona em forma de bacia ou de forma elíptica, como descrevem Sato et al. [11], Rhodes et al. [12] e Mahoney et al. [13]. É também onde ocorre o maior refinamento de grão.

#### **2.7.1.2. Zona termomecânicamente afetada**

A zona termomecânicamente afetada é apresentada na figura 2.9.

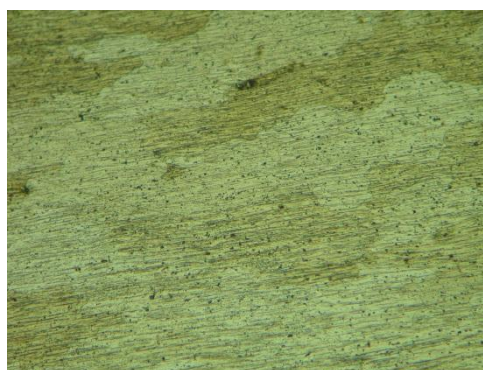


**Figura 2.9.** Zona termomecânicamente afetada obtida por FSP.

Zona de transição entre a zona do nugget e a do material base, esta é caracterizada pela não recristalização do material, devido a insuficiente tensão de deformação. É possível, no entanto, que exista dissolução de alguns precipitados existentes, devido à alta temperatura a que está sujeita esta zona. Os grãos constituintes desta zona podem apresentar elevada densidade de sub-fronteiras [11].

#### **2.7.1.3. Zona afetada pelo calor**

Na figura 2.10 é visível a zona afetada pelo calor.



**Figura 2.10.** Zona afetada pelo calor obtida por FSP.

Esta zona está apenas sob o efeito da temperatura. Pode ser definida como a zona em que as temperaturas rondam os 250°C para uma liga de alumínio tratável termicamente, Mahoney et al. [13].

## 2.8. Fadiga

A ruína de sistemas mecânicos por fadiga é uma das principais causas da sua falha. Assim sendo é de grande importância o seu estudo, compreensão e prevenção.

Segundo a ASTM [14]:

*“Fadiga é um processo de alteração estrutural permanente, progressivo e localizado, que ocorre num material sujeito a condições que produzem tensões ou extensões dinâmicas num ponto ou em vários pontos, e que pode culminar em fendas ou numa fractura completa após um número suficiente de variações de carga”.*

Devido à fadiga a fratura dá-se para tensões cíclicas muito mais baixas do que seria espectável para tensões estáticas. Esta acontece depois da nucleação de fendas, que depois de se propagarem causam a rotura.

O processo de ruína por fadiga pode então ser caracterizado em quatro fases:

- Nucleação da fissura
- Crescimento microscópico da fissura
- Propagação da fissura
- Rotura final

A nucleação da fenda dá-se numa zona onde exista um defeito interno ou uma concentração de tensões devido a um defeito geométrico. Caso não exista um defeito interno, ou o seu tamanho não permita a iniciação, esta dar-se-á na superfície da peça, zona onde a tensão é máxima.

De forma a evitar a rotura por fadiga deve-se evitar a sua nucleação.

### 2.8.1. Factor de concentração de tensões

O factor de concentração de tensões teórico,  $k_t$ , é definido como a razão que existe entre a tensão máxima existente na estrutura  $\sigma_s$ , e a tensão nominal  $\sigma_n$ .

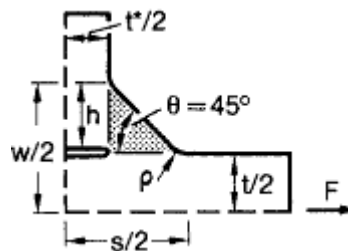
$$k_t = \frac{\sigma_s}{\sigma_n}, \quad (2.1)$$

Sabe-se que os factores de maior importância no cálculo da concentração de tensões são o raio de concordância,  $\rho$ , do cordão de soldadura, no seu pé, e o ângulo,  $\theta$ , tangente ao cordão de soldadura.



Yung e Lawrence [15] propõem a seguinte expressão para determinar  $k_t$  para o caso de juntas soldadas em T com penetração total, equação 2.2, na figura 2.11 são representadas as variáveis inerentes a este cálculo:

$$k_t = 1,03 + 0,27\theta^{0,22} \times \left(\frac{\rho}{t}\right)^{-0,47} \times \left(\frac{s}{t}\right)^{0,18}, \quad (2.2)$$



**Figura 2.11.** Esquema representativo das variáveis no cálculo de  $k_t$  para uma junta em T com penetração total [15].

O factor de concentração de tensões prático ou de fadiga,  $k_f$ , é a comparação entre a resistência de um corpo com um entalhe e sem um entalhe. De acordo com Peterson a relação entre o  $k_f$  e o  $k_t$  é obtida pela equação 2.3 [15]:

$$k_f = 1 + \frac{k_t - 1}{1 + \frac{a}{\rho}}, \quad (2.3)$$

Sendo  $a$  uma constante que depende do material.

### 2.8.2. Fadiga na liga AA6082

Para efeitos de comparação, foi necessário tentar encontrar um estudo que demonstrasse vantagens na utilização do processo de fricção linear na soldadura da liga utilizada. Foi encontrado um estudo realizado por M. Ericsson, R. Sandstrom [16]. Este estudo, embora tivesse como finalidade comparar a resistência a fadiga com a variação da velocidade de soldadura, demonstra que a soldadura por fricção linear tem melhores resultados em termos de resistência à fadiga do que processos como o MIG e o TIG. De referir também o estudo feito por J. D. Costa et. al. [17] que demonstra melhoria da resistência à fadiga para juntas soldadas por FSP. Fica ainda registado, como seria de esperar, que nenhum destes processos consegue resultados tão bons como o material base.

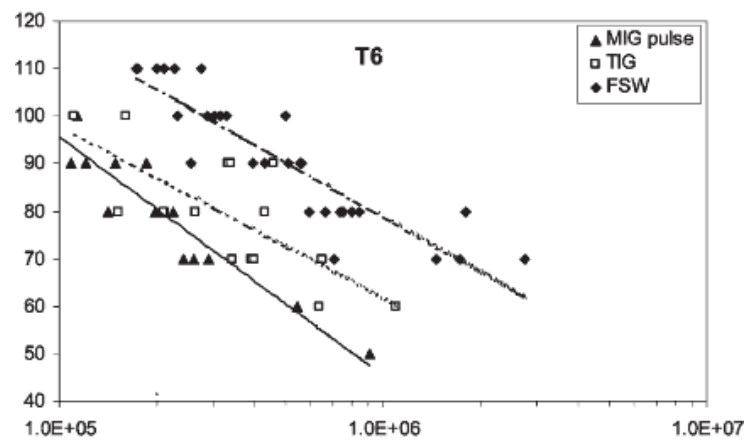


Figura 2.12. Resultados de teste à fadiga[16]

Tabela 2.2. Propriedades mecânicas obtidas pelos autores referenciados acima [16] e [17].

□	$\sigma_c$ (MPa)	$\sigma_r$ (MPa)	$\epsilon_{max}$ (mm/mm)
MB[16]	291	317	0,11
MIG[16]	147	221	0,05
FSW[16]	150	245	0,05
MB[17]	307	330	0,09
FSW[17]	165	241	0,07

### 3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

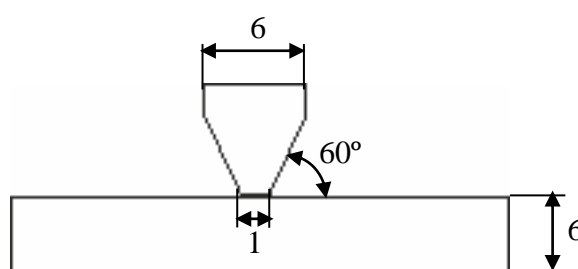
Pretende-se, neste capítulo, explicar resumidamente os métodos utilizados e a sua aplicação.

#### 3.1. Soldadura MIG

Na primeira fase do trabalho foram soldadas placas de alumínio por MIG. As placas originais, de 6mm de espessura, foram cortadas em placas mais pequenas de 333x163, tendo também sido cortadas placas com 333x28mm. Sendo a placa maior a base da peça e a placa mais pequena soldada no centro desta.

Utilizou-se uma máquina SAFMIG 480 e um carrinho de velocidade regulável, para a deslocação da tocha. Como metal de adição utilizou-se o fio AWS A5.10-80:ER 5356, com 5% magnésio, Argon como gás de proteção e um suporte para fixação das placas a soldar.

Na figura 3.1 apresenta-se uma imagem explicativa da preparação de junta. De frisar que não existiu folga entre as duas placas a soldar.



**Figura 3.1.** Preparação de junta utilizada na soldadura MIG.

Os parâmetros utilizados para a realização das soldaduras foram alvo de otimização. Os parâmetros foram tipo de preparação de junta, intensidade da corrente, diferença de potencial, distância da tocha à peça, velocidade de soldadura e tratamento da raiz.

Foi realizada uma otimização destes parâmetros que será explicada na secção 4.1. Uma tabela completa com estes parâmetros encontra-se no anexo A. Após a otimização chegou-se aos valores indicados na tabela 3.1.

**Tabela 3.1.** Parâmetros finais de soldadura.

Série	Nº de soldadura	Preparação de Junta ( em T)	I(A) Nominal	I(A) Final	V(V) Nominal	V(V) Final	Dist. da tocha (mm)	Vel. do Carro (cm/min)	Tratamento na raiz
13	1	Maquinado, M eio x, 60 ° Aber. 0,5-1 mm Talão	320	240	23,8	23	12	50	Limpeza da raiz manual
	2	Maquinado, M eio x, 60 ° Aber. 0,5-1 mm Talão	320	248	23,8	23	12	50	

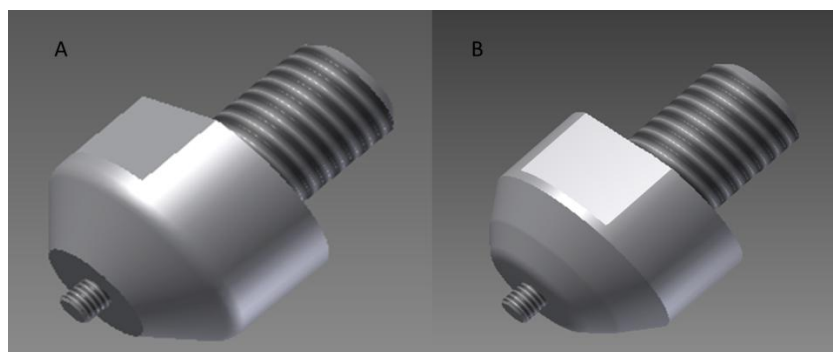
Registou-se que o aumento da intensidade até ao valor referido na tabela ajudou na eliminação da falta de penetração e a diminuição da diferença de potencial acabou com algum efeito de mordedura que acontecia nos pés da soldadura. A preparação de junta foi também modificada, tendo-se aumentado o ângulo desta, de forma a facilitar a penetração.

O procedimento utilizado para a realização das soldaduras MIG foi similar em todas as séries efetuadas. Depois de fixas as placas no suporte foi realizada a primeira soldadura. Depois do arrefecimento das placas, estas foram fixas de novo, de forma a poder realizar a soldadura no lado oposto. O início da primeira soldadura é sempre coincidente com o final da segunda.

### 3.2. Pós processamento por fricção linear

Para a realização do pós processamento foi utilizada uma máquina fresadora, da marca Cincinnati, com controlo de velocidade de avanço e de rotação. Esta máquina não está equipada com controlo de pressão o que tornou o trabalho mais difícil. Foi também utilizada uma mesa de suporte de forma a fixar as peças a pós processar. Esta mesa é também útil de forma a diminuir o empenamento da peça.

Utilizaram-se duas ferramentas para a realização do pós processamento, uma vez que com a primeira ferramenta o acabamento na zona pós processada era de má qualidade e o raio de concordância formado não era o esperado. Outro problema que foi também resolvido com estas mudanças na ferramenta prende-se com o facto de o cone lateral da ferramenta estar todo ele em contato com o cordão de soldadura, diminuindo a pressão sentida na zona de pós processamento. Assim alterou-se a primeira ferramenta de forma a suavizar estes aspetos. Criou-se um boleado na zona periférica do *shoulder* da ferramenta, de raio 2,3mm, e aumentou-se em 10° a abertura do cone, a meia altura deste, como se pode ver na figura 3.2. Em anexo encontram-se os desenhos cotados das ferramentas utilizadas.



**Figura 3.2.** Ferramenta A e B para FSP.

Foi utilizada uma velocidade de rotação da ferramenta de 1500 rpm, uma velocidade de avanço de 240 mm/min, um ângulo de inclinação de 2,5°, a penetração da ferramenta na zona do pé do cordão foi de 3,2mm, a altura do pino roscado 2,5mm e 0,8 mm de forma a prever ajustamentos da máquina e do material. O posicionamento do pino roscado é sensivelmente o do pé do cordão de soldadura.

Também no caso do pós processamento o início da primeira passagem é coincidente com o final da segunda passagem. Ainda de referir, é o fato de o lado do avanço da ferramenta ser sempre o do lado do cordão.

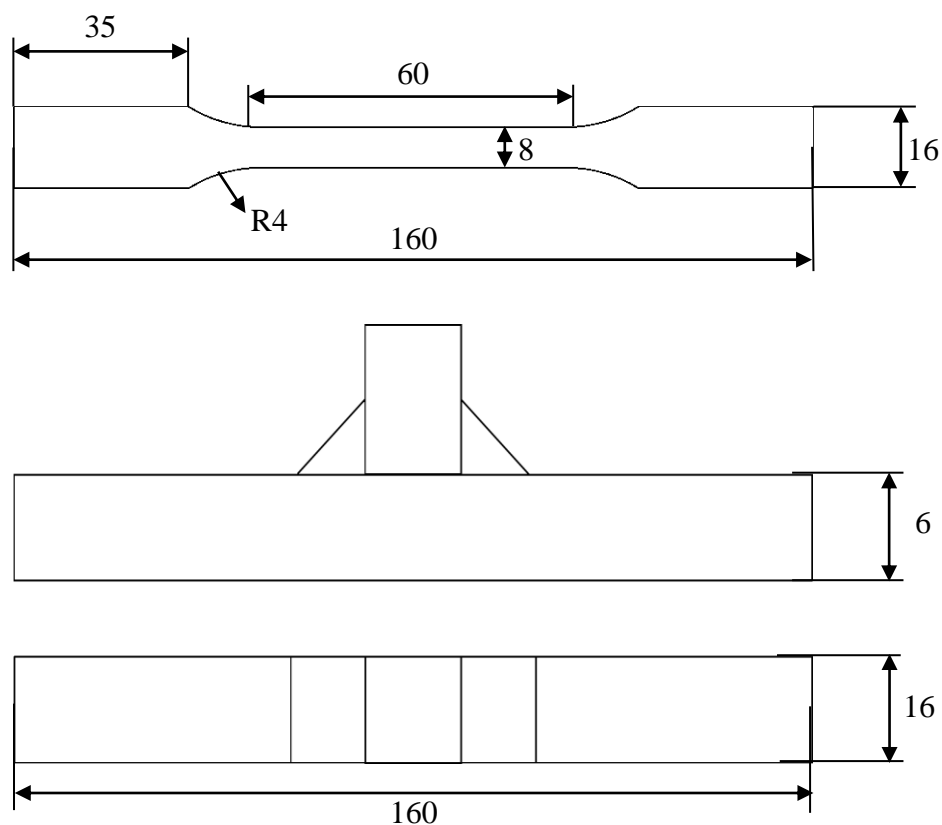
### 3.3. Análise de durezas

A análise de durezas é outra das formas de comparação, entre as placas soldadas a MIG e soldadas a MIG e pós processadas. Esta análise é feita numa máquina Duramin.

As durezas são calculadas através de indentações feitas ao longo de uma linha paralela à base da peça e a cerca de 0,25 mm de distância do topo da peça. Entre cada indentação existe essa mesma distância. Estas indentações têm uma carga de 0,2 quilograma.

### 3.4. Ensaio de tração e fadiga

Para a realização dos ensaios de tração e de fadiga foram maquinados provetes com a geometria indicada na figura 3.3. Estes provetes foram cortados das placas soldadas ou soldadas e pós processadas através de um serrote mecânico, tendo sido maquinados numa fresa. É de referir que alguns provetes soldados e pós processados também foram maquinados em forma de osso de cão.



**Figura 3.3.** Exemplo da geometria dos provetes utilizados.

No caso dos ensaios de fadiga a juntas soldadas pós processadas houve necessidade de retirar a rebarba causada pelo pós processamento, uma vez que esta estava a causar que a rotura se desse nesse ponto. A figura 3.4 ilustra esta situação.

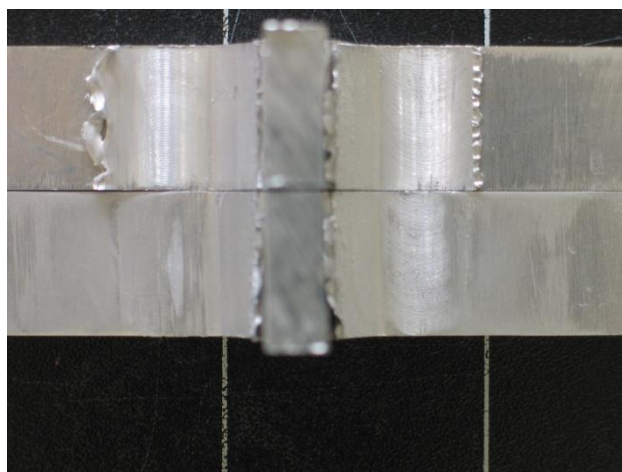


Figura 3.4. Provetes com e sem rebarba.

### 3.4.1. Ensaios de tração

Para a realização dos ensaios de tração foi utilizada uma máquina Instron modelo 4206, e um extensómetro Instron modelo 2630-100, visíveis na figura 3.5. Durante o ensaio a máquina é comandada por controlo remoto usando um programa de computador que faz também a aquisição de dados: tempo, carga, alongamento e extensão. Inserindo as dimensões dos provetes no programa é calculada a carga e a velocidade a utilizar nos ensaios. Foi utilizada uma velocidade de 1,2 mm/min.

Através do tratamento dos dados em *Microsoft Excel* é possível o cálculo das tensões de cedência e de rotura dos materiais ensaiados: material base, soldadura MIG e soldadura MIG com pós processamento por fricção linear.



Figura 3.5. Máquina Instron utilizada nos ensaios de tração.

### 3.4.2. Ensaios de fadiga

Os ensaios de fadiga foram realizados numa máquina servohidráulica, da marca Instron, modelo Fast Track 8800, visível na figura 3.6. Os ensaios foram realizados, com controlo de carga, para condições de  $R=0,02$  e  $R=0,4$  e como uma frequência que variou entre 20Hz e 25Hz. A gama de tensões variou entre os 75 MPa e 280 MPa.



**Figura 3.6.** Máquina Instron utilizada nos ensaios de fadiga.

De forma a utilizar a máquina em questão e o seu software é necessário introduzir o valor da carga média e da carga alternada. Estes valores são obtidos através da equação 3.1:

$$\Delta P [kN] = \frac{\Delta \sigma [MPa] \times B [mm] \times W [mm]}{(1-R) \times 1000}, \quad (3.1)$$

$\Delta P$  é a gama de forças aplicadas,  $\Delta \sigma$  é a gama de tensões aplicadas,  $R$  é a razão de tensões,  $W$  é a largura do provete na zona soldada e  $B$  é a espessura do provete na zona soldada.

$$P_{m\acute{a}x} [kN] = \Delta P + P_{min}, \quad (3.2)$$

$$P_m [kN] = \frac{P_{m\acute{a}x} [kN] + P_{min} [kN]}{2}, \quad (3.3)$$

$$P_a [kN] = \frac{P_{m\acute{a}x} [kN] - P_{min} [kN]}{2}, \quad (3.4)$$

$P_m$  é a carga média,  $P_a$  é a carga alternada,  $P_{m\acute{a}x}$  é a carga máxima e  $P_{min}$  é a carga mínima.





## **4. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS**

### **4.1. Otimização de parâmetros**

Neste capítulo apresenta-se a otimização dos parâmetros utilizados na soldadura a MIG e da ferramenta utilizada no FSP.

#### **4.1.1. Parâmetros da soldadura MIG**

De forma a obter a melhor qualidade possível nas soldaduras realizadas foi necessário efetuar uma otimização dos parâmetros reguláveis.

Uma vez que o maior problema encontrado nos testes iniciais de soldadura foi a falta de penetração todos os ajustes foram no sentido de colmatar esta falha.

No caso da preparação de junta optou-se por realizá-la dos dois lados da chapa vertical, diminuir o tamanho do talão e abrir o ângulo de abertura dos 45° para os 60°.

A intensidade nominal de corrente foi aumentada de 230 A para 320 A, em intervalos de cerca de 10 A, de forma a aumentar a penetração.

Após se ter verificado a existência de algum efeito de mordedura para lá dos pés da soldadura optou-se por diminuir os valores nominais da intensidade de corrente, eliminando-se assim este efeito.

Também no sentido de aumentar a penetração da soldadura diminuiu-se a distância da tocha a peça.

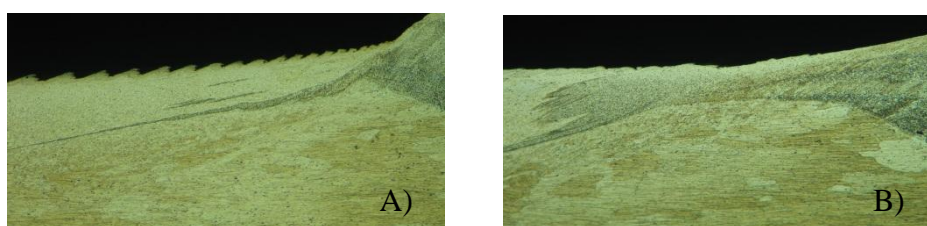
Na tabela 4.1 apresenta-se a variação ocorrida nos parâmetros otimizados.

**Tabela 4.1.** Variação dos parâmetros de soldadura.

Série	Nº de soldadura	Preparação de Junta ( em T)	I (A) Nominal	I(A) Final	Tensão (V) Nominal	Tensão (V) Final	Distância da tocha (mm)	Vel. do Carro (cm/min)
1	1	Maquinado, 45 ° Aber. 2-2,5 mm Talão	230	178	27,4	26,6	17	50
	2	Sem	230	178	27,4	26,6	17	50
14	1	Maquinado, Meio x, 60 ° Aber. 0,5- 1 mm Talão	320	240	23,8	23	12	50
	2	Maquinado, Meio x, 60 ° Aber. 0,5- 1 mm Talão	320	248	23,8	23	12	50

#### 4.1.2. Desenho da ferramenta para FSP

No final das primeiras séries de pós processamento observou-se que a ferramenta utilizada não deixava o acabamento final pretendido. Este era muito rugoso, introduzindo um raio de curvatura entre a zona processada e o pé da soldadura demasiado pequeno, como se vê na figura 4.1.A. Assim sendo, e depois de se ter testado uma destas séries à fadiga, tendo os resultados não sido satisfatórios, concluiu-se que seria necessário modificar a ferramenta utilizada.

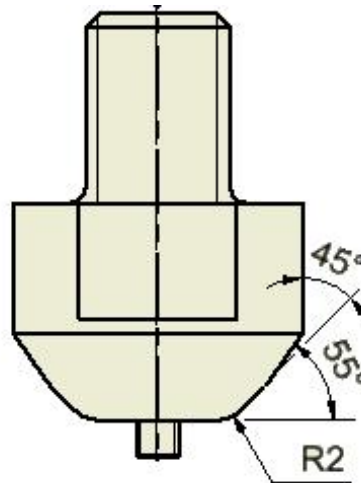


**Figura 4.1.** Pormenor da zona do pé pós processado pela ferramenta A em A) e B em B).

De forma a modificar o raio de curvatura optou-se por arredondar a quina viva existente no *shoulder* da ferramenta, com um raio de cerca de 2 mm.

A modificação introduzida no cone da ferramenta, abertura do seu ângulo a meia altura em cerca de 10°, teve por objetivo diminuir a zona de contato entre o cone da ferramenta e o cordão de soldadura. Aumentou-se assim a pressão exercida na zona de pós processamento e acabou-se com algum efeito de gripagem que se apresentava na zona onde havia contato com o cone da ferramenta.

Na seção 4.5.3 serão analisados os resultados obtidos nos ensaios de fadiga que levaram à mudança da ferramenta.



**Figura 4.2.** Desenho 2D das modificações da ferramenta.

## 4.2. Análise morfológica

Neste capítulo irá ser feita a análise de imagens tiradas a partir de um microscópio óptico, para melhor se caracterizarem as estruturas presentes nas várias zonas dos provetes soldados a MIG e soldados a MIG e pós processados por FSP.

### 4.2.1. Análise morfológica da série MIG

A série MIG apresenta três zonas distintas. São elas o material base, a zona fundida e a zona afetada pelo calor. Apresentam-se, na figura 4.3, ampliações destas zonas.

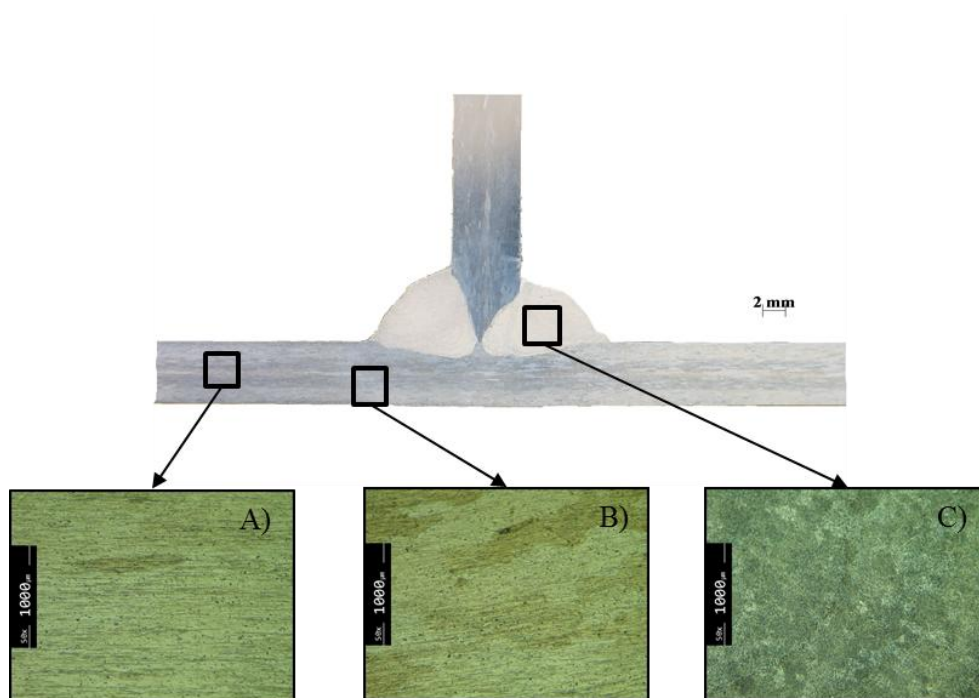


Figura 4.3. Micrografias da série MIG.

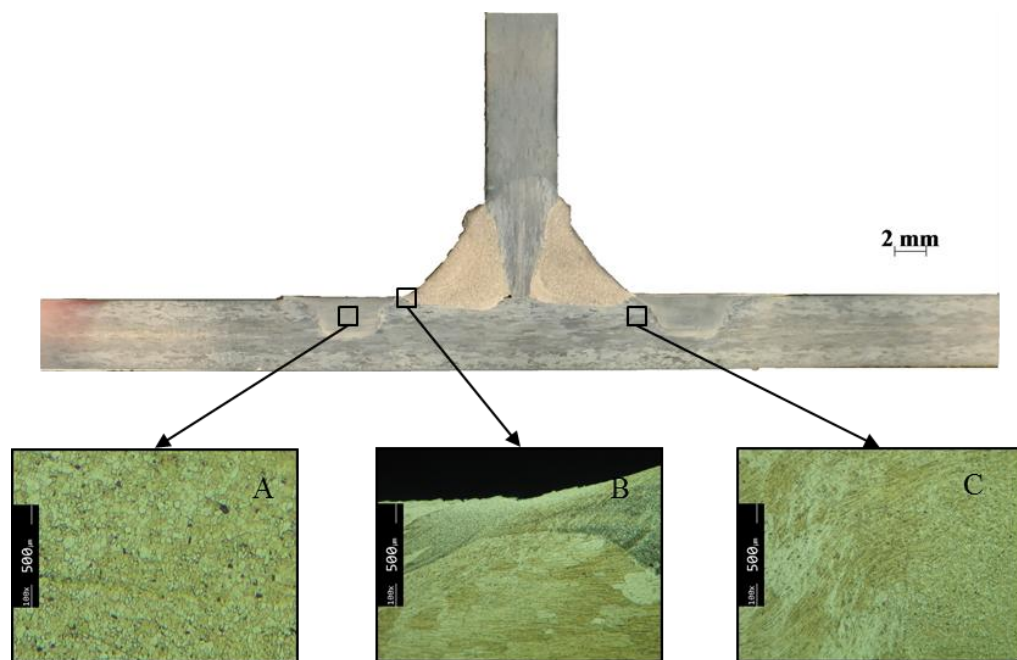
A micrografia A) foi feita na zona de material base, AA6082, os grãos presentes são tipo “panqueca”, alongados na direção de laminagem. Apresentam um comprimento entre 135  $\mu\text{m}$  e 150  $\mu\text{m}$  e uma altura entre 85  $\mu\text{m}$  e 90  $\mu\text{m}$ .

Na micrografia B) pode-se observar a zona afetada pelo calor. Esta apresenta um tamanho de grão superior ao do material base, uma vez que o processo de soldadura a sujeita a vários ciclos térmicos, propiciando assim o crescimento do seu grão e a perda de propriedades mecânicas.

Finalmente, na micrografia C) vê-se a zona fundida. Esta zona, composta principalmente por metal de adição é a zona com piores propriedades mecânicas, devido não só ao ciclos térmicos por que passou mas também ao facto de o próprio metal de adição ter propriedades mais baixas que o material base. É também a zona mais propícia ao aparecimento de defeitos.

#### 4.2.2. Análise morfológica da série pós processada

Na figura 4.4 apresentam-se três zonas distintas da série pós processada. Não é mostrada a zona do material base, uma vez que é igual à apresentada na secção anterior.



**Figura 4.4.** Micrografias da série pós processada.

Na micrografia A) pode ver-se a zona do nugget, local onde se deu o afundamento do pino da ferramenta. Esta zona é caracterizada por um forte refinamento do seu grão, apresenta um tamanho entre  $11\ \mu\text{m}$  e  $16\ \mu\text{m}$ . O nugget formado é em forma de bacia.

Em B) vê-se o pé da soldadura, zona processada pelo shoulder da ferramenta. Podem observar-se línguas de material fundido que foi misturado pela ferramenta nesta zona. É também visível a suavização do raio de concordância entre a zona soldada e o material base que permitirá diminuir as tensões locais nesta zona. A zona abaixo das línguas de material é a zona termomecânicamente afetada. Esta zona está presente dos dois lados do nugget e é também apresentada na micrografia C), onde se pode observar a diferença entre o grão presente na zona do nugget e na zona afetada termomecânicamente.

### 4.3. Análise de microdureza

Como foi dito no procedimento, analisaram-se as microdurezas em amostras da série soldada a MIG, MIG, e da série soldada a MIG e pós processada por FSP, MIG+FSP. A figura 4.5 esquematiza como foram feitas as séries de identificações.

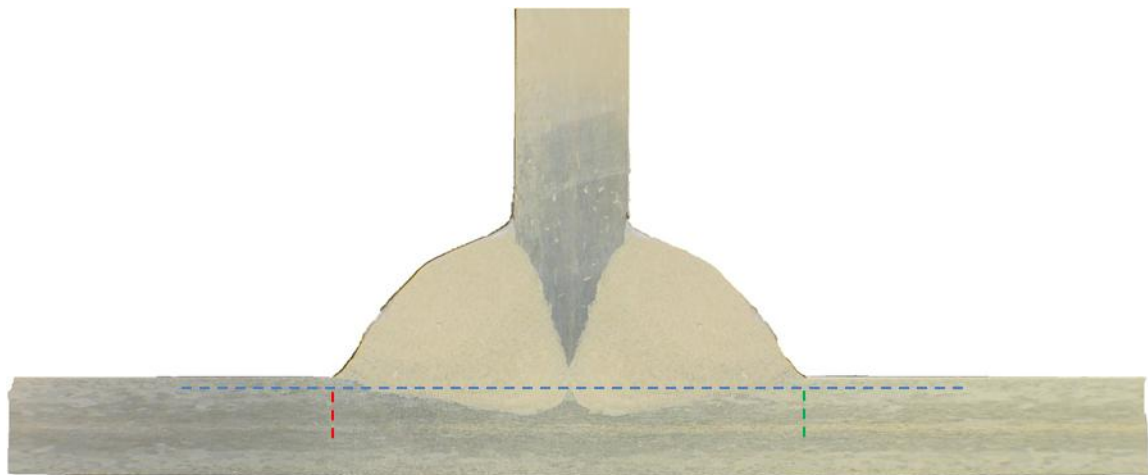


Figura 4.5. Zona 1 a azul, zona 2 a verde e zona 3 a vermelho.

### 4.3.1. Microdurezas em MIG

Na série soldada a MIG obtiveram-se os perfis de durezas indicados na figura

4.6.

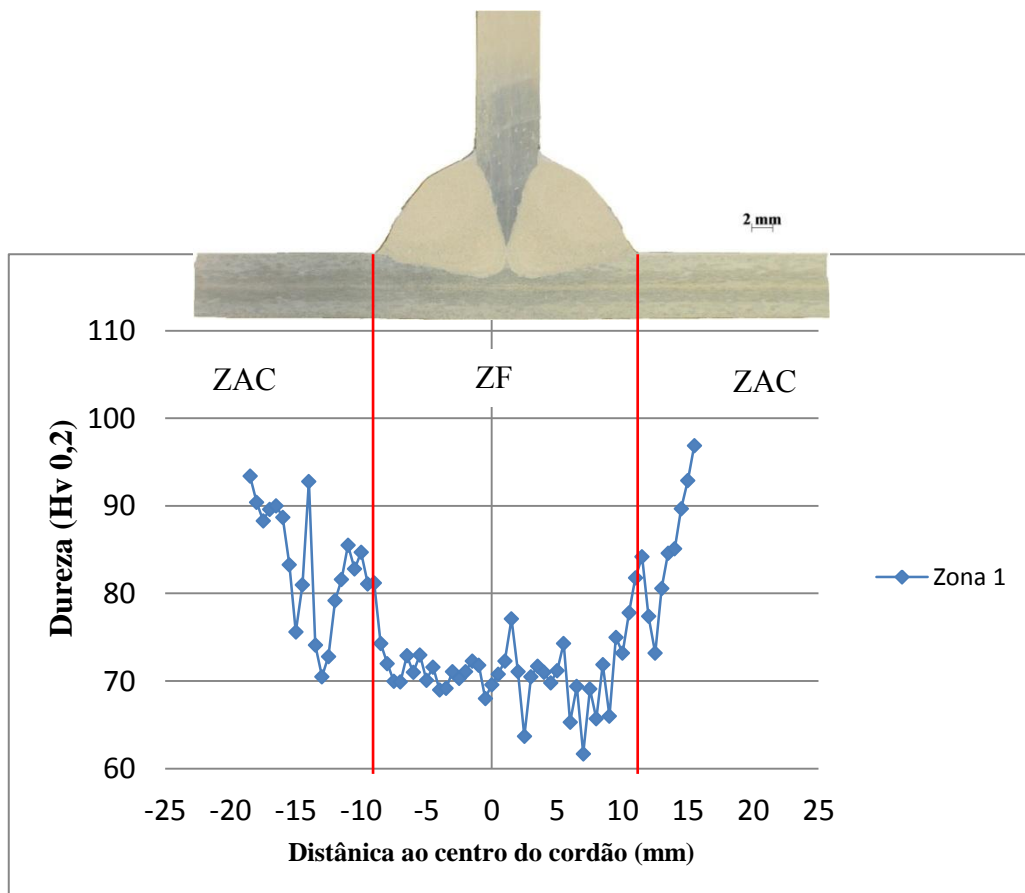


Figura 4.6. Perfil de durezas da zona 1 em MIG.

Para a zona 1, linha paralela à base da amostra e a 0,25 mm do topo da mesma, encontram-se duas zonas distintas.

A zona fundida, que apresenta uma dureza média de 70,5 HV, é a zona de menor dureza da amostra, sendo composta principalmente por material de adição. Esta zona estende-se por cerca de 20 mm.

A zona afetada pelo calor, que apresenta uma variação nas durezas medidas, de 62 HV a 101 HV, é a zona para lá da zona fundida.

Não foram realizadas medições para lá destas zonas, no entanto, sabe-se que a dureza média da liga utilizada é de cerca de 100 HV.

Nas figuras 4.7 e 4.8 apresentam-se os perfis de dureza para as zonas 2 e 3.

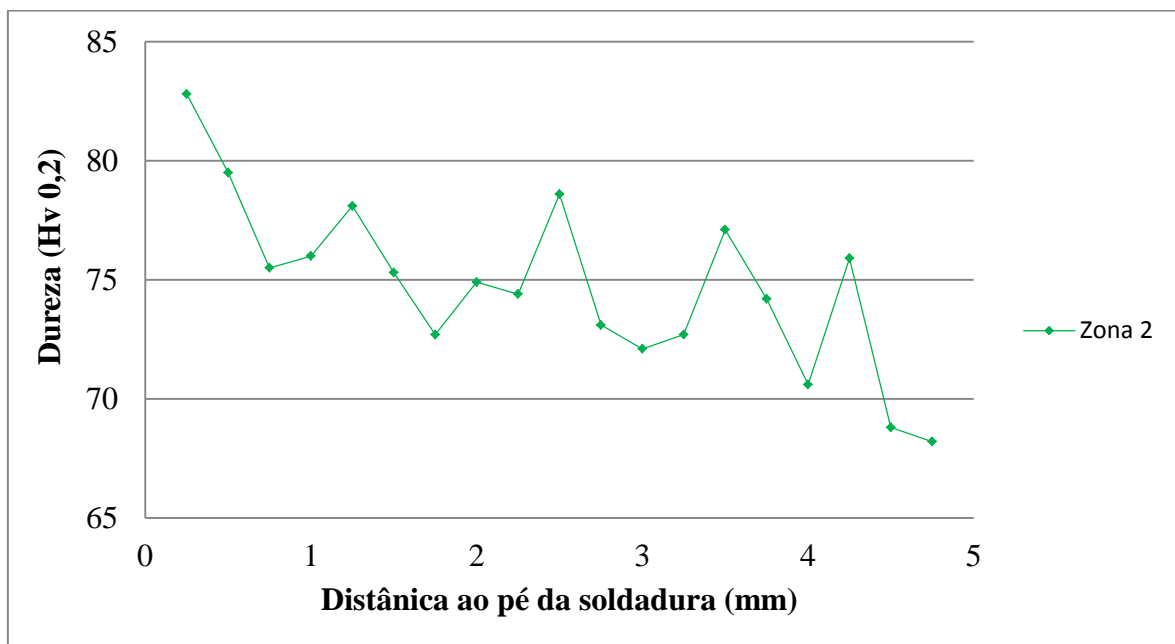


Figura 4.7. Perfil de durezas da zona 2 em MIG.



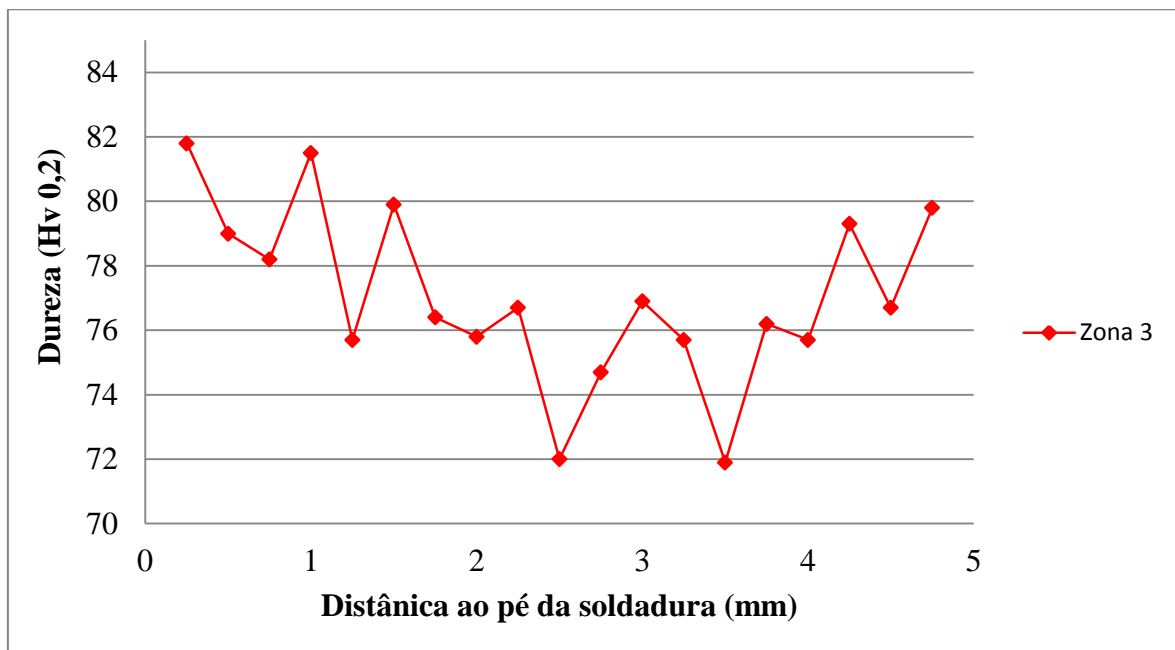


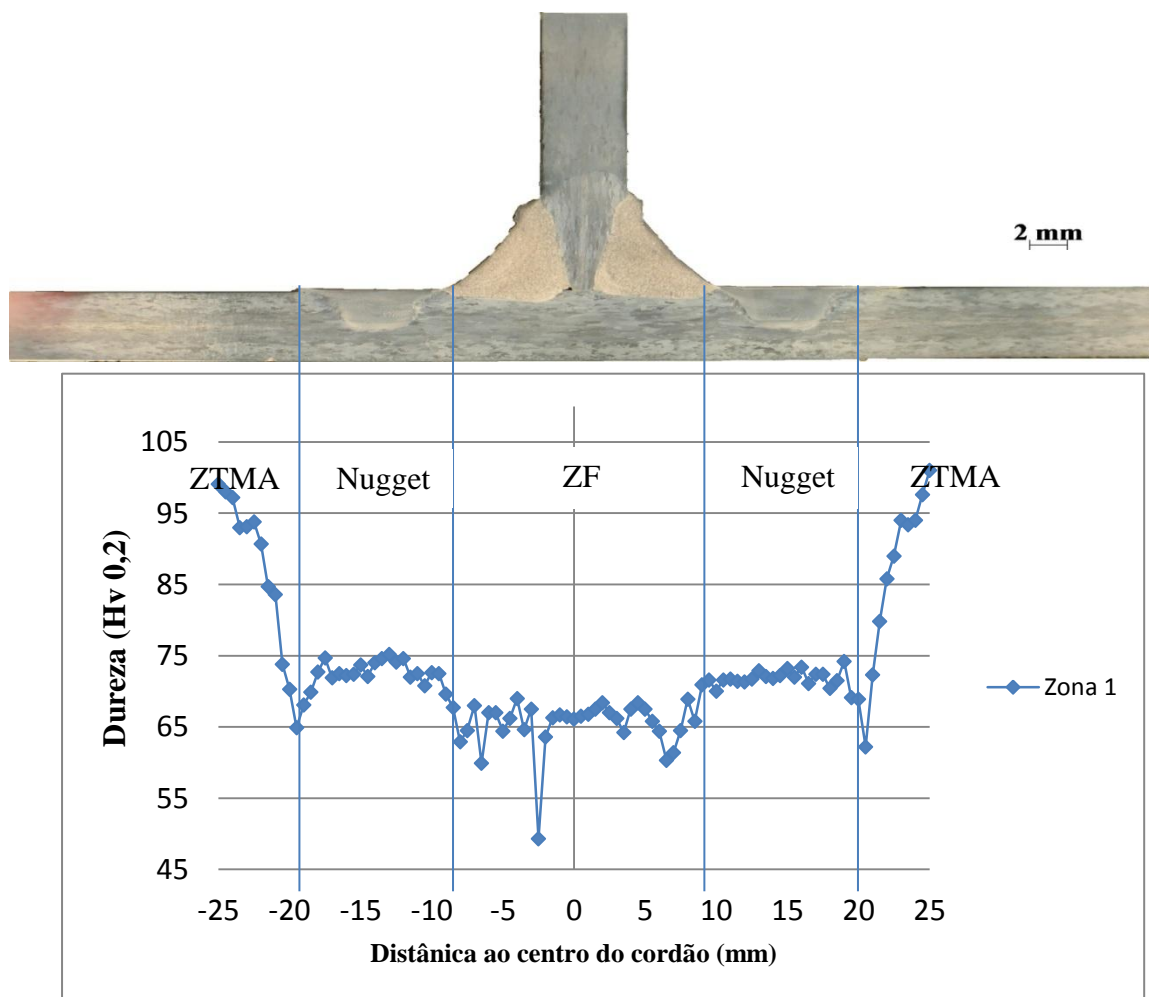
Figura 4.8. Perfil de durezas da zona 3 em MIG.

Para conseguir obter uma melhor caracterização do perfil de durezas foram ainda realizadas medições perpendicularmente à zona 1, a 0,25 mm do pé de cada cordão. Estas zonas apresentam uma dureza média de 75,9 HV. Todas estas medições se encontram em zona afetada termicamente.

Pode-se concluir que a baixa dureza apresentada na zona fundida se deve ao facto de esta ser principalmente composta por material de adição, de menor dureza que o material base, e que a zona termicamente afetada, embora com dureza superior à zona fundida, tem uma dureza muito aquém da dureza esperada para o material base, uma vez que a liga em causa, devido ao calor do processo de soldadura utilizado, perdeu as propriedades que adquiriu devido ao tratamento térmico de que tinha sido alvo. Isto acontece pois os pequenos precipitados que conferem maior dureza à liga AA6082-T6 se dissolvem ou criam precipitados maiores que diminuem assim a dureza do material.

#### 4.3.2. Microdurezas em MIG+FSP

Na série soldada a MIG e pós processada por FSP obtiveram-se os seguintes perfis de durezas, representados na figura 4.9.



**Figura 4.9.** Perfil de durezas para a zona 1 em MIG+FSP.

Para a zona 1, encontram-se agora três zonas distintas, embora já se obtenham resultados muito próximos do material base quando nos encontramos nos pontos mais afastados do centro da soldadura.

A zona fundida apresenta uma dureza média de 65,5 HV. A zona do nugget com um dureza média de 72,4 HV. Já a zona termomecânica afetada apresenta uma dureza média de 84,1 HV.

Nas figuras 4.10 e 4.11 apresentam-se os perfis de dureza para as zonas 2 e 3.

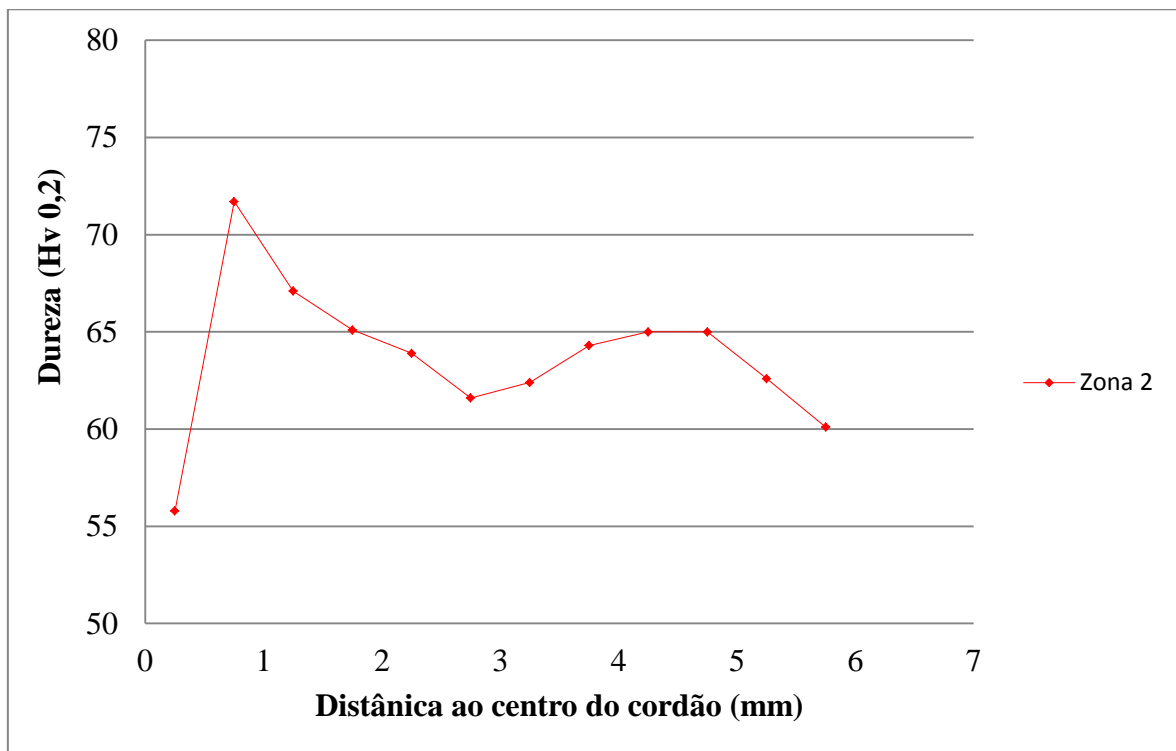


Figura 4.10. Perfil de durezas da zona 2 em MIG+FSP.

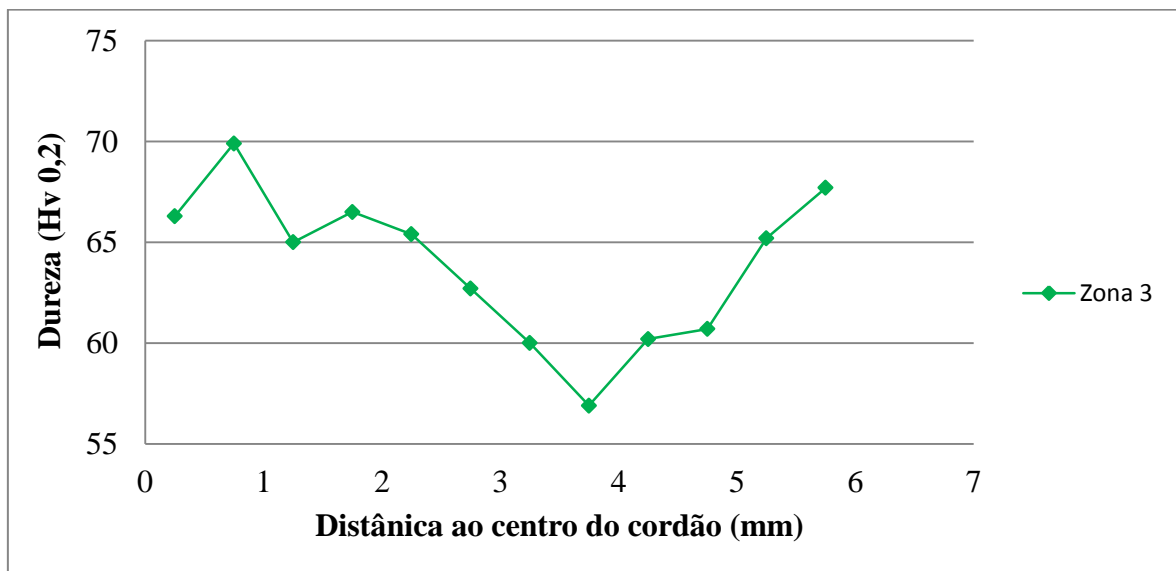


Figura 4.11. Perfil de durezas da zona 3 em MIG+FSP.

Para a zona 2 e 3, obtida do mesmo modo que no caso das soldaduras MIG, temos uma dureza média de 63,8 HV. Também estas medições foram obtidas na zona termicamente afetada.

Estes dados permitem concluir que a adição de calor pelo pós processamento diminuem uma vez mais a dureza. Isto acontece tal como no processo MIG através da dissolução e crescimento de precipitados.

#### 4.3.3. Comparação

Os gráficos seguintes ajudam a visualizar as diferenças entre os perfis de dureza obtidos anteriormente.

No gráfico da imagem 4.12 fica clara a diminuição de durezas causada pelo pós processamento, ou seja, a adição de mais ciclos térmicos volta a propiciar a dissolução dos precipitados que conferem dureza a esta liga.

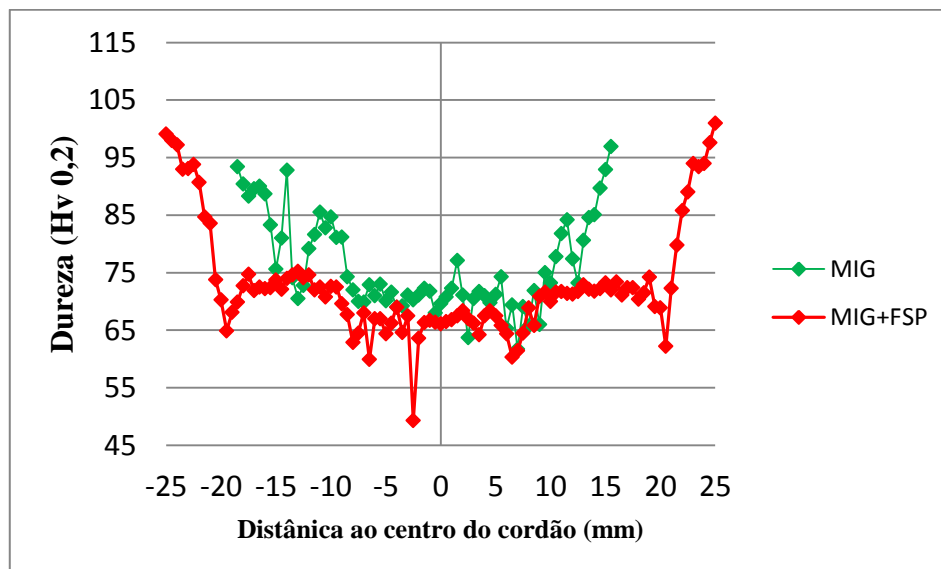


Figura 4.12. Comparação dos perfis de durezas na zona 1.

Quando comparados os perfis com os obtidos nos estudos [16] e [17] conclui-se que a dureza obtida por FSW é superior à dureza obtida no processo MIG com pós processamento. No entanto, as durezas encontradas para o processo MIG são mais elevadas que as do estudo [16].

Nos gráficos apresentados nas imagens 4.13 e 4.14 vê-se também o efeito do pós processamento, nas zonas 2 e 3, mais uma vez negativo em relação à dureza apresentada. A explicação para este decréscimo é similar à dada anteriormente.

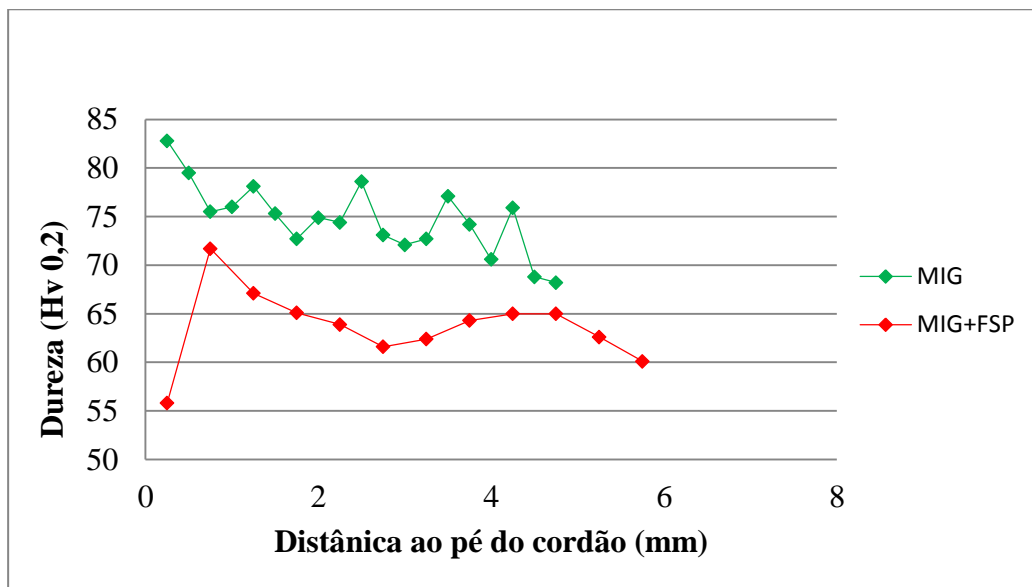


Figura 4.13. Comparação dos perfis de durezas na zona 2.

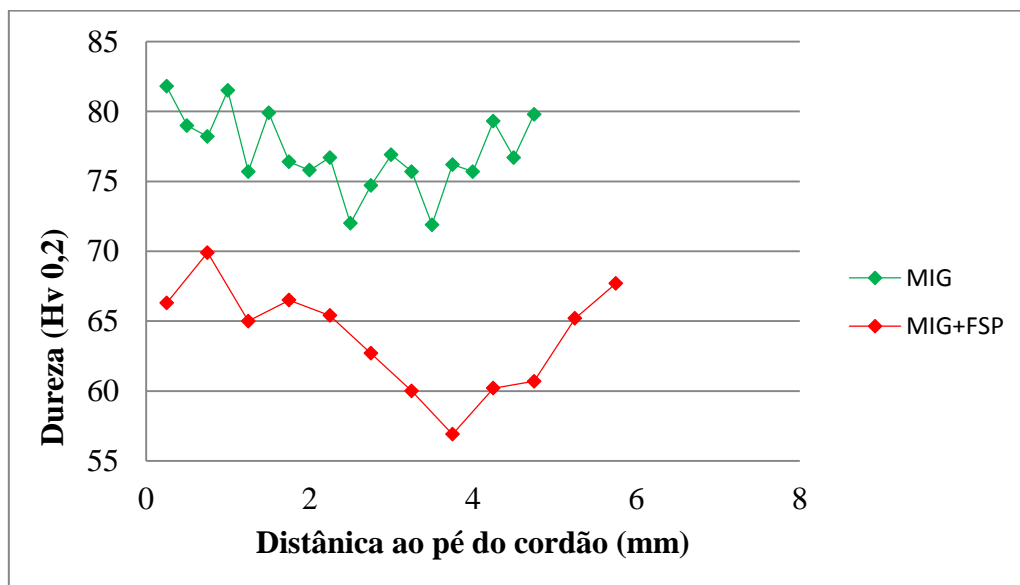
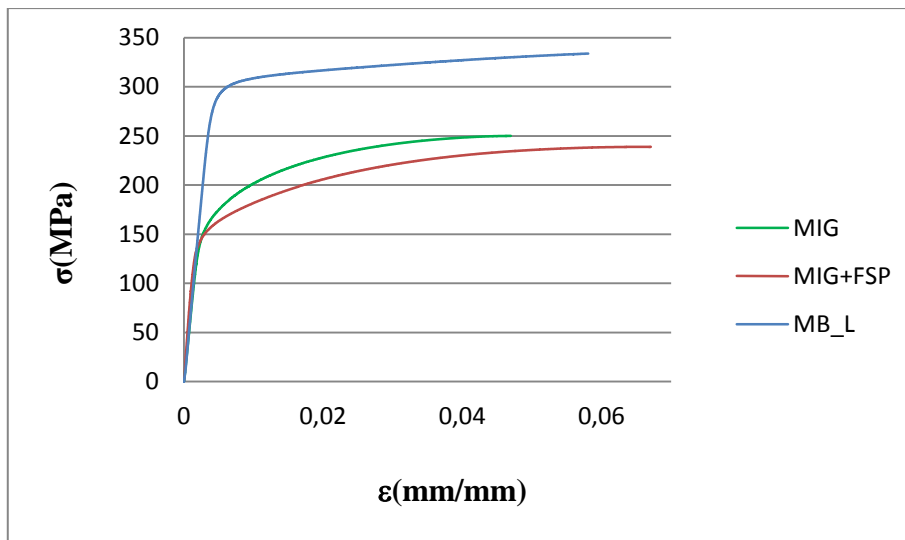


Figura 4.14. Comparação dos perfis de durezas na zona 3.

#### 4.4. Ensaio de tração

No âmbito do trabalho realizado houve a necessidade de caracterizar algumas propriedades mecânicas da liga em estudo. Foram realizadas ensaios em quatro séries diferentes: MB\_L série de material base com a força de tração a ser aplicada no sentido longitudinal da direção de laminagem, MB\_T onde a força é aplicada no sentido transversal à direção de laminagem, MIG série soldada por MIG e a série MIG+FSP

soldada por MIG e pós processada por fricção linear. Estes resultados serão ainda comparados com resultados obtidos por M. Ericsson, R. Sandstrom [16], onde apresenta valores para o material base, MB, soldadura a MIG e soldadura por fricção linear, FSW.



**Figura 4.15.** Gráfico representativo dos ensaios de tração realizados.

**Tabela 4.2.** Propriedades mecânicas obtidas por ensaios de tração.

□	$\sigma_c$ (MPa)	$\sigma_r$ (MPa)	$\epsilon_{m\acute{a}x}$ (mm/mm)	Along. para $\sigma_{r\max}$ .L0=50 mm (mm)
MB_T	296	333	0,10	9,04
MB_L	300	338	0,08	8,32
MIG	156	250	0,04	4,16
MIG+FSP	156	239	0,06	5,25
MB[16]	291	317	0,11	-
MIG[16]	147	221	0,05	-
FSW[16]	150	245	0,05	-
MB[17]	307	330	0,09	-
FSW[17]	165	241	0,07	-

Para o caso dos provetes soldados a MIG há um decréscimo de 52% na tensão de cedência e de 74% na tensão de rotura. A deformação e a extensão diminuem para metade.

A fratura dos provetes deu-se na zona do pé do cordão de soldadura, zona com uma elevada concentração de tensões, devido ao efeito geométrico do cordão, e também por ser a interface entre o material base e a zona fundida, zona mais ductil devido à sua

composição, material de adição, e de ter sofrido vários ciclos térmicos que retiraram dureza ao material.

Os provetes soldados a MIG e pós processados apresentam a mesma queda no caso da tensão de cedência, 52%, e um decréscimo de 71% no caso da tensão de rotura. Também estes partiram na zona do pé do cordão de soldadura. A explicação para este facto é a mesma embora o efeito geométrico tenha sido melhorado.

Os valores obtidos pelos dois autores mencionados acima são muito próximos.

Na comparação com os valores obtidos nos estudos referenciado acima há que ter em atenção o facto de o material base apresentar diferenças nas propriedades apresentadas. O material base em estudo apresenta um valor 16% menor de tensão de cedência e um valor maior em 6% na tensão de rotura. Ainda assim obteve-se um aumento de 6% e 12% para a tensão de cedência e de rotura, respetivamente, na comparação das duas séries soldadas a MIG. A série pós processada apresenta um aumento de 6% na tensão de cedência e uma diminuição de 3% na tensão de rotura quando comparada com a série soldada por fricção linear.

## 4.5. Ensaios de Fadiga

Neste sub capítulo será utilizada a seguinte nomenclatura: MB para a série ensaiada de provetes de metal base, AA6082, com uma razão de tensões  $R=0,02$ ; MIG  $R=0$  para a série soldada a MIG e testada para uma razão de tensões,  $R=0,02$ ; MIG  $R=0,4$  para a série soldada a MIG e ensaiada para  $R=0,4$ ; MIG+FSP  $R=0$  para a série soldada a MIG e pós processada, ensaiada com  $R=0,02$ ; MIG+FSP  $R=0,4$  para a série soldada a MIG e pós processada, ensaiada com  $R=0,4$ ; MIG+FSP A para a série soldada a MIG e pós processada com a ferramenta A e ensaiada para  $R=0,02$ . Será ainda utilizado um asterisco, \*, no final do nome de cada série no caso de se ter transformado as tensões nominais em locais.

Os ensaios realizados para o material base têm como objetivo a obtenção de uma reta de referência, não de comparação, uma vez que não é possível obter estes valores devido à perda de propriedades mecânicas inerente aos processos utilizados.

#### 4.5.1. Transformação de tensões nominais em tensões locais

De forma a conseguir resultados em que fosse possível comparar os ensaios realizados com geometrias diferentes realizou-se a transformação das tensões nominais em tensões locais. Desta forma elimina-se o factor geométrico associado aos processos utilizados, forma do cordão de soldadura MIG e forma dada pelo pós processamento por FSP. Assim é possível verificar a importância da dureza e das tensões residuais.

Para esta transformação efetuou-se o cálculo do factor de concentrações de fadiga,  $k_f$ , para cada provete ensaiado. Multiplicando este factor pela tensão nominal aplicada obtém-se a tensão local.

#### 4.5.2. Ensaio de fadiga às juntas MIG

Para as juntas soldadas a MIG o gráfico, para tensões nominais, é o observado na figura 4.16.

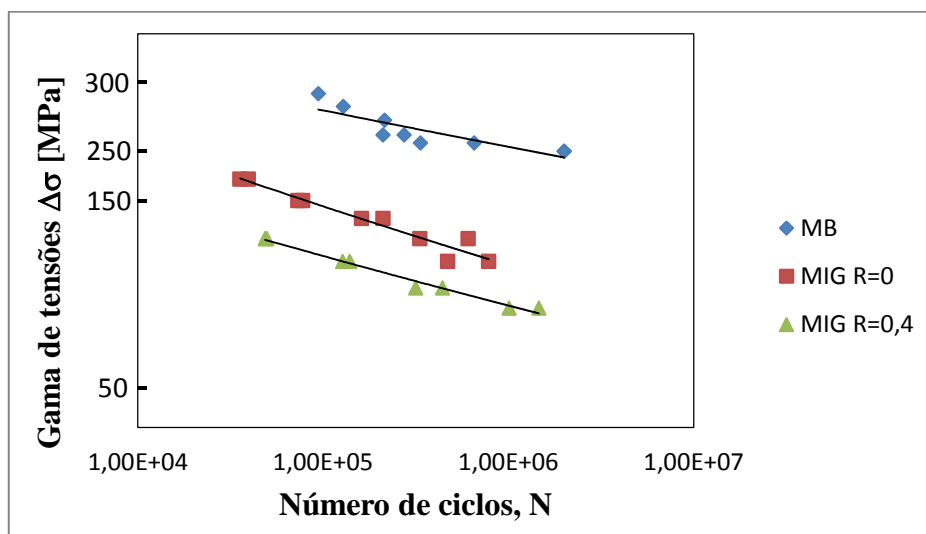


Figura 4.16. Resultados dos ensaios de fadiga realizados em juntas MIG, para tensões nominais.

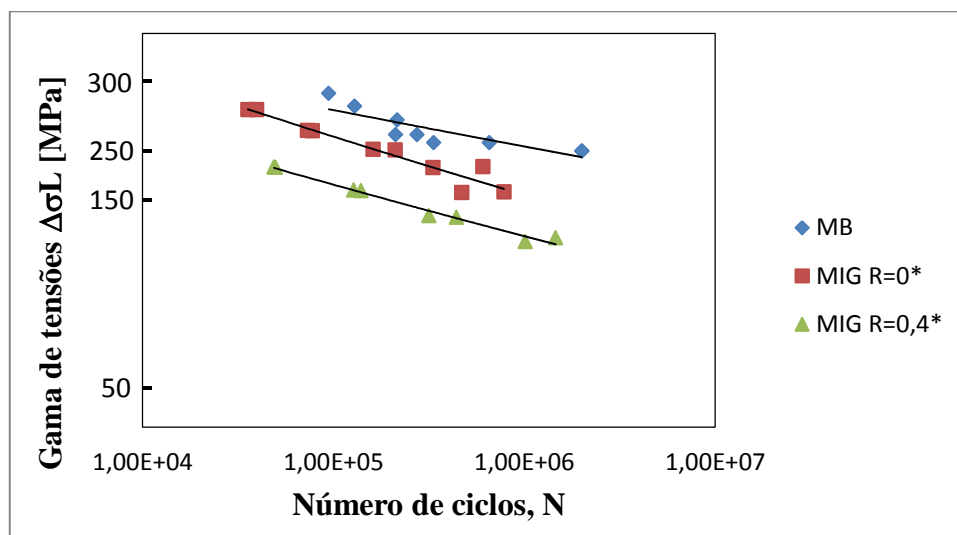
Através da análise do gráfico é possível verificar que o aumento da razão de tensões, que implica o aumento da tensão média, diminui a vida à fadiga das juntas ensaiadas, sendo este efeito maior para vidas curtas do que para vidas longas.

Foi efetuado o cálculo da gama de tensões para uma vida de  $10^5$  ciclos tendo-se obtido uma gama de tensões de 146 MPa para a série MIG R=0 e 107 MPa para a série MIG R=0,4. Isto indica uma diminuição na resistência à fadiga de 26,9%. Calculou-se também a gama de tensões para uma vida de  $10^6$  ciclos. Tendo como resultados para a



série MIG R=0 104MPa e para a série MIG R=0,4 80MPa, ou seja, uma diminuição de 23%.

Em seguida apresenta-se, na figura 4.17, o gráfico anterior mas com tensões locais, retirando assim o efeito geométrico.



**Figura 4.17.** Resultados dos ensaios de fadiga realizados em juntas MIG, para tensões locais.

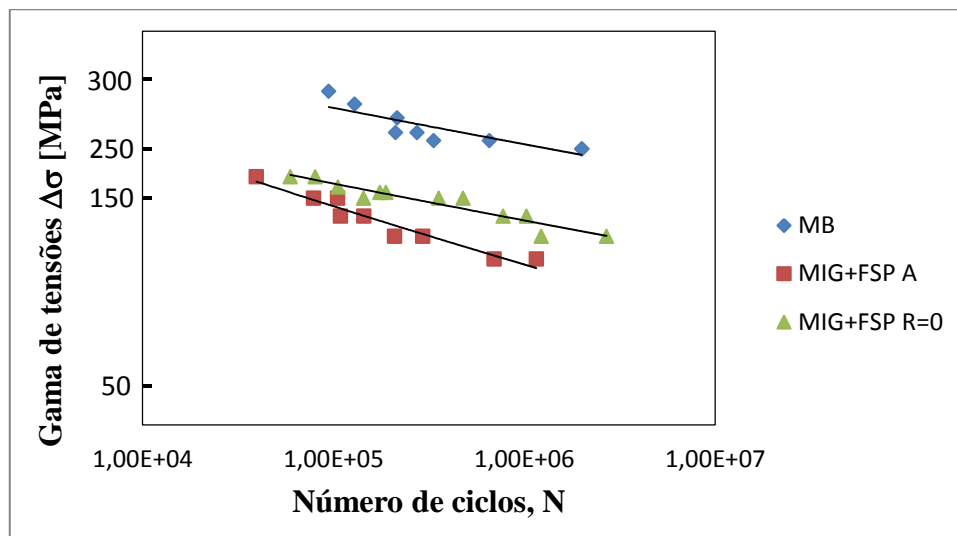
Existe claramente uma aproximação das séries MIG à série MB, ou seja, o efeito geométrico é um factor de elevada importância, se não o mais importante, na resistência das juntas soldadas à fadiga.

Neste caso, a diminuição da gama de tensões foi de 24,5% e 21,4% para  $10^5$  e  $10^6$  ciclos, respetivamente.

### 4.5.3. Ensaios de fadiga às juntas MIG+FSP

#### 4.5.3.1. Ensaios de fadiga e modificação da ferramenta

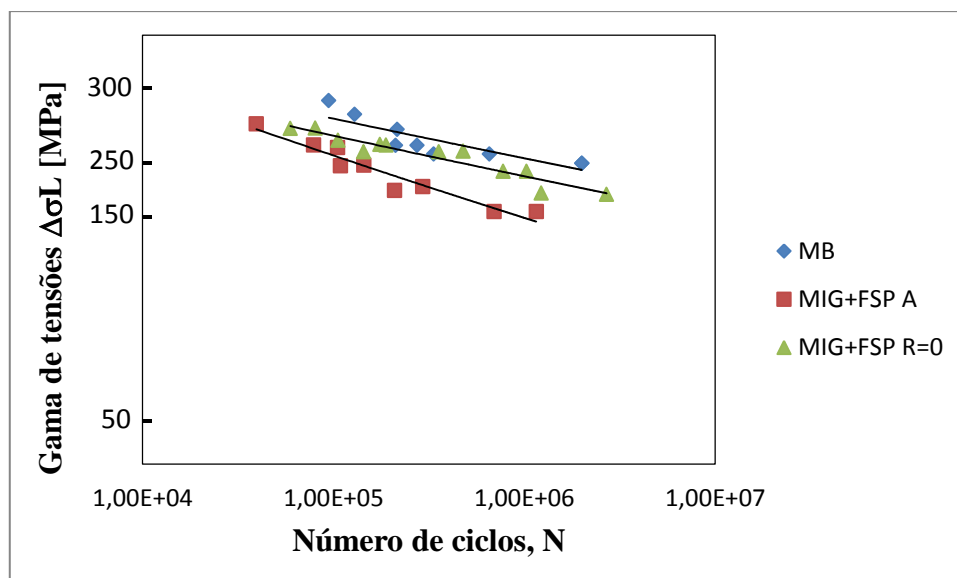
Apresenta-se em seguida, na figura 4.18, o gráfico correspondente aos ensaios de resistência à fadiga das séries MIG+FSP R=0 e MIG+FSP A, ocorridos nas mesmas condições, tendo apenas sido utilizadas ferramentas diferentes.



**Figura 4.18.** Ensaio de fadiga com R=0 para séries processadas pela ferramenta A e B, para tensões nominais.

Existe um ganho de resistência à fadiga de cerca de 12% para vidas na ordem dos  $10^5$  ciclos e na ordem dos 22% para vidas de  $10^6$  ciclos. Pode-se então concluir que a mudança de ferramenta foi bastante benéfica.

De forma a completar o estudo desta mudança de ferramenta foi também feita a mudança da gama de tensões nominais para locais.



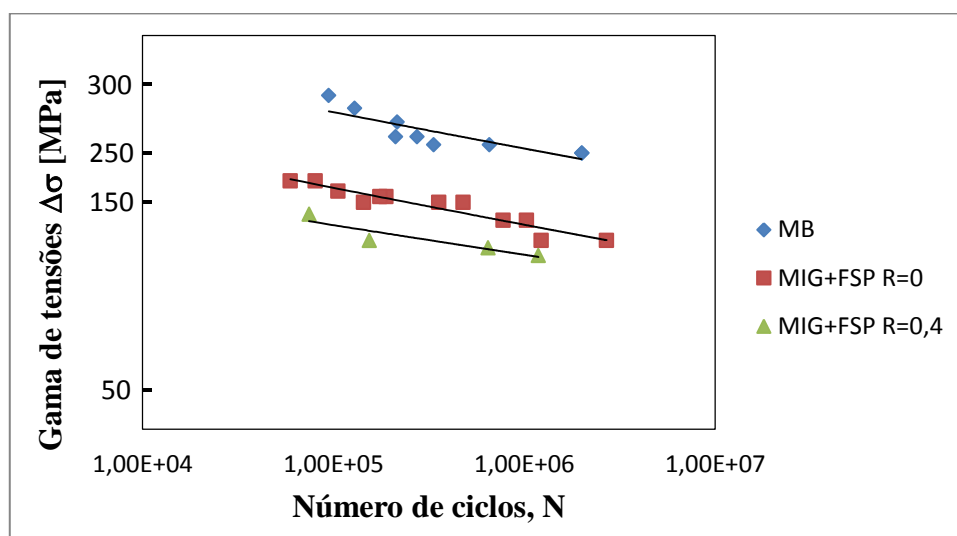
**Figura 4.19.** Ensaio de fadiga com R=0 para séries processadas pela ferramenta A e B, para tensões locais.

Neste caso o aumento da resistência à fadiga é apenas de 8% e 18% para vidas de  $10^5$  ciclos e  $10^6$  ciclos respetivamente. Este pequeno aumento vem demonstrar que a

modificação do acabamento superficial e o facto de se ter acrescentado pressão na zona de pós processamento é verdadeiramente importante.

#### 4.5.3.2. Ensaio de fadiga às juntas MIG+FSP

Para as séries pós processadas o gráfico, para tensões nominais, é apresentado na figura 4.20.



**Figura 4.20.** Ensaio de fadiga para as séries processadas com a ferramenta B, para tensões nominais.

No caso do pós processamento, a diminuição da gama de tensões com o aumento de R é de 20,1% para  $10^5$  ciclos e de 16,7% para  $10^6$  ciclos. Estes valores são menores que no caso das juntas MIG, isto deve-se ao facto de, nos ensaios para R=0,4, a iniciação de fenda ser mais preponderante durante a vida do ensaio, ocorre maior número de ciclos em iniciação que em propagação da fenda. Isto é observável pelo menor declive das retas de R=0,4 em relação ao declive apresentado pelas retas de R=0. Observa-se ainda que a diferença entre os declives é mais acentuada no caso das séries pós processadas do que nas séries MIG.

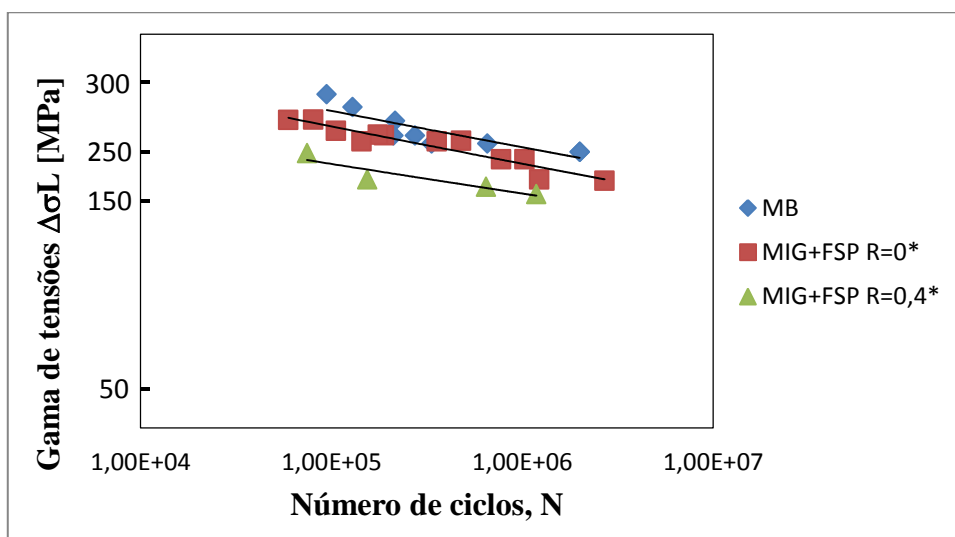


Figura 4.21. Ensaio de fadiga para as séries processadas com a ferramenta B, para tensões locais.

Para o caso das tensões locais, figura 4.21, temos uma diminuição de 20,3% e 16,7% para vidas de  $10^5$  ciclos e  $10^6$  ciclos. Valores muito próximos ou mesmo iguais aos obtidos para tensões nominais. Isto acontece uma vez que o raio gravado pela ferramenta no pé da soldadura será equivalente. É no entanto visível uma maior aproximação aos valores do material base.

#### 4.5.4. Comparação entre MIG e MIG+FSP

Far-se-á agora a comparação entre as séries soldadas a MIG e as séries soldadas a MIG e pós processadas.

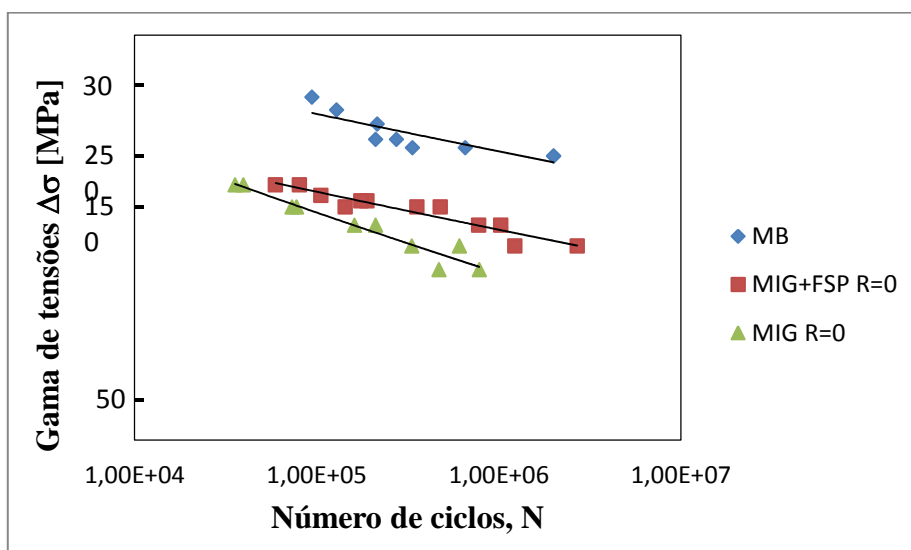
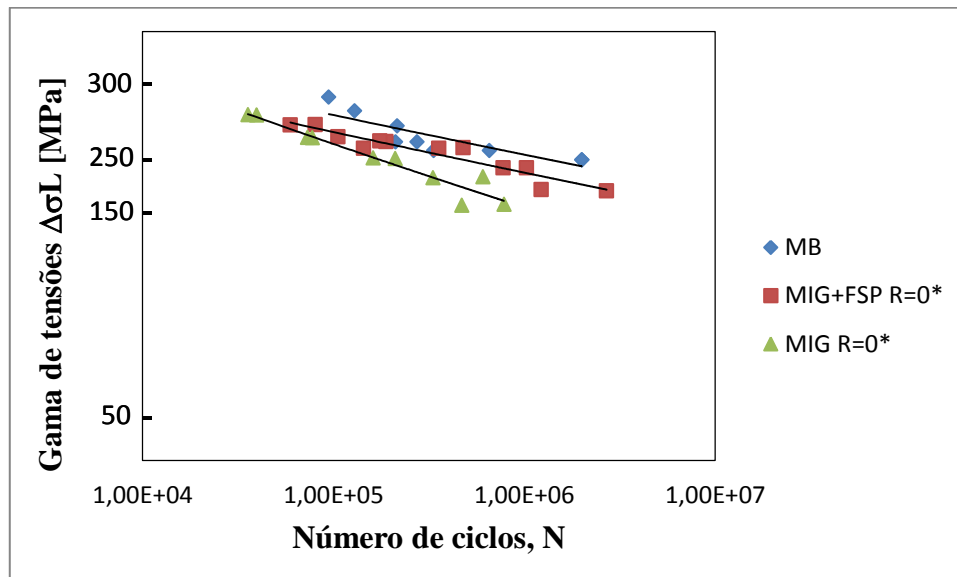


Figura 4.22. Comparação entre as séries MIG e MIG+FSP para R=0 e tensões nominais.

Como era esperado as séries pós processadas têm uma maior resistência à fadiga. Existe um aumento da gama de tensões de 9,5% e 20,2% para vidas de  $10^5$  ciclos e  $10^6$  ciclos respectivamente. É então possível dizer que existe melhoria da resistência à fadiga pela aplicação de pós processamento.



**Figura 4.23.** Comparação entre as séries MIG e MIG+FSP para R=0 e tensões locais.

A nível das tensões locais, figura 4.23, as melhorias com o pós processamento são mais baixas, 2,4% e 13,2%. Mais uma vez fica patente que o efeito geométrico é muito significativo na resistência à fadiga.

Tendo em conta que os resultados obtidos para os perfis de dureza indicam durezas da série pós processada inferiores às durezas da série MIG é previsível que as melhorias apresentadas se devam ao efeito de eliminação de tensões residuais, ao refinamento de material e à eliminação de defeitos provenientes da soldadura MIG, consequência do pós processamento.

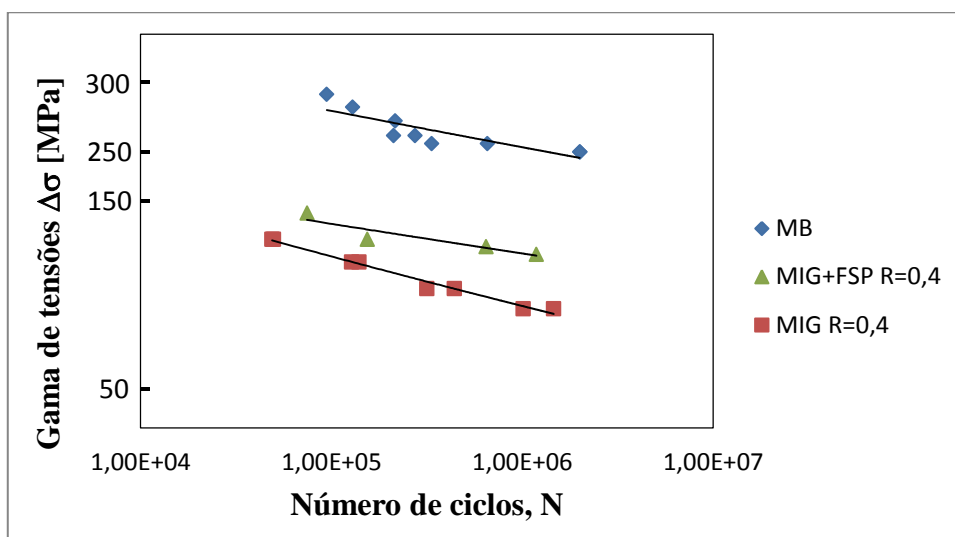


Figura 4.24. Comparação entre as séries MIG e MIG+FSP para R=0,4 e tensões nominais.

Para R=0,4, numa representação com tensões nominais, o aumento para as séries pós processadas é de 17,2% e 26,2%, muito mais elevado que para R=0. Mais uma vez a explicação advém do facto de haver maior importância da iniciação de fenda.

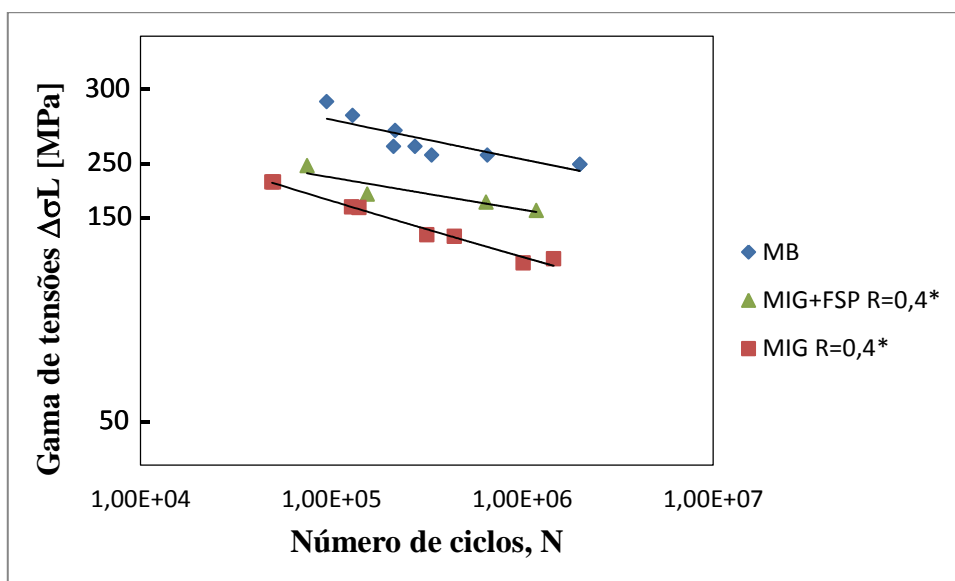


Figura 4.25. Comparação entre as séries MIG e MIG+FSP para R=0,4 e tensões locais.

No mesmo caso mas para tensões locais o gráfico da figura 4.25 é indicativo de melhorias mais baixas, para  $10^5$  ciclos 7,5%, e para  $10^6$  ciclos 18,1%, devido ao desaparecimento do efeito geométrico. No entanto, volta a observar-se que existe uma melhoria mais acentuada do que para o mesmo caso com R=0.

Podemos concluir, resumidamente, que a principal razão para a melhoria obtida através do pós processamento é a diminuição do efeito geométrico. Retirando esse efeito é ainda visível uma melhoria causada pela eliminação de tensões residuais, eliminação de defeitos da soldadura MIG e refinamento microestrutural. Deve-se lembrar que a melhoria apresentada é mais significativa para a razão de tensões  $R=0,4$ , sendo a iniciação de fenda mais preponderante neste caso, uma vez que as melhorias existentes são sobretudo na superfície da peça, tendo assim mais influência no retardar da iniciação de fenda.

## 5. CONCLUSÃO

Através do trabalho realizado foi possível concluir que o pós processamento por fricção linear de juntas T soldadas a MIG traz melhorias ao nível da resistência à fadiga. Estas melhorias são obtidas principalmente através da diminuição do efeito geométrico. Ficou também provado que este não é o único fator a ter em conta. O refinamento da microestrutura, a eliminação de defeitos inerentes ao processo de soldadura MIG e a eliminação de tensões residuais também contribuem positivamente para esta melhoria.

Obtiveram-se aumentos da gama de tensões para as vidas estudadas entre 9% e 26% depois da utilização do FSP. Estes valores são variáveis consoante a razão de tensões e a gama de tensões aplicadas nos ensaios. O aumento da resistência à fadiga cresce com o aumento da razão de tensões e com a diminuição da gama de tensões aplicadas.

Concluiu-se também que este processo é principalmente eficaz no prolongamento da fase de iniciação de fenda.

Os aspetos negativos desta técnica, para o caso desta liga, prendem-se com a adição de mais ciclos térmicos ao material pós processado, diminuindo a sua dureza, uma vez que o material em estudo, AA6082-T651, é endurecido por tratamento térmico. O custo da realização do pós processamento é outro fator a ter em conta numa perspetiva de aplicação industrial.

Como sugestões para trabalhos futuros, na continuação do presente trabalho, seria interessante analisar as tensões residuais, de forma a saber-se qual o efeito do FSP no seu alívio. A comparação entre a utilização do FSP e técnicas tradicionais de melhoramento superficial, como a granalhagem e martelagem, seria também um interessante, tal como a análise do custo destes processos.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Aluminum GMAW Welding Guide, Lincoln Electric, C8.100, (2006).
- [2] Joseph R. Davis (1993), Aluminum and Aluminum Alloys, ASM International
- [3] J. F.Oliveira Santos e L. Quintino, Processos de soldadura, 2ª edição, Edições Técnicas, (2006).
- [4] W. M. Thomas, E. D. Nicholas, J. C. Needham, M. G. Murch, P. Templesmith and C. J. Dawes, GB Patent Application No. 9125978.8, Dec. 1991, U.S. Patent No.5460317, Oct. 1995.
- [5] R.S. Mishra, Z.Y. Ma, Friction stir welding and processing, Materials Science and Engineering, R 50, Pages 1-78.
- [6] [http://en.wikipedia.org/wiki/Friction\\_stir\\_welding](http://en.wikipedia.org/wiki/Friction_stir_welding)
- [7] Ericsson, M., and Sandstrom, R., Influence of welding speed on the fatigue of friction stir welds, and comparison with MIG and TIG, International Journal of Fatigue, 25, 1379–1387 (2003).
- [8] K. Kumar and Satish V. Kailas. On the role of axial load and the effect of interface position on the tensile strength of a friction stir welded aluminium alloy Materials & Design Volume 29, Issue 4, (2008), Pages 791-797
- [9] M. De Giorgi, A. Scialpi, F.W. Panella and L.A.C. De FilippisM., Effect of shoulder geometry on residual stress and fatigue properties of AA6082 fsw joints, Journal of Mechanical Science and Technology 23 (2009) 26~35
- [10] A. Shafieizarghani et al., Ultrafine Grained 6082 Aluminium Alloy Fabricated By Friction Stir Processing, International Journal of Modern Physics B, Vol. 22, Nos. 18 & 19 (2008) 2874-2878
- [11] Y.S. Sato, H. Kokawa, M. Enmoto, S. Jogan, (1999) “ Microstructural evaluation of 6063 Aluminum during friction stir welding”, Metallurgical and Materials Transactions, A 30/9, 2429-286
- [12] C.G. Rhodes, M.W. Mahoney, W.H. Bingel, R.A. Spurling, C.C. Bampton, Scripta Mater. 36 (1997) 69.
- [13] M.W. Mahoney, C.G. Rhodes, J.G. Flintoff, R.A. Spurling, W.H. Bingel, Metall. Mater. Trans. A 29 (1998) 1955.

- [14] Moura Branco, Carlos A.G. de; Mecânica dos Materiais; Fundação Calouste Gulbenkian, 4ª edição, (2006)
- [15] Yung, J. Y. and Lawrence, F. V., Analytical and Graphical Aids for the Fatigue Design of Weldments, *Fatigue Fract Eng. Mater. Structures* Vol 8 N° 3 pp. 223-241, (1985).
- [16] M. Ericsson, R. Sandström, Influence of welding speed on the fatigue of friction stir welds, and comparison with MIG and TIG / *International Journal of Fatigue* 25 (2003) 1379–1387
- [17] 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)

## ANEXO A

### Parâmetros de soldadura MIG.

**Tabela A.1.** Parâmetros de soldadura utilizados nas várias séries.

Série	Nº de soldadura	Preparação de Junta ( em T)	I(A) Nominal	I(A) Final
1	1	Maquinado, 45 ° Aber. 2-2,5 mm Talão	230	178
	2	sem	230	178
2	1	Maquinado, 45 ° Aber. 2-2,5 mm Talão	238	170
	2	sem	236	180
3	1	Maquinado,Meio x, 45 ° Aber. 2-2,5 mm Talão	236	174
	2	Maquinado,Meio x, 45 ° Aber. 2-2,5 mm Talão	236	180
4	1	À mão, Meio x, 45 ° Aber. 2-2,5 mm Talão	242	188
	2	À mão, Meio x, 45 ° Aber. 2-2,5 mm Talão	242	188
5	1	À mão, Meio x, 45 ° Aber. 2-2,5 mm Talão	256	192
	2	À mão, Meio x, 45 ° Aber. 2-2,5 mm Talão	256	192
6	1	À mão, Meio x, 60 ° Aber. 2-2,5 mm Talão	290	208
	2	À mão, Meio x, 60 ° Aber. 2-2,5 mm Talão	290	214
7	1	Maquinado,Meio x, 45 ° Aber. 2-2,5 mm Talão	290	210
	2	Maquinado,Meio x, 45 ° Aber. 2-2,5 mm Talão	290	214
8	1	Maquinado,Meio x, 45 ° Aber. 2-2,5 mm Talão	290	214
	2	Maquinado,Meio x, 45 ° Aber. 2-2,5 mm Talão	290	204
9	1	Maquinado,Meio x, 45 ° Aber. 2-2,5 mm Talão	290	210
	2	Maquinado,Meio x, 45 ° Aber. 2-2,5 mm Talão	290	208
10	1	Maquinado,Meio x, 45 ° Aber. 2-2,5 mm Talão	296	218
	2	Maquinado,Meio x, 45 ° Aber. 2-2,5 mm Talão	296	220
11	1	Maquinado,Meio x, 60 ° Aber. 1-1,5 mm Talão	296	220
	2	Maquinado,Meio x, 60 ° Aber. 1-1,5 mm Talão	310	236
12	1	Maquinado,Meio x, 60 ° Aber. 1-1,5 mm Talão	310	226
	2	Maquinado,Meio x, 60 ° Aber. 1-1,5 mm Talão	324	250
13	1	Maquinado,Meio x, 60 ° Aber. 0,5-1 mm Talão	320	240
	2	Maquinado,Meio x, 60 ° Aber. 0,5-1 mm Talão	320	248
14	1	Maquinado,Meio x, 60 ° Aber. 0,5-1 mm Talão	320	240
	2	Maquinado,Meio x, 60 ° Aber. 0,5-1 mm Talão	320	242

**Tabela A.2.** Parâmetros de soldadura utilizados nas várias séries.

Série	V(V) Nominal	V(V) Final	Dis. da tocha (mm)	Vel. do Carro (cm/min)	Tratamento na raiz
1	27,4	26,6	17	50	Limpeza da raiz com Rebarbadora
	27,4	26,6	17	50	-
2	26,2	25,4	13	50	Limpeza da raiz com Rebarbadora
	25,4	24,8	13	50	-
3	25,4	25	13	50	Limpeza da raiz com Rebarbadora
	25,4	25	13	50	-
4	26,2	25,4	13	40	Limpeza da raiz com Rebarbadora
	26,2	25,4	13	40	-
5	27,2	26,6	13	40	Limpeza da raiz com Rebarbadora
	27,2	26,6	13	40	-
6	23,8	23,2	13	50	Limpeza da raiz com Rebarbadora
	23,8	23,2	13	50	-
7	23,8	23,4	13	50	Limpeza da raiz com Rebarbadora
	23,8	23,4	13	50	-
8	23,8	23,4	13	50	Limpeza da raiz com Rebarbadora
	23,8	23,4	13	50	-
9	23,8	23,4	13	50	Limpeza da raiz com Rebarbadora
	23,8	23,4	13	50	-
10	23,8	23,2	12	50	Limpeza da raiz com Rebarbadora
	23,8	23,2	12	50	-
11	23,8	23,2	12	50	Limpeza da raiz com Rebarbadora
	23,8	23	12	50	-
12	23,8	23	12	50	Limpeza da raiz com Rebarbadora
	23,8	23	12	50	-
13	23,8	23	12	50	Limpeza da raiz manual
	23,8	23	12	50	
14	23,8	23	12	50	Limpeza da raiz manual
	23,8	23	12	50	

## ANEXO B

Desenhos técnicos cotados para as ferramentas A e B.

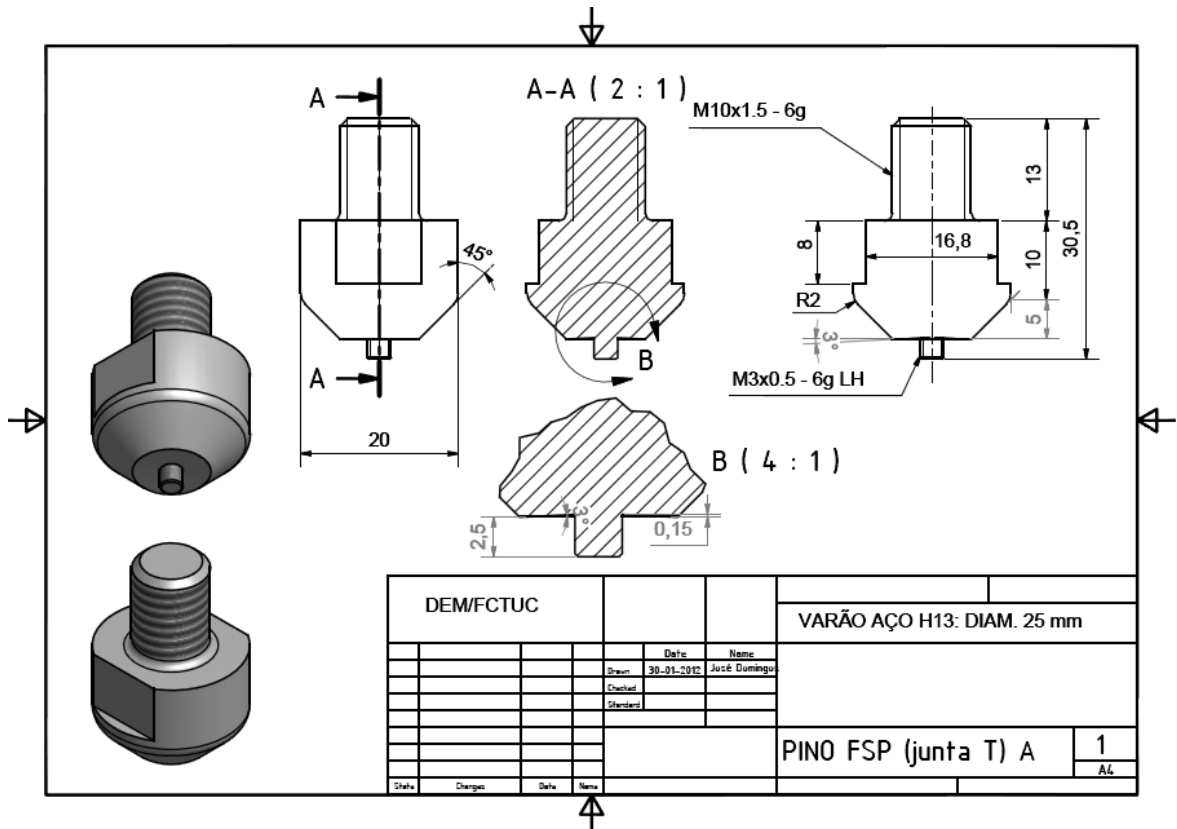


Figura B.1. Desenho 2D cotado para a ferramenta A.

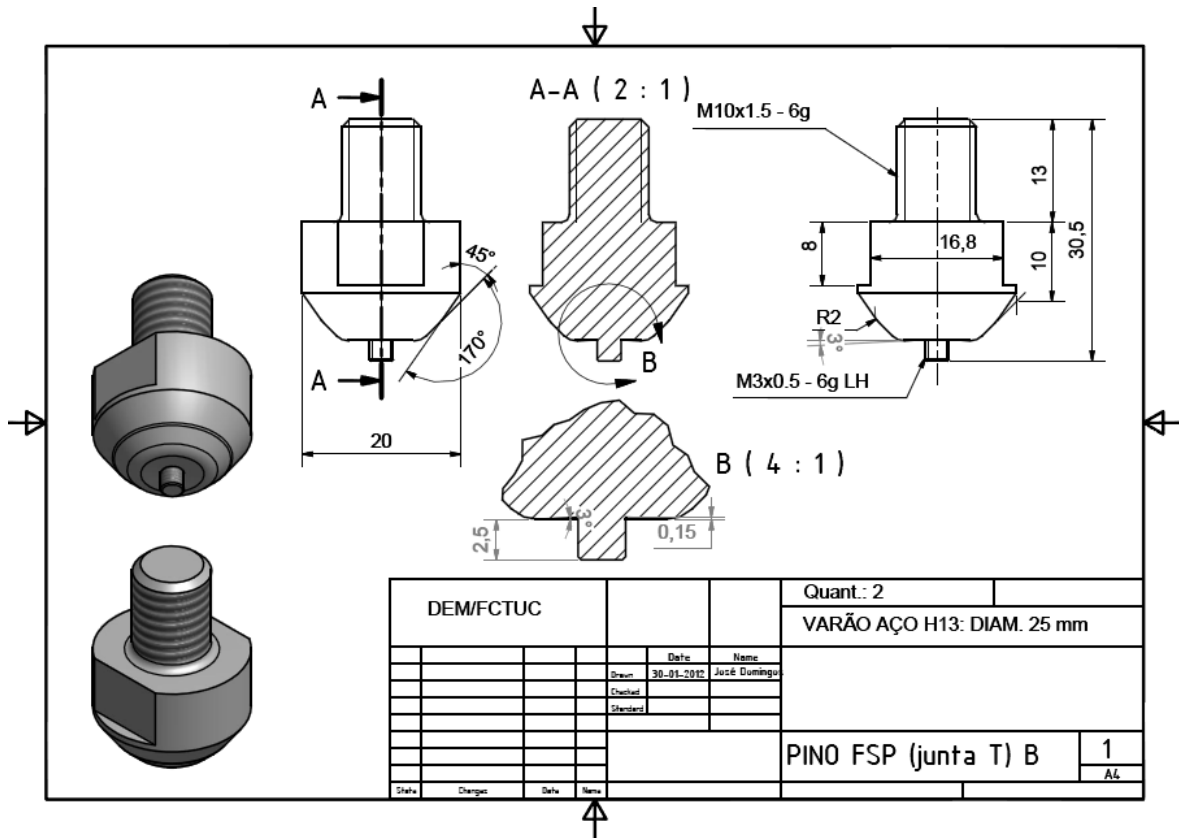


Figura B.2. Desenho 2D cotado para a ferramenta B.