

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

AVALIAÇÃO DA GEOMETRIA DE FERRAMENTA E PARÂMETROS  
DO PROCESSO FSW NA SOLDAGEM DA LIGA DE ALUMÍNIO AA 5052

por

TIAGO VALDAMERI CAPELARI

Dissertação para obtenção do Título de  
Mestre em Engenharia

Porto Alegre, Dezembro de 2006.

AVALIAÇÃO DA GEOMETRIA DE FERRAMENTA E PARÂMETROS  
DO PROCESSO FSW NA SOLDAGEM DA LIGA DE ALUMÍNIO AA 5052

por

Tiago Valdameri Capelari

Engenheiro Mecânico

Dissertação submetida ao Corpo Docente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, PROMEC, da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Título de

Mestre em Engenharia

Área de Concentração: Processos de Fabricação

Orientador: Prof. Dr. José Antônio Esmerio Mazzaferro

Comissão de Avaliação:

Prof. Dr. Afonso Reguly, PPGEM/UFRGS

Prof. Dr. Arnaldo Rubén Gonzalez, DEMEC/UFRGS

Prof. Dr. Flávio José Lorini, PROMEC/UFRGS

Prof. Dr. Flávio José Lorini  
Coordenador do PROMEC

Porto Alegre, 20 de Dezembro de 2006.

## **AGRADECIMENTOS**

Este trabalho é fruto da colaboração de diversas pessoas, às quais gostaria de dirigir meus mais sinceros agradecimentos.

Aos meus pais, Alcides e Lourdes, pelo incondicional incentivo aos estudos, pelos exemplos de dignidade, de caráter e pelo amor dedicado.

Ao meu orientador, Prof. Dr. José Antonio Esmerio Mazzaferro, pela orientação e amizade durante a realização deste trabalho.

Ao LAMEF, na pessoa do Prof. Dr. Afonso Reguly, que gentilmente permitiu que parte das análises fosse ali realizada.

Ao pessoal do Laboratório de Usinagem, Prof. Dr. Flávio José Lorini, Eng. Heraldo José Amorim, Aldoni Gabriel Wiedenhof e aos bolsistas Lucas e Fernando pela amizade e apoio.

Ao amigo, Eng. Márcio Manzato e ao Sr. Guerra, pelo auxílio fundamental na usinagem das ferramentas de soldagem.

A minha irmã, Tânia, pelo incentivo e apoio logístico no período pós-defesa.

À Talita, pelo apoio, compreensão e amor.

## RESUMO

A soldagem de ligas de alumínio sem degradação excessiva das propriedades originais do metal base apresenta-se como um obstáculo a ser superado pelas indústrias em seus processos de fabricação, uma vez que o alumínio tem sido usado cada vez de forma mais intensiva. Esforços têm sido feitos para melhorar as propriedades da união destas ligas, que quando soldadas por processos convencionais como MIG ou TIG, perdem muito de suas propriedades originais devido às elevadas temperaturas envolvidas.

Processos de união que não envolvem fusão, como rebitagem ou mesmo colagem despontam como alternativas em se tratando da união de alumínio, especialmente no setor aeronáutico. Neste sentido, o processo de soldagem denominado *Friction Stir Welding* (FSW), vem ganhando espaço nas pesquisas e também na indústria. Neste processo, uma ferramenta de alta resistência mecânica e com um perfil especial é utilizada para, por meio de atrito com as peças a serem soldadas, gerar calor e misturar mecanicamente o material da junta, consolidando a solda.

Este trabalho visa implantar o processo FSW utilizando uma fresadora universal de elevada rigidez na soldagem de chapas de alumínio AA 5052-H34 com 6,35 mm de espessura. Para tanto, três geometrias de ferramentas de soldagem foram projetadas, fabricadas e testadas, de forma a definir-se parâmetros de soldagem compatíveis com as condições fornecidas pela máquina fresadora, por meio de testes preliminares. Uma vez definidos estes parâmetros, juntas foram obtidas com as três geometrias de ferramenta disponíveis e posteriormente seus desempenhos foram comparados. Ensaio mecânicos de dobramento e tração, medição do perfil de microdurezas e análise macrográfica da seção transversal das soldas foram os métodos empregados na caracterização das propriedades resultantes. Em adição, soldas pelo processo MIG também foram obtidas e sujeitas às mesmas avaliações.

Observou-se desempenho similar entre as três geometrias de ferramenta testadas, sendo que apenas uma destas produziu soldas com ductilidade significativamente inferior às demais. Em relação à tensão de escoamento, eficiências próximas de 80% foram alcançadas por duas das geometrias, sem perda expressiva da ductilidade original. O perfil de microdurezas das amostras soldadas pelo processo FSW não demonstrou grande variação ao longo da seção transversal, ao passo que as amostras soldadas através do processo MIG apresentaram zonas bem definidas devido à natureza do processo empregado.

## **ABSTRACT**

Welding of aluminum alloys with no considerable degradation of the properties of the base metal is a problem to be overcome by industry manufacturing processes, once aluminum is being used more intensively nowadays. Efforts have been made to improve aluminum joint properties that, when welded by conventional techniques such as MIG or TIG, experience a loss in mechanical properties due to the high temperatures involved.

No-melt joining processes such as adhesive bonding or riveting are often considered when it comes to aluminum joining, especially in aerospace applications. Alternatively a welding process named Friction Stir Welding (FSW) is receiving growing attention for its potential applications where heat must be minimized or when dissimilar metals must be joined. In this process a high strength rotating tool with a special profile is introduced at the interface of the materials to be joined and translated along the joint at controlled speeds. Heat generated softens the material and allows the tool to stir while traveling along the joint.

This work aimed at producing welds on AA 5052-H34 plates, 6,35mm (0,25 inches) in thickness, using a milling machine. In order to do that, three tool geometries were designed, manufactured and tested so as to define which welding parameters generated the best results. Once these parameters were chosen, each tool produced three welds and their performance was evaluated. Transversal bending, tensile tests, micro-hardness measurements along the weld cross-section and macrographical analysis were carried out in order to assess weld properties. In addition, MIG welds were produced and subjected to the same test conditions.

Considering yield stress as an efficiency parameter, all the tested tools presented similar results – around 80% of the base metal yield stress. On the other hand, when considering elongation or performance on transversal bending tests it was noticed that the conic pin tool was not able to produce sound welds under the chosen process parameters. These welds were characterized by the presence of a longitudinal groove, as observed in macrographic analysis.

Micro-hardness measurements along FS weld cross-sections demonstrated a small variation between the different weld zones while on MIG cross-sections a higher variation in hardness values could be seen across the weld. Further MIG welds presented a larger heat affected zone than that of FS welds.

## ÍNDICE

1	Introdução.....	1
2	Objetivos e Metodologia .....	3
3	Revisão Bibliográfica .....	4
3.1	Alumínio e suas ligas.....	4
3.1.1	Classificação das Ligas de Alumínio.....	5
3.1.2	Sistema de Classificação de Têmperas.....	7
3.2	Soldagem do alumínio e suas ligas.....	9
3.2.1	Soldabilidade das ligas de alumínio .....	11
3.2.2	Processo de soldagem MIG .....	12
3.2.2.1	Parâmetros de soldagem MIG .....	13
3.2.3	Processo de soldagem FSW.....	15
3.2.3.1	Parâmetros do processo .....	17
3.2.3.2	Equipamento para soldagem FSW .....	21
4	Materiais e Equipamentos .....	23
4.1	Material utilizado.....	23
4.2	Preparação dos corpos de prova para soldagem .....	24
4.2.1	Corpos de prova para soldagem FSW .....	24
4.2.2	Corpos de prova para soldagem MIG.....	25
4.3	Equipamentos utilizados.....	26
4.4	Ferramentas de soldagem .....	27
5	Procedimento Experimental .....	30
5.1	Soldagem FSW – Testes preliminares.....	30
5.2	Soldagem FSW – Parâmetros fixos .....	32
5.3	Soldagem MIG .....	34
5.4	Usinagem dos corpos de prova.....	35
6	Resultados e Discussão.....	37
6.1	Testes preliminares .....	37
6.1.1	Ferramenta com pino cônico liso.....	37
6.1.2	Ferramenta de pino facetado.....	39
6.1.3	Ferramenta de pino cônico com rosca .....	40
6.1.4	Modificações implementadas .....	41
6.2	Soldagem FSW .....	42

6.2.1 Ensaio de dobramento .....	45
6.2.2 Ensaio de tração.....	47
6.2.3 Análise metalográfica.....	51
6.2.4 Perfis de dureza .....	53
6.3 Soldagem MIG .....	55
6.3.1 Ensaio de dobramento .....	56
6.3.2 Ensaio de tração.....	57
6.3.3 Análise metalográfica.....	58
6.3.4 Perfis de dureza .....	58
7 Conclusões.....	60
8 Referências Bibliográficas.....	62
9 Anexo A – Juntas para soldagem MIG.....	66
10 Anexo B – Desenho técnico das ferramentas .....	67

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3.1 – Consumo do alumínio primário em 2004 no Brasil. ....	4
Figura 3.2 – Solubilidade do hidrogênio em alumínio. ....	10
Figura 3.3 – Esquema do equipamento de soldagem MIG. ....	12
Figura 3.4 – Modelo esquemático de ferramenta utilizada no processo FSW. ....	16
Figura 3.5 – Esquema ilustrando as etapas do processo. ....	16
Figura 3.6 – Geometrias de ombro - vista inferior. ....	18
Figura 3.7 – Geometria utilizada na soldagem de compósitos de Al. ....	19
Figura 3.8 – Ferramentas empregadas na soldagem de Al 2014. ....	19
Figura 3.9 – Ferramenta FSW e variáveis geométricas relacionadas. ....	21
Figura 4.1 – Macrografia do material utilizado nos ensaios. ....	23
Figura 4.2 – Acabamento do chanfro para soldagem pelo processo FSW. ....	25
Figura 4.3 – Dimensões do chanfro para soldagem MIG. ....	25
Figura 4.4 – Máquina fresadora universal utilizada na soldagem FSW. ....	26
Figura 4.5 – Sensor automotivo de rotação adaptado. ....	27
Figura 4.6 – Ferramentas para soldagem FSW. ....	28
Figura 4.7 – Detalhes do ombro e pino. ....	28
Figura 5.1 – Suporte de fixação das chapas. ....	33
Figura 5.2 – Dispositivo utilizado na soldagem MIG semi-automática. ....	34
Figura 5.3 – Representação esquemática do posicionamento dos corpos de prova na chapa. ....	35
Figura 6.1 – Macrografia (Reagente Tuckers) - Ferramenta de pino cônico. ....	38
Figura 6.2 – Diminuição no tamanho da descontinuidade com aumento do ângulo de ataque. ....	38
Figura 6.3 – Macrografia (Reagente Tuckers) - Ferramenta de pino facetado. ....	39
Figura 6.4 – Diminuição no tamanho da descontinuidade com aumento do ângulo de ataque. ....	39
Figura 6.5 – Macrografia (Reagente Tuckers) - Ferramenta de pino cônico com rosca. ....	40
Figura 6.6 – Comportamento da velocidade de rotação durante a soldagem. ....	42
Figura 6.7 – Aparência do cordão - Ferramenta cônica lisa. ....	43
Figura 6.8 – Descontinuidade observada no furo remanescente. ....	44
Figura 6.9 – Aparência do cordão - Ferramenta facetada. ....	44
Figura 6.10 – Aparência do cordão - Ferramenta com rosca. ....	45
Figura 6.11 – Dobramento transversal de face - Ferramenta cônica lisa. ....	46
Figura 6.12 – Defeito observado no dobramento transversal de raiz. ....	46
Figura 6.13 – Dobramento de face e raiz. Ferramenta facetada (a) e cônica com rosca (b). ....	47



Figura 6.14 – Ruptura sobre o cordão de solda FSW - geometria cônica lisa.....	48
Figura 6.15 – Ruptura sobre o cordão de solda FSW - geometria facetada. ....	49
Figura 6.16 – Ruptura sobre o cordão de solda FSW - geometria cônica com rosca.....	50
Figura 6.17 – Amostras da seção transversal - ferramenta de soldagem cônica lisa.....	51
Figura 6.18 – Detalhe da descontinuidade na soldagem com geometria cônica lisa.....	51
Figura 6.19 – Amostras da seção transversal - ferramenta de soldagem facetada. ....	52
Figura 6.20 – Amostras da seção transversal - ferramenta de soldagem cônica com rosca. ....	52
Figura 6.21 – Perfil de microdureza médio - ferramenta cônica lisa. ....	53
Figura 6.22 – Perfil de microdureza médio - ferramenta facetada. ....	54
Figura 6.23 – Perfil de microdureza médio - ferramenta cônica com rosca.....	54
Figura 6.24 – Aparência do cordão - processo MIG. ....	55
Figura 6.25 – Dobramento transversal de face. ....	56
Figura 6.26 – Dobramento transversal de raiz.....	56
Figura 6.27 – Ruptura ao lado do cordão de solda MIG. ....	58
Figura 6.28 – Amostras da seção transversal - solda MIG.....	58
Figura 6.29 – Perfil de microdureza médio - processo MIG.....	59

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 3.1 – Principais elementos de liga das séries de alumínio.....	6
Tabela 3.2 – Soldabilidade das mais comuns ligas de alumínio. ....	12
Tabela 3.3 – Parâmetros para soldagem MIG de Al - chapa 6,35 mm.....	14
Tabela 4.1 – Composição química da liga AA 5052-H34.....	23
Tabela 4.2 – Resultados dos ensaios mecânicos da liga AA 5052-H34.....	24
Tabela 4.3 – Detalhes dimensionais das ferramentas de soldagem.....	28
Tabela 5.1 – Parâmetros testados nos ensaios preliminares – fase I. ....	31
Tabela 5.2 – Parâmetros testados nos ensaios preliminares – fase II. ....	31
Tabela 5.3 – Parâmetros utilizados na soldagem das chapas pelo processo FSW. ....	32
Tabela 5.4 – Parâmetros de soldagem MIG. ....	34
Tabela 5.5 – Identificação dos CPs sujeitos à dobramento de face ou raiz.....	36
Tabela 6.1 – Dimensões finais das ferramentas de soldagem FSW. ....	41
Tabela 6.2 – Velocidade de rotação efetiva durante a soldagem.....	43
Tabela 6.3 – Ensaio de tração - Ferramenta com pino cônico liso.....	48
Tabela 6.4 – Ensaio de tração - Ferramenta com pino facetado.....	49
Tabela 6.5 – Ensaio de tração - Ferramenta com pino cônico com rosca. ....	50
Tabela 6.6 – Ensaio de tração - solda MIG. ....	57

## 1 Introdução

A utilização do alumínio e de suas ligas tem experimentado um constante crescimento nos diversos setores da indústria de manufatura, devido às características apresentadas por este metal. O baixo peso específico, aliado à alta resistência mecânica de algumas ligas, faz com que o alumínio seja a primeira escolha em termos de material para atender às exigências de determinadas aplicações.

A legislação ambiental cada vez mais rígida em diversos países também contribui para que as ligas de alumínio aumentem sua parcela de participação no mercado de transportes, especificamente. A redução dos índices de emissão de poluentes passa, sem dúvida, pelo aumento da eficiência dos automóveis. O crescente interesse no emprego de energias alternativas, como o biocombustível, o gás natural, a eletricidade ou mesmo as células de combustível a hidrogênio também demanda por índices maiores de eficiência nos veículos automotores.

Com relação à autonomia, a substituição de componentes de aço por componentes de alumínio é uma tendência que pode ser observada nos automóveis de passeio atuais: motores com bloco em alumínio, partes da carroceria, radiadores, rodas, e mais recentemente protótipos de escapamento. Outra questão que merece destaque é a da reciclagem deste metal. Cerca de 90% do alumínio presente em veículos é recuperado e reciclado, com enormes vantagens ambientais e econômicas (ABAL, 2006).

Entretanto, o aumento da utilização das ligas de alumínio não só no setor de transportes, mas também no aeronáutico e de embalagens, faz com que os processos de fabricação existentes nas indústrias adaptem-se ao emprego do alumínio. Neste contexto, os processos de soldagem surgem como um ponto crítico do processo de manufatura, uma vez que as propriedades deste metal acabam por se degradar quando submetido à soldagem por processos convencionais, onde ocorre fusão do metal base. Alternativas visando contornar esta dificuldade imposta por processos tradicionalmente utilizados, como *Metal Inert Gas* (MIG) ou *Tungsten Inert Gas* (TIG) surgem em processos de soldagem por fricção, onde a união das peças ocorre sem fusão do material base.

Uma técnica de soldagem que vem ganhando espaço na indústria automotiva e aeronáutica é o processo denominado *Friction Stir Welding* (FSW). Neste método de soldagem uma ferramenta de elevada resistência mecânica com um perfil especial é utilizada para, mediante atrito com as peças a serem soldadas, gerar calor promovendo a mistura mecânica dos materiais envolvidos, assim consolidando a solda. Embora a técnica tenha merecido destaque,

sendo objeto de estudo em diversos centros de pesquisa tecnológica e Universidades do exterior, pouco se tem observado quanto a trabalhos realizados inteiramente no Brasil. Um dos motivos para isto certamente reside na necessidade de um alto investimento para a obtenção dos equipamentos específicos à soldagem FSW.

Neste sentido esse trabalho visa, a partir de uma aproximação experimental, implementar o processo FSW com o auxílio de uma fresadora universal adaptada para a soldagem de chapas de alumínio AA 5052-H34 com 6,35 mm de espessura. O trabalho também contempla o projeto, fabricação e teste de três geometrias de ferramentas de soldagem, indispensáveis ao objetivo do mesmo, buscando definir as melhores combinações de parâmetros disponibilizados pela máquina utilizada.

Como forma de avaliação do desempenho obtido, as soldas são submetidas à caracterização de suas propriedades mecânicas por meio de ensaios de tração e de dobramento transversal de face e de raiz. A medição da microdureza em diversos pontos sobre a seção transversal também é realizada, buscando quantificar a variação na dureza imposta pelo processo ao longo do perfil. Em adição, macrografias destas seções transversais também são analisadas, visando identificar possíveis descontinuidades oriundas do processo. Na tentativa de traçar um comparativo entre o desempenho dos processos FSW e MIG, soldas por meio deste último foram obtidas e sujeitas as mesmas avaliações impostas ao processo FSW.

O trabalho divide-se em oito capítulos, onde as diversas etapas são detalhadamente descritas. No capítulo 2 são expostos de forma direta os objetivos e a metodologia empregada na sua abordagem. A partir do capítulo 3, uma revisão bibliográfica sobre temas pertinentes ao trabalho é feita, dando especial ênfase ao alumínio e suas ligas e aos processos de soldagem relevantes. No capítulo 4, especificam-se os materiais e equipamentos utilizados na execução das diferentes etapas experimentais do trabalho, e no capítulo 5 descrevem-se os procedimentos adotados na soldagem dos corpos de prova. O capítulo 6 apresenta os resultados obtidos nos ensaios mecânicos de tração e dobramento, bem como os perfis de microdureza medidos e as macrografias analisadas. A discussão destes resultados é feita juntamente com a exposição dos mesmos, e no capítulo 7 são delineadas as conclusões obtidas a partir destas análises. Por fim, o capítulo 8 apresenta as referências bibliográficas consultadas e em seguida os anexos com detalhes complementares do trabalho.

## 2 Objetivos e Metodologia

Este trabalho tem como objetivo principal a obtenção de juntas soldadas pelo processo FSW isentas de defeitos e que apresentem resistência mecânica comparável àquela obtida através dos processos convencionais de soldagem, como o processo MIG.

Para isto, a seguinte metodologia foi adotada:

- Realização de uma revisão bibliográfica sobre os assuntos correlatos, a fim de melhor compreender os mecanismos envolvidos na soldagem pelo processo FSW e processos convencionais de soldagem.
- Compreensão da influência das variáveis do processo sobre a qualidade final de uma junta soldada por FSW.
- Projeto e fabricação de diferentes ferramentas de soldagem, verificando sua adequação ao processo.
- Especificação de uma metodologia de soldagem para o processo FSW com base nos equipamentos disponíveis e estabelecimento de procedimentos de soldagem para a obtenção de juntas isentas de defeitos, utilizando as ferramentas desenvolvidas.
- Avaliação qualitativa e quantitativa do desempenho das juntas soldadas através de ensaios mecânicos de dobramento transversal, tração, perfil de microdurezas e macrografias das seções transversais das soldas.
- Comparação do desempenho das juntas soldadas por FSW com juntas soldadas pelo processo MIG.

### 3 Revisão Bibliográfica

#### 3.1 Alumínio e suas ligas

O alumínio é o segundo elemento metálico mais abundante na crosta terrestre. Devido às suas notáveis propriedades, como excelente resistência à corrosão, baixa densidade, elevada condutividade térmica e elétrica, além da facilidade de processamento através dos diversos métodos de fabricação fazem com que ele ocupe posição de destaque no cenário industrial mundial. O alumínio é o segundo metal mais utilizado no mundo, perdendo apenas para o aço.

A resistência mecânica de algumas ligas de alumínio, em certos casos superior à de alguns aços com baixo teor de Carbono, aliada à excelente resistência à corrosão e a um peso específico de  $2,7\text{g/cm}^3$  (equivalente à 1/3 do peso específico do aço), fazem com que estas ligas apresentem-se como uma alternativa na substituição de componentes ou partes estruturais visando a redução de peso e o conseqüente aumento de carga útil. Tais características tornam as ligas de alumínio um material atraente aos mais diversos segmentos industriais, com destaque ao setor de transportes, mundialmente o maior consumidor dentre os demais (DAVIS, 1993). No Brasil, o setor de embalagens lidera o consumo, como pode ser visto na figura 3.1.

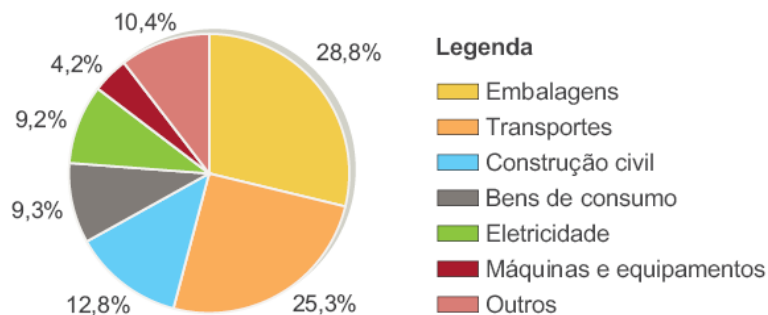


Figura 3.1 – Consumo do alumínio primário em 2004 no Brasil. (ABAL, 2005)

A obtenção do alumínio é toda baseada no processo Hall-Heroult. Neste processo, a alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) refinada da Bauxita é dissolvida em um banho de criolita e sais de fluoreto. Eletrodos de carbono são utilizados para aplicar elevada corrente elétrica, provocando a dissociação da alumina, de modo que o alumínio deposita-se no cátodo, de onde é periodicamente removido para posterior processamento e fabricação de lingotes. As principais impurezas do processo são Ferro e Silício, embora Zinco, Gálio, Titânio e Vanádio também sejam encontrados.

A produção do alumínio divide-se na obtenção do alumínio primário e secundário. O alumínio primário é aquele obtido através do processo de redução da alumina, e caracteriza-se

pelo elevado consumo de energia elétrica. O alumínio secundário é aquele obtido através do re-processamento de sucata, em grande parte proveniente da reciclagem, e de sobras de processos de transformação. Devido às questões ambientais e ao baixo custo de re-processamento, a produção de alumínio secundário tem crescido em importância. Apenas 5% da energia elétrica que é consumida na obtenção do alumínio primário é necessária na sua reciclagem (TAYRA, 1999).

O Brasil ocupa posição de destaque entre os produtores mundiais de alumínio. Atualmente o país é o sexto maior produtor de alumínio primário, e possui a terceira maior reserva de bauxita do mundo (ABAL, 2005). As maiores jazidas brasileiras encontram-se em Minas Gerais e no Pará.

Embora o Brasil não seja um dos principais produtores do mercado internacional de alumínio, as indústrias deste segmento têm papel importante na economia do país. Nos anos de 2004 e 2005 elas representaram respectivamente 6,7 e 5,4% do saldo da balança comercial brasileira (ABAL, 2005). Apesar disso, o país apresenta baixo consumo per capita do metal, demonstrando a possibilidade de grande crescimento deste setor (TAYRA, 1999).

### **3.1.1 Classificação das Ligas de Alumínio**

A designação das diferentes ligas de alumínio é feita através de sistemas internacionais propostos por algumas associações como a Aluminum Association (AA) e International Organization for Standardization (ISO). A nomenclatura proposta pela AA é a mais amplamente utilizada sendo, portanto, a adotada neste trabalho.

As ligas de alumínio podem, segundo sua composição, ser divididas em duas categorias, cada qual com seu próprio sistema de classificação: composições para fundição e composições para trabalho mecânico. As composições para trabalho mecânico, e objeto de estudo neste trabalho, são classificadas em séries de quatro dígitos, de acordo com o principal elemento de liga adicionado, conforme ilustra a tabela 3.1.

O significado dos 4 dígitos diferem-se entre a série 1xxx e demais séries. Na série 1xxx, o segundo algarismo, se igual a zero, indica que as impurezas presentes são as naturais do processo de fabricação. Se diferente de zero, indica que há controle especial na concentração de determinada impureza. O terceiro e quarto dígitos indicam o percentual de alumínio além dos 99% existentes. No caso de um alumínio 1045, o percentual de alumínio presente será 99,45%, sendo o restante, impurezas naturais do processo.

Tabela 3.1 – Principais elementos de liga das séries de alumínio.

Série	Principal elemento de liga
1xxx	Al $\geq$ 99%
2xxx	Cu
3xxx	Mn
4xxx	Si
5xxx	Mg
6xxx	Mg/Si
7xxx	Zn

Para as séries de 2xxx a 9xxx, o primeiro dos dígitos indica a série a qual a liga pertence e, por conseguinte o principal elemento de adição. O segundo dígito irá indicar se a composição da liga é igual à liga desenvolvida originalmente (se igual à zero) ou se a liga original sofreu alteração na sua composição química (algarismos de 1 a 9). O terceiro e quarto dígitos apenas diferenciam as ligas dentro de uma mesma série.

Dentre estas séries, é ainda possível fazer-se uma subdivisão quanto ao mecanismo de endurecimento ao qual as ligas respondem e que promovem o aumento da dureza e da resistência mecânica. As ligas das séries 2xxx, 6xxx e 7xxx são classificadas como tratáveis termicamente, enquanto as ligas das séries 3xxx, 4xxx e 5xxx são denominadas de endurecíveis por deformação. A seguir descreve-se as características gerais de cada uma das séries de ligas de alumínio, bem como suas mais freqüentes áreas de aplicação.

**Série 1xxx:** Com teor de pureza igual ou superior à 99%, encontra aplicação principalmente nas áreas elétrica e química. Possui excelente resistência à corrosão, elevadas condutividade térmica e elétrica, elevada ductilidade e baixa resistência mecânica. Respondem moderadamente à processos de endurecimento por deformação devido ao alto teor de pureza.

**Série 2xxx:** Tendo o Cobre como principal elemento de liga, as propriedades mecânicas desta série podem ser superiores às de alguns aços com baixo teor de Carbono. São largamente utilizadas em aplicações estruturais. Possui boa usinabilidade, baixa soldabilidade e baixa resistência a corrosão. Normalmente as características à corrosão são melhoradas por meio de recobrimento com alumínio de alta pureza ou por ligas da série 6xxx (Cladamento ou *Alclad*).



**Série 3xxx:** As ligas desta série são de moderada resistência mecânica, encontrando aplicação nos mais diversos segmentos, desde utensílios domésticos, trocadores de calor e placas de trânsito até latas de bebida. O principal elemento de liga é o Manganês, embora apresente solubilidade máxima de apenas 1,5%. A máxima resistência mecânica é obtida por meio de trabalho mecânico.

**Série 4xxx:** O principal elemento de liga desta série é o Silício, em teores de até 12%. Sua função é baixar a temperatura de fusão destas ligas sem que ocorra fragilização. Por fundirem-se em temperaturas mais baixas que as demais séries, estas ligas são utilizadas principalmente como arames de solda e ligas de brasagem.

**Série 5xxx:** O Magnésio, principal elemento de liga desta série, em combinação com o Manganês resulta em ligas de média-alta resistência mecânica. De boa soldabilidade e com destacada resistência à corrosão (principalmente em atmosfera salina), esta série encontra aplicação em diferentes setores. A gama de produtos varia desde navios e embarcações, tanques criogênicos e latas até estruturas automotivas.

**Série 6xxx:** Nesta série Magnésio e Silício são adicionados em proporções suficientes para formação de Silicato de Magnésio ( $Mg_2Si$ ). As ligas desta série têm elevada resistência à corrosão, boa conformabilidade, boa soldabilidade e são de fácil usinagem. São utilizadas para uso arquitetônico, quadros de bicicletas e também estruturas soldadas.

**Série 7xxx:** Em teores de 1 a 8%, o Zinco é o principal elemento de liga, embora Magnésio, Cobre, Cromo e Zircônio também podem estar presentes em menores quantidades. O Zinco, combinado ao Magnésio, confere às ligas desta série altíssima resistência mecânica, o que as tornam muito utilizadas em aplicações estruturais, principalmente pela indústria aeronáutica.

### 3.1.2 Sistema de Classificação de Têmperas

Além do sistema de classificação por séries, um sistema adicional é utilizado para especificar a seqüência de tratamentos térmicos ou mecânicos ao qual determinada liga de alumínio foi submetida durante seu processo produtivo. A esta condição final baseada na seqüência de tratamentos termo-mecânicos dá-se o nome de têmpera.

A designação das têmperas é feita através de uma letra maiúscula seguida de dois ou três dígitos (DAVIS, 1990). Esta seqüência é separada do nome da liga por um hífen. O significado da classificação das têmperas é detalhado a seguir:

F: Como fabricado. Aplica-se a produtos fabricados por deformação a frio, a quente ou fundição onde nenhum controle especial foi empregado sobre as condições térmicas ou endurecimento por deformação ocorrido.

O: Recozido. Aplica-se a produtos que passaram por recozimento a fim de obter-se redução da resistência mecânica e a produtos fundidos para aumentar a ductilidade e estabilidade dimensional.

H: Endurecido por deformação (aplicável apenas às ligas para trabalho mecânico). Indica que o produto teve sua resistência mecânica aumentada através de encruamento, com ou sem tratamento térmico posterior. A letra H é sempre seguida por um ou dois dígitos que indicam a realização ou não de alívio de tensões e o percentual de redução sofrido, respectivamente.

W: Tratamento térmico de solubilização. Esta têmpera é aplicável às ligas cuja resistência espontaneamente modifica-se em temperatura ambiente durante um período de meses ou mesmo anos após tratamento térmico de solubilização. Esta designação só é válida quando especificar o período de duração do envelhecimento natural (por exemplo, W ½h).

T: Tratamento térmico de solubilização. Aplicável às ligas cuja resistência estabiliza-se em um período de até algumas semanas após a realização de tratamento térmico de solubilização. Se as propriedades estabilizam-se em temperatura ambiente, diz-se que a liga é envelhecida naturalmente. Caso o material seja submetido à temperatura, diz-se envelhecido artificialmente. A letra T geralmente é seguida por um ou dois dígitos, que especificam a seqüência de tratamentos termo-mecânicos realizados.

### 3.2 Soldagem do alumínio e suas ligas

A aplicação das ligas de alumínio torna-se restrita quando os processos de união disponíveis não atendem às necessidades de cada aplicação. Isto é particularmente importante na soldagem devido à sensibilidade que as propriedades de resistência mecânica das ligas endurecidas por envelhecimento ou deformação apresentam ao calor gerado nos processos ao arco elétrico (EAA, 2006).

No caso das ligas endurecíveis por trabalho mecânico, o calor envolvido na soldagem por arco elétrico remove parte ou todos os efeitos decorrentes de prévias deformações. A resistência mecânica na zona afetada pelo calor (ZAC) não será maior do que aquela encontrada na liga em estado recozido. As ligas endurecíveis por precipitação, entretanto, apresentam resistência mecânica levemente inferior ao metal base. Parte da resistência mecânica e da ductilidade pode ser recuperada por meio de tratamentos de solubilização e envelhecimento após a soldagem.

A soldagem é um dos processos de fabricação que possui maior importância na expansão do uso das ligas de alumínio para os diversos segmentos industriais. Os processos utilizados devem produzir juntas soldadas com resistência similar à do metal base, apresentar bom aspecto visual, bom desempenho à vida em fadiga e resistência à corrosão. Dentre os processos utilizados para atender a estas exigências, os de maior importância atualmente são os que utilizam gás inerte de proteção, como os processos TIG e MIG (DAVIS, 2002).

O processo de soldagem TIG foi desenvolvido antes que o processo MIG e durante certo período foi utilizado para todas as espessuras de metal e tipos de juntas (SAUNDERS, 1989). Atualmente, o processo TIG é mais voltado para espessuras de alumínio de até 6,3 mm e na execução de passes de raiz, em aplicações onde elevada qualidade seja indispensável. Por sua vez, a soldagem MIG é a mais amplamente utilizada principalmente devido à alta velocidade de soldagem e conseqüente produtividade. O processo MIG, por ser utilizado neste trabalho, será discutido mais detalhadamente em tópicos subseqüentes.

De acordo com diversos autores (Saunders, 1989; Davis, 1990; Praveen e Yarlagadda, 2005), dentre as propriedades das ligas de alumínio de maior influência nos processos de soldagem, destacam-se:

- Formação de camada de óxido;
- Solubilidade do hidrogênio;
- Características térmicas;
- Características elétricas;

Formação de Camada de Óxido: A formação da camada de óxido ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) ocorre devido à alta afinidade química entre o alumínio e o oxigênio. Esta camada constitui uma proteção natural à corrosão que, entretanto, é facilmente removida por processos de soldagem ao arco elétrico. O elevado ponto de fusão deste óxido ( $2050^\circ\text{C}$ ) aliado a uma camada excessivamente espessa, porém, poderá impedir a abertura do arco elétrico ou resultar em falta de fusão. Nestes casos, recomenda-se a redução da espessura desta camada por meios químicos ou mecânicos como escovamento e/ou usinagem, tanto das superfícies a serem unidas, quanto da região de contato do metal com o cabo-terra. O aumento desta camada pode ser associado a processos prévios de anodização, tratamentos térmicos ou mesmo a condições de estocagem do material em ambientes úmidos.

Solubilidade do hidrogênio: A solubilidade quase nula do hidrogênio em alumínio sólido é a causa principal de porosidade na soldagem das ligas de alumínio (Davis, 2002). Entretanto, em temperaturas elevadas como as da poça de fusão, grandes quantidades de hidrogênio podem ser absorvidas, como indica a figura 3.2.

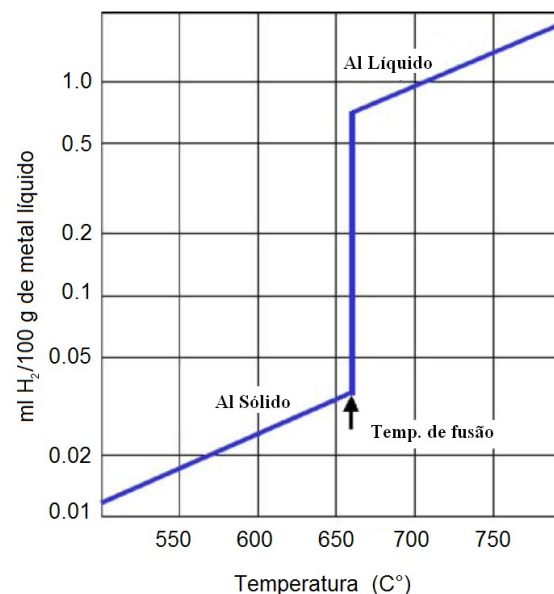


Figura 3.2 – Solubilidade do hidrogênio em alumínio. (Praveen e Yarlagadda, 2005)

Com a rápida solidificação da poça de fusão, a solubilidade do hidrogênio no alumínio decai rapidamente. O hidrogênio que excede o limite de solubilidade forma então bolhas de gás caso não consiga sair da poça em solidificação. Segundo Praveen e Yarlagadda (2005), este é um dos principais problemas na soldagem do alumínio, pois reduz a resistência à fadiga e à tração da junta soldada. Comumente, as principais fontes de hidrogênio na soldagem são umidade nas

superfícies a serem soldadas ou no metal de adição, condensação no interior de tochas refrigeradas à água, metal base ou metal de adição sujos com óleo lubrificante ou ainda impureza do gás de proteção.

Características Térmicas: Embora a temperatura de fusão seja inferior à dos metais ferrosos, um maior aporte de calor é necessário para compensar as perdas devido à elevada condutividade térmica e calor específico das ligas de alumínio. Estas características as tornam sensíveis às variações no aporte de calor, podendo ocasionar variações na fusão e na penetração da solda em processos rápidos como MIG. Além disso, o alto coeficiente de expansão térmica (2 vezes maior que dos aços) associado à alta contração na solidificação (6% por volume), resulta em problemas de distorção, que deverão ser controlados através da seqüência de passes e da correta fixação das peças.

Características Elétricas: Na soldagem ao arco elétrico, as características elétricas do alumínio não apresentam grande influência como o fazem na soldagem por resistência elétrica. Neste processo, o calor gerado depende da resistência imposta pelo material ao fluxo de corrente elétrica. Devido à alta condutividade elétrica do alumínio, correntes mais elevadas deverão ser utilizadas para produzir-se o mesmo aquecimento obtido na soldagem de aços. Nos processos ao arco elétrico. Outro aspecto é a fixação do cabo terra, que nos processos ao arco elétrico, pode ser feita em qualquer ponto da peça. Problemas de sopro elétrico são minimizados pelo fato do alumínio ser não-magnético.

### **3.2.1 Soldabilidade das ligas de alumínio**

Define-se soldabilidade como a capacidade de um material ser soldado sob condições de fabricação impostas por uma específica e adequadamente projetada estrutura e de desempenhar satisfatoriamente sua função em serviço (Olson, 1977).

Considerando-se os processos TIG e MIG, uma classificação geral quanto à soldabilidade das ligas de alumínio pode ser proposta. De uma forma geral, as ligas que apresentam melhor soldabilidade, ou seja, são mais facilmente soldadas, são aquelas pertencentes às séries 1xxx, 3xxx, 5xxx e 6xxx. Em seguida, vêm as séries 4xxx e 2xxx que podem ser soldadas, mas requerem técnicas especiais e apresentam perda de ductilidade. Por fim, as ligas de alta resistência mecânica da série 7xxx são classificadas como não recomendadas para soldagem. A

esta última, entretanto, deve-se destacar as ligas 7005 e 7039 que foram especialmente desenvolvidas com o intuito de melhorar a soldabilidade.

A tabela 3.2 mostra em detalhes esta classificação segundo a soldabilidade das diversas ligas de alumínio. Somente estão listadas as ligas para trabalho mecânico.

Tabela 3.2 – Soldabilidade das mais comuns ligas de alumínio. (Adaptada de Olson, 1977)

Soldabilidade	Ligas
Prontamente soldáveis	1xxx, 1350, 1060, 1100, 2219, 3003, 3004, 5005, 5050, 5052, 5083, 5086, 5154, 5254, 5454, 5456, 5652, 6010, 6061, 6063, 6101, 6151, 7005, 7039
Soldáveis na maioria das aplicações <sup>1</sup>	2014, 2036, 2038, 4032
Soldabilidade limitada <sup>2</sup>	2024
Soldagem não recomendada	7021, 7029, 7050, 7075, 7079, 7129, 7150, 7178, 7475

<sup>1</sup> Pode necessitar de técnicas especiais;      <sup>2</sup> Sempre requer técnicas especiais.

### 3.2.2 Processo de soldagem MIG

O processo de soldagem MIG é um processo de soldagem onde calor é gerado por um arco elétrico entre um eletrodo consumível e a peça a ser soldada. O eletrodo, um arame metálico continuamente alimentado, torna-se o metal de adição ao ser consumido durante o processo. A poça de fusão, eletrodo, arco elétrico e áreas adjacentes são protegidos de contaminação atmosférica por um fluxo de gás inerte (ou mistura de gases) de proteção, que é direcionado através da tocha de soldagem. Na figura 3.3, tem-se esquematicamente a representação do equipamento de soldagem MIG.

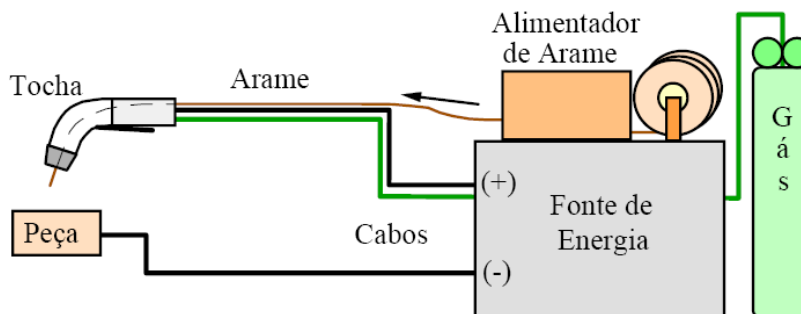


Figura 3.3 – Esquema do equipamento de soldagem MIG.

Originalmente o processo foi desenvolvido para a soldagem de ligas de magnésio e alumínio. Hoje, entretanto, a maioria dos metais e ligas pode ser soldado através deste processo, com exceção dos metais com baixo ponto de fusão, tais como as ligas de zinco, chumbo e estanho ou de ligas que contenham estes elementos em teor elevado. Os metais de melhor soldabilidade através deste processo são os aços carbono, aços baixa liga, aços inoxidáveis, alumínio e as ligas das séries 3000, 5000 e 6000, além das ligas de cobre e ligas de magnésio. As ligas das séries 2000 e 7000, além dos ferros fundidos e titânio também podem ser soldados, mas requerem cuidados adicionais.

Na grande maioria das aplicações, a soldagem MIG é realizada em polaridade inversa, ou seja, corrente contínua e eletrodo positivo (CCEP). Este tipo de ligação caracteriza-se por um arco elétrico estável, transferência metálica suave, poucos respingos, resulta num cordão de solda de boa aparência e também promove maior penetração.

A polaridade direta (corrente contínua e eletrodo negativo – CCEN) raramente é utilizada. Embora a taxa de fusão do eletrodo seja maior do que em CCEP, o arco elétrico apresenta-se muito instável e a penetração obtida é menor. De forma similar, a soldagem MIG em corrente alternada normalmente não é utilizada devido à extinção do arco elétrico na inversão da polaridade (corrente nula) ou, no caso de haver retificação, devido à instabilidade do arco elétrico resultante.

### **3.2.2.1 Parâmetros de soldagem MIG**

Os parâmetros de soldagem sempre afetam as características da solda, como a penetração, a altura e largura do cordão, taxa de deposição, além de aspectos microestruturais. Na soldagem MIG, dentre os vários parâmetros de soldagem existentes, pode-se citar:

- Velocidade de alimentação do arame (corrente de soldagem)
- Tensão do arco elétrico
- Velocidade de soldagem
- Gás de proteção (composição e vazão)
- Diâmetro do eletrodo
- Extensão do eletrodo (*stickout*)
- Posição da tocha (inclinação)

A tabela 3.3 apresenta os valores típicos de parâmetros utilizados na soldagem MIG de alumínio em juntas de topo, para chapas com 6,35 mm (1/4”) nas diferentes posições de soldagem.

Tabela 3.3 – Parâmetros para soldagem MIG de Al - chapa 6,35 mm. (Adaptado de Davis, 2002).

Posição <sup>5</sup> e Preparação <sup>6</sup> da junta	Abertura de raiz [mm]	Passes <sup>7</sup>	Diâmetro do eletrodo [mm]	Corrente (CCEP) [A]	Tensão [V]	Vazão de Argônio [L/min]	Velocidade de Soldagem [mm/min]
P B	0 – 2,4	1F, 1R	1,2 – 1,6	175 – 200	24 – 28	19	600 – 780
P F	0 – 2,4	2	1,2 – 1,6	185 – 225	24 – 29	19	600 – 780
V, H F	0 – 2,4	3F, 1R	1,2	165 – 190	25 – 29	21	600 – 900
SC F	0 – 2,4	3F, 1R	1,2 – 1,6	180 – 200	25 – 29	28	600 – 900
P, V H	3,2 – 6,3	2 – 3	1,2 – 1,6	175 – 225	25 – 29	19	600 – 780
SC, H H	6,3	4 – 6	1,2 – 1,6	170 – 200	25 – 29	28	660 – 1020

<sup>5</sup> P – plana; V – vertical; H – horizontal; SC – sobre-cabeça.

<sup>6</sup> Detalhes geométricos no anexo A.

<sup>7</sup> F – passe executado pela face; R – passe executado pela raiz.

Os valores fornecidos pela literatura para a soldagem MIG de diversos materiais, espessuras ou posição, como os da tabela 3, são uma simples referência inicial para o ajuste dos parâmetros que serão utilizados de fato em um procedimento de soldagem. Desta forma, a seguir uma breve discussão sobre a influência da variação destes principais parâmetros sobre as propriedades ou características da junta soldada é apresentada.

Corrente de soldagem: Possui maior influência sobre a taxa de deposição, tamanho e formato do cordão de solda e penetração. Quanto maior a corrente, maior a taxa de deposição. O aumento da corrente (para demais parâmetros mantidos fixos) aumenta a profundidade e largura da penetração, bem como aumenta o tamanho do cordão de solda.

Velocidade de soldagem: Diretamente ligado à energia de soldagem, o aumento da velocidade causa a diminuição da quantidade de calor transmitido ao metal base e por consequência a diminuição do tamanho da zona afetada pelo calor. Isto diminui a penetração e o tamanho do cordão de solda.

Extensão do eletrodo: Também conhecido por *stickout*, é a dimensão do eletrodo desde o tubo de contato até a ponta do arame. A resistência elétrica do arame eleva-se com o aumento deste comprimento, o quê devido ao efeito Joule, causa o aumento da temperatura do consumível. Assim, com o aumento do *stickout*, menores correntes são necessárias para fundir o



eletrodo, e assim o aquecimento da poça de fusão também é menor. Isto pode resultar em uma taxa de deposição elevada, porém de pobre penetração, comprometendo o desempenho da junta.

Diâmetro do eletrodo: O diâmetro do eletrodo influi diretamente na densidade de corrente utilizada na soldagem. Esta, por sua vez, influi na taxa de fusão e na penetração obtidos. Maiores densidades de corrente promovem maior taxa de fusão e maior penetração.

Posicionamento do eletrodo: O posicionamento do eletrodo é definido através de dois ângulos: ângulo de trabalho e ângulo de deslocamento. O ângulo de trabalho é o ângulo que o eletrodo faz com o plano normal à superfície do metal base. O ângulo de deslocamento é o ângulo entre o eletrodo e uma linha perpendicular ao eixo longitudinal da solda. Também é conhecido como ângulo de puxar ou de empurrar. A penetração obtida e o tamanho do cordão de solda estão relacionados com o ângulo de deslocamento. Na soldagem de alumínio, costuma-se soldar “empurrando” a poça de fusão, de modo a evitar contaminações, aumentar a penetração e diminuir o aporte de calor ao metal base.

Gás de proteção: Além da proteção contra contaminação, o gás de proteção possui influência direta no modo de transferência metálica e temperatura do arco elétrico. Isto possui conseqüências diretas na solda obtida, tanto em penetração, tamanho e aparência do cordão, tamanho e microestrutura resultante na zona afetada pelo calor, além da ocorrência e quantidade de respingos.

### **3.2.3 Processo de soldagem FSW**

O processo denominado Friction Stir Welding (FSW) é uma técnica de soldagem relativamente nova desenvolvida pelo TWI (The Welding Institute) e patenteada no início da década de 90 (Thomas et al, 1991). À exemplo dos processos TIG e MIG, seu desenvolvimento ocorreu com o intuito de melhorar a eficiência de juntas soldadas de alumínio que, conforme já discutido, sofrem degradação de suas propriedades devido às altas temperaturas à que são submetidos na soldagem ao arco elétrico. Estudos têm demonstrado que a técnica permite a soldagem das diversas séries de alumínios, inclusive daquelas de baixa soldabilidade por processos convencionais (Colligan, 1999; Lienert et al, 2003; Boz e Kurt, 2004; Zhao, Lin e Qu, 2005).

Neste processo, uma ferramenta rotativa de alta resistência mecânica é utilizada para, através do atrito com o metal base, gerar calor suficiente para promover a união das peças. A ferramenta caracteriza-se por uma geometria típica, constituída de pino e ombro, responsáveis pela geração de calor e pela agitação do material na linha da solda. Como em todos os processos

de soldagem por fricção, o calor gerado não é suficiente para fundir o material e a soldagem ocorre no estado sólido.

As figuras 3.4 e 3.5 ilustram esquematicamente um modelo característico de ferramenta e o princípio de soldagem FSW.

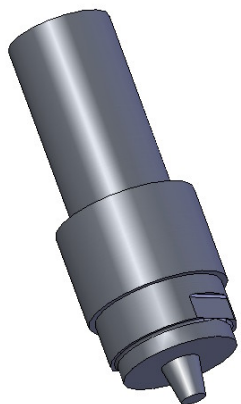


Figura 3.4 – Modelo esquemático de ferramenta utilizada no processo FSW.

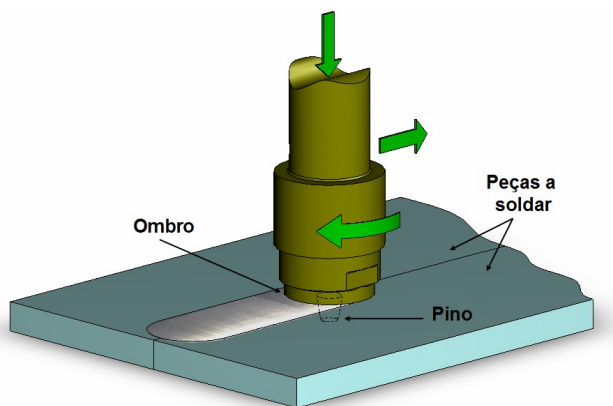


Figura 3.5 – Esquema ilustrando as etapas do processo.

Com as peças a serem soldadas rigidamente fixas, a ferramenta em rotação é aproximada da junta e forçada contra as peças, até a completa imersão do pino no interior do material. A parte superior da ferramenta, denominada ombro, entra em contato com a superfície das peças, gerando calor que provoca a diminuição da resistência mecânica do material adjacente à ferramenta, levando-o a um estado plástico. A ferramenta é então deslocada ao longo da junta a ser soldada, promovendo a união das peças através do aquecimento e revolvimento do material.

Embora a maioria das pesquisas até então se concentre em aperfeiçoar o processo para a união das diferentes ligas de alumínio, há um crescente interesse em expandir seu campo de aplicação para outros materiais, incluindo os aços. Além da soldagem de todas as séries de alumínio, estudos têm demonstrado a possibilidade da soldagem de cobre, titânio, magnésio, zinco e suas respectivas ligas além de termoplásticos, aços com baixo teor de carbono e compósitos de alumínio (Lienert et al, 2003; Liu et al, 2005). Na soldagem de alumínio, trabalhos exploratórios têm relatado sucesso na soldagem de espessuras desde 1 até 75mm em único passe, e de espessuras maiores em dois passes (Thomas e Nicholas, 1997).

O processo apresenta inúmeras vantagens quando comparado à soldagem por processos convencionais ao arco elétrico. Dentre elas, destacam-se:

- Excelentes propriedades mecânicas da junta soldada
- Baixa distorção e ausência de respingos
- Ausência de porosidades e fumos
- Não requer consumíveis ou gases de proteção
- Ferramenta de soldagem apresenta baixo desgaste
- Processo tolera pequenas imperfeições geométricas na junta
- Menor consumo energético se comparado à processos ao arco elétrico
- Permite soldagem em todas as posições

Em contrapartida, algumas limitações ainda restringem uma maior utilização do processo na soldagem de certos materiais. Em algumas aplicações, porém, as dificuldades ligadas à necessidade de um rígido sistema de fixação ou de uma placa de suporte na raiz da solda já foram superadas. Como desvantagens do processo, ainda devem ser destacados:

- Presença de um furo no final da solda
- Dificuldade na soldagem de materiais de elevado ponto de fusão

### **3.2.3.1 Parâmetros do processo**

A qualidade da solda e eficiência das propriedades mecânicas da junta obtida pelo processo FSW são funções do efeito resultante de um conjunto de variáveis empregadas durante o processo. De acordo com diversos autores (Mishra e Ma, 2005; Zhao, Lin e Qu, 2005; Buffa et al, 2006), os parâmetros de soldagem, a geometria da ferramenta e o tipo da junta exercem efeitos significantes no escoamento do material e na distribuição de temperatura durante a soldagem, assim influenciando a qualidade final da solda obtida. As variáveis principais do processo de soldagem são:

- Geometria da ferramenta
- Velocidade de rotação da ferramenta
- Velocidade de soldagem (ou de avanço da ferramenta)
- Inclinação da ferramenta
- Profundidade de penetração do pino (força)

Devido à importância que estas variáveis exercem no processo de soldagem, elas serão discutidas em detalhe nos tópicos a seguir.

**Geometria da ferramenta:** A geometria da ferramenta é o aspecto de maior influência no desenvolvimento do processo (Mishra e Ma, 2005; Zhao, Lin e Qu, 2005; Buffa et al, 2006), sendo responsável por promover o aquecimento e o escoamento do material ao redor do pino. Ombro e pino possuem funções distintas durante a soldagem.

A maior parcela do calor gerado durante o processo provém do atrito entre ombro e a peça a ser soldada. O ombro da ferramenta também é responsável por restringir a expulsão do material da região de solda, além de favorecer o escoamento do material ao redor do pino. A figura 3.6 ilustra esquematicamente algumas das geometrias de ombro desenvolvidas junto ao TWI (Mishra e Ma, 2005) e que melhoram o desempenho durante soldagem.

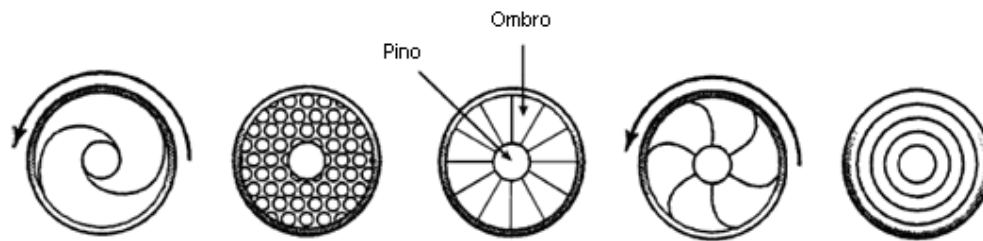


Figura 3.6 – Geometrias de ombro - vista inferior. (Mishra e Ma, 2005)

Por sua vez, o pino contribui apenas com uma pequena parcela da geração do calor total, mas é responsável pela deformação mecânica à que o material plastificado é submetido durante o processo. Frequentemente a geometria do pino constitui-se de um corpo cilíndrico ou cônico cujo diâmetro externo é similar à espessura da chapa a ser soldada.

A este corpo alguns elementos geométricos podem ser acrescentados, como a presença de rasgos ou reentrâncias. No entanto diversos trabalhos relatam a eficiência de soldas obtidas utilizando-se ferramentas de pino com rosca, como os de Colligan, 1999, Guerra et al, 2003, Peel et al, 2003, Roldo, 2004, e Boz e Kurt, 2005.

A figura 3.7 ilustra o modelo de ferramenta adotado por Liu et al, 2005, no estudo do desgaste de ferramenta na soldagem de compósitos com matriz de alumínio, enquanto Zhao, Lin e Qu, 2005 utilizaram as ferramentas da figura 3.8 na avaliação da influência da geometria do pino na soldagem de alumínio 2014.



Figura 3.7 – Geometria utilizada na soldagem de compósitos de Al. (Liu et al, 2005)



Figura 3.8 – Ferramentas empregadas na soldagem de Al 2014. (Zhao, Lin e Qu, 2005)

O projeto de um pino com geometria adequada deve contemplar a relação existente entre o volume dinâmico ( $V_d$ ) e o volume estático ( $V_e$ ) do pino da ferramenta. O volume estático corresponde ao volume real do pino da ferramenta, enquanto que o volume dinâmico corresponde ao volume aparente do pino quando o mesmo está em rotação.

Mishra e Ma, citando Thomas, comentam que ferramentas com alta razão entre  $V_d$  e  $V_e$  favorecem o escoamento do material no entorno do pino, com conseqüente redução da força de soldagem. O aumento desta razão também leva ao aumento da área de contato entre pino e material, ocasionando maior aquecimento localizado, contribuindo assim para a redução da força de soldagem. Tais fatos justificariam o desempenho superior das ferramentas cujo pino possui filetes de rosca.

**Velocidade de rotação:** A velocidade de rotação [RPM] está intimamente ligada à geração de calor durante o processo de soldagem. Quanto maior a velocidade de rotação, maiores serão as temperaturas atingidas no processo devido ao aumento do aquecimento por atrito. Este aumento da temperatura proporciona uma movimentação mais intensa do material plastificado, o que favorece a mistura na interface da solda (Mishra e Ma, 2005). Entretanto, Tang (citado por Mishra) demonstrou que na soldagem de alumínio 6061, com o aumento da rotação ocorre a diminuição da taxa de aquecimento devido à modificação do coeficiente de atrito durante o processo. Isto parece indicar que haverá um limite superior a partir do qual o aumento da rotação ocasionará elevação significativa da temperatura, e que então outros parâmetros devem ser modificados para a obtenção das condições propícias à soldagem.

**Velocidade de soldagem:** A velocidade de soldagem [mm/min] possui relação direta com o aporte de calor durante o processo. Baixas velocidades de soldagem implicam maior aporte de calor e temperaturas mais elevadas, enquanto, em contrapartida, alta velocidade de

soldagem significa menor aporte de calor por unidade de comprimento da solda. As propriedades mecânicas e microestrutura resultante, bem como os valores de tensão residual e tamanho do *nugget*, são fortemente dependentes da escolha de valores adequados deste parâmetro, conforme observado nos trabalhos de Peel et al, 2003 e Renck, 2005.

**Inclinação da ferramenta:** Usualmente a ferramenta de soldagem é utilizada segundo um ângulo de inclinação em relação à superfície da chapa. Esta inclinação auxilia na movimentação do material da frente para trás do pino, e também na consolidação do material plastificado após a passagem do mesmo, devido à maior pressão existente na região posterior da ferramenta.

**Penetração da ferramenta:** A penetração da ferramenta é uma função do comprimento do pino e do ângulo de inclinação adotado, e define a pressão que é exercida sobre o material na parte posterior da ferramenta durante a soldagem. Quando o pino é excessivamente longo, o ombro da ferramenta não entra em contato suficiente com a chapa sendo soldada. Isto diminui a temperatura de soldagem e reduz a pressão na parte posterior do ombro sobre a chapa, resultando frequentemente em soldas defeituosas. Por outro lado, se o pino é curto demais, a penetração do ombro na chapa será excessiva ocasionando a formação de rebarba. A dimensão ideal do comprimento do pino é aquela que, para determinado ângulo de inclinação, permitirá contato e pressão suficiente do ombro sobre a chapa e resultará em uma solda com penetração total na raiz. A penetração total, no entanto, dependerá da extensão de material que dada geometria de ferramenta consegue plastificar abaixo do pino.

A figura 3.9 apresenta um desenho esquemático em vista lateral mostrando a ferramenta de soldagem com o pino inserido na chapa a ser soldada onde se pode observar a relação entre algumas variáveis geométricas do processo, que são:

- e – espessura da chapa a ser soldada
- p – penetração do ombro da ferramenta
- D – diâmetro do ombro da ferramenta
- $l_p$  – comprimento do pino da ferramenta
- a – ângulo de inclinação da ferramenta

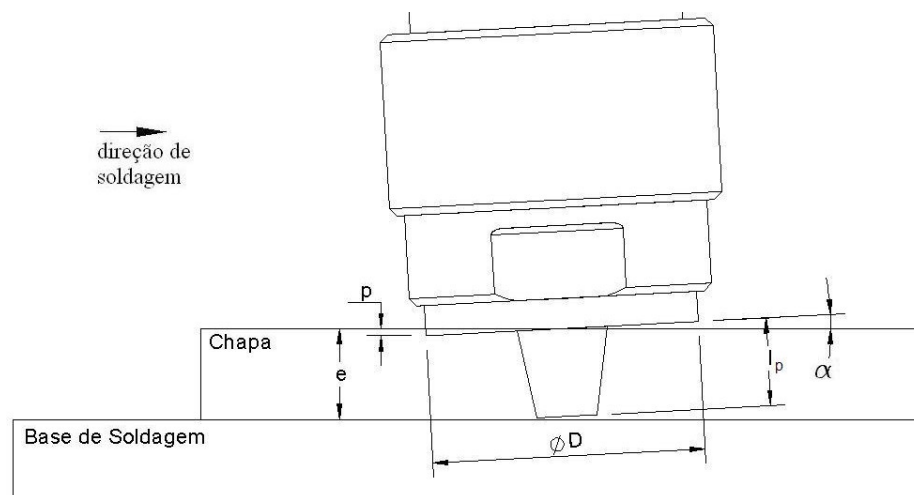


Figura 3.9 – Ferramenta FSW e variáveis geométricas relacionadas. (fonte: próprio autor)

Além dos parâmetros já mencionados, outras variáveis podem ser de importância na soldagem de determinados materiais (Mishra e Ma, 2005). Na união de chapas com elevado ponto de fusão, o calor gerado pelo atrito entre peça e ferramenta poderá não ser suficiente para levar o material ao estado plástico necessário para a soldagem por fricção. Nestes casos o uso de pré-aquecimento pode tornar-se uma variável fundamental para o sucesso do processo. Por outro lado, a aplicação do processo FSW em materiais com ponto de fusão menor, tais como algumas ligas de alumínio e Magnésio, pode requerer o uso de refrigeração como forma de inibir o crescimento excessivo dos grãos recristalizados e de diminuir a dissolução de precipitados endurecedores nas proximidades e no interior da zona de mistura.

### 3.2.3.2 Equipamento para soldagem FSW

Equipamentos voltados especificamente à soldagem FSW frequentemente fazem uso de um sistema de controle da força aplicada pela ferramenta sobre a chapa. Entretanto, Cook et al. (2003) comenta que na soldagem em máquinas fresadoras adaptadas, o controle pelo monitoramento da força axial não é necessário, pois se o equipamento e sistema de fixação possuem rigidez suficiente e a ferramenta desloca-se paralela à superfície sendo soldada, a força axial será constante.

O controle sobre a força aplicada durante a soldagem é fundamental em situações onde não se possa garantir rigidez suficiente do sistema para que o caminho programado seja cumprido, como no caso do uso de robôs. Segundo Cook et al. (2003), pequenas variações na posição da ferramenta implicam em grandes modificações na intensidade da força axial sobre as peças sendo soldadas.

Para Zäh e Eireiner (2005), todos os parâmetros de soldagem são constantes na soldagem empregando-se fresadoras convencionais. Um dos problemas verificados, no entanto, é que durante o processo fatores como tolerâncias das peças sendo unidas, pequenos deslocamentos sofridos pela estrutura da máquina em função dos grandes esforços e a própria dilatação das peças e da ferramenta modificam a penetração inicial aplicada à mesma.

Contudo, fresadoras relativamente modernas poderiam superar estas dificuldades, dado que hoje muitas máquinas possuem controle da força axial sobre o eixo-árvore, permitindo a soldagem pelo processo FSW com vantagens sobre as máquinas dedicadas exclusivamente à soldagem. Dentre estas, se poderiam citar:

- Amplas funções de medição e supervisão já integradas ao sistema de controle numérico
- Economia na aquisição de fresadoras, frente a um equipamento dedicado à soldagem FSW
- Possibilidade de aproveitamento de maquinário já existente no parque fabril
- Flexibilidade das fresadoras, permitindo preparo da junta, soldagem pelo processo FSW e eventualmente remoção do furo remanescente da solda em uma mesma máquina.

Possivelmente devido à estes fatores, inúmeros trabalhos na área tenham sido realizados em máquinas fresadoras adaptadas, nem todas com controle da força aplicada, como relatado por Colligan (1999), Johnson (2001), Cederqvist e Reynolds (2001), Cook et al. (2003) e Guerra et al. (2003).



## 4 Materiais e Equipamentos

A soldagem das chapas de alumínio através do processo FSW foi realizada junto ao Laboratório de Usinagem do Departamento de Engenharia Mecânica da UFRGS, que disponibilizou uma fresadora para ser adaptada ao processo. A soldagem das chapas utilizando o processo MIG foi realizada junto ao Laboratório de Soldagem e Técnicas Conexas, que disponibilizou o equipamento e consumíveis necessários. Neste capítulo são descritos os materiais e procedimentos adotados nas diferentes etapas do trabalho.

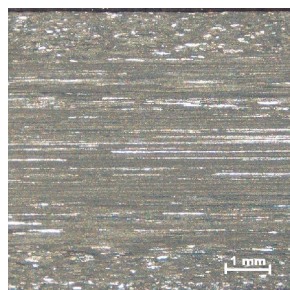
### 4.1 Material utilizado

Na realização deste trabalho todos os procedimentos de soldagem foram executados em chapas de alumínio AA5052-H34 com 6,35mm de espessura. A caracterização do material empregado foi realizada através de análise química e ensaios mecânicos de tração e microdureza. A composição química do material é a indicada na tabela 4.1.

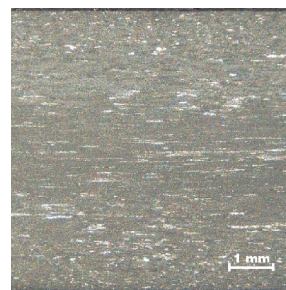
Tabela 4.1 – Composição química da liga AA 5052-H34.

Material	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti	Al
5052	0,17	0,50	0,01	0,21	2,22	0,323	0,01	0,005	0,012	96,54

A macrografia do material revelou a presença de encruamento proveniente do processo de laminação da chapa, como mostra a figura 4.1. No sentido paralelo à laminação há a presença de uma camada de grãos refinados próximo às superfícies da chapa, e de grãos alongados próximos ao centro.



(a)



(b)

Figura 4.1 – Macrografia do material utilizado nos ensaios.

(a) Sentido paralelo à laminação; (b) Sentido perpendicular à laminação.

Amostras do material foram ainda submetidas a ensaios de tração e microdureza, cujas endentações foram realizadas na linha média da espessura da chapa. Os resultados dos ensaios mecânicos – tensão de escoamento ( $\bar{\sigma}_{esc}$ ), tensão máxima ( $\bar{\sigma}_{max}$ ), alongação ( $\bar{\varepsilon}$ ) e microdureza – são os apresentados na tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Resultados dos ensaios mecânicos da liga AA 5052-H34.

Propriedades Mecânicas	Metal Base	
	Média	Desvio Padrão
$\bar{\sigma}_{esc}$ [MPa]	142.4	3.44
$\bar{\sigma}_{max}$ [MPa]	235.2	0.84
$\bar{\varepsilon}$ [%]	24.2	0.45
Micro-dureza [HV 0.1]	75.3	3.6

Os valores obtidos no ensaio de tração do metal base referem-se ao ensaio de corpos de prova extraídos perpendicularmente ao sentido de laminação da chapa, uma vez que todas as soldas analisadas neste trabalho foram realizadas paralelamente ao sentido de laminação.

## 4.2 Preparação dos corpos de prova para soldagem

A preparação do material para a soldagem consistiu no corte das chapas em dimensões aproximadas das dimensões finais com o uso de serra-fita. Em seguida foi executado o fresamento das mesmas em função do tipo de chanfro requerido pelo processo de soldagem a ser executado. As dimensões escolhidas foram tais que permitem a retirada de corpos de prova padrão para os ensaios de dobramento e tração de acordo com a norma adequada.

Os parâmetros de fresamento utilizados foram mantidos constantes para todas as chapas. O acabamento final dos chanfros foi executado com auxílio de lima murça para remoção de rebarbas e cantos vivos decorrentes do processo de fresamento.

### 4.2.1 Corpos de prova para soldagem FSW

Para a soldagem pelo processo FSW foram preparados corpos de prova com chanfro reto nas dimensões 30 x 200 mm e 80 x 200 mm. Os corpos de prova menores destinaram-se a realização de pré-testes para definição dos parâmetros adequados de soldagem, enquanto os

demais foram reservados para a soldagem com os parâmetros já estabelecidos, permitindo então a retirada de amostras de tamanho adequado para a realização de ensaios de caracterização das propriedades da solda.

A preparação das juntas utilizadas na soldagem FSW (chanfro reto), embora considerada dispensável pela maioria dos trabalhos na área, foi necessária devido à grande disparidade de acabamento obtido no corte em serra-fita, e também a problemas de fixação das chapas no suporte de soldagem devido à falta de paralelismo entre as faces laterais das mesmas. Na figura 4.2 é possível observar a diferença no acabamento obtido por serra-fita (chapas a esquerda) e após o fresamento (chapas a direita).



Figura 4.2 – Acabamento do chanfro para soldagem pelo processo FSW.

#### 4.2.2 Corpos de prova para soldagem MIG

Para a soldagem através do processo MIG, foram preparadas dezesseis chapas com chanfro em V, das quais três pares foram utilizados para ajuste de parâmetros de soldagem adequados. Após definidos os parâmetros de soldagem, nove pares foram soldados para posterior caracterização da solda. As dimensões do chanfro basearam-se nas recomendações de soldagem comumente sugeridas para soldagem MIG em juntas de topo (Davis, 2002).

A figura 4.3 ilustra as dimensões adotadas para o chanfro dos corpos de prova soldados através do processo MIG (dimensões em mm).

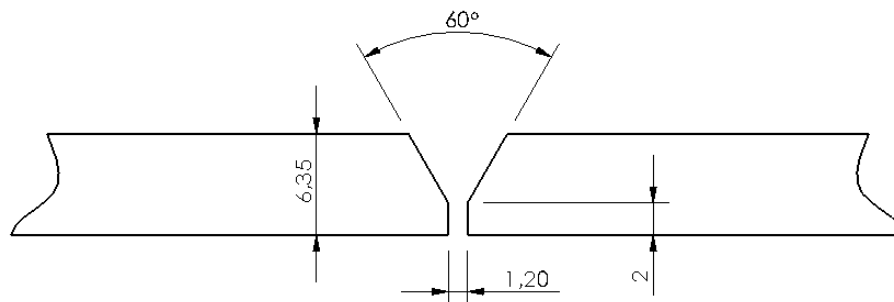


Figura 4.3 – Dimensões do chanfro para soldagem MIG.

### 4.3 Equipamentos utilizados

Na realização deste trabalho os seguintes equipamentos foram utilizados:

- Máquina Fresadora: A soldagem das chapas de alumínio através do processo FSW foi realizada em uma máquina fresadora universal convencional da marca Invicta, modelo FU2, ano de fabricação 1961 (figura 4.4). A máquina possui um motor de 7,5 HP, cuja transmissão é feita por quatro correias flexíveis. A velocidade máxima de rotação no cabeçote vertical é de 1200 RPM e a velocidade de avanço máxima da mesa é de 790 mm/min.



Figura 4.4 – Máquina fresadora universal utilizada na soldagem FSW.

- Monitoramento da velocidade de rotação: O monitoramento da velocidade de rotação foi feito através de um sistema de aquisição de dados, composto por placa conversora A/D Computer Boards, modelo CIO-DAS 08/JR com 12 bits de resolução e sensor de rotação automotivo marca Siemens adaptado na máquina fresadora, conforme ilustrado na figura 4.5.



Figura 4.5 – Sensor automotivo de rotação adaptado.

- Macrografias: Para a análise macrográfica das soldas e metal base utilizou-se um microscópio óptico Olympus, modelo SZ40. As fotografias das macrografias foram feitas por uma câmera marca Olympus, modelo DP12.
- Microdurômetro: O perfil de dureza nas chapas soldadas foi medido utilizando-se um microdurômetro marca STRUERS, modelo Duramin 10.
- Equipamento de Soldagem MIG: Na soldagem MIG empregou-se uma fonte de soldagem marca Migtronic, modelo BDH 550.
- Ensaio de tração: Os ensaios de tração utilizaram como norma de referência a NBR ISO 6892 / 2002. O equipamento empregado é a máquina universal de ensaios EMIC, modelo DL 30000, com certificado de calibração RBC 3767/2006 emitido pelo CERTI, válido até 08/2007. Os ensaios foram realizados em ambiente com temperatura e umidade controladas de, respectivamente, 20,4°C e 62%.

#### 4.4 Ferramentas de soldagem

Para a soldagem FSW três ferramentas com geometrias de pino distintas foram projetadas e fabricadas. As geometrias de pino escolhidas foram a cônica lisa, facetada e cônica com rosca. Inicialmente as ferramentas seriam compostas por um corpo, utilizado para fixação junto à pinça da máquina fresadora, e de ponteiros intercambiáveis em aço de elevada dureza onde ombro e pino seriam usinados. Entretanto, devido às dificuldades em se obter a usinagem das peças, apenas duas delas foram fabricadas de acordo com o projeto inicial, sendo mantidas, entretanto, as dimensões originais.

Desta forma, a ferramenta de pino cônico com rosca é inteiriça e usinada em aço AISI M2 sem tratamento térmico. As demais são compostas por uma ponteira em aço AISI H13 para trabalho a quente, onde ombro e pino foram usinados. Após a usinagem, estas ponteiras foram temperadas e revenidas para uma dureza final de 50 HRC. O corpo destas ferramentas foi fabricado em aço laminado SAE 1141.

As figuras 4.6 e 4.7 apresentam as três ferramentas utilizadas na soldagem, bem como detalhes do ombro e pinos usinados.

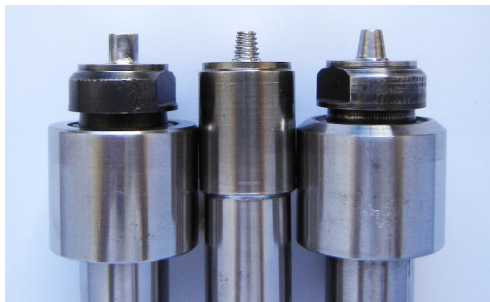


Figura 4.6 – Ferramentas para soldagem FSW.



Figura 4.7 – Detalhes do ombro e pino.

As características dimensionais das ferramentas basearam-se inicialmente nas informações disponíveis na literatura. Segundo diversos autores (Thomas et al., 1996; Colligan, 1999; Cederqvist e Reynolds, 2001; Guerra et. al., 2003; Zhao et. al., 2005), as dimensões básicas para uma ferramenta FSW devem contemplar um diâmetro de pino similar à espessura da chapa a ser soldada. O comprimento do pino deve ser um pouco inferior à espessura da chapa, já que a região soldada abaixo da ponta do pino estende-se por uma pequena região apenas. Além disto, o diâmetro do ombro deve corresponder à aproximadamente três vezes o diâmetro maior do pino. Com base nestas informações, as dimensões das ferramentas utilizadas nos testes preliminares são as descritas na tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Detalhes dimensionais das ferramentas de soldagem.

Ferramenta	Comprimento pino [mm]	Ø do pino [mm]	Geometria do ombro	Ø do ombro [mm]	Observações
C	5.9	6.0	Liso - reto	18	–
F	5.9	6.0	Liso - reto	18	–
R	5.7	6.0	Liso - reto	18	Passo: 1mm

C – Pino cônico liso (conicidade 10°).

F – Pino facetado reto (120° entre faces).

R – Pino cônico com rosca (conicidade 10°).

Maiores detalhes geométricos das ponteiros das ferramentas são apresentados no anexo 2.

A ferramenta inteira foi usinada em torno convencional, enquanto as ferramentas compostas por ponteira e corpo foram usinadas em torno CNC visando diminuir eventual excentricidade na montagem das partes. A partir destas dimensões iniciais, as ferramentas ainda passaram por pequenos ajustes dimensionais durante os testes preliminares, a fim de melhorar o aspecto e qualidade das soldas resultantes.

## **5 Procedimento Experimental**

No desenvolvimento deste trabalho dois processos distintos de soldagem foram utilizados: FSW e MIG. Após a soldagem de corpos de prova utilizando os dois processos, uma avaliação comparativa do desempenho das juntas obtidas foi realizada.

A soldagem dos corpos de prova pelo processo FSW dividiu-se em duas fases: testes preliminares e soldagem definitiva. Os testes preliminares tiveram como objetivo inicial o estabelecimento do processo FSW e a definição e ajuste de parâmetros adequados à soldagem. A soldagem definitiva, já com parâmetros estabelecidos, permitiu a obtenção de dados qualitativos para comparação com o processo MIG.

A soldagem utilizando o processo convencional MIG serve como controle de referência para os resultados obtidos pelo processo de soldagem por fricção, indicando as limitações ainda existentes no processo FSW implementado.

A comparação dos resultados se deu através da análise das propriedades mecânicas das soldas, obtidas através de ensaios de tração e dobramento. Adicionalmente também foram feitas análise metalográfica e medição do perfil de dureza da seção transversal das soldas obtidas pelos diferentes processos.

### **5.1 Soldagem FSW – Testes preliminares**

Como forma de definir parâmetros adequados para a realização de soldas com qualidade aceitável, inúmeros testes preliminares foram realizados como prévia da soldagem dos corpos de prova utilizados para obtenção de dados qualitativos para a dissertação. As observações e melhorias implementadas a partir destes pré-testes basearam-se nos fatores descritos a seguir:

- Tamanho da rebarba
- Descontinuidade visível em corte transversal (inspeção visual e metalografia)
- Visualização da linha de solda na raiz (penetração total)

A realização de ensaios mecânicos simples, como o dobramento, não foi possível nesta fase em função da pequena quantidade de material disponível para a realização de todo o trabalho. Assim, as devidas modificações no ferramental e nos parâmetros de soldagem foram feitas baseadas em inspeção visual e análise macrográfica da seção transversal.

Os parâmetros adotados nos pré-testes, em especial a velocidade de rotação, basearam-se em informações disponíveis na literatura e em experiências anteriores conduzidas junto ao



GPAI – UFRGS (CAPELARI, 2002; GEREMIA, 2003). Condições que não se mostraram adequadas em testes anteriores foram descartadas.

As soldas foram realizadas em chapas previamente preparadas com as dimensões 30 x 200 mm, sendo que eventualmente mais de uma solda foi feita na mesma chapa. Após a limpeza com solvente industrial e fixação no suporte de soldagem, soldas foram executadas para cada geometria de ferramenta fabricada. Inicialmente, procurou-se observar a influência da velocidade de rotação. As velocidades de rotação testadas (630 – 800 – 1000 RPM) são valores fixos da máquina, não sendo possível o uso de rotações intermediárias. Os parâmetros utilizados são os descritos na tabela 5.1, onde os valores de penetração do ombro foram medidos diretamente pelas coordenadas da mesa da máquina fresadora.

Tabela 5.1 – Parâmetros testados nos ensaios preliminares – fase I.

Ferramenta	Velocidade de Soldagem [mm/min]	Ângulo de Inclinação [°]	Velocidades de Rotação [RPM]	Penetração do Ombro [mm]
C	75	1	630 / 800 / 1000	0,60
F	75	1	630 / 800 / 1000	0,55
R	75	1	630 / 800 / 1000	0,70

C – Pino cônico liso (conicidade 10°).

F – Pino facetado reto (120° entre faces).

R – Pino cônico com rosca (conicidade 10°).

Após a soldagem, amostras da seção transversal dos corpos de prova foram cortadas e embutidas a frio para análise metalográfica. Em função dos resultados obtidos, novos testes foram realizados. Nesta fase, observou-se a influência do ângulo de inclinação da ferramenta sobre a seção transversal da solda. A tabela 5.2 apresenta os novos parâmetros testados.

Tabela 5.2 – Parâmetros testados nos ensaios preliminares – fase II.

Ferramenta	Velocidade de Soldagem [mm/min]	Ângulos de Inclinação [°]	Velocidade de Rotação [RPM]	Penetração do Ombro [mm]
C	75	2 e 3	1000	não medido
F	75	2 e 3	1000	não medido
R	75	2 e 3	1000	não medido

C – Pino cônico liso (conicidade 10°).

F – Pino facetado reto (120° entre faces).

R – Pino cônico com rosca (conicidade 10°).

A velocidade de penetração utilizada nos ensaios foi a menor disponível na máquina fresadora e foi mantida constante em todos os ensaios em 10 mm/min, de forma a diminuir os esforços sobre os mancais do cabeçote.

A análise visual dos cordões de solda e das macrografias da seção transversal obtidas com as diferentes combinações de parâmetros, em conjunto com uma análise geométrica do problema, permitiu que correções dimensionais fossem feitas nas ferramentas de soldagem. Uma vez feitos os ajustes necessários, soldas em chapas maiores (80 x 200 mm) foram produzidas permitindo uma análise qualitativa e quantitativa dos resultados.

## 5.2 Soldagem FSW – Parâmetros fixos

Uma vez definidos os parâmetros capazes de produzir soldas com descontinuidades de pequeno nível, ou mesmo isentas de defeitos, foram soldadas chapas com dimensões maiores de forma a permitir a retirada de corpos de prova para ensaios de dobramento e tração, além da análise metalográfica.

Cada ferramenta produziu três soldas segundo parâmetros idênticos de soldagem definidos a partir dos pré-testes. A escolha de parâmetros idênticos para as três ferramentas permite a comparação dos resultados em função da geometria de cada ferramenta. A tabela 5.3 apresenta os parâmetros utilizados.

Tabela 5.3 – Parâmetros utilizados na soldagem das chapas pelo processo FSW.

Ferramenta	Ângulo de Inclinação [°]	Velocidade de Soldagem [mm/min]	Velocidade de Rotação [RPM]	Penetração do ombro [mm]
C	3	75	1000	~ 0,40
F	3	75	1000	~ 0,45
R	3	75	1000	~ 0,45

C – Pino cônico liso (conicidade 10°).

F – Pino facetado reto (120° entre faces).

R – Pino cônico com rosca (conicidade 10°).

As chapas foram soldadas em temperatura ambiente, sem pré ou pós-aquecimento do material. Durante a soldagem monitorou-se o comportamento da velocidade de rotação da ferramenta. O procedimento adotado na soldagem de cada chapa consistiu das seguintes etapas:

- Limpeza das chapas com solvente industrial
- Fixação das chapas no suporte de soldagem
- Alinhamento da junta com o deslocamento do pino da ferramenta
- Seleção da velocidade de rotação da ferramenta
- Início da rotação da ferramenta
- Seleção da velocidade de mergulho
- Penetração automática da ferramenta até a coordenada pré-determinada
- Seleção da velocidade de avanço
- Deslocamento longitudinal da ferramenta em modo automático
- Término do deslocamento longitudinal e retirada da ferramenta
- Desligamento da máquina e retirada da chapa soldada.

O pino da ferramenta penetra no material até a coordenada de tangência com a base de soldagem, garantindo assim a soldagem em toda espessura da chapa. O suporte de soldagem no qual as chapas são fixadas impede o afastamento das faces laterais durante a soldagem e também a movimentação vertical das mesmas. A figura 5.1 apresenta o suporte de fixação e o posicionamento das chapas e da ferramenta para a soldagem.

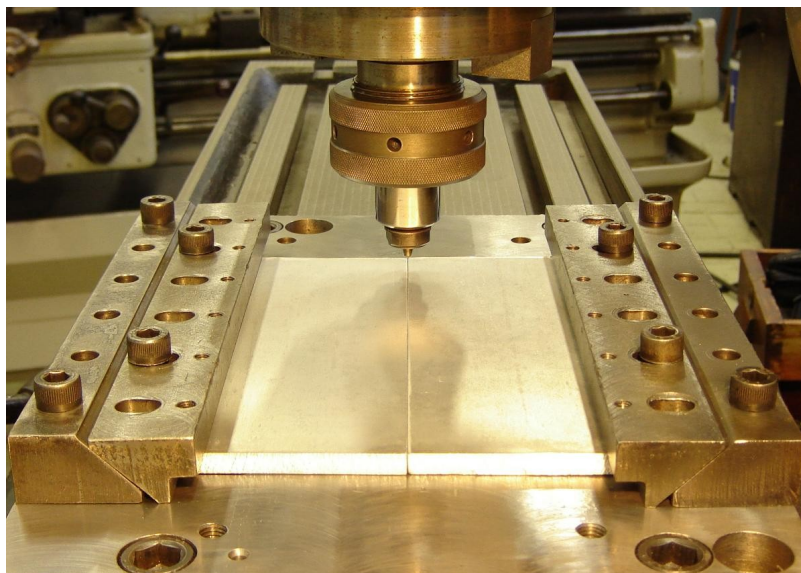


Figura 5.1 – Suporte de fixação das chapas.

Após a soldagem, corpos de prova foram usinados para os ensaios de dobramento e tração, bem como foram retiradas amostras da seção transversal das soldas para análise metalográfica.

### 5.3 Soldagem MIG

A soldagem pelo processo MIG foi realizada de forma semi-automática na posição plana. Utilizou-se um dispositivo mecanizado de movimentação linear com velocidade constante como meio de produzirem-se soldas com propriedades uniformes e com boa repetitividade. Na figura 5.2 é possível observar o dispositivo mecanizado empregado na soldagem MIG, bem como a forma de fixação das chapas para a soldagem.



Figura 5.2 – Dispositivo utilizado na soldagem MIG semi-automática.

Baseado nos dados disponíveis na literatura, alguns pré-testes foram conduzidos para ajuste dos parâmetros de soldagem, como corrente, tensão e velocidade de soldagem, a fim de obter-se penetração total da junta. Na tabela 5.4 são apresentados os valores empregados na soldagem dos corpos de prova após os devidos ajustes iniciais.

Tabela 5.4 – Parâmetros de soldagem MIG.

Diâmetro do bocal	15 mm	Corrente (CCEP)	150 – 165 A
Diâmetro do arame	1,2 mm	Tensão	23 – 25 V
Dist. peça – bico de contato	20 mm	Vazão de Argônio	15 l/min
Velocidade do arame	8 m/min	Velocidade de Soldagem	265 mm/min

A velocidade de soldagem empregada, embora inferior àquelas sugeridas pela literatura, permitiu a soldagem em um passe único. Para maior proteção da região próxima ao arco elétrico,

a soldagem ocorreu com a tocha sob um ângulo de deslocamento negativo de  $45^\circ$ , “empurrando” a poça de fusão. Como metal de adição utilizou-se o arame AWS A5.10 ER5356.

De forma similar ao realizado no processo FSW, três soldas foram produzidas segundo parâmetros idênticos. Após a soldagem e escovamento do cordão, corpos de prova foram usinados para realização de ensaios mecânicos e análise metalográfica.

#### 5.4 Usinagem dos corpos de prova

Uma vez concluída a etapa de soldagem das chapas, corpos de prova de tração e dobramento, bem como amostras da seção transversal dos cordões de solda foram usinados. A preparação dos corpos de prova foi feita em um centro de usinagem CNC, de modo a garantir bom acabamento e repetitividade dimensional e geométrica. Na figura 5.3 é apresentado um desenho esquemático do posicionamento dos corpos de prova e a correspondente identificação dos mesmos.

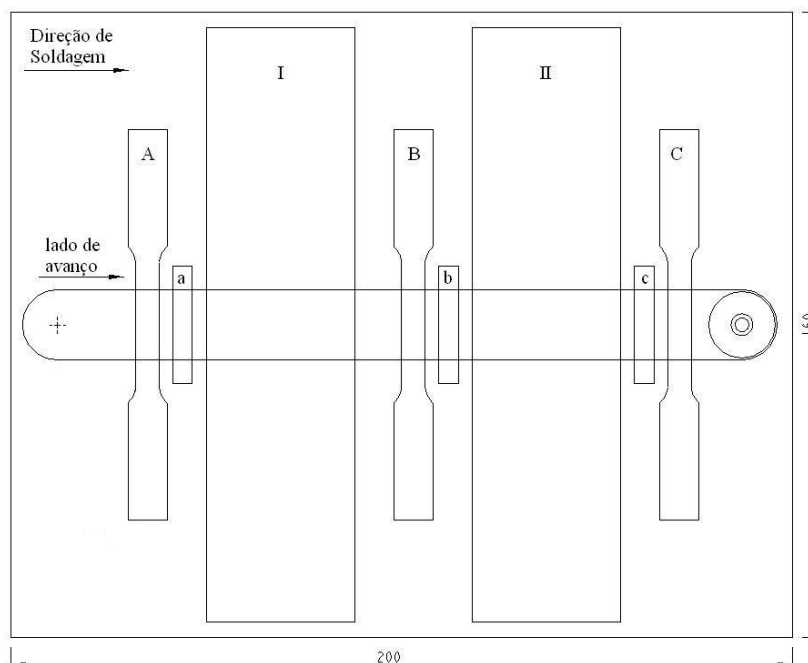


Figura 5.3 – Representação esquemática do posicionamento dos corpos de prova na chapa.

Para cada solda realizada foram retirados três corpos de prova de tração (A, B e C), dois corpos de prova para dobramento transversal de face e raiz (I e II) e mais três amostras representativas do início, meio e final da solda (respectivamente a, b e c) para análise metalográfica e medição do perfil de dureza. Os primeiros 20 mm iniciais de cada solda FSW foram descartados.

Os corpos de prova para o ensaio de dobramento foram confeccionados de acordo com o especificado pela norma ASTM E 190 (1997), enquanto que para o ensaio de tração as dimensões seguem o especificado pela ASTM E 8M (2000-b) para corpos de prova de tamanho reduzido. A espessura dos corpos de prova de tração excede, porém, o recomendado pela norma em 0,35mm. Entretanto, para fins de comparação das propriedades da junta obtida, os ensaios são válidos.

Os corpos de prova para ensaio de tração passaram por uma etapa adicional de fresamento para remoção da rebarba resultante do processo FSW e do reforço proveniente da solda MIG, visto que esta disparidade poderia levar a uma maior dispersão nos resultados. O acabamento final foi feito com lima para remoção de rebarbas e cantos vivos.

Dado o pequeno número de corpos de prova para testes de dobramento, a seqüência de ensaios foi escolhida de forma a sujeitar à dobramento de raiz (mais crítico) os corpos de prova localizados no início de cada solda (corpos de prova I), conforme descrito na tabela 5.5. Tal escolha deveu-se ao fato da probabilidade da solda não estar totalmente estabilizada no começo da junta ser maior.

Tabela 5.5 – Identificação dos CPs sujeitos à dobramento de face ou raiz.

Corpo de prova	Dobramento de Face	Dobramento de Raiz
C1, F1, R1, M1	I	X
	II	X
C2, F2, R2, M2	I	X
	II	X
C3, F3, R3, M3	I	X
	II	X

C – Solda FSW (ferramenta com pino cônico liso).  
F – Solda FSW (ferramenta com pino facetado).  
R – Solda FSW (ferramenta com pino cônico com rosca).  
M – Solda obtida pelo processo MIG.  
Algarismos 1, 2 e 3 denotam o número da repetição da solda.

## **6 Resultados e Discussão**

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos nas diferentes fases do trabalho, bem como a discussão pertinente aos mesmos. Três grandes grupos são analisados: testes preliminares, soldagem FSW e soldagem MIG.

Nos testes preliminares são apresentados resultados qualitativos nos quais basearam-se todos os ajustes necessários às ferramentas de soldagem utilizadas pelo processo FSW.

Quanto aos resultados obtidos na soldagem pelo processo FSW já com os parâmetros definidos e pelo processo MIG, busca-se fazer uma análise macroscópica dos mesmos dando ênfase aos dados obtidos nos ensaios de tração, dobramento, perfis de dureza e análises macrográficas. Baseado nestes dados faz-se a caracterização das soldas obtidas pelos diferentes processos.

### **6.1 Testes preliminares**

Nos testes preliminares foram realizadas soldas variando-se a velocidade de rotação e o ângulo de inclinação da ferramenta para cada uma das três geometrias de pino usinadas. A primeira abordagem consistiu em uma análise visual do aspecto do cordão e da quantidade de rebarba formada. Em seguida, amostras da seção transversal de cada solda foram cortadas, embutidas e preparadas para análise metalográfica, de forma a identificar possíveis descontinuidades decorrentes do processo de soldagem, bem como os parâmetros que resultaram nas melhores soldas. A seguir são apresentados os resultados para as três geometrias de ferramenta utilizadas.

#### **6.1.1 Ferramenta com pino cônico liso**

Para observar-se o efeito da velocidade de rotação na soldagem FSW, soldas foram realizadas com rotações de 630, 800 e 1000 RPM, para uma velocidade de soldagem fixa de 75 mm/min e ângulo de ataque de 1°. A profundidade de penetração do ombro na chapa foi de 0,6 mm.

Após a soldagem, amostras da seção transversal foram preparadas para análise em microscópio. A figura 6.1 apresenta a evolução obtida nas características da seção transversal em função da velocidade de rotação empregada.

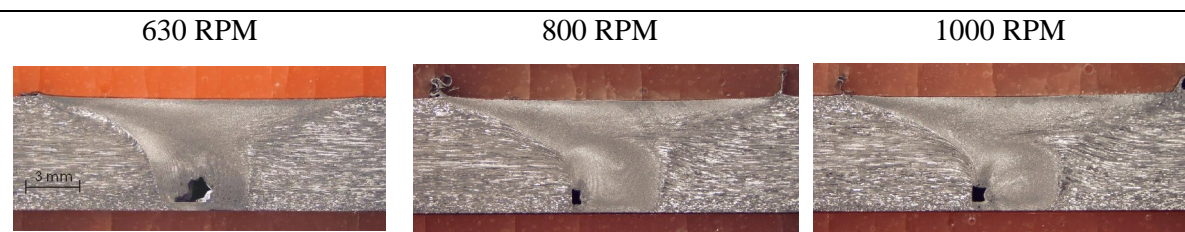


Figura 6.1 – Macrografia (Reagente Tuckers) - Ferramenta de pino cônico.

Para todas as rotações testadas pode-se observar a presença de uma descontinuidade longitudinal ao cordão, localizada no lado de avanço e na parte inferior da solda e que se estende ao longo de todo o comprimento soldado. Nota-se que o aumento da rotação de 630 para 800 RPM ocasiona a diminuição do tamanho da descontinuidade, mas o aumento de 800 para 1000 RPM não apresenta o mesmo efeito de diminuição.

Em seguida, novas soldas foram feitas variando-se o ângulo de inclinação da ferramenta. As velocidades de rotação e avanço foram mantidas fixas em 1000 RPM e 75mm/min. Na figura 6.2 pode-se observar o efeito do aumento do ângulo de ataque sobre a formação da descontinuidade.

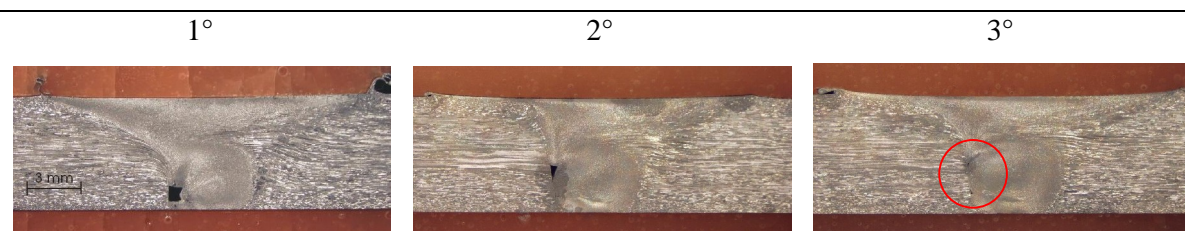


Figura 6.2 – Diminuição no tamanho da descontinuidade com aumento do ângulo de ataque.

Observa-se a presença de uma descontinuidade longitudinal ao cordão, que se estende ao longo de todo o comprimento soldado. O aumento do ângulo de inclinação da ferramenta ocasiona forte redução no tamanho da descontinuidade formada, como ilustrado pela figura 6.2. Apesar da evolução obtida com a variação deste parâmetro, ainda se pode notar a formação deste defeito em todas as seções transversais, como destacado pelo círculo na seção correspondente à inclinação de três graus.

O aumento do ângulo de inclinação também levou à formação de rebarba em excesso, o que sugere ajustes no comprimento do pino como meio de solução.



### 6.1.2 Ferramenta de pino facetado

Da mesma forma como para a ferramenta de pino cônico liso, uma seqüência de soldas foi executada para definirem-se parâmetros que produzissem soldas de qualidade aceitável. Testaram-se as velocidades de rotação de 630, 800 e 1000 RPM com ângulo de inclinação e velocidade de avanço fixos em  $1^\circ$  e 75mm/min, respectivamente. A penetração do ombro na chapa foi de 0,55 mm.

Na figura 6.3 são apresentadas as macrografias da seção transversal da soldas obtidas com o emprego dos parâmetros descritos.

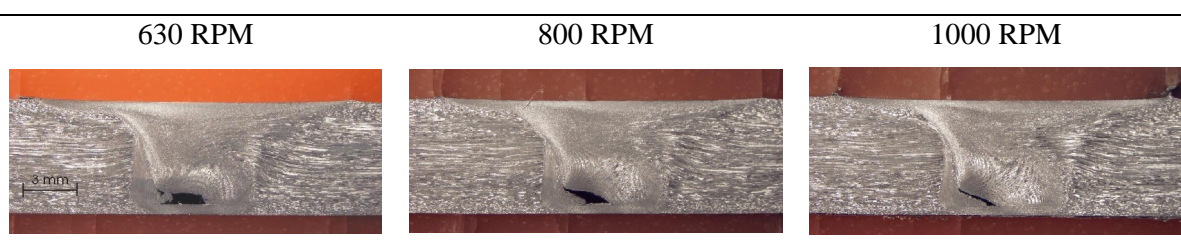


Figura 6.3 – Macrografia (Reagente Tuckers) - Ferramenta de pino facetado.

Embora todas as combinações utilizadas apresentem uma descontinuidade longitudinal ao longo do cordão, observa-se a tendência de diminuição do tamanho desta com o aumento da velocidade de rotação. Deve-se notar também que o formato do pino resultou em uma região soldada com aspecto diferente daquela observada para o pino cônico.

Diferentes ângulos de inclinação foram em seguida avaliados. As velocidades de rotação e avanço foram mantidas fixas em 1000 RPM e 75mm/min, respectivamente, e combinadas com ângulos de ataque de 2 e 3 graus. A figura 6.4 mostra a seção transversal da solda para as diferentes inclinações adotadas.

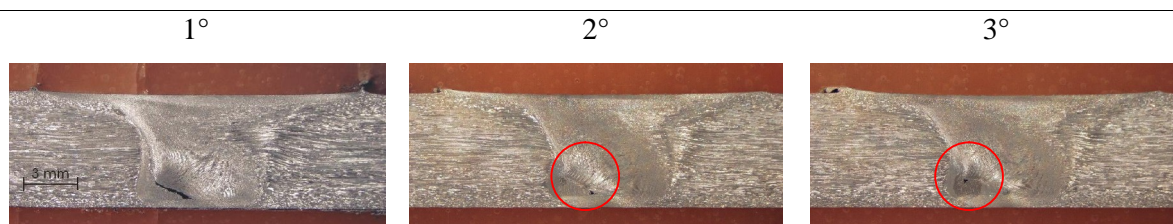


Figura 6.4 – Diminuição no tamanho da descontinuidade com aumento do ângulo de ataque.

Como observado para as soldas produzidas com a ferramenta de pino cônico liso, novamente nota-se a tendência de diminuição no tamanho do defeito formado segundo ângulos

de inclinação maiores. No entanto não foi possível eliminar a descontinuidade por completo, como destacado pelos círculos (figura 6.4). Novamente, houve formação de rebarba em excesso, o que sugere correções no comprimento adotado para o pino.

### 6.1.3 Ferramenta de pino cônico com rosca

Seguindo a mesma seqüência que para as ferramentas anteriores, a geometria de pino cônico com rosca foi testada em diferentes velocidades de rotação. Para permitir a comparação com as demais ferramentas, as mesmas condições de soldagem foram empregadas – velocidade de avanço de 75mm/min e ângulo de inclinação de 1° (fixos). As rotações testadas foram 630, 800 e 1000 RPM e a penetração do ombro na chapa foi de aproximadamente 0,7 mm.

As seções transversais das soldas obtidas nas diferentes velocidades são as apresentadas na figura 6.5.

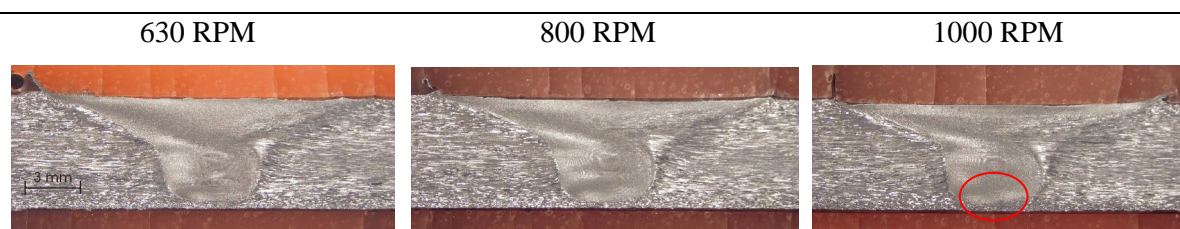


Figura 6.5 – Macrografia (Reagente Tuckers) - Ferramenta de pino cônico com rosca.

O desempenho da ferramenta com rosca mostrou-se superior às demais geometrias empregadas nos pré-testes mesmo para um ângulo de inclinação de 1°. Como é possível observar, não há presença de descontinuidade visível ao microscópio, mesmo utilizando-se maiores magnificações. A formação da seção transversal tem aspecto regular, similar ao obtido para o pino cônico liso.

A partir destas observações, ensaios com ângulos de ataque maiores não foram realizados visto que o efeito obtido com este aumento para as demais ferramentas atuou no sentido de melhorar a qualidade final da solda.

Da figura 6.5 também se pode notar que penetração total não foi atingida (destacado na figura) e que houve formação em excesso de rebarba. Como já comentado, ambos os problemas são devidos ao fato do comprimento do pino ser demasiadamente inferior à espessura da chapa. Desta forma, o pino não se aproximou suficientemente da raiz e permitiu a penetração do ombro em excesso, formando a rebarba.

### 6.1.4 Modificações implementadas

Baseado na análise visual dos cordões e na análise das macrografias das seções transversais das soldas, foi possível implementar-se modificações dimensionais nas ferramentas buscando a eliminação dos problemas até então verificados.

A modificação básica refere-se ao aumento do comprimento do pino das ferramentas. Esta dimensão é a responsável pela determinação de dois fatores importantes, que são a penetração do ombro na peça e a penetração do pino na espessura da chapa, aproximando-se por fim do suporte de soldagem.

Tal modificação fez-se necessária para adequar a penetração do ombro da ferramenta na superfície da chapa, diminuindo assim a quantidade de material expelido lateralmente durante o deslocamento da ferramenta. No caso específico da ferramenta cônica com rosca, tal modificação teve ainda a função de diminuir a distância entre a base de soldagem e a parte inferior do pino, buscando com isso a execução de uma solda com penetração total.

Em função das observações feitas nos testes preliminares, a geometria das ferramentas utilizadas na soldagem das chapas é a apresentada na tabela 6.1.

Tabela 6.1 – Dimensões finais das ferramentas de soldagem FSW.

Ferramenta / Geometria	Comprimento pino [mm]	Ø do pino [mm]	Geometria do ombro	Ø do ombro [mm]	Observações
C	6.25	6.0	Liso - reto	18	–
F	6.10	6.0	Liso - reto	18	–
R	6.20	6.0	Liso - reto	18	Passo: 1mm

C – Pino cônico liso (conicidade 10°).

F – Pino facetado reto (120° entre faces).

R – Pino cônico com rosca (conicidade 10°).

Os novos valores do comprimento do pino permitem a soldagem utilizando maiores ângulos de inclinação da ferramenta, onde os melhores resultados foram obtidos, porém sem implicar em penetração excessiva do ombro.

Vale ressaltar que nesta fase de determinação dos parâmetros adequados de soldagem, uma ferramenta com pino regulável diminuiria consideravelmente o tempo de testes, uma vez que não se tornaria necessário recorrer à processos de usinagem para ajustes da ferramenta.

## 6.2 Soldagem FSW

Uma vez definidos os parâmetros para a soldagem FSW e executados os devidos ajustes nas ferramentas, foram realizadas as soldas em chapas maiores para posterior avaliação das propriedades mecânicas. O gráfico da figura 6.6 apresenta o comportamento da velocidade de rotação da ferramenta durante a soldagem.

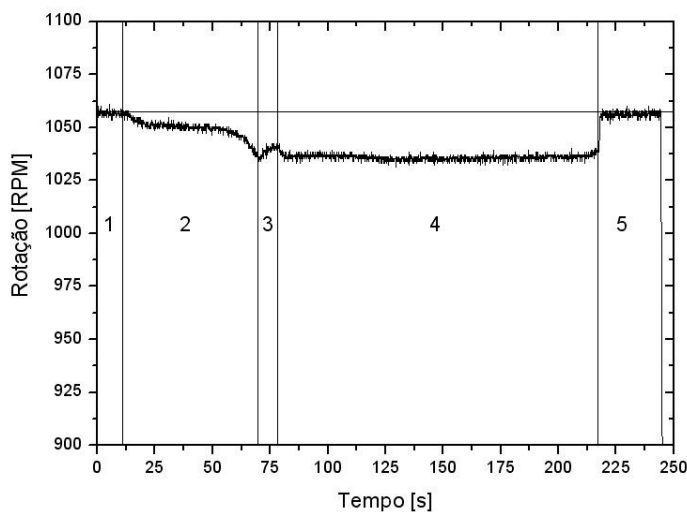


Figura 6.6 – Comportamento da velocidade de rotação durante a soldagem.

O gráfico representa o comportamento padrão da velocidade de rotação observado durante a soldagem FSW para as três geometrias de ferramenta testadas na máquina fresadora. Vale ressaltar que este é o comportamento característico da máquina utilizada, e não necessariamente do processo.

Cinco regiões podem ser identificadas neste gráfico:

- Regiões 1 e 5, que representam a ferramenta em rotação livre, sem carga, respectivamente no início e fim da solda;
- Região 2, que demonstra a queda de rotação verificada no momento de penetração da ferramenta, com um decréscimo acentuado a partir do momento em que o ombro entra em contato com a chapa;
- Região 3, que representa o intervalo no qual modifica-se manualmente a velocidade de avanço da mesa por meio de alavancas, ocasionando um período de aquecimento estacionário (aproximadamente 10s) com conseqüente aumento da rotação;
- Região 4, que compreende o período no qual a ferramenta desloca-se ao longo da junta, formando a solda.

Observa-se inicialmente que a rotação definida na máquina difere daquela medida na ferramenta, e que sem carga (regiões 1 e 5) a velocidade de rotação média é de 1056 RPM. A fim de averiguar-se a velocidade de rotação efetiva durante a soldagem, os dados da região 4 foram analisados.

A tabela 6.2 apresenta os valores médios obtidos na soldagem com cada geometria.

Tabela 6.2 – Velocidade de rotação efetiva durante a soldagem.

Ferramenta	Rotação Média [RPM]	Desvio-Padrão
C	1035,2	1,50
F	1035,4	0,51
R	1035,3	0,39

A análise estatística destes dados, através do método de análise de variância ANOVA, mostra que não houve diferença significativa entre as velocidades de rotação efetivas das ferramentas, para um nível de significância de 5%. A velocidade efetiva de soldagem para qualquer das ferramentas empregadas é de 1035 RPM.

A análise visual das soldas obtidas com o uso da ferramenta de geometria cônica lisa mostra que cordões de boa aparência e com pouca rebarba foram obtidos. A figura 6.7 apresenta o aspecto do cordão obtido com esta ferramenta nas três repetições (C1, C2 e C3).

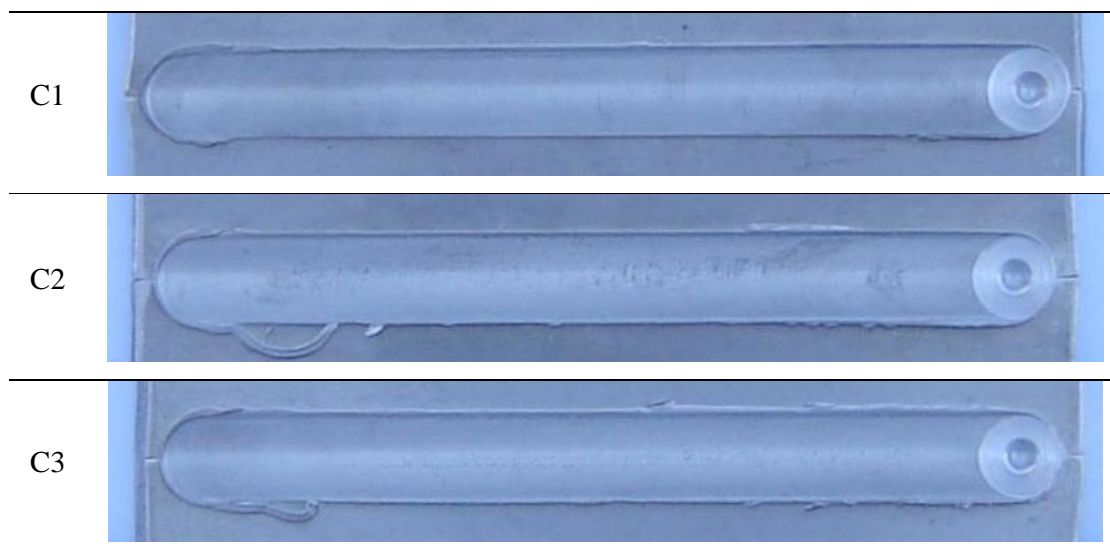


Figura 6.7 – Aparência do cordão - Ferramenta cônica lisa.

No furo remanescente da solda, entretanto, é possível observar a presença de uma descontinuidade, possivelmente presente ao longo de toda extensão do cordão. A ocorrência de tal defeito foi verificada nas três repetições, e encontra-se localizada no lado de avanço da ferramenta, próxima à raiz da solda, como mostra a figura 6.8.



Figura 6.8 – Descontinuidade observada no furo remanescente.

Para a ferramenta com pino facetado, o nível de rebarba produzido foi maior como se pode observar na figura 6.9, onde imagens do cordão obtido nas três repetições são apresentadas.

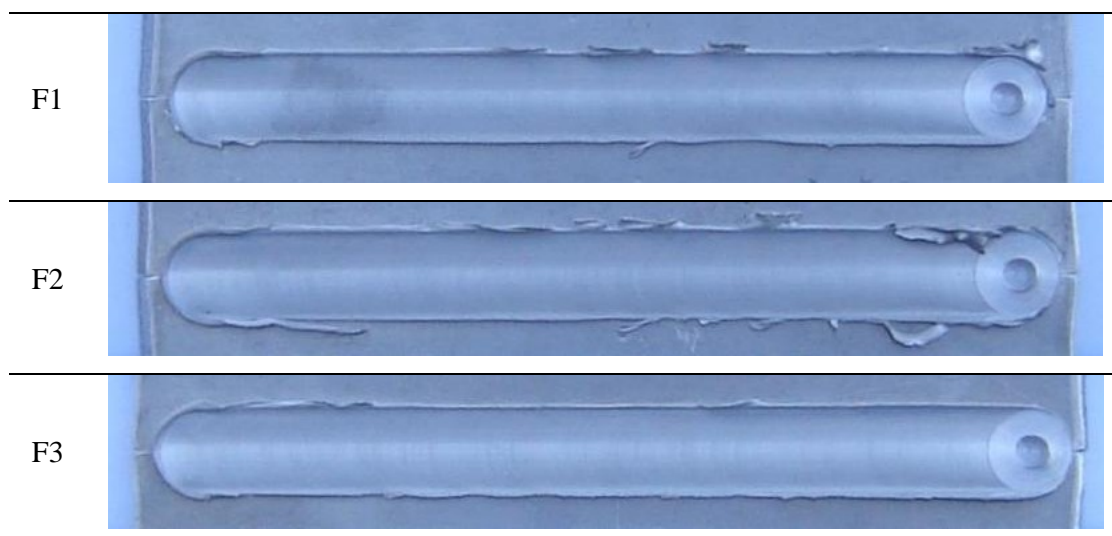


Figura 6.9 – Aparência do cordão - Ferramenta facetada.

Possivelmente o maior nível de rebarba verificado deve-se ao fato do comprimento do pino da ferramenta facetada ser 0,15 mm menor que o comprimento do pino da ferramenta cônica lisa, como já indicado na tabela 6.1. Fica evidente que o processo é bastante sensível à

pequenas variações dimensionais do ferramental empregado, o que neste caso ocasionou penetração excessiva do ombro.

A ferramenta de pino cônico com rosca apresentou níveis de rebarba similares às demais ferramentas, como pode ser observado na figura 6.10. Como esperado a partir dos testes preliminares, não foi observado presença de qualquer tipo de defeito no furo remanescente.

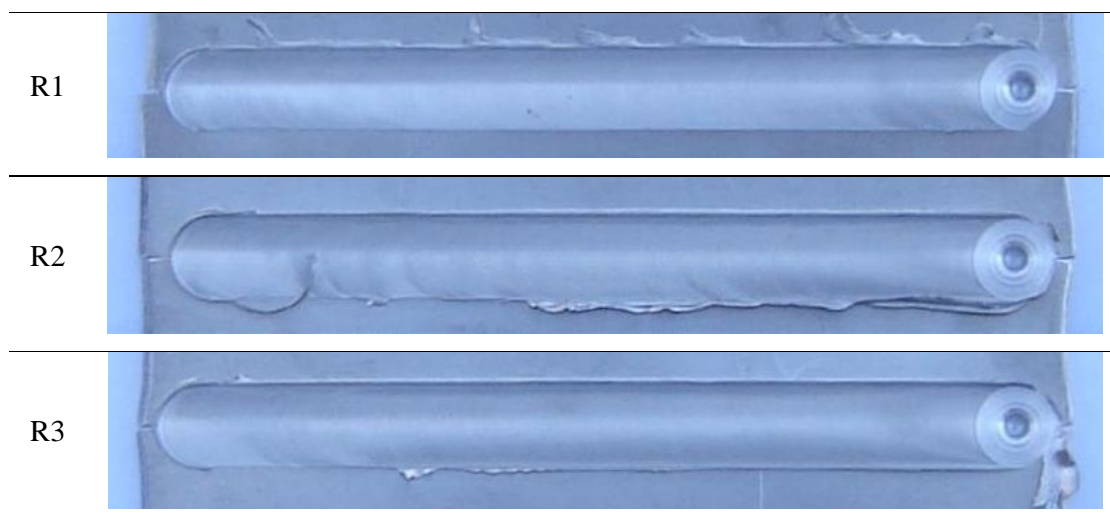


Figura 6.10 – Aparência do cordão - Ferramenta com rosca.

A diminuição da formação de rebarba durante a soldagem seguramente está associada ao fato da geometria do ombro não contemplar qualquer grau de concavidade ou de canais espirais contrários ao sentido de rotação da ferramenta. Tais implementações certamente atuariam no sentido de reduzir a expulsão de material na passagem da ferramenta, melhorando o acabamento obtido.

Além da inspeção visual dos cordões, dando atenção ao tamanho da rebarba produzida e a presença ou não de falhas de preenchimento no furo remanescente da solda, outro aspecto observado foi a eliminação da linha que define a junta soldada na raiz da solda. A avaliação visual da raiz da solda demonstrou o completo desaparecimento de qualquer sinal da presença do chanfro, sendo um indicativo inicial da obtenção de “penetração total”.

### 6.2.1 Ensaio de dobramento

Após a soldagem das chapas, corpos de prova foram preparados para o ensaio de dobramento. As chapas foram submetidas ao dobramento até apresentarem algum sinal de falha, ou caso isto não ocorresse, até um dobramento de 180°.



As chapas soldadas com a ferramenta de pino cônico liso não apresentaram qualquer defeito quando submetidas ao dobramento transversal de face, como mostra a figura 6.11.



Figura 6.11 – Dobramento transversal de face - Ferramenta cônica lisa.

No dobramento transversal de raiz, entretanto, observou-se o surgimento de um defeito por volta dos  $25 - 35^\circ$ , dependendo da solda em análise. A figura 6.12 apresenta em detalhe o defeito, que se estende longitudinalmente à solda. A posição em que se observa o defeito coincide com aquela descrita anteriormente no furo remanescente (lado de avanço, próximo à raiz da solda), indicando que para esta geometria de ferramenta não se obteve completo preenchimento da seção transversal após a passagem da ferramenta.

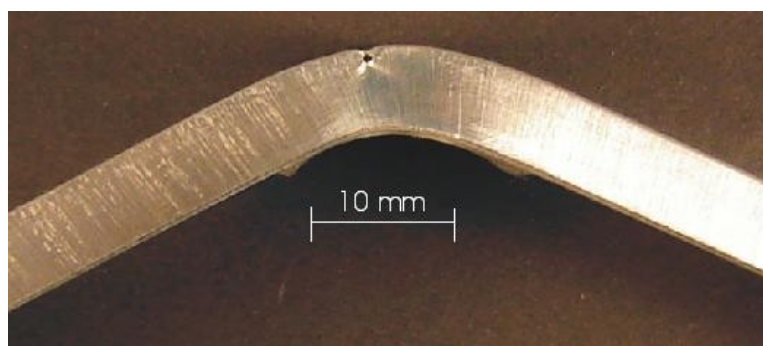


Figura 6.12 – Defeito observado no dobramento transversal de raiz.

O dobramento transversal de face e de raiz dos corpos de prova soldados com as ferramentas de pino facetado e pino cônico com rosca não apresentaram quaisquer defeitos, tendo suportado um dobramento de  $180^\circ$ . Na figura 6.13 é possível observar os corpos de prova após os dobramentos transversais de face e de raiz.



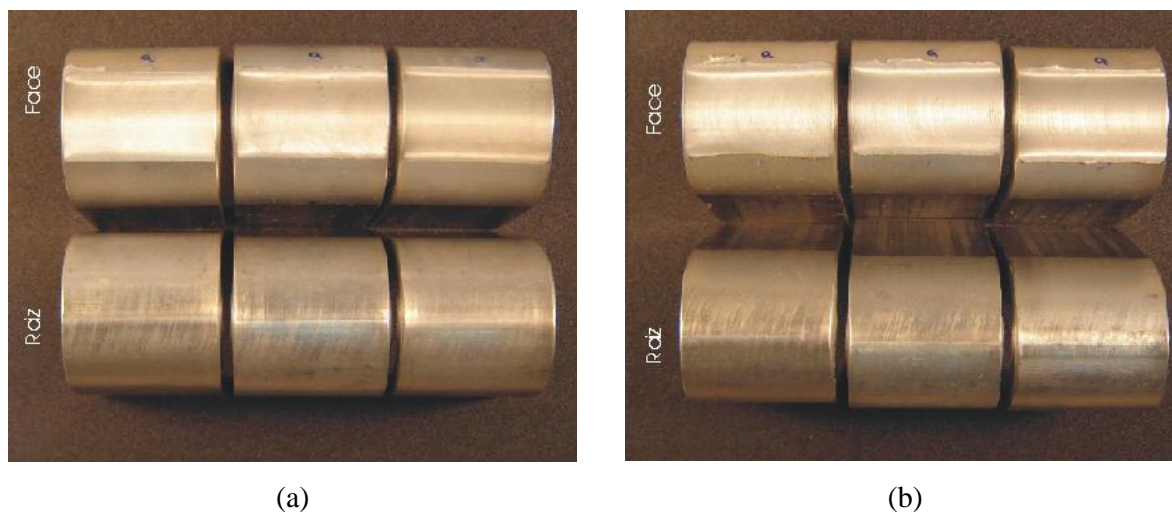


Figura 6.13 – Dobramento de face e raiz. Ferramenta facetada (a) e cônica com rosca (b).

Com base nos testes de dobramento, pode-se afirmar que para as soldas obtidas pelas geometrias facetada e cônica com rosca, não se verifica queda significativa da ductilidade do material em decorrência da presença da solda. Para a geometria cônica lisa, entretanto, verifica-se que novos ajustes seriam necessários para que as soldas obtidas com esta geometria fossem aprovadas em ensaios de dobramento.

### 6.2.2 Ensaio de tração

Com o objetivo de verificar a eficiência da junta soldada obtida pelo processo FSW, corpos de prova de tração foram confeccionados e ensaiados em uma máquina universal de ensaios. A seguir são apresentados os resultados obtidos para as três ferramentas utilizadas no trabalho, com suas respectivas médias e desvios-padrão.

Nas tabelas 6.3 à 6.4,  $\bar{C}$ ,  $\bar{F}$  e  $\bar{R}$  correspondem aos valores médios de tensão de escoamento ( $\sigma_{esc}$ ), tensão máxima ( $\sigma_{max}$ ) e alongação ( $\varepsilon$ ) obtidos por cada ferramenta e  $s$  representa o desvio-padrão amostral calculado para as nove amostras ensaiadas (três para cada repetição). A eficiência da junta soldada é calculada tomando como base os valores de  $\sigma_{esc}$ ,  $\sigma_{max}$  e  $\varepsilon$  obtidos na caracterização do metal base.

A tabela 6.3 apresenta os valores obtidos no ensaio de tração das amostras soldadas com a ferramenta de geometria cônica lisa. Nas colunas C1, C2 e C3 mostra-se o valor médio encontrado para cada solda.

Tabela 6.3 – Ensaio de tração - Ferramenta com pino cônico liso.

Propriedades Mecânicas	Solda			$\bar{C}$	$s$	Eficiência [%]
	$\bar{C}1$	$\bar{C}2$	$\bar{C}3$			
$\bar{\sigma}_{esc}$ [MPa]	119,67	123,00	102,67	115,11	11,83	80,84
$\bar{\sigma}_{max}$ [MPa]	212,67	212,67	212,67	212,67	3,35	90,42
$\bar{\varepsilon}$ [%]	18,00	18,67	18,00	18,22	1,30	75,30

Segundo os dados obtidos, inicialmente observa-se que a tensão de escoamento apresenta um desvio-padrão grande, o que indica a existência de uma heterogeneidade nos corpos de prova ensaiados. Este desvio-padrão pode estar ligado à variações na descontinuidade presente nestas soldas, o que traduz-se por uma disparidade nos resultados da tensão de escoamento média de cada repetição.

Embora o desvio-padrão da tensão de escoamento indique baixa repetitividade na qualidade da solda, esta geometria de ferramenta alcançou uma eficiência em torno de 80% do metal base.

Durante os ensaios de tração, observou-se que a falha dos corpos de prova origina-se muito próxima ao defeito previamente detectado, propagando-se com o aumento da tensão e rompendo no próprio cordão de solda, como mostra a figura 6.14.

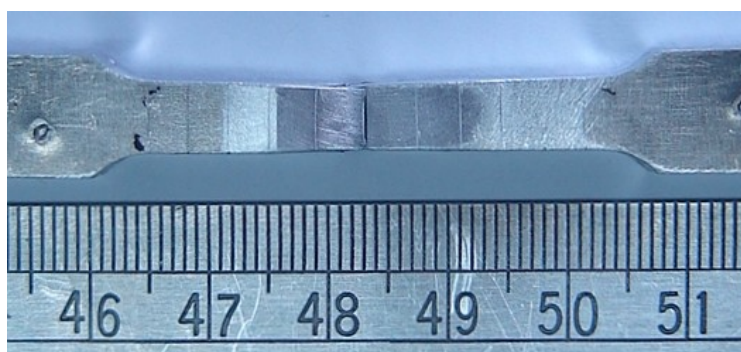


Figura 6.14 – Ruptura sobre o cordão de solda FSW - geometria cônica lisa.

Como já verificado através dos ensaios de dobramento, observa-se queda acentuada da ductilidade, demonstrada através da redução da elongação.

Na tabela 6.4 apresenta-se os resultados obtidos para a ferramenta de geometria facetada.

Tabela 6.4 – Ensaio de tração - Ferramenta com pino facetado.

Propriedades Mecânicas	Solda			$\bar{F}$	$s$	Eficiência [%]
	$\bar{F}_1$	$\bar{F}_2$	$\bar{F}_3$			
$\bar{\sigma}_{esc}$ [MPa]	115,33	116,33	117,33	116,33	2,18	81,69
$\bar{\sigma}_{max}$ [MPa]	221,00	220,67	223,33	221,67	2,12	94,25
$\bar{\varepsilon}$ [%]	25,33	24,67	24,33	24,78	1,39	102,39

De forma semelhante ao obtido pela geometria cônica lisa, a eficiência das soldas para esta geometria apresentou desempenho de 81%, porém com desvio-padrão menor. Isto demonstra que o processo teve boa repetitividade, como indicado pelos valores médios de tensão de escoamento em cada repetição.

Embora a eficiência seja bastante próxima daquela apresentada pela geometria cônica lisa, o desempenho desta ferramenta mostra-se superior quando se compara a ductilidade dos corpos de prova soldados. A elongação obtida utilizando-se a geometria facetada mostra-se comparável à do metal base, sem demonstrar perda significativa.

Quanto ao local de ruptura dos corpos de prova, observou-se que a falha ocorre sobre a solda no lado de recuo, como ilustrado pela figura 6.15, situando-se a uma distância entre 5 e 8 mm afastada da linha de centro da solda.

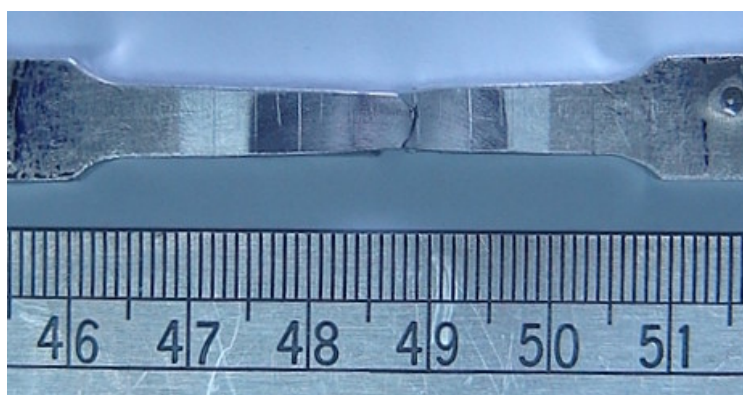


Figura 6.15 – Ruptura sobre o cordão de solda FSW - geometria facetada.

Os resultados obtidos em ensaio de tração para a ferramenta de geometria cônica com rosca são apresentados a seguir, na tabela 6.5.

Tabela 6.5 – Ensaio de tração - Ferramenta com pino cônico com rosca.

Propriedades Mecânicas	Solda			$\bar{R}$	$s$	Eficiência [%]
	$\bar{R1}$	$\bar{R2}$	$\bar{R3}$			
$\bar{\sigma}_{esc}$ [MPa]	121,67	116,00	113,33	117,00	5,59	82,16
$\bar{\sigma}_{max}$ [MPa]	225,33	223,00	223,00	223,78	2,05	95,14
$\bar{\varepsilon}$ [%]	22,33	22,33	22,00	22,22	0,67	91,83

Nota-se que a eficiência da solda obtida com o emprego da geometria cônica com rosca é muito próxima daquela alcançada pelas demais geometrias. Embora levemente superior no desempenho quanto à tensão de escoamento e tensão máxima, as soldas obtidas pelo uso desta geometria apresentaram uma queda de aproximadamente 10% na elongação. Este resultado, porém, não chegou a comprometer o desempenho das soldas nos ensaios de dobramento. Para as três grandezas avaliadas, um pequeno desvio-padrão foi obtido mostrando que o processo apresentou boa repetitividade.

O local da ruptura observado encontra-se sobre a solda, novamente não se observando a origem da falha sobre a raiz da solda, mas sim nas adjacências desta no lado de recuo, como mostra a figura 6.16. Assim como para a geometria facetada, a ruptura ocorre numa faixa situada entre 5 e 8 mm afastada da linha de centro da solda.

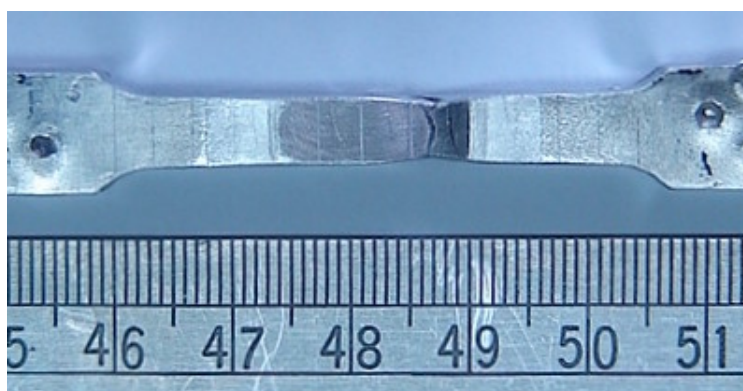


Figura 6.16 – Ruptura sobre o cordão de solda FSW - geometria cônica com rosca.

Com exceção dos corpos de prova obtidos com o emprego da ferramenta de geometria cônica lisa, as demais rupturas observadas nos ensaios de tração se aproximam dos resultados encontrados por Larsson et. al. (2000) na soldagem de alumínio 5083, com a ruptura ocorrendo sobre o cordão e se originando em uma região de interface entre núcleo da solda e metal base.

### 6.2.3 Análise metalográfica

Para cada solda realizada, três amostras da seção transversal do cordão de solda foram retiradas para observação em microscópio, representando respectivamente o início, meio e final da solda (cortes A, B e C). Na figura 6.17 são ilustradas amostras da seção transversal após a soldagem com a ferramenta cônica lisa.

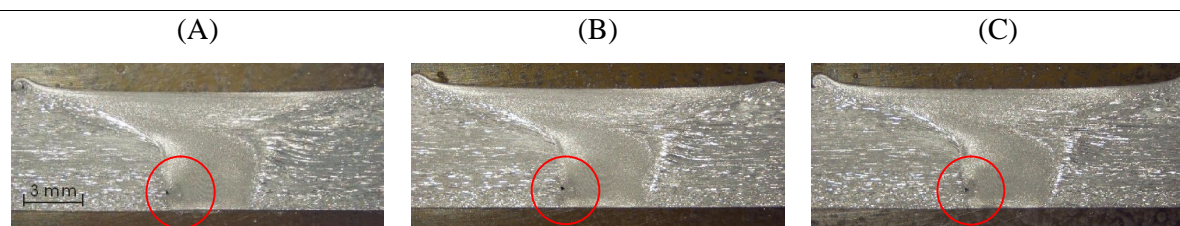


Figura 6.17 – Amostras da seção transversal - ferramenta de soldagem cônica lisa.

Embora a penetração da ferramenta tenha sido completa, promovendo uma região de mistura ao longo de toda espessura da chapa, nota-se a presença de uma pequena descontinuidade localizada no lado de avanço da ferramenta, próxima à raiz da solda (círculos), que se estende ao longo de toda a junta, como evidenciado pelos cortes transversais realizados ao longo do cordão.

A localização coincide com aquela na qual se observou o surgimento de defeito durante o ensaio de dobramento. Na figura 6.18 vê-se em detalhe a falha proveniente do processo de soldagem com esta ferramenta. Também se pode observar o grau de refinamento dos grãos no núcleo da solda decorrente do processo de soldagem, juntamente com linhas formando uma textura diferente da observada pela geometria cônica. Embora o tamanho da descontinuidade seja aparentemente uniforme nas três seções realizadas, pode haver variações como indicado pelos resultados das amostras em ensaio de tração.



Figura 6.18 – Detalhe da descontinuidade na soldagem com geometria cônica lisa.



A seguir, amostras da seção transversal de uma das soldas produzidas com a ferramenta de geometria facetada são apresentadas. Como mostra a figura 6.19, não se observam descontinuidades similares às aquelas produzidas pela geometria cônica lisa, e defeitos de outro tipo não se mostram evidentes.

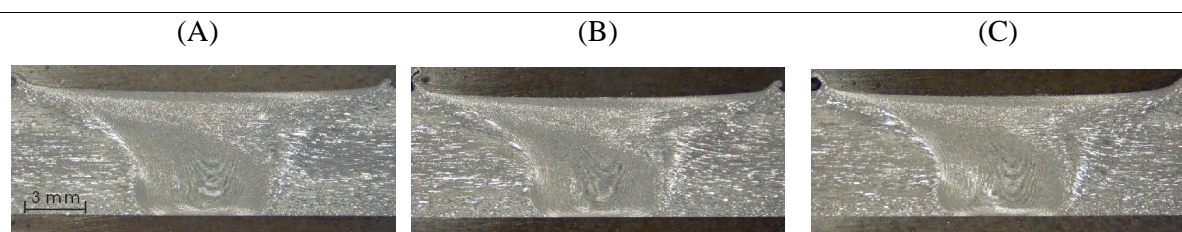


Figura 6.19 – Amostras da seção transversal - ferramenta de soldagem facetada.

Nota-se, entretanto, que o núcleo da solda é consideravelmente maior que aquele produzido pela geometria cônica. Isto se deve ao fato do pino facetado não possuir uma conicidade como as demais ferramentas.

Também se pode observar que a microestrutura resultante no núcleo da solda possui grãos bastante refinados em comparação àqueles do metal base, e que a penetração da ferramenta foi completa.

De forma semelhante à geometria facetada, na soldagem com a ferramenta de geometria cônica com rosca, não se observou ocorrência de descontinuidades. A figura 6.20 apresenta as macrografias das seções transversais de uma das chapas soldadas.

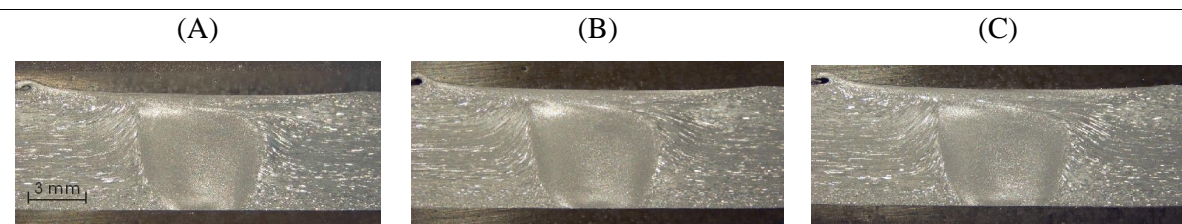


Figura 6.20 – Amostras da seção transversal - ferramenta de soldagem cônica com rosca.

Pode-se observar que a microestrutura resultante no núcleo da solda possui grãos bastante refinados e com distribuição homogênea, quando comparados às demais seções transversais analisadas. O núcleo da solda apresenta-se com um formato aproximadamente circular, e o efeito da adição dos filetes de rosca ao pino cônico propicia um aumento do tamanho da região de

mistura, se comparado à seção transversal da solda obtida com o emprego da ferramenta de soldagem cônica lisa.

#### 6.2.4 Perfis de dureza

Nas figuras 6.21 à 6.23 são apresentados os gráficos que mostram os valores de microdureza encontrados na seção transversal das soldas produzidas com as diferentes ferramentas empregadas. Cada ponto representa a média do valor de microdureza na posição “x” da seção transversal, com seu respectivo desvio-padrão. Nestes gráficos, o ponto zero indica a linha central da solda, sendo o sentido de x positivo o lado de recuo da ferramenta. Na figura 6.18, tem-se os valores médios de dureza obtidos ao longo da seção transversal das soldas obtidas com o emprego da ferramenta de geometria cônica lisa.

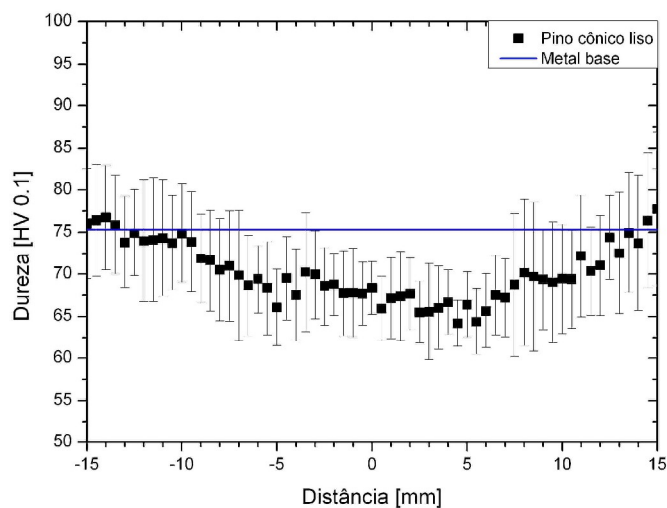


Figura 6.21 – Perfil de microdureza médio - ferramenta cônica lisa.

Para a ferramenta com geometria cônica lisa observa-se que há um desvio-padrão médio de 5,7 HV, e uma queda de aproximadamente 10 HV em relação ao metal base. Observa-se também que a uma distância de 15 mm afastado da linha de solda há uma recuperação da dureza original do metal base, indicada pela linha contínua horizontal, indicativo que a zona afetada pelo calor possui dimensões de aproximadamente 15 mm no entorno da linha central da solda.

A figura 6.22, a seguir, apresenta os valores médios do perfil de dureza encontrados nas soldas obtidas com a ferramenta de geometria facetada.

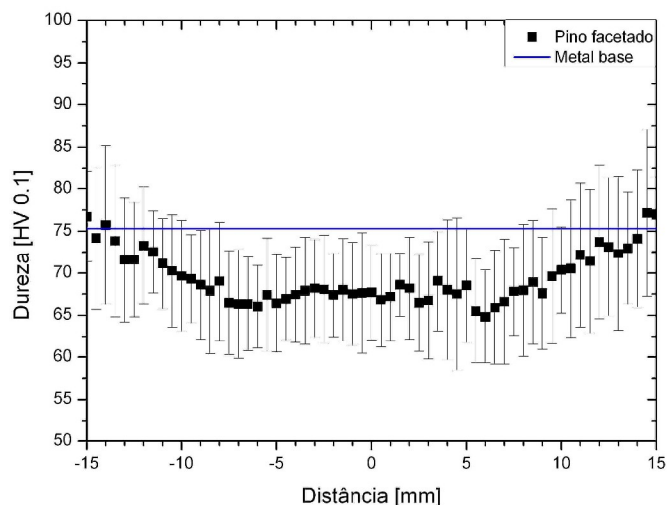


Figura 6.22 – Perfil de microdureza médio - ferramenta facetada.

Para a geometria facetada, observa-se um desvio-padrão médio de 6,7 HV, e uma dureza média na região central em torno de 65 HV. De maneira similar à geometria cônica lisa, observa-se o retorno aos valores da dureza original do metal base ao aproximar-se da região situada à 15 mm do centro da junta. Para a ferramenta de geometria com rosca, os valores médios de microdureza são os apresentados na figura 6.23.

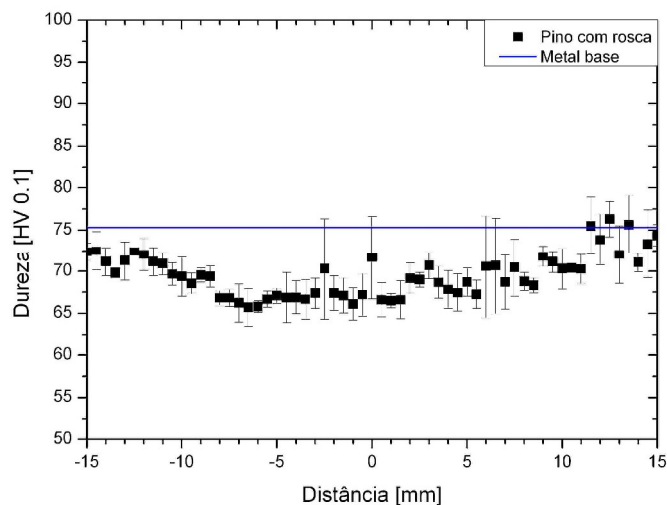


Figura 6.23 – Perfil de microdureza médio - ferramenta cônica com rosca.

Inicialmente, pode-se observar que o desvio-padrão médio apresentado nas medições de microdureza foi menor (cerca de 2 HV) quando comparado às geometrias anteriores, mostrando uma maior uniformidade entre as amostras analisadas. Assim como nas demais geometrias analisadas, a queda de dureza em relação ao metal base é de cerca de 10 HV na região central da



solda, e observa-se a recuperação dos valores originais da dureza do metal base ao aproximar-se da região situada à 15 mm da linha central da solda.

### 6.3 Soldagem MIG

Para efeitos de comparação do desempenho das soldas por fricção, três juntas foram soldadas utilizando o processo MIG. Com base em parâmetros de soldagem indicados pela literatura, testes iniciais foram conduzidos e alguns ajustes foram efetuados para obtenção de uma junta soldada com penetração total e com bom aspecto visual do cordão de solda. Feito isto, foram produzidas as juntas para posterior avaliação das propriedades mecânicas e comparação com o processo FSW.

Na figura 6.24 apresenta-se a aparência dos cordões de solda obtidos, onde o dígito que segue a letra M designa o número da repetição da solda.

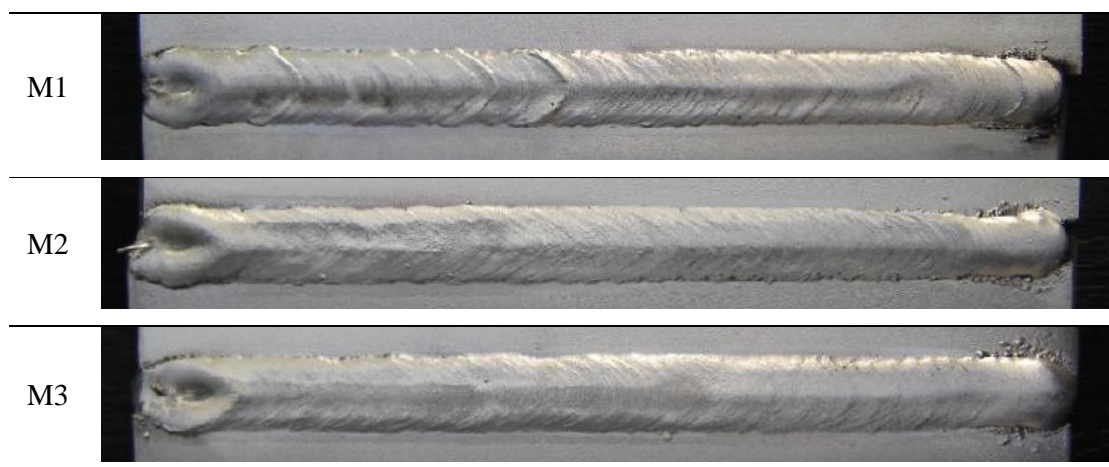


Figura 6.24 – Aparência do cordão - processo MIG.

O cordão de solda resultante apresentou boa aparência superficial e isenção de defeitos detectáveis sem auxílio de técnicas de inspeção adicionais não destrutivas, como o método dos líquidos penetrantes.

Descontinuidades como mordeduras (face ou raiz), falta de penetração ou falta de fusão não foram observados. Entretanto, considerável distorção pôde ser constatada em função da dilatação/contração durante o processo.

A seguir são apresentados os resultados obtidos nas diferentes avaliações a que foram submetidos os corpos de prova usinados a partir das juntas soldadas pelo processo MIG.

### 6.3.1 Ensaio de dobramento

A partir das três juntas soldadas, seis corpos de prova para dobramento transversal foram confeccionados, sendo três deles submetidos a dobramento de face e três ao dobramento de raiz. Na figura 6.25 ilustra-se os corpos de prova MIG sujeitos a dobramento de face.



Figura 6.25 – Dobramento transversal de face.

A análise destes corpos de prova não revelou a presença de falhas ou trincas detectáveis visualmente. Em seguida, na figura 6.26, apresenta-se os corpos de prova após serem submetidos ao dobramento transversal de raiz.

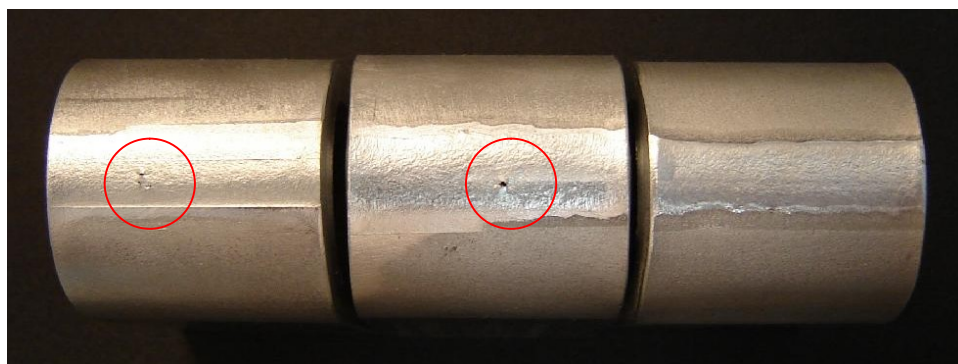


Figura 6.26 – Dobramento transversal de raiz.

Observa-se que nestes ensaios, dois dos corpos de prova apresentaram fissuras superficiais, como destacado pelos círculos na figura 6.26. O surgimento destas discontinuidades, entretanto, não impediu o dobramento completo dos corpos de prova, fato não observado nas amostras soldadas pelo processo FSW utilizando a ferramenta de geometria cônica lisa.

### 6.3.2 Ensaio de tração

Como meio de quantificar a eficiência da junta soldada pelo processo MIG, corpos de prova foram confeccionados e submetidos ao ensaio de tração. Três corpos de prova foram extraídos de cada solda produzida, sendo os valores apresentados uma média representativa das propriedades resultantes ao longo do cordão.

Na tabela 6.6 são apresentados os resultados obtidos para os ensaios realizados, com suas respectivas médias e desvio-padrão. Novamente, a eficiência da junta soldada é calculada tomando como base os valores de  $\sigma_{esc}$ ,  $\sigma_{max}$  e  $\varepsilon$  obtidos na caracterização do metal base.

Tabela 6.6 – Ensaio de tração - solda MIG.

Propriedades Mecânicas	Solda			$\bar{M}$	$s$	Eficiência [%]
	$\bar{M}1$	$\bar{M}2$	$\bar{M}3$			
$\bar{\sigma}_{esc}$ [MPa]	104.00	102.67	113.33	106.67	8.87	74.91
$\bar{\sigma}_{max}$ [MPa]	215.67	197.00	214.67	209.11	11.69	88.91
$\bar{\varepsilon}$ [%]	20.33	20.33	21.33	20.67	4.21	85.40

Analisando-se os valores da tabela observa-se que ocorre uma queda significativa nos valores de tensão de escoamento quando comparados ao metal base. Uma eficiência de 74,91% mostra-se inferior a todos os resultados obtidos através do processo FSW.

Em termos da tensão máxima, fica evidente a degradação sofrida pelo material em função das elevadas temperaturas experimentadas durante o processo de soldagem MIG, apresentando a eficiência de  $\sigma_{max}$  em torno de 89%.

Quanto à ductilidade, ocorre significativa diminuição nos valores desta propriedade como demonstrado através da queda no percentual de alongação.

Com relação ao local de ruptura, observou-se que a falha ocorre imediatamente ao lado do cordão de solda, na zona afetada pelo calor, como mostra a figura 6.27.

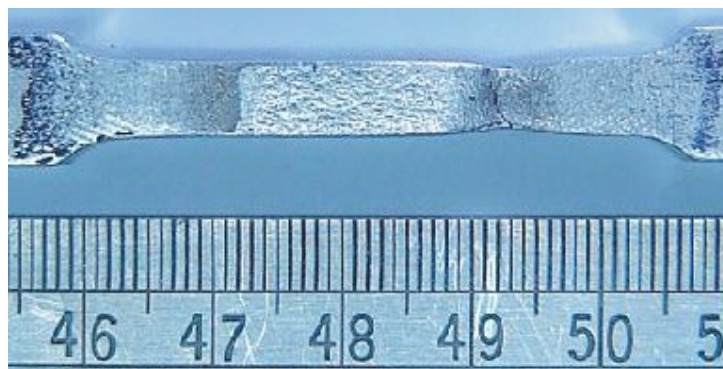


Figura 6.27 – Ruptura ao lado do cordão de solda MIG.

### 6.3.3 Análise metalográfica

Seguindo a mesma metodologia utilizada para com as soldas pelo processo FSW, três amostras da seção transversal de cada solda foram retiradas para análise em microscópio. Na figura 6.28 pode-se observar amostras representativas do início, meio e final da solda MIG (cortes A, B e C).

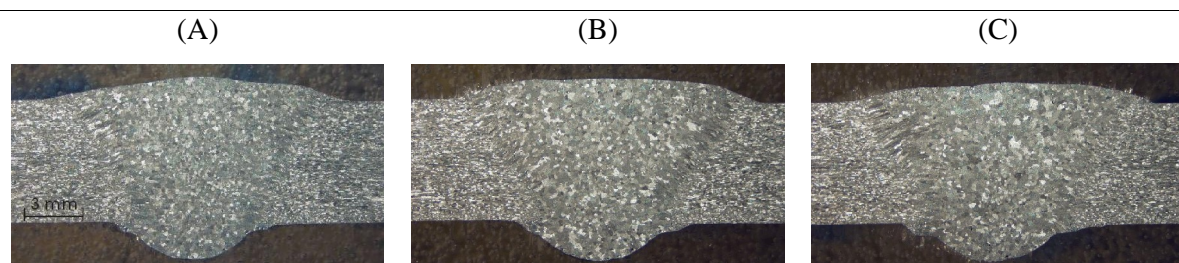


Figura 6.28 – Amostras da seção transversal - solda MIG.

Como esperado, observa-se que existe uma grande disparidade entre os tamanhos de grão na zona fundida e no metal base em decorrência da deposição do metal de adição e das elevadas temperaturas a que o material foi submetido, com conseqüentes transformações microestruturais. Verifica-se também a presença de porosidade dispersa ao longo da zona fundida. Esta porosidade certamente influenciou o desempenho observado nos ensaios de tração e dobramento.

### 6.3.4 Perfis de dureza

Da mesma forma que para as soldas obtidas pelo processo FSW, na figura 6.29 é apresentado o perfil de microdurezas obtido para as soldas do processo MIG. Novamente, cada ponto representa a média das medições feitas na amostra B de cada solda, com seus respectivos desvios-padrão.

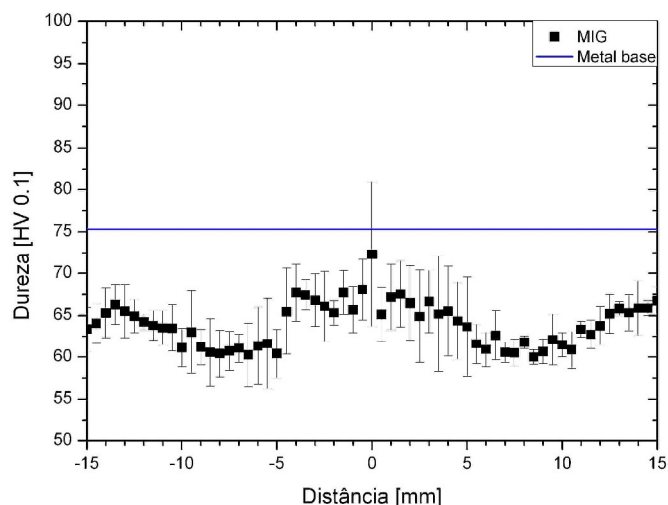


Figura 6.29 – Perfil de microdureza médio - processo MIG.

Inicialmente destaca-se o pequeno desvio padrão médio apresentado pelas medições, que situa-se em torno de 2.9 HV, demonstrando homogeneidade nas amostras analisadas.

Verifica-se que há uma queda mais acentuada dos valores de microdureza quando comparados aos obtidos pelo processo FSW, evidenciando a perda de dureza na ZAC, e em especial na região situada entre, aproximadamente, 5 e 10 mm, onde se verificam os menores valores de dureza medidos. Tais valores ficam em torno de 60 HV.

Diferentemente dos demais perfis analisados, não se observa aqui a recuperação da dureza original do metal base na região de análise (15 mm para cada lado da solda), demonstrando que a ZAC resultante é mais extensa do que aquela decorrente do processo FSW.

## 7 Conclusões

Com base na análise dos resultados obtidos ao longo do trabalho, podem-se delinear as seguintes conclusões:

A implementação do processo FSW, em conjunto com o projeto, fabricação de ferramentas e realização de inúmeros testes preliminares, permitiu a obtenção de soldas de qualidade aceitável, com baixo nível de defeitos e com resistência mecânica apreciável de até 82% da tensão de escoamento apresentada pelo metal base. Com relação à elongação, as soldas produzidas pelo processo FSW demonstraram ser possível obter-se juntas soldadas sem perda significativa da ductilidade.

A ferramenta de soldagem com pino cônico liso não apresentou desempenho satisfatório, como demonstrado pelos resultados dos ensaios de dobramento e tração. As amostras analisadas em macrografia demonstraram a presença de uma descontinuidade que se estende ao longo de todo o comprimento soldado e em todas as repetições realizadas. A esta descontinuidade se atribui o desempenho inferior dos corpos de prova sujeitos a ensaios de dobramento e tração. Eficiências calculadas indicam que as soldas fabricadas com esta ferramenta alcançam 80,84, 90,42 e 75,30% dos valores obtidos em relação ao metal base para a tensão de escoamento, tensão máxima e elongação, respectivamente. A obtenção de soldas isentas de quaisquer descontinuidades utilizando esta geometria de ferramenta requer a realização de ensaios adicionais, com parâmetros de soldagem provavelmente não compatíveis com a capacidade da máquina fresadora utilizada neste trabalho.

A ferramenta de soldagem com pino de geometria facetada apresentou desempenho satisfatório, como demonstrado pelos ensaios mecânicos. Os corpos de prova submetidos aos ensaios de dobramento transversal de face e de raiz não revelaram a presença de qualquer tipo de descontinuidade superficial, permitindo dobramentos de 180°. A análise macrográfica destas soldas também não permitiu identificar falhas grosseiras como a falta de preenchimento observada para a geometria cônica lisa, não ficando evidente assim a ocorrência de defeitos. Nos ensaios de tração, os corpos de prova tiveram bom desempenho, como evidenciado pela eficiência da tensão de escoamento, tensão máxima e elongação calculada de, respectivamente, 81,69, 94,25 e 102,39%, residindo nos valores obtidos de elongação e no ensaio de dobramento a evidência de desempenho superior desta ferramenta em relação à geometria cônica lisa.

A análise dos resultados dos ensaios de tração obtidos para a ferramenta de geometria cônica com rosca mostra que o desempenho desta é semelhante ao obtido pela ferramenta de geometria facetada. A análise macrográfica de amostras obtidas na soldagem com esta

ferramenta mostra que não há presença evidente de descontinuidades, fato comprovado pelo bom desempenho dos corpos de prova nos ensaios de dobramento transversal de face e de raiz, bem como nos ensaios de tração. Neste último, eficiências calculadas de 82,16% (tensão de escoamento), 95,14% (tensão máxima) e 91,83% (elongação) foram obtidas.

Em relação aos parâmetros de soldagem utilizados, pode-se afirmar que o desempenho obtido com velocidade de rotação de 1000 RPM, 3° de inclinação da ferramenta, penetração do ombro de 0,4 mm e 75 mm/min de velocidade de avanço mostra-se adequado para a obtenção de soldas com qualidade apreciável, utilizando-se as geometrias facetada e cônica com rosca, na soldagem de alumínio AA5052-H34 com 6,35 mm de espessura.

Quanto às soldas obtidas utilizando-se o processo MIG, fica evidente que o desempenho das mesmas foi comprometido devido à porosidade presente ao longo do cordão. O baixo desempenho dos corpos de prova sujeitos aos ensaios de tração, com eficiências de tensão de escoamento de 74,91%, tensão máxima de 88,91% e elongação de 85,40%, calculadas em relação ao metal base, corroboram com o observado nas análises macrográficas, onde porosidade dispersa foi observada. Desta forma, fica comprometida a comparação do desempenho entre os processos FSW e MIG, uma vez que os resultados obtidos para o processo MIG não necessariamente refletem o que as melhores condições de soldagem poderiam oferecer.

A falha dos corpos de prova origina-se na interface entre o núcleo da solda e o metal base, sendo que a ruptura ocorre sobre o cordão de solda. Na soldagem pelo processo MIG, observou-se a ruptura ao lado do cordão de solda, coincidente com a região de menor dureza verificada através dos ensaios de microdureza Vickers.

As chapas soldadas pelo processo MIG, embora sujeitadas por suportes de fixação, apresentaram distorção residual, fato não observado nas soldas pelo processo FSW.

Verificou-se através da análise dos perfis de dureza, que a extensão da região onde se verifica perda de dureza é menor nas soldas obtidas pelo processo FSW do que no processo MIG. A variação ao longo do perfil da solda não é acentuada, não ficando evidente diferenças na dureza entre as diferentes zonas microestruturais resultantes do processo. Quanto à queda de dureza, observa-se que no processo MIG a diminuição nos valores de dureza é maior, em média, do que aquela observada na soldagem pelo processo FSW.

## 8 Referências Bibliográficas

ABAL. Centro de Informações Automotivo e de Transportes. **ALUAUTO**. n.10, 2006. Disponível em: <<http://www.abal.org.br>>. Acesso em: 27 out. 2006.

ABAL. **Relatório de Sustentabilidade da Indústria do Alumínio**. São Paulo, 2005. 56 p. Disponível em: <<http://www.abal.org.br>>. Acesso em: 01 maio 2006.

ASTM E 190. **Standard Test Method for Guided Bend Test for Ductility of Welds**. American Society for Testing and Materials, 1997.

ASTM E 8M. **Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials**. American Society for Testing and Materials, 2000.

BOZ, M.; KURT, A.. **The influence of pin geometry on bonding and mechanical properties in friction stir welding process**. Materials and Design, 25 (2004) 343-347.

BUFFA, G. et al. **Design of the friction stir welding tool using the continuum based FEM model**. Materials Science And Engineering, A419 (2006) 381-388.

CAPELARI, Tiago V.. **Friction Stir Welding de placas de alumínio 5652**. In: Trabalhos de conclusão do curso de engenharia mecânica - 2002. Porto Alegre : Escola de Engenharia da UFRGS/Biblioteca, 2003.

CEDERQVIST, L.; REYNOLDS, A. P.. **Factors Affecting the Properties of Friction Stir Welded Aluminum Lap Joints**. Welding Journal: Welding Research Supplement, vol. 80, nº12, 2001, p. 281s - 287s.

CHAO, Y. J.; WANG, Y.; MILLER, K. W.. **Effect of friction stir welding on dynamic properties of AA2024-T3 and AA7075-T7351**. Welding Journal: Welding Research Supplement, vol. 80, nº8, 2001, p. 196s - 200s.

COLLIGAN, K. **Material flow behavior during friction stir welding of Aluminum**. Welding Journal: Welding Research Supplement, vol. 78, nº7, 1999, p. 229s - 237s.



COOK, G. E. et al. **Controlling robotic friction stir welding.** Welding Journal, vol. 82, n°6, 2003, p. 28-34.

DAVIS, J. R.. ASM International (Ed.). **ASM Handbook V.2: Properties and Selection - Nonferrous alloys and Special-Purpose materials.** 10th ed., Metals Park, Ohio, 1990.

DAVIS, J. R.. ASM International (Ed.). **ASM Specialty Handbook: Aluminum and Aluminum alloys.** Ohio, 2002.

EAA. European Aluminium Association. **Aluminium Automotive Manual.** Disponível em: <<http://www.eaa.net/aam>>. Acesso em: 05 maio 2006.

GEREMIA, Wagner. **Estudo preliminar sobre a influência da geometria das ferramentas e parâmetros de operação no processo de soldagem por friction stir welding em alumínio 5052.** In: Trabalhos de conclusão do curso de engenharia mecânica - 2003/1. Porto Alegre : Escola de Engenharia da UFRGS/Biblioteca, 2003.

GUERRA, M. et al. **Flow patterns during friction stir welding.** Materials Characterization, 49 (2003) 95-101.

JOHNSON, R.. **Forces in friction stir welding of aluminium alloys.** In: 3° International Symposium on Friction Stir Welding, 2001, Kobe, Japão.

LARSSON, H.; KARLSSON, L.; SVENSSON, L.. **Friction Stir Welding of AA 5083 and AA6082 aluminium.** Svetsaren, n°2, p. 6 -10, 2000.

LIENERT, T. J. et al. **Friction Stir Welding Studies on Mild Steel.** Welding Journal: Welding Research Supplement, vol. 82, n°1, 2003, p. 1s - 9 s.

LIU, H. J. et al. **Wear characteristics of a WC-Co tool in friction stir welding of AC4A + 30 vol%SiCp composite.** International Journal of Machine Tools and Manufacture, 45 (2005) 1635-1639.

MISHRA, R. S.; MA, Z. Y.. **Friction stir welding and processing**. Materials Science And Engineering, R50 (2005) 1-78.

MORTENSEN, K. S. et al. **Mechanical properties and microstructures of inertia-friction-welded 416 stainless steel**. Welding Journal: Welding Research Supplement, vol. 80, n°11, 2001, p. 268s - 273s.

OERTEL, G. et al. **Effect of thermal cycling on friction stir welds of 2195 Aluminum alloy**. Welding Journal: Welding Research Supplement, vol. 80, n°3, 2001, p. 71s - 79s.

OLSON. D. L.. ASM International (Ed.). **ASM Handbook V.6: Welding, Brazing and Soldering**. 8th ed., Metals Park, Ohio, 1977.

OOSTERKAMP, A.; OOSTERKAMP, L. D.; NORDEIDE, A.. **"Kissing Bond" phenomena in solid-state welds of Aluminium alloys**. Welding Journal: Welding Research Supplement, vol. 83, n°8, 2004, p. 225s - 231s.

PEEL, M. et al. **Microstructure, mechanical properties and residual stresses as a function of welding speed in aluminium AA5083 friction stir welds**. Acta Materialia, 51 (2003) 4791-4801.

PRAVEEN, P.; YARLAGADDA, P.k.d.v.. **Meeting challenges in welding of aluminum alloys through pulse gas metal arc welding**. Journal Of Materials Processing Technology, 164-165 (2005) 1106-1112.

RENCK, Tiago. **Estudo das propriedades mecânicas de juntas soldadas em alta velocidade pelo processo de fricção e mistura mecânica**. 2004. 84 f. Dissertação (Mestrado) - PPGEM, UFRGS, Porto Alegre, 2005.

ROLDO, Liane. **Caracterização microestrutural e de propriedades mecânicas da liga de Alumínio AA6056 T4 e T6 soldada pelo processo de fricção e mistura mecânica**. 2004. 96 f. Tese (Doutorado) – PPGEM, UFRGS, Porto Alegre, 2004.

SAUNDERS, H. L.. Aluminum Association (Ed.). **Welding Aluminum: Theory and Practice**. Washington Dc, 1989.

SONG, M.; KOVACEVIC, R.. **Thermal modeling of friction stir welding in a moving coordinate system and its validation.** International Journal of Machine Tools and Manufacture, 43 (2003) 605-615.

SQUILLACE, A. et al. **A comparison between FSW and TIG welding techniques: modifications of microstructure and pitting corrosion resistance in AA 2024-T3 butt joints.** Journal of Materials Processing Technology, 152 (2004) 97-105.

THOMAS, W. M. et al. **Friction stir butt welding.** International Patent no. 9125978.8. Dez. 1991. Disponível em: <<http://www.patent.gov.uk/>>. Acesso em: 10 abr. 2006.

THOMAS, W. M. et al. **Friction stir welding tool and method.** UK Publication Number GB 2306366. Out. 1996. Disponível em: <<http://www.patent.gov.uk/>>. Acesso em: 10 abr. 2006.

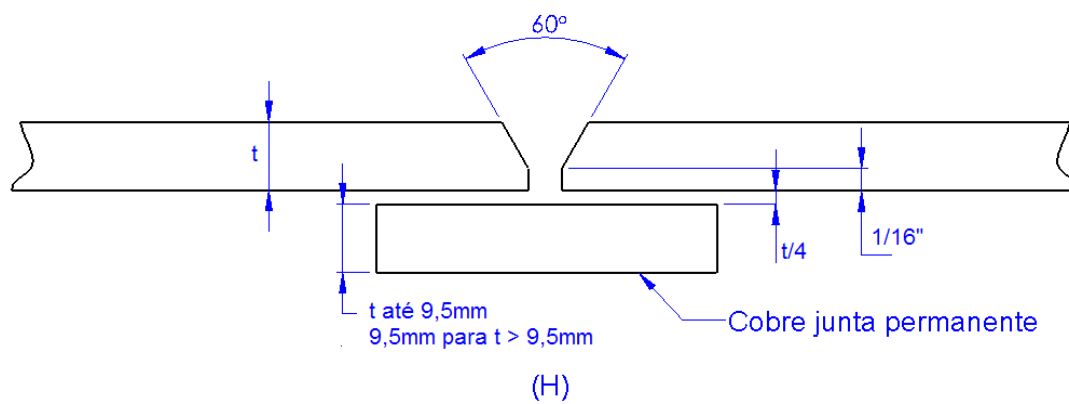
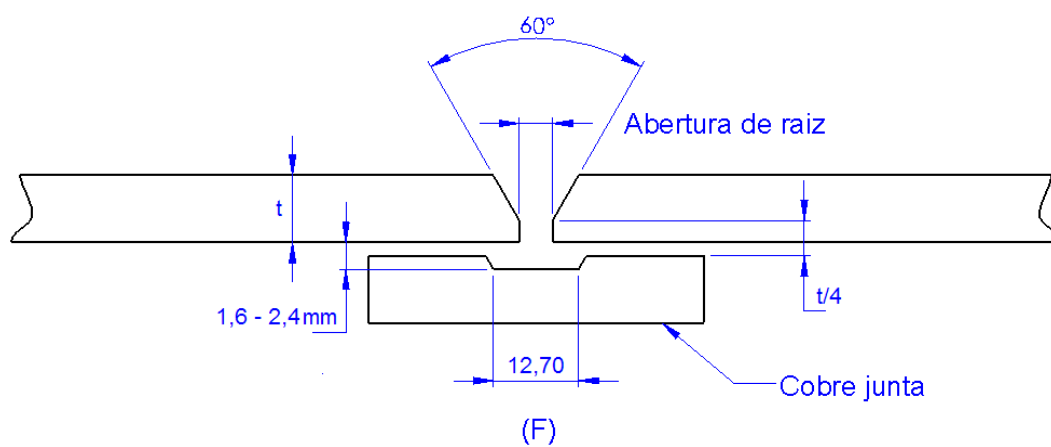
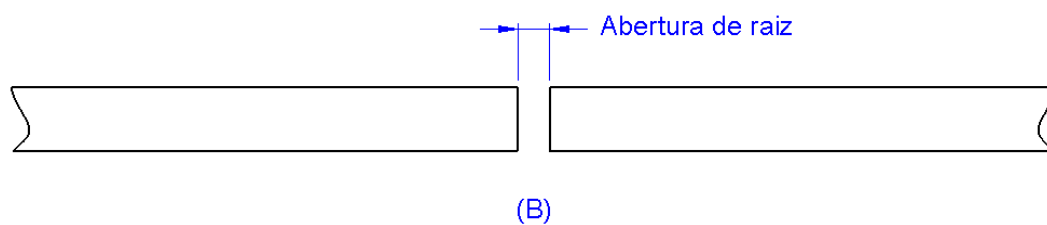
THOMAS, W. M.; NICHOLAS, E. D.. **Friction stir welding for the transportation industries.** Materials And Design, 18 (1997) 269-273.

TWI Ltd. – The Welding Institute. **Friction Stir Welding at TWI.** Disponível em: <<http://www.twi.co.uk/>>. Acesso em: 27 abr. 2006.

ZÄH, M.; EIREINER, D.. **Estudo propõe uso de uma fresadora na soldagem por agitação e fricção.** Corte e Conformação de Metais, n°12, 2005, p. 56-63.

ZHAO, Y.; LIN, S.; QU, F.. **The influence of pin geometry on bonding and mechanical properties in friction stir weld 2014 Al alloy.** Materials Letters, 59 (2005) 2948-2952.

## 9 Anexo A – Juntas para soldagem MIG



## 10 Anexo B – Desenho técnico das ferramentas

