

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Escola de Engenharia
Programa de Pós Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais
PPGEM

A INFLUÊNCIA DO PERFIL DA FERRAMENTA E VELOCIDADE DE ROTAÇÃO NA
SOLDA PONTO POR FRICÇÃO E MISTURA MECÂNICA DAS LIGAS AA 6181-T4 E
MG-AZ31

Fabiano Dornelles Ramos

Tese para obtenção do Título de Doutor
em Engenharia

Porto Alegre
2008

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Escola de Engenharia
Programa de Pós Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais
PPGEM

**A INFLUÊNCIA DO PERFIL DA FERRAMENTA E VELOCIDADE DE ROTAÇÃO
NA SOLDA PONTO POR FRICÇÃO E MISTURA MECÂNICA DAS LIGAS AA 6181-
T4 E MG-AZ31**

FABIANO DORNELLES RAMOS
Engenheiro Metalúrgico

Trabalho realizado no Departamento de Metalurgia da Escola de Engenharia da UFRGS, dentro do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais-PPGEM, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Doutor em Engenharia

Área de Concentração: Ciências dos Materiais

Porto Alegre
2008

Esta tese foi julgada aprovada para a obtenção do título de Doutor em Engenharia, área de concentração Ciências dos Materiais, e aprovada em sua forma final pelo Orientador, pela Banca Examinadora e pelo Programa de Pós-Graduação.

Orientador: Prof. Dr Telmo Roberto Strohaecker
Co-Orientador: Dr Jorge Fernandez dos Santos

Banca Examinadora:

Prof. Dr. José Antônio Esmério Mazzaferro/ PROMEC-UFRGS

Prof. Dr. Arnaldo Ruben Gonzáles/ PROMEC-UFRGS

Dr. Cesar Afonso Weis Olea/ Vallourec & Mannesmann Tubes

Prof. Dr. Carlos Perez Bergmann
Coordenador do PPGEM

Porto Alegre
2008

Sumário

1	INTRODUÇÃO	1
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1	Alumínio	3
2.1.1	Ligas de Alumínio	3
2.2	Magnésio	4
2.3	Solda por Fricção e Mistura Mecânica (SFMM)	6
2.4	Solda ponto por fricção e mistura mecânica (SPFMM)	9
2.4.1	Processos Alternativos de Solda Ponto por Fricção	14
2.5	Regiões da solda	17
2.5.1	Regiões em SPFMM	17
2.5.2	Formação da zona de mistura	18
2.6	Fusão local transiente	19
2.7	Fluxo de material	20
2.8	Influência da ferramenta	25
2.8.1	Penetração da ferramenta em SPFMM para ligas de alumínio	26
2.9	Parâmetros de soldagem	28
3	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	30
3.1	Diagrama de fluxo do trabalho	30
3.2	Material	30
3.3	Processo SPFMM	31
3.3.1	Pórtico de Soldagem	31
3.3.2	Projeto da ferramenta	32
3.4	Parâmetros de soldagem	34
3.5	Monitoramento de Força e Torque	35
3.6	Caracterização metalográfica	35
3.6.1	Material de base	35
3.6.2	Soldas AA6181, Mg AZ31 e amostras de fluxo de material	36
3.7	Caracterização mecânica	36
3.7.1	Testes de cisalhamento	36
3.7.2	Caracterização da falha	37
3.7.3	Perfis de microdureza	37
3.8	Soldagem das amostras de caracterização de fluxo de material	37
3.9	Análise de Dados	38
3.9.1	Como funciona a ANOVA	38

4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	41
4.1	Soldas AA6181 e Mg AZ31	41
4.2	Monitoramento de Força e Torque	44
4.2.1	AA 6181-T4	44
4.2.2	Mg AZ31	54
4.3	Caracterização metalográfica	61
4.3.1	AA 6181	61
4.3.2	Mg AZ31	74
4.3.3	Fluxo de material	80
4.4	Caracterização Mecânica	89
4.4.1	Ensaio de tração do material de base	89
4.4.2	Ensaio de cisalhamento	92
4.4.3	Perfis de microdureza	101
4.5	Análise de dados	103
4.5.1	AA 6181	103
4.5.2	Mg AZ31	106
5	CONCLUSÕES	110
	Anexos	118

Lista de Figuras

Figura 1- Desenho esquemático mostrando as diferentes séries de ligas de alumínio.	4
Figura 2-Representação esquemática do processo de SFMM. As setas indicam os três principais parâmetros: Força axial (FA), velocidade de rotação (VR) e velocidade de soldagem (VS).	7
Figura 3-Principais etapas do SPFMM. a) Penetração da ferramenta rotativa até o contato do ombro com a chapa superior, b) Plastificação localizada e mistura de material e c) Remoção da ferramenta e consolidação da junta.	10
Figura 4- Princípio do SPFMM com translação da ferramenta. (a) Penetração da ferramenta rotativa até o contato do ombro com a chapa superior, (b) Plastificação localizada e mistura de material, (c) Translação da ferramenta ao longo da linha de solda, gerando uma área soldada maior e (d) Remoção da ferramenta deixando o furo remanescente.	11
Figura 5-Aspecto da SPFMM após a remoção do pino em um processo sem translação da ferramenta. Pode ser observada a impressão do ombro (flecha preta) e a impressão do pino (flecha vermelha).	12
Figura 6- Aspecto da SPFMM após a remoção do pino em um processo com translação da ferramenta.	12
Figura 7- Diagrama esquemático de um processo (a) controlado por carga e (b) controlado por deslocamento.	14
Figura 8- O movimento “squircle” mostrando o aumento na área soldada [20].	15
Figura 9- Comparação na área da solda: (a) SPFMM normal (b) SPFMM com movimento squircle.	15
Figura 10- Movimento da ferramenta e vista de topo do processo Swing SPFMM.	16
Figura 11- Octaspot™ mostrando o caminho percorrido pela ferramenta.	17
Figura 12- Macrografia da seção transversal de uma chapa soldada por SPFMM sem translação da ferramenta de uma liga Al 7075-T6.	18
Figura 13- Flutuações nos picos de temperatura durante SPFMM com velocidades de rotação 2500 e 3000 RPM e 4s de tempo de indentação[17].	20
Figura 14- Diferentes estágios do processo de SPFMM. a) Contato inicial entre as chapas dissimilares Al 5754/Al 6111. b) Formação de uma zona recristalizada logo na região de contato com a base inferior do pino. c) Camada de alumínio 5754 (chapa superior) formada a frente da ponta do pino.	21
Figura 15- Material da chapa de Al 5754 preso no ressalto da ferramenta que está dentro da chapa inferior de Al 2024.	22
Figura 16- Movimento do material marcador durante o processo. a) Imagem sobreposta de ambos os lados da solda. b) Movimento das partículas marcadoras para cima na chapa superior.	23
Figura 17- Desenho esquemático mostrando os padrões de fluxo no processo de SPFMM.	23
Figura 18- SPFMM entre AA 5754 (chapa superior) e AA 6111 (chapa inferior): (a) movimento de uma camada aderida de AA 5754 na direção da chapa inferior junto com o pino, conforme esse penetra na chapa inferior. (2500 RPM, 2,5 mm/s de taxa de penetração e 2s de tempo de indentação); (b) mistura dissimilar produzida utilizando um pino facetado (2500 RPM, 2,5 mm/s de taxa de penetração e 0,78 s de tempo de indentação) [28].	24
Figura 19- Perfil da Zona de mistura na solda dissimilar AA 5754/AA 6111 por SPFMM: (a) sem tempo de mistura e (b) com tempo de mistura de 2s. A velocidade de rotação foi de 2500 RPM e a taxa de penetração foi de 2,5 mm/s. []	25
Figura 20- Sistema integrado composto por ombro retrátil (a) e três pinos (b) [35].	26
Figura 21- Efeito da velocidade de rotação na força axial para a liga AA 5754-H12 [37].	28
Figura 22- Pórtico de soldagem.	31
Figura 23- Aspecto geral das ferramentas utilizadas.	32
Figura 24- Diferentes ferramentas utilizadas para as soldas e suas denominações.	32
Figura 25- Imagem mostrando os três tipos de ombro. a) côncavo (Cc), b) duas ranhuras (2Sc) e c) três ranhuras (3Sc).	33
Figura 26- Imagem mostrando os pinos projetados para o processo. a) Cilíndrico, b) três superfícies planas, c) três superfícies planas mais um degrau e d) três superfícies planas mais três protuberâncias.	34
Figura 27- Desenho esquemático mostrando a vista superior da montagem das chapas para realização das soldas ponto.	35
Figura 28- Amostra de cisalhamento montada na máquina antes de ser testada.	37
Figura 29- Imagem do aspecto visual das soldas ponto para a liga AA 6181-T4. As colunas apresentam soldas com mesmas velocidades de rotação (a ferramenta utilizada está indicada na própria imagem).	41

Figura 30- Imagem do aspecto visual das soldas ponto para a liga Mg AZ31. As colunas apresentam soldas com mesmas velocidades de rotação (a ferramenta utilizada está indicada na própria imagem).	42
Figura 31-Imagem mostrando duas impressões deixadas pela ferramenta onde foi usada a mesma ferramenta (F1) e parâmetros e variando a velocidade de rotação. a) 2000 RPM e b) 3000 RPM. Material AA 6181.	43
Figura 32- Imagem mostrando a formação excessiva de rebarba (região destacada em vermelho) em uma solda da liga AA 6181. Amostra F3 2000 RPM.	43
Figura 33- Amostras soldadas de magnésio, onde a) se observa um bom acabamento superficial e b) formação excessiva de rebarba.	44
Figura 34- Pico de força obtido para amostra F1-1000RPM onde podem ser observados os picos F1 e F2 e ainda o platô do tempo de mistura.	45
Figura 35- Gráfico mostrando os valores obtidos de torque e força (picos F1 e F2) para o processo de SPFMM.	46
Figura 36- Diagrama mostrando a relação entre os pinos e respectivas velocidades de rotação, se fixando ombro côncavo da ferramenta.	47
Figura 37- Diagrama mostrando a relação entre os pinos e respectivas velocidades de rotação, se fixando ombro com duas ranhuras da ferramenta.	48
Figura 38- Diagrama mostrando a relação entre os pinos e respectivas velocidades de rotação, se fixando ombro com três ranhuras da ferramenta.	48
Figura 39- Relação entre o torque produzido de acordo com as diferentes ferramentas utilizadas.	49
Figura 40- Imagem mostrando a relação entre diferentes ombros e respectivas velocidades de rotação, se fixando o pino A.	50
Figura 41- Imagem mostrando a relação entre diferentes ombros e respectivas velocidades de rotação, se fixando o pino B.	50
Figura 42- Imagem mostrando a relação entre diferentes ombros e respectivas velocidades de rotação, se fixando o pino C.	51
Figura 43- Imagem mostrando a relação entre diferentes ombros e respectivas velocidades de rotação, se fixando o pino D.	51
Figura 44- Relação entre o torque produzido de acordo com as diferentes ferramentas utilizadas.	52
Figura 45-Curva torque vs tempo de processo para a amostra F7- soldada com 1000 RPM.	53
Figura 46- Valores obtidos de CL e suas respectivas energias alcançadas durante o processo.	53
Figura 47- Evolução da força durante o processo de soldagem por SPFMM do magnésio AZ31 onde se observa os picos F1 e F2 e o tempo de mistura (dwell time). Amostra F5-3000 RPM.	55
Figura 48- Valores máximos de força e torque obtidos na soldagem de magnésio.	56
Figura 49- Diagrama mostrando a relação entre os pinos e respectivas velocidades de rotação, se fixando ombro côncavo da ferramenta.	56
Figura 50- Diagrama mostrando a relação entre os pinos e respectivas velocidades de rotação, se fixando ombro com duas ranhuras da ferramenta.	57
Figura 51- Diagrama mostrando a relação entre os pinos e respectivas velocidades de rotação, se fixando ombro com três ranhuras da ferramenta.	57
Figura 52- Relação entre o torque produzido de acordo com as diferentes ferramentas utilizadas.	58
Figura 53- Diagrama mostrando a relação entre diferentes ombros e respectivas velocidades de rotação, se fixando o pino A.	59
Figura 54- Diagrama mostrando a relação entre diferentes ombros e respectivas velocidades de rotação, se fixando o pino B.	59
Figura 55- Diagrama mostrando a relação entre diferentes ombros e respectivas velocidades de rotação, se fixando o pino C.	60
Figura 56- Diagrama mostrando a relação entre diferentes ombros e respectivas velocidades de rotação, se fixando o pino D.	60
Figura 57- Relação entre o torque produzido de acordo com as diferentes ferramentas utilizadas.	61
Figura 58- Macrografia das amostras soldadas nas três velocidades de rotação com a ferramenta F1.	62
Figura 59- Macrografia das amostras soldadas nas três velocidades de rotação com a ferramenta F2.	62
Figura 60- Macrografia das amostras soldadas nas três velocidades de rotação com a ferramenta F3.	63
Figura 61- Macrografia das amostras soldadas nas três velocidades de rotação com a ferramenta F4.	63
Figura 62-Macrografia das amostras soldadas nas três velocidades de rotação com a ferramenta F5.	64
Figura 63- Macrografia das amostras soldadas nas três velocidades de rotação com a ferramenta F6.	64
Figura 64- Macrografia das amostras soldadas nas três velocidades de rotação com a ferramenta F7.	65
Figura 65- Macrografia das amostras soldadas nas três velocidades de rotação com a ferramenta F8.	65
Figura 66-Macrografia das amostras soldadas nas três velocidades de rotação com a ferramenta F9.	66
Figura 67-Macrografia das amostras soldadas nas três velocidades de rotação com a ferramenta F10.	66

Figura 68- Macrografia das amostras soldadas nas três velocidades de rotação com a ferramenta F11.	67
Figura 69- Macrografia das amostras soldadas nas três velocidades de rotação com a ferramenta F12.	67
Figura 70- Valores obtidos de CL para amostras soldadas de alumínio. Os valores foram medidos nas amostras de metalografia. As linhas vermelhas separam os diferentes ombros utilizados.	68
Figura 71- Imagem mostrando as diferentes zonas da solda observadas em microscopia ótica. Ferramenta F7, 1000 RPM.	69
Figura 72- A imagem mostra corpos de prova soldados com a mesma ferramenta (F11), porém com velocidades de rotação diferentes, onde pode ser percebida a diferença de espessuras de CL. a) 1000 RPM e b) 3000 RPM.	70
Figura 73- Imagem mostrando a micrografia da região 1, onde pode ser observada a ZM do material. a) Menor aumento e b) maior aumento. Amostra F4-2000 RPM.	71
Figura 74- Imagem mostrando a microestrutura da região 2, onde se observa os grãos deformados da ZTMA, a interface entre as chapas inferior e superior e ainda uma parte da ZM. Amostra F4-2000 RPM.	71
Figura 75- Mesma imagem anterior com efeito de negativo para realçar o contraste dos grãos. Amostra F4-2000 RPM.	72
Figura 76- Micrografias do material de base (MB) mostrando partículas de segunda fase alongadas, com orientação preferencial e grãos poligonais. Amostra F4-2000 RPM.	73
Figura 77- Micrografia da zona de mistura (ZM). Nesta figura se observa os grãos recristalizados e as partículas de segunda fase quebradas e de menor tamanho, sem orientação preferencial. Amostra F4-2000 RPM.	73
Figura 78- Imagem da região 3, mostrando a presença das três zonas da solda. Acredita-se que existe a presença de uma ZTA entre o material base e a ZTMA. Amostra F4-2000.	74
Figura 79- A figura mostra as zonas formadas na soldagem das amostras de Mg e as regiões de análise de micrografia (1, 2 e 3). A elipse maior mostra a região de grande deformação na chapa superior enquanto a elipse menor mostra a formação de rebarba. Amostra F8, 3000 RPM.	75
Figura 80- Micrografia do material de base, mostrando os grãos equiaxiais e partículas de segunda fase dispersas. Amostra F8, 3000 RPM.	75
Figura 81- Micrografia do material de base em maior aumento, onde se percebe além das partículas de segunda fase dispersas, a formação de maclas de deformação. Amostra F8, 3000 RPM.	76
Figura 82- Micrografia da região 1. Amostra F8, 3000 RPM.	77
Figura 83- Micrografia da região 1 em maior aumento. Amostra F8, 3000 RPM.	77
Figura 84- Micrografia da região 2, onde se percebe a grande diferença no tamanho de grão. Amostra F8, 3000 RPM.	78
Figura 85- Micrografia da região 3(elipse vermelha). Amostra F8, 3000 RPM.	79
Figura 86- Micrografia da região 3 em maior aumento, mostrando a interface. Amostra F8, 3000 RPM.	79
Figura 87- Macrografia mostrando amostra soldada para visualização do fluxo de material. Ferramenta F9.	80
Figura 88- Detalhe mostrando a direção do fluxo de material no processo. As setas indicam para onde se dá o transporte de material.	81
Figura 89- Detalhe mostrando o fluxo de material na região abaixo do pino da ferramenta, onde se observa grande concentração de cobre não misturado ao alumínio. Ferramenta F9.	81
Figura 90- Macrografia mostrando amostra soldada para visualização do fluxo de material. Ferramenta F10.	82
Figura 91- Detalhe mostrando a direção do fluxo de material no processo. As setas indicam para onde se dá o transporte de material. Ferramenta F10.	82
Figura 92- Detalhe em maior aumento mostrando o fluxo em ambos os lados da metalografia. Ferramenta F10.	83
Figura 93- Macrografia mostrando amostra soldada para visualização do fluxo de material. Ferramenta F11.	83
Figura 94- Detalhe mostrando a direção do fluxo de material no processo. As setas indicam para onde se dá o transporte de material. Ferramenta F11.	84
Figura 95- Detalhe das zonas em detalhe mostrando o fluxo em ambos os lados da metalografia. Ferramenta F11.	84
Figura 96- Macrografia mostrando amostra soldada para visualização do fluxo de material. Ferramenta F12.	85
Figura 97- Detalhe mostrando a direção do fluxo de material no processo. As setas indicam para onde se dá o transporte de material. Ferramenta F12.	85

Figura 98- Imagens das zonas em detalhe mostrando o fluxo em ambos os lados da metalografia. Ferramenta F12.	86
Figura 99- Imagens das zonas em detalhe mostrando o fluxo em ambos os lados da metalografia. Ferramenta F12.	86
Figura 100- Imagem mostrando a região abaixo do pino onde se observa uma maior quantidade de cobre. Ferramenta F12.	87
Figura 101- Imagem mostrando a semelhança no perfil da ZM na região abaixo do pino para uma amostra soldada com a ferramenta F2 (pino B).	88
Figura 102- Amostras de aço soldadas por Kyffin et al [50] mostrando a formação do gancho (b) e sem a formação do gancho (a).	89
Figura 103- Curva tensão vs deformação para a liga AA6181 nos sentidos longitudinal (a) e transversal (b) ao sentido de laminação.	90
Figura 104- Curva tensão vs deformação para a liga Mg AZ31 nos sentidos longitudinal (a) e transversal (b) ao sentido de laminação.	91
Figura 105- Resultados do teste de cisalhamento realizado nas amostras de alumínio de acordo com a ferramenta utilizada.	92
Figura 106- Duas amostras ensaiadas mostrando (a) uma pequena CL (amostra F1-1000RPM) e (b) uma grande CL (amostra F8-3000).	93
Figura 107- Modos de falha a) Cisalhamento, b) arrancamento e c) arrancamento inclusive da chapa inferior.	94
Figura 108- Resultados do teste de cisalhamento realizado nas amostras de magnésio de acordo com a ferramenta utilizada.	95
Figura 109- Amostras de ensaio de cisalhamento mostrando os dois tipos de falhas obtidos . a) Falha por cisalhamento. Amostra F6-2500, b) Falha por arrancamento. Amostra F6-3000.	95
Figura 110- Imagem mostrando o aspecto geral dos dois tipos de falha obtidos nas amostras soldadas com a ferramenta F6. a) Falha por cisalhamento obtido com a velocidade de 1000 RPM e b) Falha por arrancamento obtido com a velocidade de 3000 RPM.	96
Figura 111- Fractografia mostrando os micromecanismos de falha da fratura A, onde se observa que foi por coalescimento de microcavidades.	97
Figura 112- Fractografia mostrando os micromecanismos de falha da fratura B, onde se observa que foi por coalescimento de microcavidades.	97
Figura 113- Curvas obtidas no ensaio de cisalhamento das amostras de Al soldadas com a ferramenta F6, velocidades de 1000 e 3000 RPM.	98
Figura 114- Imagem mostrando o aspecto geral dos dois tipos de falha obtidos nas amostras soldadas com a ferramenta F6. a) Pull out obtido com a velocidade de 2500 RPM e b) Shear failure obtido com a velocidade de 3000 RPM.	99
Figura 115- Imagem mostrando os micromecanismos de falha da fratura C.	99
Figura 116- Imagem mostrando os micromecanismos de falha da fratura D.	100
Figura 117- Curvas obtidas no ensaio de cisalhamento das amostras de Mg soldadas com a ferramenta F11, velocidades de 2500 e 3000 RPM.	101
Figura 118- Perfil de microdureza realizado na amostra F7-1000 RPM. Onde se observa a presença das quatro diferentes zonas.	102
Figura 119- Perfil de microdureza realizado na amostra F6-3000 RPM. Onde se observa as diferentes zonas formadas.	103
Figura 120- Comparação de médias múltiplas dos pinos utilizados para o ombro Cc.	104
Figura 121- Comparação de médias múltiplas dos pinos utilizados para o ombro 2Sc.	105
Figura 122- Comparação de médias múltiplas dos pinos utilizados para o ombro 3Sc.	106
Figura 123- Comparação de médias múltiplas dos pinos utilizados para o ombro côncavo.	107
Figura 124- Comparação de médias múltiplas dos pinos utilizados para o ombro 2Sc.	108
Figura 125- Comparação de médias múltiplas dos pinos utilizados para o ombro 3Sc.	109

Lista de Tabelas

Tabela 1- Típicas propriedades físicas, mecânicas e químicas do alumínio.	3
Tabela 2- Composição química típica da liga AA 6181.	4
Tabela 3- Principais propriedades químicas, físicas e mecânicas do magnésio.	5
Tabela 4- Propriedades típicas de tração e composição química de ligas de magnésio.	6
Tabela 5- Melhora na força máxima cisalhante em comparação à ferramenta convencional de SPFMM, e a solda ponto por resistência.	26
Tabela 6- Análise de composição química para o material AA 6181 (% em peso).	30
Tabela 7- Análise de composição química para o material AZ31 (% em peso).	31
Tabela 8- Matriz de parâmetros para as amostras de alumínio e magnésio.	34
Tabela 9- Valores obtidos da curva para as direções longitudinal e transversal ao sentido de laminação.	90
Tabela 10- Valores obtidos da curva para as direções longitudinal e transversal ao sentido de laminação.	92
Tabela 11- Resultados obtidos para o ombro côncavo das amostras de Al.	104
Tabela 12- Resultados obtidos para o ombro com duas espirais das amostras de Al.	105
Tabela 13- Resultados obtidos para o ombro com três espirais das amostras de Al.	106
Tabela 14- Resultados obtidos para o ombro côncavo das amostras de Mg.	107
Tabela 15- Resultados obtidos para o ombro 2Sc das amostras de Mg.	107
Tabela 16- Resultados obtidos para o ombro 3Sc das amostras de Mg.	108

Resumo

Soldagem a ponto por fricção é um processo que ocorre no estado sólido com alta eficiência energética, baixo custo de produção além de ser um processo ambientalmente limpo. Estes processos por fricção são uma alternativa a processos convencionais tais como solda ponto por resistência, rebitemento e “clinchng”. A Solda Ponto por Fricção e Mistura Mecânica, ou SPFMM, é uma excelente alternativa aos processos tradicionais de união, desde que é eficiente na união de ligas de alta resistência da indústria automotiva e aeroespacial como alumínio e magnésio, que são materiais que apresentam dificuldades na soldagem com a utilização de métodos convencionais através da fusão dos materiais envolvidos. A ausência de uma fase de fusão nesses processos elimina defeitos como porosidades, bolhas, rebaixos, inclusões e microestruturas indesejáveis, que freqüentemente aparecem na solda e zonas afetadas pelo calor em processos de soldagem por fusão. Estes materiais são interessantes, especialmente na indústria automotiva, devido a sua excelente relação de resistência/peso, onde a técnica já é utilizada apresentando redução drástica de custos de operação e aumento a resistência das juntas formadas.

O processo de SPFMM consiste em uma ferramenta, que é uma combinação de um pino e um ombro que em rotação, penetra nas chapas formando uma junta sobreposta. Esta ferramenta rotativa ao penetrar utiliza elevadas cargas axiais. O contato do pino com regiões adjacentes e do ombro com a superfície superior da junta geram calor de fricção. Este calor de fricção promove a plastificação do material da junta, que ao mesmo tempo é misturado pelo pino consolidando, assim, a formação da junta. Após a remoção da ferramenta e fim do processo, um furo remanescente permanece no centro da solda.

O objetivo do presente trabalho é avaliar a influência da utilização de diferentes perfis de ferramenta e diferentes velocidades de rotação sobre a soldagem e o comportamento mecânico de ligas de alumínio e magnésio soldadas pelo processo de SPFMM. Também buscou-se observar a influência da ferramenta sobre a variação do fluxo de material. As soldas foram realizadas com duas diferentes velocidades de rotação para o magnésio e três diferentes velocidades de rotação para as ligas de alumínio. E um total de doze combinações de quatro diferentes perfis de pino e três diferentes perfis de ombro foram utilizadas para a produção destas soldas. A taxa de penetração, profundidade de penetração e tempo de mistura foram mantidos constantes. A caracterização metalúrgica foi feita através de microscopia ótica, lupa e eletrônica de varredura. A caracterização mecânica das juntas foi feita através de ensaios de cisalhamento, perfis de microdureza e monitoramento

de torque e força durante o processo de soldagem. Ainda foram realizadas análises do fluxo de material durante o processo.

Foi possível observar uma tendência de aumentar a resistência mecânica da junta com a utilização de velocidades de rotação mais elevadas em ambos os materiais. A utilização de ferramentas com diferentes perfis apresentou diferenças representativas, porém com muita dependência da combinação de velocidade de rotação, pino e ombro utilizados.

Abstract

Friction based spot welding are processes that occurs in solid state with high energy efficiency, low costs and environmentally friend. These processes provide an alternative to conventional spot joining methods as resistance spot welding, riveting and clinching. Friction Stir Spot Welding is a good alternative to traditional spot joining processes since it is able to join high strength aerospace and automotive alloys like aluminum and magnesium, which are difficult to join by conventional fusion. The absence of melting during welding avoids defects like porosity, inclusions, and undesired microstructures, that are frequently observed in fusion weldings. These materials are interesting especially regarding the automotive industry, because of its mechanical strength/weight relationship, where the technique is already in use with drastic reducing of operating costs and increasing in joint mechanical strength.

The SPFMM process consists in a rotating tool comprised of a pin and a shoulder that penetrates into two overlap positioned sheets. The tool displaces and plasticize the adjacent material and provide the joint consolidation leaving a keyhole after tool removal and the process is finished.

The aim of this work was to evaluate the influence of different tool profiles on the metallurgical and mechanical behavior of friction stir spot welded joints of aluminum and magnesium alloys. The joints were performed with two different rotation speeds for the magnesium AZ31 samples and with three different rotation speeds for the aluminum AA6181-T4 samples and twelve combinations of three different shoulders and four different pins. The plunge rate, plunge depth and dwell time were kept constant. The metallurgical characterization was performed using optical and scanning electron microscopy. The mechanical performance of the joints was evaluated in terms of microhardness profiles and shear test. It was possible to observe a tendency to increase the mechanical strength with the usage of higher rotational speeds for both materials. The usage of different tool profiles also presented different mechanical performance, but it's strongly influenced by the combination of rotational speed, pin and shoulder.

1 Introdução

Atualmente, a busca por redução de peso em estruturas de componentes leva a utilização de materiais versáteis que alcancem uma boa relação resistência mecânica/peso. Deste modo, uma busca incessante é realizada para obtenção de melhorias nos processos de união de ligas automotivas e aeroespaciais, como o alumínio e magnésio. A utilização destes materiais já é amplamente pesquisada, sendo que sua utilização, devido ao baixo peso, implica em um menor consumo de combustível resultando em menores danos ao meio ambiente e produtos mais viáveis economicamente.

O processo de soldagem por fricção e mistura mecânica, SFMM, foi criado e patenteado pelo The Welding Institute (TWI) em 1991, e consiste, basicamente, em uma ferramenta rotativa composta por um pino e um ombro, que penetram na junta a ser soldada. Esta ferramenta rotativa ao penetrar nas chapas sobrepostas utiliza elevadas cargas axiais e o contato do pino e do ombro com regiões adjacentes e a superfície superior da junta geram calor de fricção. Este calor de fricção promove a plastificação do material da junta, que ao mesmo tempo é misturado pelo pino consolidando, assim, a formação da junta. Como uma derivação deste processo, foram criados e patenteados pelo GKSS- Forschungszentrum (Geesthacht, Alemanha) dois novos processos chamados Friction Spot Welding, ou solda ponto por fricção e mistura mecânica com preenchimento do furo remanescente (SPFMMPFR), e também o Solda ponto por fricção e mistura mecânica (SPFMM), ou solda ponto por fricção e mistura mecânica, sem preenchimento do furo remanescente. A utilização destes processos de união de juntas solda ponto por fricção tem se mostrado uma excelente alternativa a processos tradicionais, tais como solda ponto por resistência, rebitemento e prensagem (co-deformação).

O presente trabalho se restringiu a utilização do SPFMM, que é um processo que ocorre no estado sólido. É também conhecido como uma SFMM “curta”, pois as ferramentas utilizadas em ambos os processos são semelhantes, com a diferença do tipo de movimento que ocorre durante a consolidação da junta. Enquanto no SFMM a ferramenta rotativa ainda tem os movimentos de penetração, translação e remoção, no SPFMM a ferramenta rotativa apenas penetra e retrai. É considerado um processo limpo, não produz resíduo nem fumaça, não afetando o meio ambiente, é um processo de fácil automação e de baixo custo energético.

Existem variações para o mesmo processo, que basicamente variam a forma da ferramenta, ou mesmo o modo como a ferramenta faz a mistura de material. Neste trabalho foi

utilizada a variação do processo patenteada pela Mazda, que já está produzindo em escala o equipamento para desenvolvimento da solda, processo denominado por eles Friction Spot Joint.

Amostras de ligas de magnésio AZ31 e alumínio 6181- T4 foram utilizadas para serem realizadas as soldas. Estas ligas foram escolhidas por serem ligas empregadas na indústria automotiva, que utiliza o processo de solda ponto por resistência (SPR) em larga escala. Buscando, deste modo, a viabilidade de troca de um processo por outro. Foram desenvolvidos perfis especiais para as ferramentas para se observar a influência da geometria das mesmas sobre o desempenho final da solda. Três tipos de ombro e quatro tipos de pinos foram desenvolvidos, totalizando 12 diferentes perfis de ferramentas para serem utilizadas como variável junto com a velocidade de rotação. A taxa de penetração e a profundidade de penetração foram mantidas constantes. Soldas foram realizadas também em amostras para ser verificado o fluxo de material [1,- 3,].

As técnicas de análise envolveram microscopia ótica, microscopia eletrônica de varredura, ensaios de dureza, perfis de microdureza, ensaios de tração de metal base e ensaios de cisalhamento nas juntas soldadas.

Para facilitar a compreensão do trabalho, este será dividido em diferentes capítulos. O capítulo 2 apresenta uma revisão bibliográfica sobre soldas por fricção e mistura mecânica e soldas ponto por fricção. O capítulo 3 destaca o procedimento experimental e técnicas de análise empregadas no desenvolvimento do trabalho. O capítulo 4 descreve os resultados obtidos através das técnicas de análise e também a discussão a respeito dos mesmos. As conclusões estão no capítulo 5 enquanto o capítulo 6 apresenta a bibliografia utilizada.

2 Revisão Bibliográfica

2.1 Alumínio

O alumínio pode ser considerado um dos mais versáteis, economicamente viável e atrativo material metálico para uma ampla faixa de aplicações. A mais importante característica deste material é, indubitavelmente, a sua baixa densidade. A densidade do alumínio é $2,7 \text{ g/cm}^3$, aproximadamente $1/3$ da do aço. Apresenta uma boa resistência a corrosão em diversos meios corrosivos e apresenta boas condutividades térmica e elétrica. A aplicação de alumínio e suas ligas é estendida desde componentes eletrônicos e químicos até grandes estruturas como fuselagens de avião e carrocerias de automóveis, especialmente devido a sua excelente combinação de propriedades mecânicas aliada a baixa densidade e boa resistência a corrosão. A resistência a corrosão é uma importante propriedade das ligas de alumínio onde o oxigênio atmosférico combinado com os átomos da superfície do material formam uma camada óxida protetora que inibe o progresso da corrosão para o interior do material. O alumínio pode ser facilmente extrudado, laminado, fundido e usinado. Desta forma, disponibilizados produtos extrudados tais como barras, tubos e perfis especiais, e produtos laminados tais como folhas, chapas e placas. A Tabela 1 apresenta propriedades físicas, químicas e mecânicas do alumínio [4, 5]

Tabela 1- Típicas propriedades físicas, mecânicas e químicas do alumínio.

Densidade (g/cm^3)	2,698
Estrutura Cristalina	CFC
Ponto de Fusão ($^{\circ}\text{C}$)	660
Coefficiente de Poisson ν	0,34
Condutividade Térmica (W/m.K)	237
Coef. de Expansão Térmica ($\mu\text{m.}^{\circ}\text{C}$)	23
Módulo de Elasticidade E (GPa)	62
Módulo de Cisalhamento G (GPa)	25

2.1.1 Ligas de Alumínio

As ligas de alumínio são divididas em duas grandes categorias: Ligas fundidas e ligas trabalhadas. As ligas de alumínio são divididas em diferentes séries, os materiais da mesma

série apresentam em comum o principal elemento de liga utilizado. A Figura 1 mostra as diferentes séries de ligas trabalhadas de alumínio.

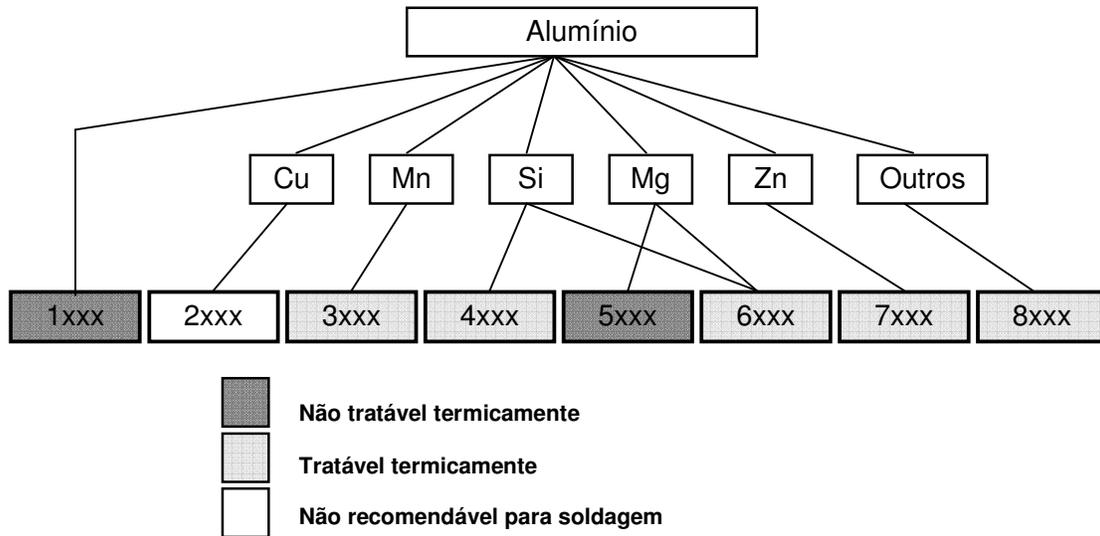


Figura 1- Desenho esquemático mostrando as diferentes séries de ligas de alumínio.

Liga AA 6181:

O alumínio AA6181 pertence a série 6xxx a qual tem silício e magnésio como principais elementos de liga, ver Tabela 2. Esta liga tem alta resistência a corrosão e condutividade elétrica assim como relativamente uma boa soldabilidade. Na condição de tratado termicamente e envelhecido, apresenta precipitados Mg_2Si como partícula endurecedora. Esta classe é usualmente submetida ao tratamento T4 (solubilização e envelhecimento natural) e utilizado principalmente em aplicações automotivas.

Tabela 2- Composição química típica da liga AA 6181.

Elemento de liga	Si	Fe	Mn	Mg	Cu	Cr	Ti	Zn	Al
AA 6181 T4	0.8 – 1.2	<0.45	<0.15	0.6 – 1.0	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	96.5 – 98.6

2.2 Magnésio

O magnésio é o quarto metal mais abundante presente na crosta terrestre (2,9%). O metal, de estrutura cristalina hexagonal compacta, o que influencia em suas propriedades mecânicas devido ao fato ter menos planos de deslizamento. O metal tem tido um papel

importante em aplicações onde se busca a redução de peso de estruturas. Aliando sua baixa densidade e boa resistência mecânica, tem alto coeficiente de expansão térmica ($28 \cdot 10^{-6} K^{-1}$ na faixa de 20 – 300°C). À temperatura ambiente uma oxidação leve se forma cobrindo a superfície com um filme fino, que, progressivamente se torna carbonato e sulfato com a ação do CO_2 e SO_2 presentes na atmosfera. A Tabela 3 mostra as propriedades gerais químicas, físicas e mecânicas do magnésio.

Tabela 3- Principais propriedades químicas, físicas e mecânicas do magnésio.

Raio atômico (Å)	1.6
Volume atômico (cm^3/mol)	13.97
Estrutura Cristalina	HCP
Ponto de Fusão (°C)	649
Calor Específico ($J/Kg \cdot ^\circ K$)	1045
Densidade (g/cm^3)	1,74
Módulo de Elasticidade E (GPa)	45
Coef. de Poisson (ν)	0.35
Condutividade Térmica ($W/m \cdot ^\circ K$)	154.5
Coef. de Expansão Térmica ($(\mu m)/^\circ C$)	26.1

O magnésio e suas ligas são utilizados em uma ampla variedade de aplicações estruturais incluindo automotivas, comerciais, equipamento aeroespacial e indústria de construção naval. As ligas de magnésio são valiosas para aplicações aeroespaciais devido a sua baixa densidade e, ainda, por apresentarem boa resistência e rigidez em ambas, altas e baixas temperaturas. Em termos de propriedades mecânicas, diferenças são observadas dependendo de o material ter sido obtido através de processos de fundição, ou se foi obtido por processos de trabalho mecânico (as propriedades mecânicas de ligas trabalhadas são similares as propriedades de ligas de média resistência de alumínio). A Tabela 4 apresenta propriedades típicas de tração de diferentes ligas de magnésio sob diferentes condições de tratamento térmico.

Tabela 4- Propriedades típicas de tração e composição química de ligas de magnésio.

Liga (ASTM)	Composição química (%)	Condição de tratamento térmico	Tensão de Escoamento (MPa)	Tensão máxima (MPa)	A (%)
AZ31B	3 Al-1 Zn-0,2 Mn	F	200	265	15
AZ80A	8 Al-0,2 Zn-0,2 Mn	T5	250	345	6
AZ63A	6 Al-3 Zn-0,2 Mn	T6	120	230	5

As ligas de magnésio têm resistência a razões de densidades que são comparáveis àquelas de outros metais estruturais comuns. As propriedades mecânicas de ligas trabalhadas dependem da orientação dos corpos de prova testados em relação ao padrão de fluxo desenvolvido durante o trabalho mecânico. O trabalho a quente de magnésio durante o processamento tende a produzir uma orientação preferencial para o plano basal no produto trabalhado, resultando em uma anisotropia das propriedades. Em produtos laminados, a resistência mecânica é, geralmente, maior na direção transversal, sendo o alongamento também maior nesta direção [6,7,8].

2.3 Solda por Fricção e Mistura Mecânica (SFMM)

A solda por fricção e mistura mecânica, ou “friction stir welding” (SFMM), é um processo criado e patenteado pelo TWI- Inglaterra. O processo consiste em uma ferramenta rotativa composta por um pino e um ombro. Esta ferramenta penetra na junta a ser soldada, plastificando material, se movimentando na direção da linha de solda e consolidando a junta. As partes soldadas têm que ser fixas sobre uma chapa de sustentação, que deve ter rigidez suficiente para suportar as altas cargas exigidas no processo e para prevenir a separação da junta. O calor é gerado pelo atrito entre a ferramenta, principalmente o ombro, com as peças a ser soldadas. Este calor ocasiona o amolecimento do material sem atingir o ponto de fusão, permitindo o movimento da ferramenta ao longo do cordão de solda. O material plastificado é transferido da superfície da ferramenta até a base do ombro, onde é forjado pelo contato íntimo entre a superfície inferior do ombro e a superfície superior da chapa soldada. O processo pode ser classificado como um processo em estado sólido com um furo remanescente ao final da solda, que vai sendo preenchido

durante a seqüência da operação. Uma representação esquemática do processo é apresentada na Figura 2.

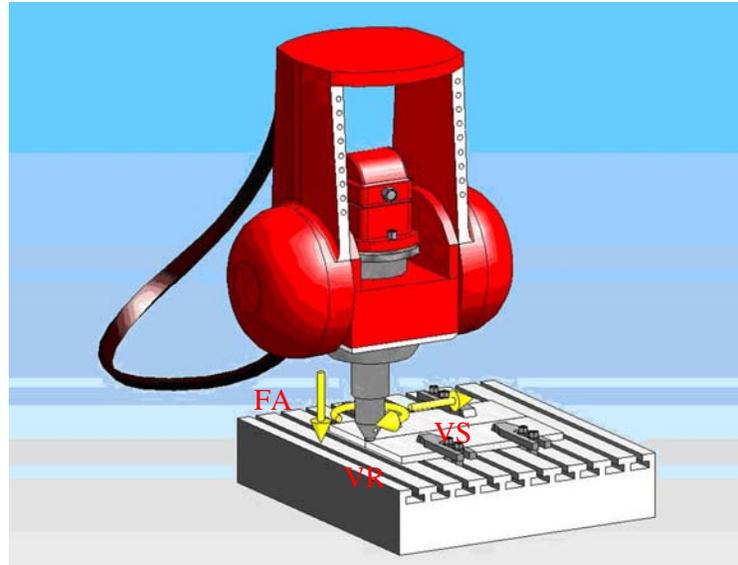


Figura 2-Representação esquemática do processo de SFMM. As setas indicam os três principais parâmetros: Força axial (FA), velocidade de rotação (VR) e velocidade de soldagem (VS).

A solda promove uma região plastificada ao redor da ferramenta devido ao calor de fricção. Existe uma nomenclatura para os dois lados da junta na direção de avanço da ferramenta. Para o lado onde a ferramenta tem o mesmo sentido de rotação e direção de avanço, o lado de avanço ou lado de cisalhamento (As); e o lado onde a ferramenta tem sentido de rotação contrário à direção de avanço da ferramenta é chamado então de lado de recuo ou lado de fluxo (Rs). O lado superior da solda é considerado a região de contato entre as chapas soldadas e o ombro da ferramenta, enquanto o lado de raiz é definido como a região de contato entre as chapas soldadas e a chapa de sustentação do processo.

O processo de SFMM pode ser dividido em 4 etapas principais. Inicialmente, as chapas a serem soldadas são rigidamente posicionadas na posição de soldagem e a ferramenta é (Figura 3a); introduzida através do material (Figura 3b); a ferramenta se movimenta ao longo do cordão de solda, o material plastificado é misturado e forjado na região posterior do pino da ferramenta (Figura 3c); finalmente a ferramenta é removida consolidando a solda no estado sólido (Figura 3d).

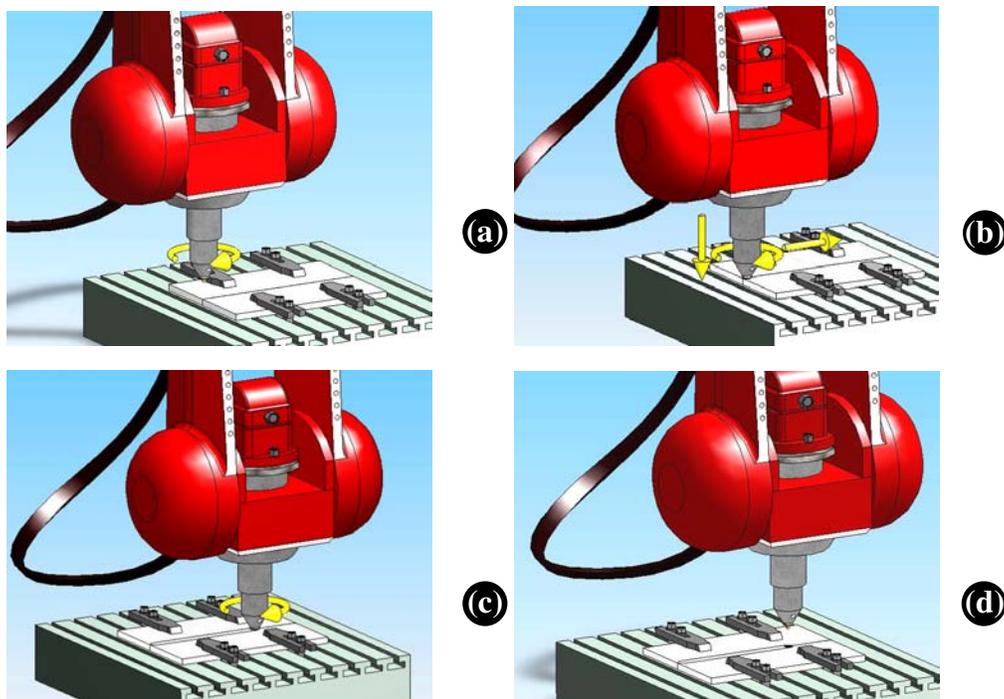


Figure 1- Representação esquemática para SFMM: (a) Rotação da ferramenta, (b) penetração da ferramenta, (c) translação da ferramenta, (d) remoção da ferramenta.

As vantagens do processo resultam do fato que o processo de SFMM (assim como todas soldas por fricção de metais) ocorrem no estado sólido (abaixo do ponto de fusão dos materiais a serem soldados). Os benefícios, portanto, incluem a habilidade de soldar materiais de baixa soldabilidade (em processos de fusão), como por exemplo, séries 2000 e 7000 de ligas de alumínio. SFMM pode ser desenvolvida em equipamentos produzidos para este propósito ou mesmo em modificações de equipamentos já existentes da área de usinagem. O processo também é de fácil automatização. Outras vantagens a serem consideradas podem ser: baixa distorção, até mesmo em soldas longas; excelentes propriedades mecânicas conforme provado por testes de fadiga, tração e dobramento; não há produção de fumaça ou cavacos; baixa porosidade; pode operar em todas posições de soldagem; baixo custo energético; não utiliza metal de adição; ferramenta não consumível; não tem necessidade de proteção por gás inerte para soldar alumínio; não necessita de certificação do soldador; alguma tolerância para imperfeições na preparação da solda, camadas finas de óxido são aceitáveis; sem lixamento, escovação ou jateamento necessários nas produções em massa [9-12].

As limitações do processo de SFMM estão sendo reduzidas através de intenso esforço no campo da pesquisa e desenvolvimento. Entretanto, as principais limitações do processo

são, até o presente: As peças a serem soldadas devem ser rigidamente fixas, uma mesa de sustentação é necessária (exceto quando é utilizada uma ferramenta auto-sustentável ou ferramentas em lados opostos são empregadas); o furo remanescente ao final do cordão de solda.

O campo de aplicação do processo de SFMM está crescendo com os vultosos investimentos na pesquisa nesta área. A SFMM tem sido aplicado em diversos segmentos da indústria para união de juntas em ligas de metais leves, especialmente em alumínio e magnésio, em combinações similares e dissimilares. O alumínio e suas ligas são principalmente utilizados nas indústrias automotivas e aeroespaciais enquanto o campo de aplicação de magnésio tem se concentrado principalmente na indústria automotiva. Nos últimos anos, solda dissimilar entre alumínio e magnésio tem recebido atenção especial das indústrias automotivas e naval [10-12]

Inicialmente, a SFMM foi desenvolvida apenas para materiais relativamente macios, como chumbo, zinco, magnésio e uma gama de ligas de alumínio. Atualmente, cobre, titânio, aços ferríticos de baixo carbono e ligas de aço-cromo de baixo carbono também são soldadas. A soldagem desta faixa de materiais mais duros tem sido possível por manter um potencial aplicável entre a dureza e as propriedades em elevadas temperaturas da ferramenta e do material a ser soldado [10-12].

2.4 Solda ponto por fricção e mistura mecânica (SPFMM)

A solda ponto por fricção e mistura mecânica, ou *friction stir spot welding* (SPFMM), é uma técnica desenvolvida e patenteada pelo GKSS-Forschungszentrum, em Geesthacht na Alemanha [1,2,3]. O processo é uma variação do processo de SFMM, onde as soldas são obtidas pela introdução, e posterior remoção da ferramenta rotativa através das seções soldadas. Existem duas principais variantes do processo: SPFMM com pequena translação da ferramenta; e SPFMM sem translação da ferramenta. Um furo remanescente fica ao final de cada procedimento de soldagem. SPFMM cria uma solda pontual em uma junta sobreposta sem que ocorra a fusão do material. A aparência da solda resultante se assemelha a uma solda ponto por resistência, comumente utilizada para montagem de carrocerias e outras aplicações similares. O processo utilizado até então para montagem de carrocerias, solda ponto por resistência, pode ser problemático para muitas estruturas de metais leves de alta performance, tais como ligas de alumínio e aços avançados de alta resistência. A maior parte das pesquisas e desenvolvimentos em SPFMM tem sido nas ligas de alumínio, devido algumas características como sua deformação em temperaturas

relativamente baixas (abaixo de 550°C), assim como experiências prévias em SFMM [13, 14, 15, 16, 17, 18].

A Figura 3 mostra o princípio do SPFMM para uma variante do processo que não envolve translação da ferramenta, onde é possível se observar que o processo é subdividido em três etapas: penetração, mistura e remoção da ferramenta.

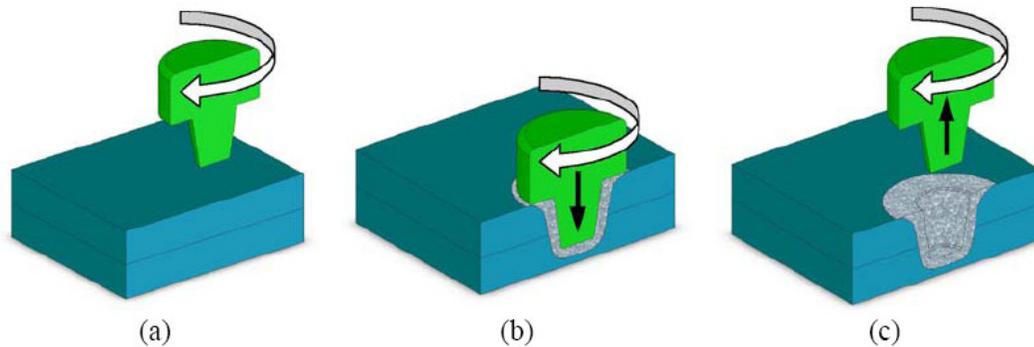


Figura 3-Principais etapas do SPFMM. a) Penetração da ferramenta rotativa até o contato do ombro com a chapa superior, b) Plastificação localizada e mistura de material e c) Remoção da ferramenta e consolidação da junta.

Durante a penetração da ferramenta, a ferramenta é rotacionada até uma pré-determinada velocidade quando, então, é introduzida na superfície de trabalho sem movimento de translação até que o pino esteja totalmente introduzido e que haja contato, ou mesmo a penetração parcial do ombro através das chapas sobrepostas.

O segundo estágio, chamado mistura do material, se dá quando a ferramenta rotativa fica em uma posição vertical fixa durante o tempo de mistura pré-estabelecido, o calor devido à fricção entre pino e material adjacente e o ombro e a região de contato da chapa superior plastifica o material tornando-o mais macio, resultando então no fluxo de material.

No terceiro estágio, chamado remoção da ferramenta, a ferramenta rotativa é removida do interior das peças deixando um furo remanescente.

No processo de SPFMM com translação da ferramenta [1,-15], o processo se assemelha ao SFMM. Pode ser dividido em quatro etapas: penetração, mistura, translação e remoção da ferramenta. Uma das maiores vantagens desta variante é o aumento substancial da área soldada melhorando as propriedades mecânicas da junta. A Figura 4 mostra o princípio do processo com translação da ferramenta apresentando suas quatro etapas.

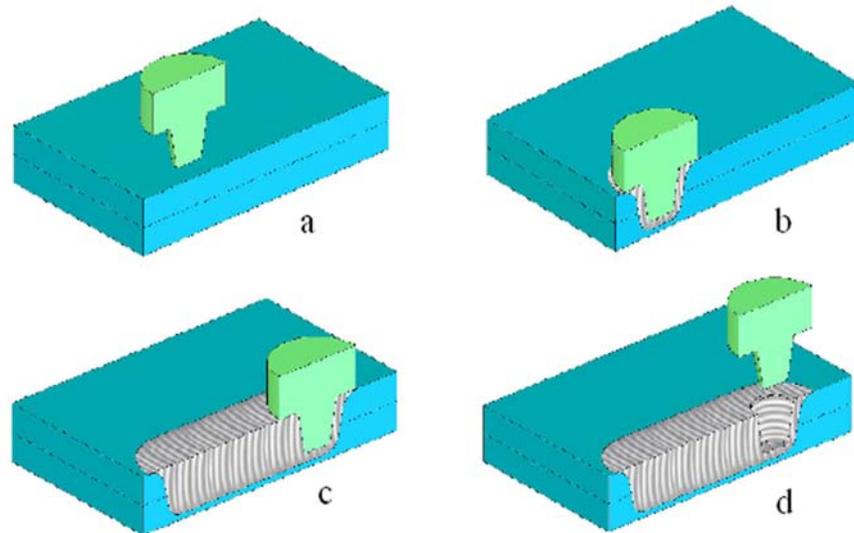


Figura 4- Princípio do SPFMM com translação da ferramenta. (a) Penetração da ferramenta rotativa até o contato do ombro com a chapa superior, (b) Plastificação localizada e mistura de material, (c) Translação da ferramenta ao longo da linha de solda, gerando uma área soldada maior e (d) Remoção da ferramenta deixando o furo remanescente.

No processo com translação da ferramenta, existe uma etapa adicional que é exatamente após a penetração, quando a ferramenta tem um curto movimento de translação, juntamente com o movimento rotativo, o que resulta em material plastificado sendo misturado ao longo da linha de solda. Ao final do processo pode ser observado, após a etapa de remoção da ferramenta, o mesmo furo remanescente no topo da junta soldada, conforme mostrado na Figura 5, para o processo sem translação da ferramenta, mostrando também as impressões deixadas pela ferramenta, e na Figura 6, para o processo com translação da ferramenta.

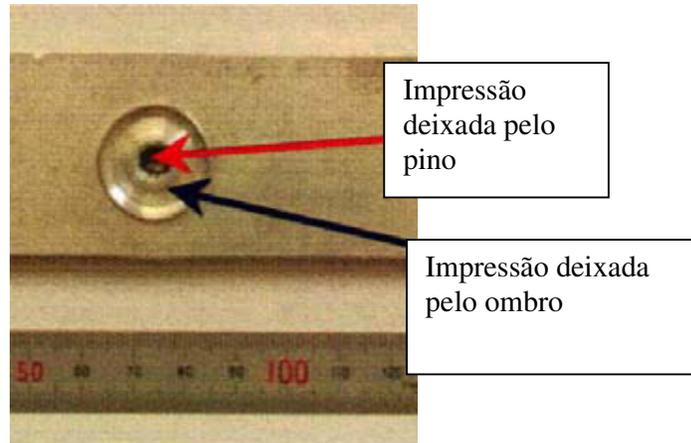


Figura 5-Aspecto da SPFMM após a remoção do pino em um processo sem translação da ferramenta. Pode ser observada a impressão do ombro (flecha preta) e a impressão do pino (flecha vermelha).

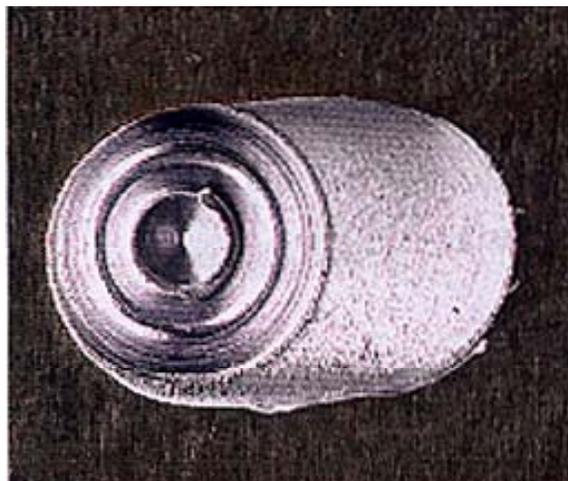


Figura 6- Aspecto da SPFMM após a remoção do pino em um processo com translação da ferramenta.

Os ciclos de SPFMM duram tipicamente menos que 5 segundos e tentativas estão sendo estabelecidas para se produzir soldas de alta velocidade, onde tempos em torno de 2 segundos ou menos podem ser empregados para o processo ser competitivo com a SPR [19]. Desta maneira, Addison [20] reportou soldas satisfatórias com tempos de ciclo inferiores a um segundo.

Segundo Gerlich [16] a densidade de potência é extremamente alta durante o processo de SPFMM, (em torno de 10^{10} W/m^3), as taxas de aquecimento variam de $200 \text{ }^\circ\text{C/s}$ a $400 \text{ }^\circ\text{C/s}$. Comparando ao SFMM, a geração de calor do pino e do ombro fazem diferentes papéis durante o SPFMM, desde que o ombro tenha suficiente contato com a superfície da chapa

superior na operação de solda ponto. De acordo com Gerlich ET AL [21], o ombro da ferramenta apenas começa a desempenhar papel importante, nas operações de juntas onde material expelido do furo gerado pelo pino fica preso entre a superfície da chapa superior e o ombro da ferramenta. A partir deste ponto o ombro propicia calor de fricção e carregamento compressivo, o que facilita a formação da junta entre as duas chapas em contato.

CONTROLE DO PROCESSO

Geralmente, o controle do processo de solda ponto por fricção pode ser dividido em dois modos de operação: Controle de carga e controle de deslocamento [22].

A Figura 7 (a) ilustra esquematicamente uma operação básica de um processo controlado por carga. Neste caso, após a ferramenta começar a rotar, o pino se direciona às chapas a uma taxa controlada pelo aumento da força normal na ferramenta. Após alcançar um nível pré-determinado, a força permanece constante durante o processo. A ferramenta permanece penetrada nas chapas, até que um tempo pré-determinado seja alcançado.

A Figura 7 (b) ilustra esquematicamente a operação básica em um sistema controlado por deslocamento. Após a ferramenta iniciar a rotação, é direcionada às chapas a uma taxa de penetração controlada até que atinja uma profundidade máxima pré-determinada. A força normal, gravada como sinal de retorno, inicia com um relativo baixo valor, quando o pino inicia a penetração nas chapas. Quando o ombro da ferramenta toca a chapa superior, os valores da força aumentam.

Em ambos os casos, controle por carga e controle por deslocamento, o tempo do processo é crítico porque afeta diretamente o tempo de ciclo, assim como a resistência mecânica final da junta [22].

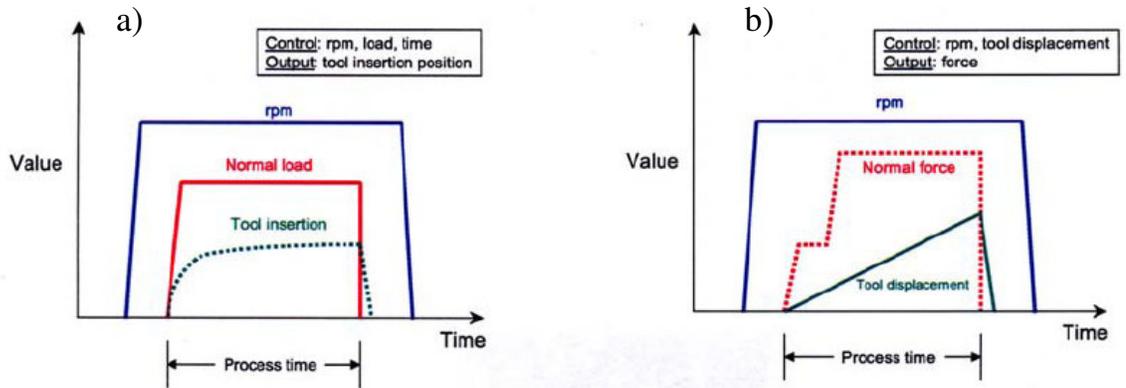


Figura 7- Diagrama esquemático de um processo (a) controlado por carga e (b) controlado por deslocamento.

2.4.1 Processos Alternativos de Solda Ponto por Fricção

Um método de aumentar a resistência das soldas é aumentar a área soldada, ou usando uma ferramenta mais larga ou pelo movimento da ferramenta existente. De acordo com Okamoto [23], experimentos iniciais em SPFMM provaram que um pequeno movimento da ferramenta aumenta a resistência da solda com um mesmo tempo de solda.

Com-Stir™

TWI apresentou no ano de 2006 a solda ponto por fricção com controle de componentes, onde uma ferramenta SFMM é rotacionada e ao redor de seu eixo, e, ao mesmo tempo, realiza um movimento orbital circular. O movimento ficou chamado de “Squircle”, e é mostrado na Figura 8 [20].

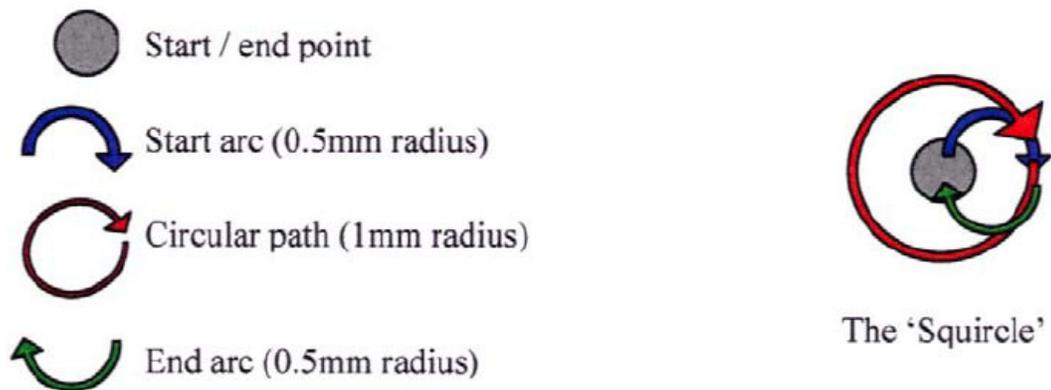


Figura 8- O movimento “squirele” mostrando o aumento na área soldada [20].

Na SPFMM/Squirele, um aumento na área soldada é produzido devido ao movimento combinado da ferramenta, conforme é mostrado na Figura 9. Addison [20] reportou que um aumento de 100% a 300% na força de ruptura nos testes de cisalhamento foi obtido pela utilização de um movimento circular orbital no processo de soldagem(comparando-se a processos convencionais de solda ponto por fricção).

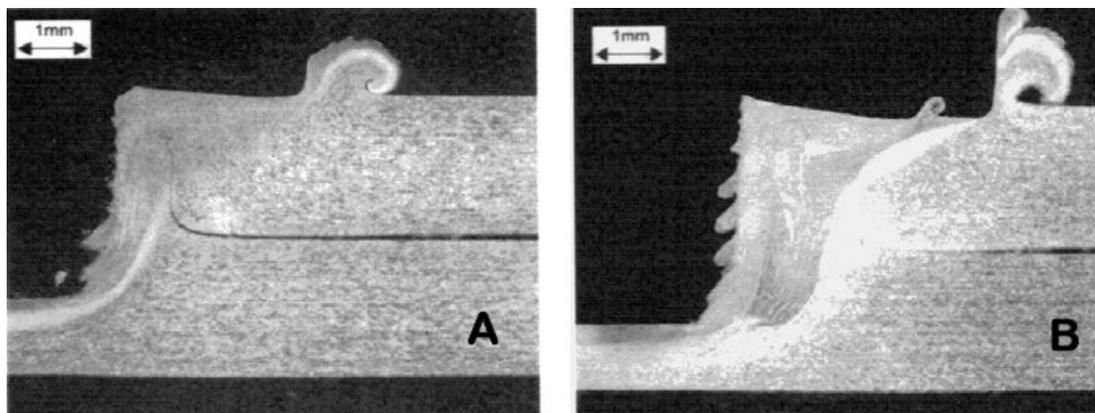


Figura 9- Comparação na área da solda: (a) SPFMM normal (b) SPFMM com movimento squirele.

Swing Friction Stir Spot Welding

Outra variante do processo é a desenvolvida pela Hitachi [24]. A ferramenta é introduzida nas chapas e durante a extração da mesma, é levemente movida de acordo com um ângulo pré-determinado aumentando, deste modo, a área soldada, conforme se observa na Figura 10.

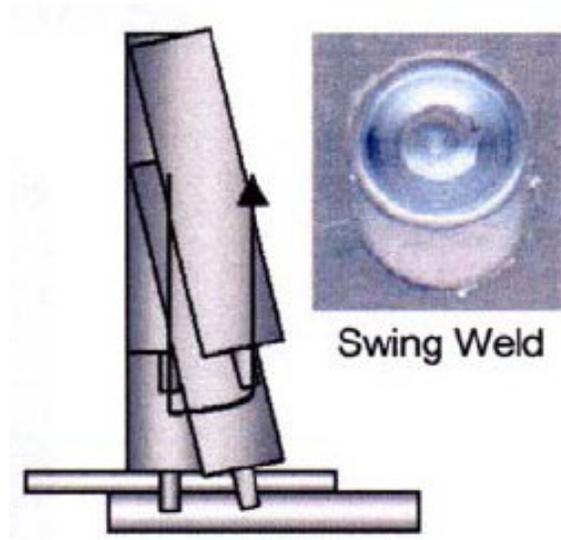


Figura 10- Movimento da ferramenta e vista de topo do processo Swing SPFMM.

Badarinarayan [24] provou que a solda resultante mostrou mais altos valores de cargas de rupturas nos ensaios de cisalhamento e tração em cruz do que aquelas soldas obtidas por processos convencionais.

Octaspot™

No Octaspot™, reportado por Tweedy und Burford [25], o aumento na área da solda ocorre fazendo-se com que a ferramenta descreva um caminho em forma de um octágono, conforme é mostrado na Figura 11.

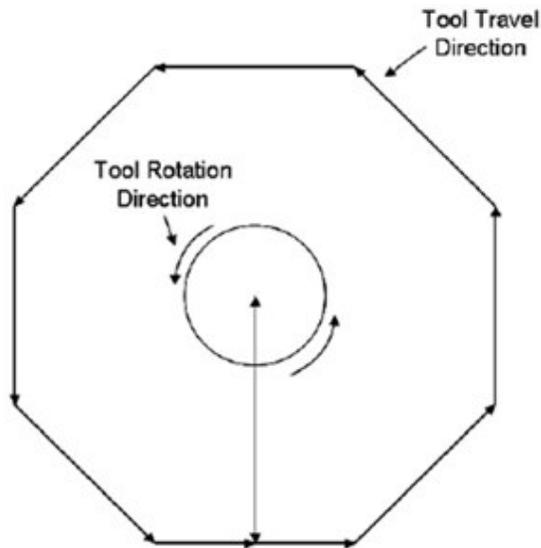


Figura 11- OctaspotTM mostrando o caminho percorrido pela ferramenta.

2.5 Regiões da solda

2.5.1 Regiões em SPFMM

Durante o processo de SPFMM, diferentes regiões são formadas na área soldada. A Figura 12 mostra a macrografia da seção transversal da solda de uma liga Al 7075- T6, onde podem ser observadas três diferentes regiões. A zona de mistura (ZM), acima da linha tracejada; A zona termo-mecanicamente afetada (ZTMA), abaixo da linha tracejada e o material de base [18]. A figura mostra também duas regiões importantes, a região I, que é a região final da interface das chapas soldadas, onde normalmente se iniciam as fraturas. E a região II, que é a região abaixo do pino onde o material fica armazenado para mistura da chapa superior com a chapa inferior. A ZTA não apareceu nesta metalografia porém acredita-se que mesmo que pequena ela estará sempre presente.

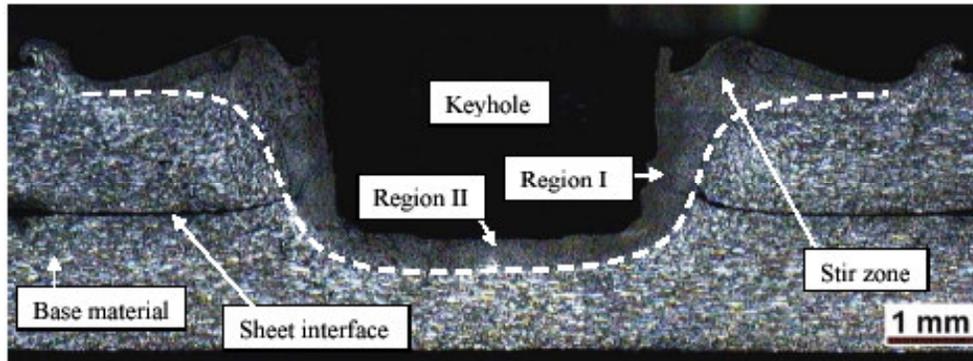


Figura 12- Macrografia da seção transversal de uma chapa soldada por SPFMM sem translação da ferramenta de uma liga Al 7075-T6.

2.5.1.1 Zona de mistura (ZM)

A ZM é a região onde o pino penetra através do material, exatamente no centro da solda. Nesta região podem ser observados efeitos severos de deformação plástica e temperatura na microestrutura. O material é caracterizado por uma microestrutura recristalizada com grãos muito finos. Outra importante característica da ZM é a solubilização e reprecipitação de precipitados originais da matriz.

2.5.1.2 Zona afetada termo-mecanicamente (ZTMA)

A ZTMA é a região que é afetada pela temperatura gerada pelos parâmetros do processo, mas também têm influência pela deformação mecânica, em proporções menores comparando a ZM. Os grãos se apresentam deformados devido ao movimento da ferramenta, mostrando um formato alongado. O crescimento de grão também é possível nesta região de transição entre grãos recristalizados e material de base.

2.5.1.3 Zona termicamente afetada (ZTA)

A zona termicamente afetada é uma região afetada basicamente pela temperatura gerada no processo, onde os grãos e partículas do material podem ser afetadas apenas pelo efeito térmico. Nesta região não é observada a deformação dos grãos ou recristalização como na ZTMA e na ZM.

2.5.2 Formação da zona de mistura

É bem conhecido que a energia requerida para soldar ambas superfícies durante o processo de SFMM vem do calor gerado pelo processo e pela deformação imprimida no mesmo pela

ferramenta. Mas, mesmo atualmente, a formação da ZM não está completamente entendida. Foi sugerido que no processo de SPFMM, quando os parâmetros de soldagem utilizados produzem taxas de aquecimento suficientemente elevadas e picos de temperatura são atingidos, partículas de segunda fase podem fundir durante a operação da solda ponto [16-18]. Gerlich et al [16-18] sugeriu previamente que é formado na ZM uma estrutura dinamicamente recristalizada devido às discordâncias introduzidas previamente no processo; recuperação dinâmica que produz subgrãos tendo contornos de grão de baixo ângulo; recristalização dinâmica contínua envolvendo introdução de discordâncias nos subgrãos, seguido de rotação desta maneira apresentando grãos equiaxiais tendo contornos de alto ângulo.

2.6 Fusão local transiente

Gerlich [16] et al tem uma proposta para a formação da ZM nas ligas de alumínio para a indústria aeronáutica. Taxa de aquecimento, microestrutura e taxa de deformação foram investigados. Pode ser notado que existe uma discrepância entre a os valores calculados e esperados de taxa de deformação, que foi obtido pelos valores de velocidade de rotação da ferramenta pré-ajustados. Esta discrepância é atribuída à fusão local, isto é, o calor gerado durante o processo deve ser limitado para prevenir a fusão local transiente de partículas de segunda fase e o escorregamento da ferramenta (tool slippage). Gerlich [18] propôs que as baixas velocidades de soldagem alcançadas durante a SFMM da liga Al7075 e Al2024 são resultados diretos de fusão localizada e escorregamento da ferramenta na interface ferramenta/amostra. Nas ligas de magnésio foi observado que a fusão local é promovida pela segregação da partícula α - Mg+ Mg₁₇Al₁₂ eutética no produto fundido [18].

Dependendo da velocidade de rotação e tempo de indentação, a linha solidus pode ser alcançada. Gerlich [16] encontrou que para um tempo de indentação de 4 segundos, com uma velocidade de rotação 3000 RPM, por exemplo, temperaturas da ordem de 537°C podem ser obtidas. Com o mesmo tempo de indentação, quando uma menor velocidade de rotação de 1000 RPM e utilizada, a taxa de aquecimento é menor e a temperatura nunca chega além de 475°C durante o processo de SPFMM [16].

De acordo com Gerlich[17], no processo de SPFMM da liga Al7075-T6, a fusão local é determinada pela presença de partículas de segunda fase na chapa do material no estado como recebido e pelo tempo de ciclo, velocidade de rotação, taxa de aquecimento e tempo de indentação empregados durante o processo. É sugerido que a fusão local transiente e o escorregamento da ferramenta ocorrem quando uma combinação de alta taxa de

aquecimento e temperaturas excedendo os 475°C facilitam a fusão de partículas de segunda fase não dissolvidas (fases η , T e S) na chapa de alumínio no estado como recebido [17]. E, também, a fusão local e escorregamento da ferramenta ocorrem sempre na interface entre a periferia da ferramenta e a área adjacente da ZM. Quando ocorre a fusão localizada, a viscosidade do material cai subitamente, deste modo, a taxa de aquecimento também decairá e, por conseqüência, a temperatura também cairá. Após isso, o filme liquefeito irá solidificar, então a viscosidade do material, taxa de aquecimento e temperatura subirão novamente, formando um processo cíclico. Gerlich [17] observou estas contínuas repetições cíclicas do processo que produzem picos de flutuação de temperatura durante o período de indentação nas soldas da liga Al7075-T6, como é mostrado na Figura 13.

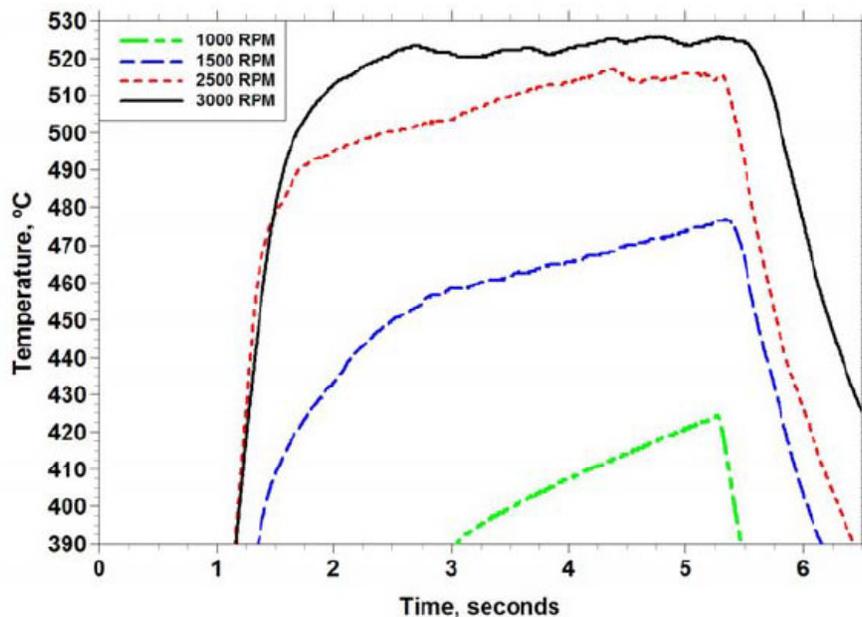


Figura 13- Flutuações nos picos de temperatura durante SPFMM com velocidades de rotação 2500 e 3000 RPM e 4s de tempo de indentação[17].

2.7 Fluxo de material

O fluxo de material durante o processo de SPFMM é bastante difícil de se observar devido a reduzida área soldada. Su et al [26] observou o fluxo em uma solda dissimilar Al5754/Al6111, a diferença nas características dos materiais quando atacados por reagente químico foram utilizadas para avaliação do fluxo de material. Outro material empregado foi a liga 6061- T6/20% vol. Al₂O₃ MMC. As partículas de Al₂O₃ foram usadas para estimar o fluxo de material [26]. O material MMC (Metal Matrix Composite) foi utilizado como a chapa superior do processo e, após a operação de soldagem, a distribuição das

partículas de Al_2O_3 foram observadas sendo encontrado que suas posições eram bastante diferentes daquelas ocupadas na chapa no estado como recebido.

De acordo com Su et al [26], a penetração do pino através da chapa superior forma uma camada dinamicamente recristalizada na região abaixo do furo remanescente. O material da chapa superior é movido para baixo, enquanto material da chapa inferior é movido para cima em movimentos espirais. Além disso, o movimento da ferramenta foi interrompido em diversos estágios do processo para ser avaliado o estado do fluxo de material nos diversos estágios de uma solda dissimilar das ligas de alumínio 5754 e 6111, conforme mostrado na Figura 14.

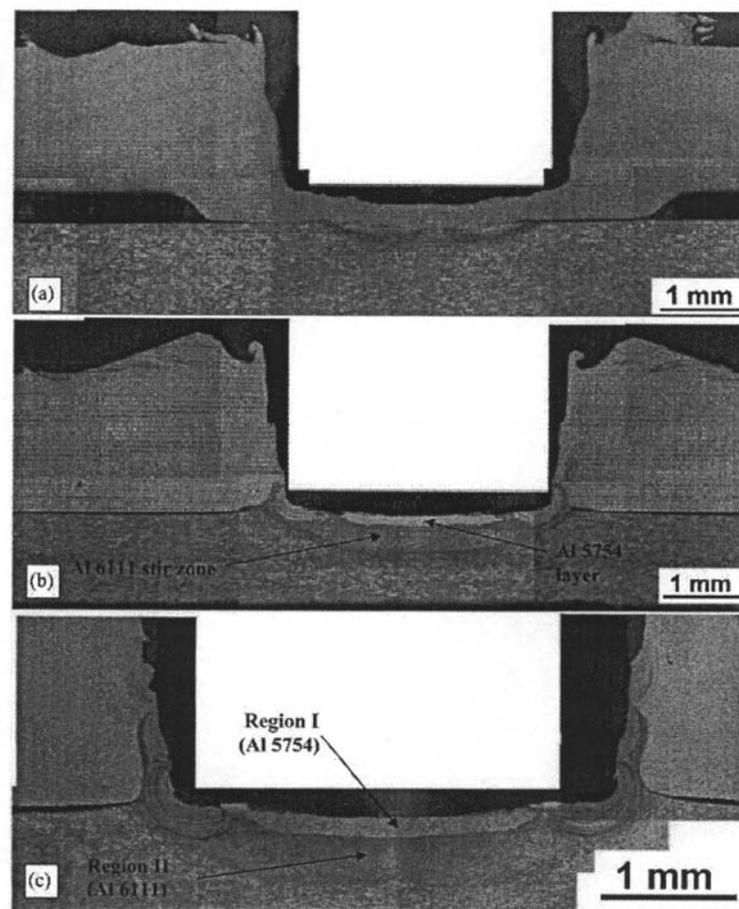


Figura 14- Diferentes estágios do processo de SPFMM. a) Contato inicial entre as chapas dissimilares Al 5754/Al 6111. b) Formação de uma zona recristalizada logo na região de contato com a base inferior do pino. c) Camada de alumínio 5754 (chapa superior) formada a frente da ponta do pino.

O fluxo de material da chapa superior (AA5754) para baixo através da chapa inferior (AA2024) ocorre pela concentração de material abaixo da ponta do pino, ou dos ressaltos,

quando estes são utilizados. A formação de uma camada à frente da ponta da ferramenta ou mesmo o material que fica incrustado próximo aos ressaltos, é que leva o material da chapa superior para dentro da chapa inferior, o que é mostrado na Figura 15.



Figura 15- Material da chapa de Al 5754 preso no ressalto da ferramenta que está dentro da chapa inferior de Al 2024.

De forma a entender o fluxo de material para a chapa superior, um furo de 0,7 mm foi feito na chapa inferior de Al6111 e posteriormente preenchido com limalha produzidas pelo corte por serra de uma chapa de MMC. Desta maneira, o movimento do material para cima e para fora durante o processo de SPFMM pôde ser observado. A Figura 16 (a) mostra a atual posição do material marcador, o movimento aparentemente é em espiral, como mostrado na Figura 16 (b), seguindo os caminhos das partículas de Al_2O_3 [26].

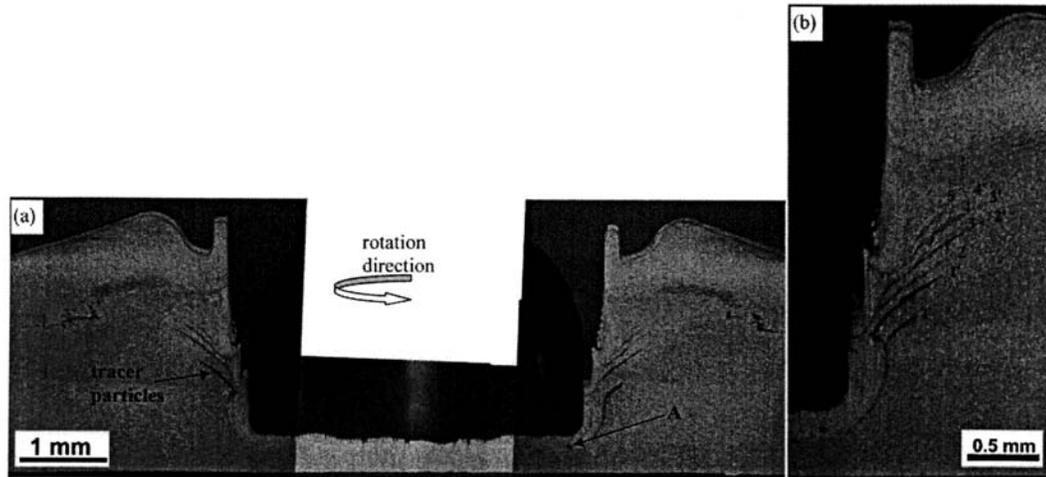


Figura 16- Movimento do material marcador durante o processo. a) Imagem sobreposta de ambos os lados da solda. b) Movimento das partículas marcadoras para cima na chapa superior.

O fluxo de material em SPFMM depende, basicamente, do movimento de penetração da chapa superior na chapa inferior através dos seguintes mecanismos: (i) carregamento de material plastificado da chapa superior para dentro da chapa inferior pela parte frontal do pino; (ii) armazenamento do material da chapa superior na raiz do pino; (iii) formação de uma camada aderida de material da chapa superior na periferia do pino. Desta maneira, dois padrões de fluxo de material podem ser observados: Um padrão interno e um externo, conforme Figura 17.

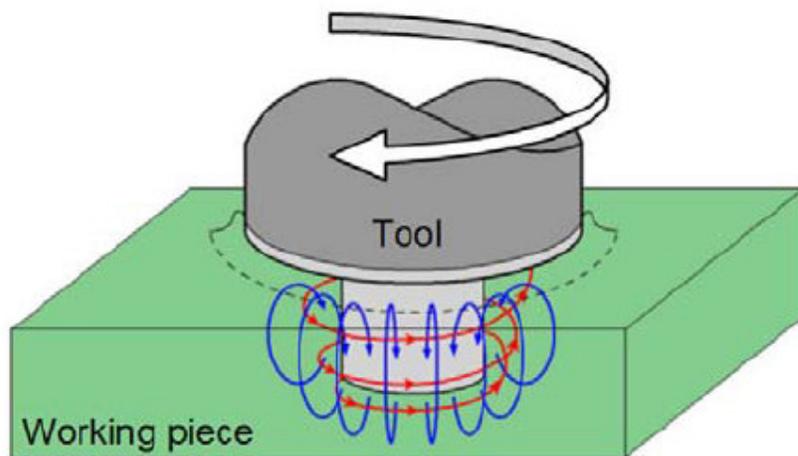
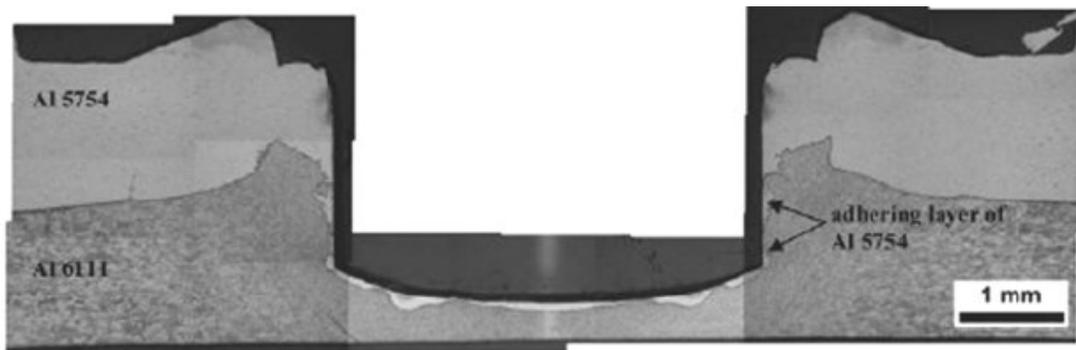


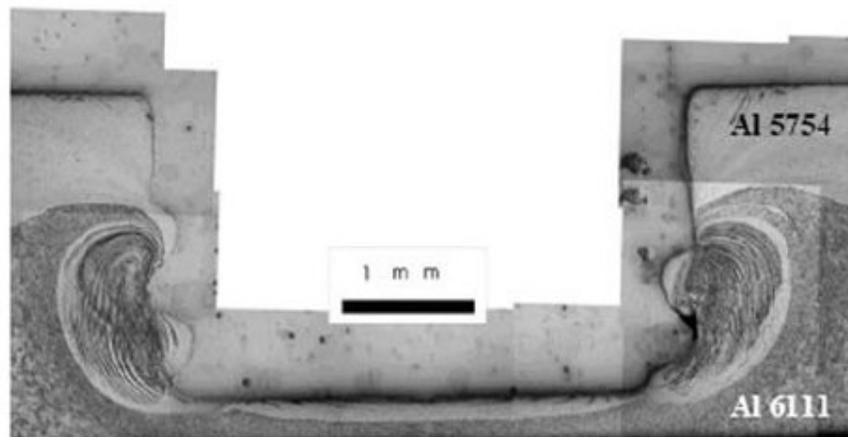
Figura 17- Desenho esquemático mostrando os padrões de fluxo no processo de SPFMM.

O padrão interno é próximo a periferia do pino onde o material da chapa superior é movido para baixo em direção a chapa inferior com o pino rotativo, enquanto o mesmo desce através da chapa inferior. O padrão externo é relacionado ao material que movido da chapa inferior em direção a chapa superior como um fluxo espiral ao redor do pino. Este comportamento foi observado por Su et al [26], mas diversos autores reportaram as mesmas variações nos padrões de fluxo [18-33].

O padrão interno de fluxo é associado à formação da chamada zona de mistura, que é visível especialmente nas soldas dissimilares de SPFMM com pino facetado (Figura 18)



(a)



(b)

Figura 18- SPFMM entre AA 5754 (chapa superior) e AA 6111 (chapa inferior): (a) movimento de uma camada aderida de AA 5754 na direção da chapa inferior junto com o pino, conforme esse penetra na chapa inferior. (2500 RPM, 2,5 mm/s de taxa de penetração e 2s de tempo de indentação); (b) mistura dissimilar produzida utilizando um pino facetado (2500 RPM, 2,5 mm/s de taxa de penetração e 0,78 s de tempo de indentação) [28].

Em seu trabalho, Su et al [26] pesquisou os tipos de fluxo de material com e sem a utilização de um tempo de indentação e pode ser observado que os fluxos se apresentaram bastante similares. Porém, com a utilização deste tempo de indentação ocorreu uma maior mistura de material e a zona de mistura ficou maior, conforme pode ser observado na Figura 19 [28,26].

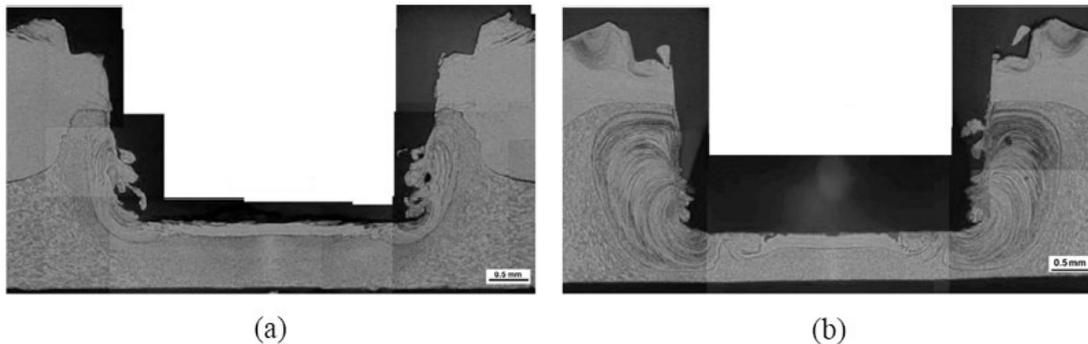


Figura 19- Perfil da Zona de mistura na solda dissimilar AA 5754/AA 6111 por SPFMM: (a) sem tempo de mistura e (b) com tempo de mistura de 2s. A velocidade de rotação foi de 2500 RPM e a taxa de penetração foi de 2,5 mm/s. [34]

2.8 Influência da ferramenta

A ferramenta tem papel fundamental no desempenho da solda. Gerlich et al [21] investigaram os mecanismos de penetração da ferramenta durante o processo de SPFMM. Seu trabalho sugere que o mecanismo de penetração da ferramenta na junta sobreposta ocorre como uma progressão de desgaste.

Valant et al [35], estudou a influência de uma geometria diferente de ferramenta sobre o fluxo de material e propriedades finais da solda. Através da utilização de três pinos igualmente espaçados e um ombro, se observou a deformação plástica mais severa no material. A natureza deste fluxo determina a morfologia final da solda, a microestrutura resultante e a presença ou ausência de defeitos, tais como defeitos volumétricos. As forças que causam este fluxo plástico são funções dos parâmetros de processo, incluindo velocidade de rotação, velocidade de avanço design da ferramenta e ângulo da ferramenta. Uma pequena variação no formato da ferramenta de soldagem pode modificar a morfologia da solda e, às vezes, aumentar a resistência da solda em até cinco vezes quando se compara a um processo que se utiliza a ferramenta convencional de SPFMM [36, 35]. Valant et al

[35] utilizou uma nova geometria em um novo equipamento e, em seu trabalho, ele variou diversos parâmetros para comparar a influência no resultado final da solda e suas propriedades, quando ambas ferramentas foram empregadas. O novo equipamento consiste em uma Fresadora vertical CNC que foi controlada por um PC e com servo-motores novos mais potentes, um novo cabeçote de soldagem e uma nova ferramenta de soldagem que consiste em um sistema integrado de ombro retrátil com três pinos e um cabeçote, conforme mostrado na Figura 20.

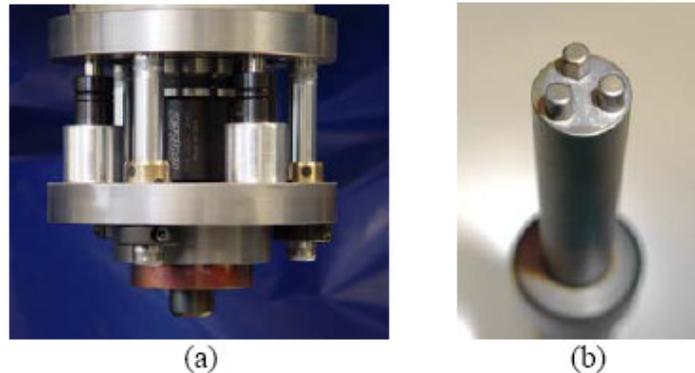


Figura 20- Sistema integrado composto por ombro retrátil (a) e três pinos (b) [35].

A utilização deste novo sistema implica em uma melhora na resistência ao cisalhamento de até cinco vezes em comparação à ferramenta convencional, conforme é mostrado na Tabela 5.

Tabela 5- Melhora na força máxima cisalhante em comparação à ferramenta convencional de SPFMM, e a solda ponto por resistência.

Processo	Força Máxima de Cisalhamento (kN)
Solda ponto por resistência [1]	1.811
SPFMM (ferramenta convencional)	2.017
SPFMM (nova ferramenta)	10.142

2.8.1 Penetração da ferramenta em SPFMM para ligas de alumínio

Enquanto em SFMM a penetração da ferramenta não é considerada de primordial importância para determinação de seus efeitos na solda final, em SPFMM, por causa de sua reduzida ou mesmo ausente linha de solda, a penetração da ferramenta deve ser considerada de maneira a avaliar sua influência nas características finais da solda.

Gerlich et al [21] investigaram a penetração da ferramenta no processo de SPFMM, e foi encontrado que a penetração da ferramenta em juntas sobrepostas é explicada como uma progressiva sucessão de eventos de desgaste, desde o desgaste suave até o desgaste severo

e, então, desgaste por fusão no material a frente da base da ferramenta. Também foi encontrado que o desgaste por fusão pode ocorrer abaixo do ombro da ferramenta, quando for providenciada suficiente penetração na chapa superior durante o processo de SPFMM [21].

Observa-se que os mecanismos de desgaste iniciam-se logo após o contato da ponta do pino com a superfície da chapa superior mesmo com uma leve pressão aplicada. Inicia com desgaste suave, que é caracterizado por cisalhamento plástico e nucleação e propagação de trincas subsuperficiais. Estas trincas podem aflorar à superfície e criar partículas de desgaste. De acordo com Zhang e Alpas [citados por Gerlich [21]], quando uma pressão de 10MPa é alcançada, uma transição de desgaste suave para desgaste severo ocorre. O desgaste dependerá da natureza do contato entre as superfícies, Su [37] testou estes dados em um SAE 52100 deslizando sobre uma superfície de alumínio AA6061 a uma velocidade de 0,4 m/s. Parece que o nível de pressão é excedido durante os primeiros 50 metros na soldagem da liga 6061.

Quando um processo de deformação termicamente ativada promove o amolecimento do material ao redor do pino, o que ocorre durante o desgaste severo, uma fina camada de material base irá recobrir a base do pino.

As forças do processo aumentam gradativamente até um pico nomeado F_1 . Após este pico, as forças decrescem abruptamente, o que sugere que esta perda na força axial ocorre devido ao desgaste por fusão estar se tornando o fenômeno dominante no material plastificado imediatamente a frente do pino da ferramenta. No desgaste por fusão, pequenas camadas (10-20 μ m de espessura) são envolvidas. A viscosidade será reduzida no material plastificado em contato na interface e, este material plastificado de baixa viscosidade será movido para regiões mais frias onde solidificará com a pressão do pino, aumentando a viscosidade do material novamente. Seguindo este aumento de viscosidade, ocorrerá novamente o aumento da temperatura e filmes fundidos se formarão novamente no material plastificado. Ocorre então a perda na força axial quando filmes fundidos lubrificam as interfaces entre pino e material adjacente plastificado [16-21]. As variações das forças axiais com a variação da velocidade de rotação podem ser observadas na Figura 21, onde as setas indicam onde se atingem os picos F_1 em cada velocidade de rotação.

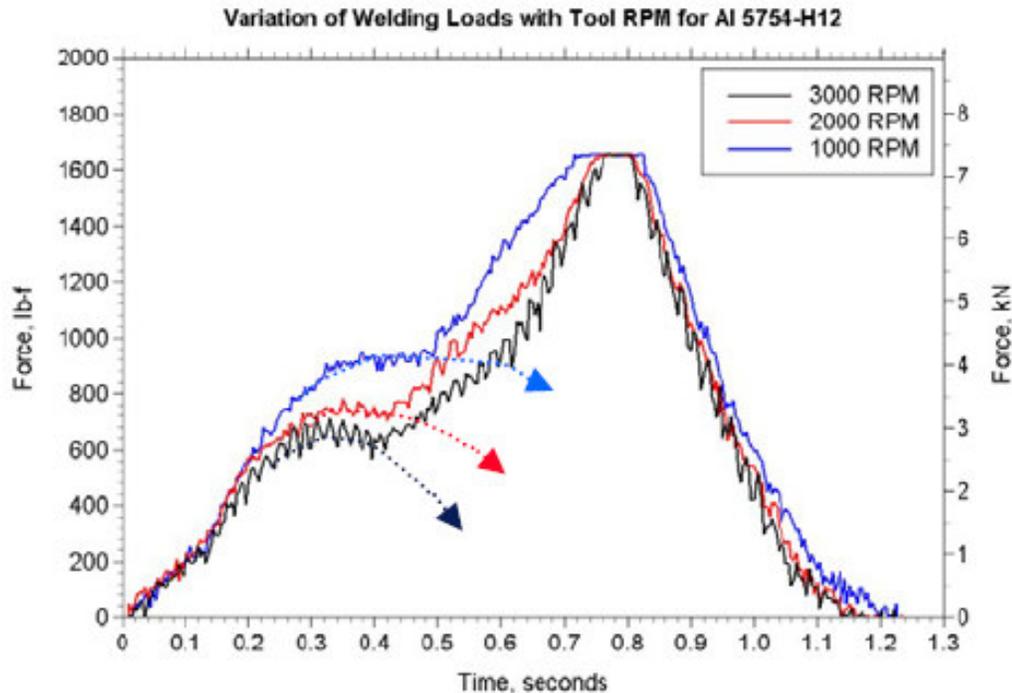


Figura 21- Efeito da velocidade de rotação na força axial para a liga AA 5754-H12 [37].

2.9 Parâmetros de soldagem

Os processos de solda ponto por fricção envolvem complexa deformação e fluxo de material. Diversos parâmetros influem no fluxo de material e na formação de perfis de temperatura que, deste modo, afetam a microestrutura final da solda e, conseqüentemente, as propriedades mecânicas das mesmas. Partindo-se desta premissa, pode se determinar, desta maneira, que a qualidade final obtida na solda e seu desempenho quanto a suas propriedades mecânicas podem ser controlados através do controle rigoroso dos parâmetros de soldagem. Os principais parâmetros de soldagem são: velocidade de rotação, profundidade de penetração, tempo de mistura, taxa de penetração e força de penetração [20-40].

A velocidade de rotação é um parâmetro de processo extremamente importante, já que está fortemente associado ao aporte térmico durante a soldagem. Entretanto o aporte térmico é diretamente dependente da condição de rotação da ferramenta, ou seja, se o processo está em condição de stick (adesão) ou de slip (deslizamento). Na condição de deslizamento, ocorre uma queda drástica no torque durante o processo, ou seja, a rotação da ferramenta está em uma velocidade muito maior que a do material adjacente, enquanto que na condição de adesão, uma quantidade de maior de material é movida [34-42,]. O aumento

da velocidade de rotação implica no aumento do aporte térmico, entretanto, este efeito não tem relevância quanto estamos sob a condição de deslizamento. Segundo Gerlich e Su [16-42], esta condição de deslizamento da ferramenta é possível devido à ocorrência da fusão localizada nas regiões adjacentes a ferramenta devido à ocorrência de picos de temperatura, o que acarretaria na ocorrência destes fenômenos, conforme mostrado anteriormente na Figura 13.

3 Procedimento Experimental

3.1 Diagrama de fluxo do trabalho

De maneira cumprir os objetivos propostos para este trabalho, um programa de trabalho foi desenvolvido, conforme ilustrado no fluxograma abaixo.

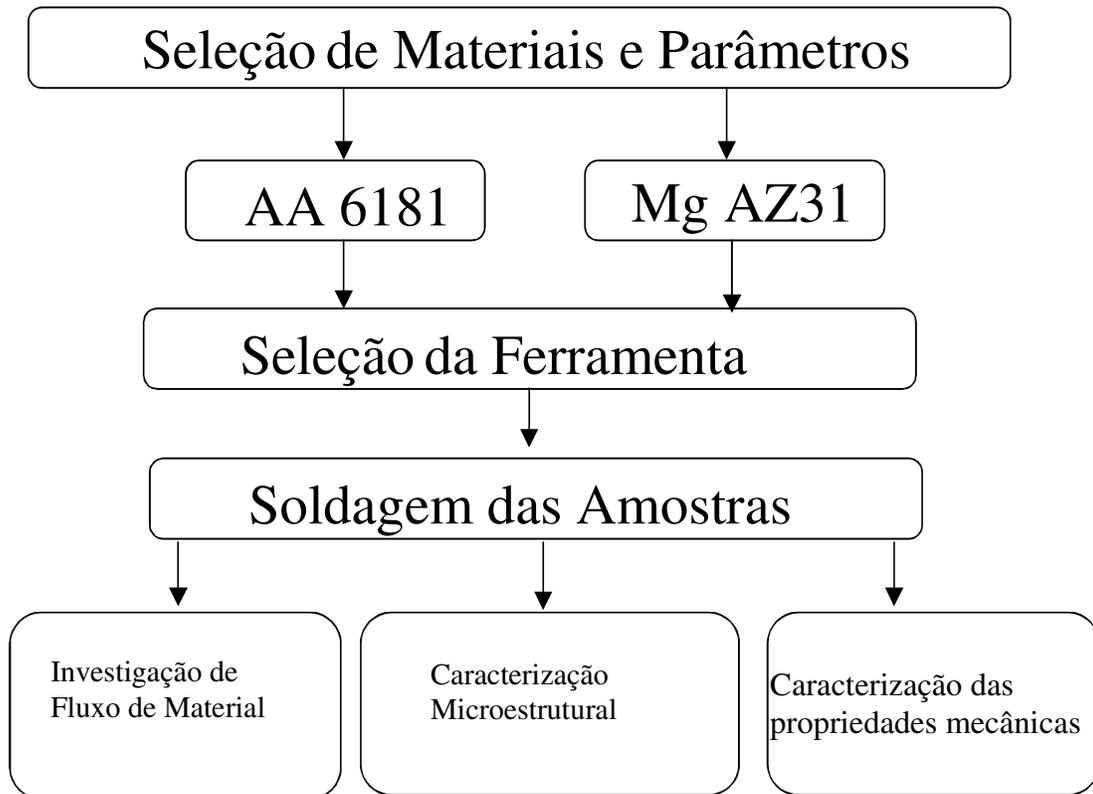


Diagrama 1: Diagrama de fluxo representando o programa de trabalho desenvolvido.

3.2 Material

AA 6181

Foram utilizadas chapas de alumínio com espessura de 1,5 mm do material AA 6181 na condição T4. A análise da composição química das amostras pode ser observada na Tabela 6.

Tabela 6- Análise de composição química para o material AA 6181 (% em peso).

Elemento	Si	Fe	Mn	Mg	Cu	Cr	Ti	Zn	Al
AA 6181	0,85	0,25	0,09	0,74	0,06	0,01	0,003	0,01	Bal.

Mg AZ31

As chapas de magnésio utilizadas foram do material AZ31 com espessura de 1,6 mm. As chapas utilizadas eram laminadas. A análise de composição química pode ser observada na Tabela 7.

Tabela 7- Análise de composição química para o material AZ31 (% em peso).

Elemento	Si	Fe	Mn	Al	Cu	Ni	Ag	Th	Sn	Zn	Mg
AZ31	0,015	0,007	0,242	2,94	0,002	0,002	0,001	0,103	0,006	0,77	Bal

3.3 Processo SPFMM

3.3.1 Pórtico de Soldagem

As soldas foram produzidas em uma máquina estilo pórtico, situada no instituto GKSS, em Gessthacht, na Alemanha, mostrada na Figura 22.



Figura 22- Pórtico de soldagem.

A máquina ainda é equipada com um sistema de fixação para ferramentas de 20 mm, ou de 15 mm com um adaptador.

3.3.2 Projeto da ferramenta

Para poder ser feita a avaliação da influência da ferramenta sobre as características finais da solda foram desenvolvidas variações nos perfis do ombro e do pino da ferramenta. Um total de quatro pinos e três ombros foram produzidos, que combinados resultam em doze diferentes perfis de ferramenta, conforme mostra a Figura 23. As regiões de interesse (ombro e pino) de todas combinações estão representadas em detalhe na Figura 24.

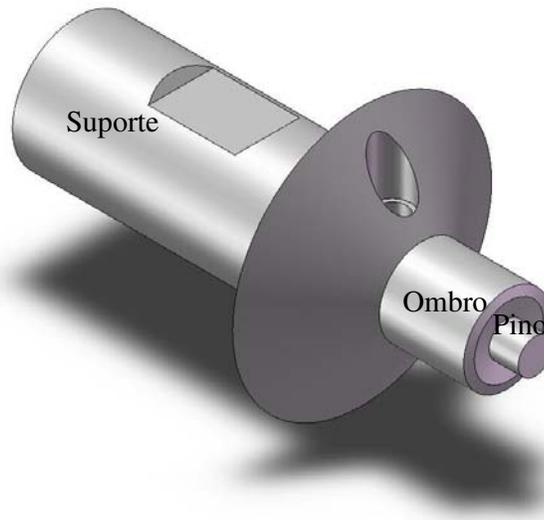


Figura 23- Aspecto geral das ferramentas utilizadas.

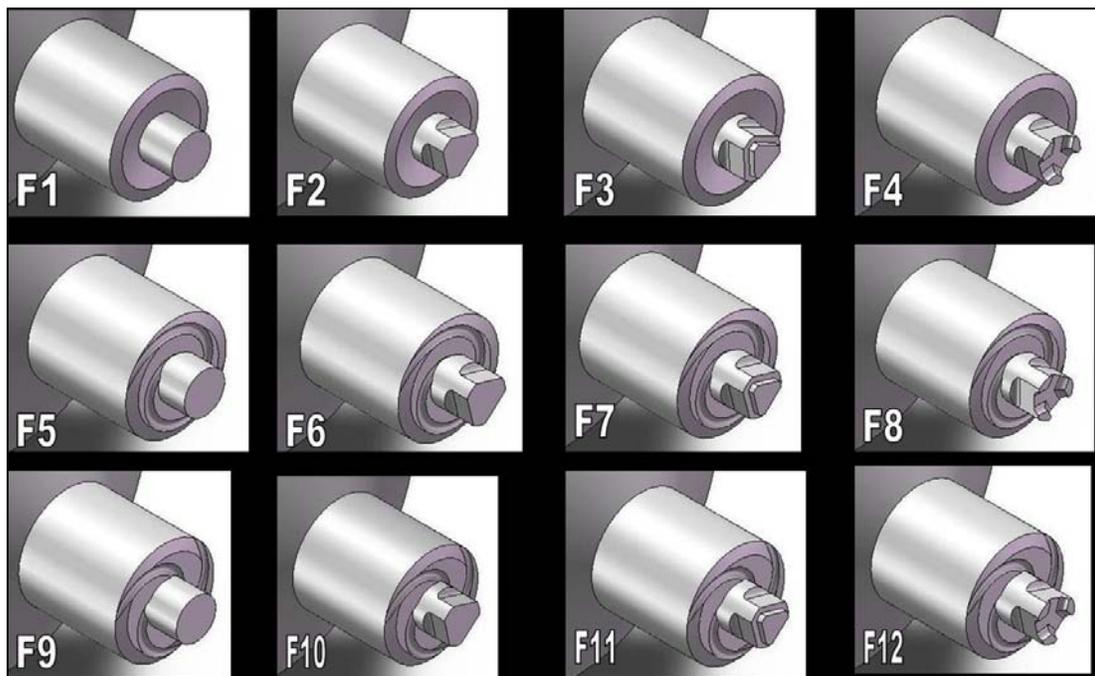


Figura 24- Diferentes ferramentas utilizadas para as soldas e suas denominações.

Os três tipos de ombro desenvolvidos foram: ombro côncavo, com duas ranhuras e com três ranhuras. O sentido de rotação se torna importante para os ombros produzidos com as ranhuras no sentido de levar o material na direção do pino. A Figura 25 mostra a imagem dos três ombros.



Figura 25- Imagem mostrando os três tipos de ombro. a) côncavo (Cc), b) duas ranhuras (2Sc) e c) três ranhuras (3Sc).

Os pinos desenvolvidos foram quatro tipos, desde perfis suaves até perfis mais agressivos, que garantam misturar mais o material. Os quatro perfis testados foram:

Côncavo: Um perfil bastante suave e tradicional, que não causa influência muito além das regiões adjacentes;

Com três superfícies planas: Que é um perfil mais agressivo, que deve gerar uma maior remoção de material e deslocamento de um sítio para outro;

Com três superfícies planas mais um degrau: Este é um perfil que busca aliar a agressividade das três superfícies planas ao mesmo tempo em que se busca uma maior suavidade durante a penetração da ferramenta através do degrau;

Com três superfícies planas mais três protuberâncias: Um perfil agressivo, que através das protuberâncias procura uma maior mistura na ZM.

A Figura 26 mostra a imagem dos pinos em perfil.

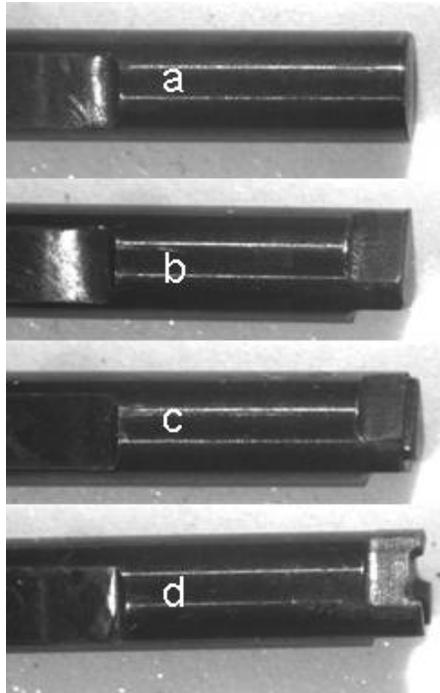


Figura 26- Imagem mostrando os pinos projetados para o processo. a) Cilíndrico, b) três superfícies planas, c) três superfícies planas mais um degrau e d) três superfícies planas mais três protuberâncias.

3.4 Parâmetros de soldagem

Os parâmetros de soldagem utilizados neste trabalho foram pré-determinados com base nos parâmetros utilizados encontrados na literatura. Para ambas as ligas foram utilizadas as 12 combinações de ferramentas com duas diferentes matrizes de parâmetros. A matriz de parâmetros utilizada para as duas ligas pode ser observada na Tabela 8.

Tabela 8- Matriz de parâmetros para as amostras de alumínio e magnésio.

Parâmetro	AA 6181-T4	Mg AZ31
Velocidade de Rotação (RPM)	1000, 2000 e 3000	2500 e 3000
Taxa de Penetração (mm/s)	1	1
Tempo de Mistura (s)	2	2
Profundidade de Penetração (mm)	2,2	2,4

Foram realizados seis pontos de solda por condição de soldagem. A máquina foi programada para utilização com controle de deslocamento. A solda foi realizada em uma chapa inteira, que após a solda foi levada para a oficina para preparação das amostras de ensaios mecânicos e metalografia. As amostras das pontas foram utilizadas para

caracterização metalográfica e as quatro amostras centrais foram utilizadas para os ensaios de cisalhamento. O desenho esquemático da Figura 27 mostra a montagem das chapas antes da soldagem e a localização dos pontos de solda na chapa.

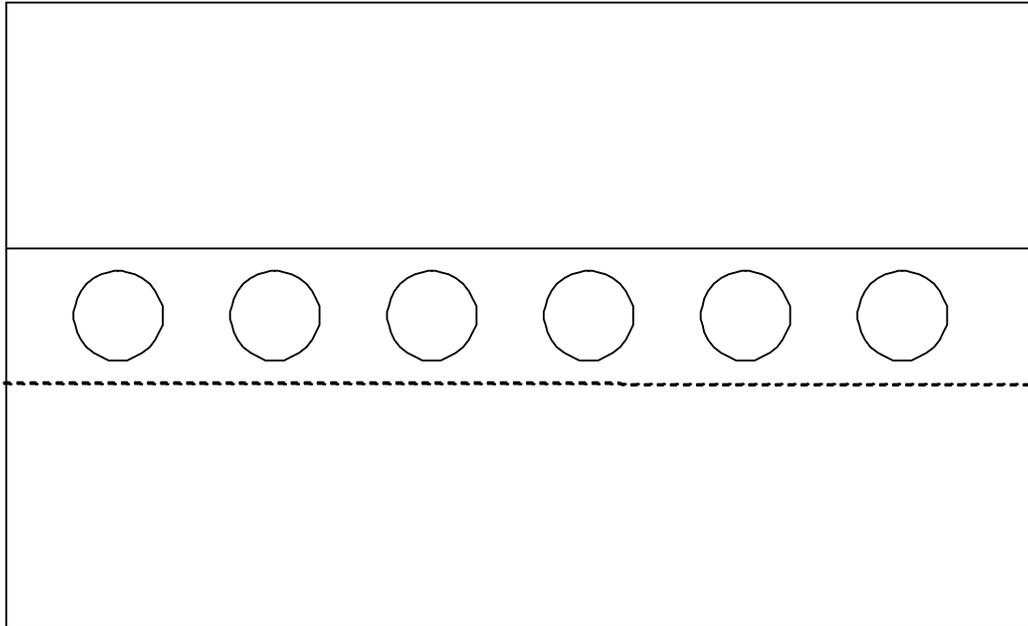
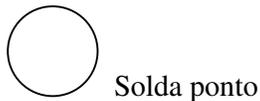


Figura 27- Desenho esquemático mostrando a vista superior da montagem das chapas para realização das soldas ponto.



Solda ponto

3.5 Monitoramento de Força e Torque

As medições de força e torque durante o processo foram adquiridas pelo software da própria GANTRY machine. As medições foram feitas ininterruptamente e os dados adquiridos pela máquina foram: Força, torque, tempo de processo, velocidade de rotação e sentido de rotação.

3.6 Caracterização metalográfica

3.6.1 Material de base

Amostras do material de base foram caracterizadas para avaliação microestrutural prévia. Foram preparadas amostras das três principais direções do material. As amostras foram

embutidas a frio e preparadas conforme procedimento padrão de metalografia. Após a preparação as amostras de alumínio foram atacadas com o reagente Barker's, enquanto as amostras de magnésio foram atacadas com o reagente Picral-Acético (5 mL ácido acético, 6g ácido pícrico, 10 mL de H₂O e 100 mL de etanol).

3.6.2 Soldas AA6181, Mg AZ31 e amostras de fluxo de material

As amostras soldadas foram seccionadas transversalmente e então embutidas a frio para ser realizada a caracterização metalográfica da seção transversal. Após a preparação, foram atacadas também com o reagente Barker's as amostras de alumínio e com o reagente Picral-Acético (5mL ácido acético, 6g ácido pícrico, 10mL de H₂O e 100mL de etanol) para as amostras de magnésio. Foram levadas então a microscopia ótica para ser feita a caracterização das diferentes zonas formadas na soldagem.

3.7 Caracterização mecânica

3.7.1 Testes de cisalhamento

As quatro amostras do centro da chapa mostrada na Figura 27 foram levadas para a oficina de onde foram tiradas amostras para os testes de cisalhamento. Para cada condição foram ensaiadas quatro amostras. Os ensaios seguiram a norma DIN EN ISO 14273:2002 [43]. Para realização do ensaio foi utilizada uma máquina de fuso Schenk-Trebel, que pode ser observada na Figura 28.

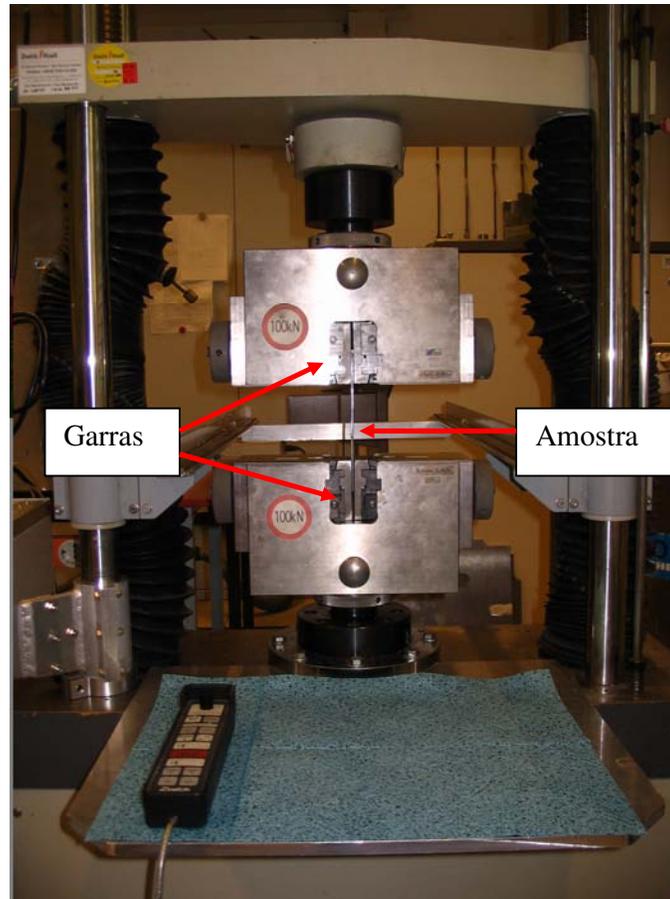


Figura 28- Amostra de cisalhamento montada na máquina antes de ser testada.

3.7.2 Caracterização da falha

A caracterização das amostras ensaiadas em cisalhamento foi realizada através lupa microscópica e microscopia eletrônica de varredura.

3.7.3 Perfis de microdureza

Os perfis de microdureza foram realizados nas mesmas amostras usadas para metalografia. Foram realizados perfis nas superfícies transversais das amostras a 0,5 mm da superfície superior da chapa superior, a 1 mm de distância e a 1,5 mm de distância. As cargas utilizadas foram de 200 gramas-força e o espaçamento entre indentações foi de 0,5 mm.

3.8 Soldagem das amostras de caracterização de fluxo de material

As amostras soldadas para caracterização de fluxo de material foram montadas na mesma configuração das amostras soldadas para metalografia (Figura 27). Para observação das

direções de fluxo de material foi utilizado um terceiro material, no caso cobre, entre as chapas para se obter um bom contraste e se buscar as direções do fluxo de material. Para tanto, foram utilizadas as chapas do material AA6181-T4, e entre elas uma chapa fina de 0,5 mm de cobre. A profundidade de penetração foi modificada de modo que se garanta que ocorra a penetração suficiente da ferramenta até a chapa inferior. Para caracterização do fluxo de material, foi utilizada uma ferramenta com o ombro fixo, onde se variou apenas o tipo de pino. O ombro escolhido foi o com três ranhuras, foram utilizados os quatro tipos de pinos e, ainda, foi utilizada a profundidade de penetração de 3 mm com velocidade de rotação de 3000 RPM sendo os outros parâmetros mantidos iguais aos citados na Tabela 8.

3.9 Análise de Dados

A análise de dados levou em conta as condições de soldagem e os resultados obtidos no ensaio de cisalhamento. Foi utilizada a tabela ANOVA para realizar a análise, o que permite observar a influência de um parâmetro sobre os demais, ou seja, se existe a influência de um pino sobre um tipo de ombro e vice versa.

3.9.1 Como funciona a ANOVA

Agora a ANOVA basicamente divide a variabilidade em variabilidade *Entre Grupos* e variabilidade *Dentro de Grupos*, e compara as duas.

Quanto maior for a primeira comparada à segunda, maior é a evidência de que existe variabilidade entre grupos, ou seja, médias diferentes.

Define-se a **soma de quadrados total, SQT**, como:

$$\mathbf{SQT} = \sum (x_i - \bar{x})^2, \quad \text{Equação 1}$$

Calculada a partir de todos os dados, em que \bar{x} é a média amostral global.

Note que a estimativa usual de variância de uma amostra é:

$$s^2 = \mathbf{SQT}/(n - 1) \quad \text{Equação 2}$$

Podemos dividi-la como:

$$\mathbf{SQT} = \mathbf{SQD} + \mathbf{SQE}, \quad \text{Equação 3}$$

em que

$$\mathbf{SQD} = \sum_{gp1} (x_i - \bar{x}_1)^2 + \sum_{gp2} (x_i - \bar{x}_2)^2 + \sum_{gp3} (x_i - \bar{x}_3)^2 + \sum_{gp4} (x_i - \bar{x}_4)^2 \quad \text{Equação 4}$$

e \bar{x}_k é a média amostral do grupo k ; e

$$\mathbf{SQE} = n_1(\bar{x}_1 - \bar{x})^2 + n_2(\bar{x}_2 - \bar{x})^2 + n_3(\bar{x}_3 - \bar{x})^2 + n_4(\bar{x}_4 - \bar{x})^2 \quad \text{Equação 5}$$

em que n_k é o tamanho amostral do grupo k .

Aqui **SQD** é utilizado para denotar **soma de quadrados dentro de grupo** e **SQE** para a **soma de quadrado entre grupos**.

Agora tendo separado a variabilidade, é possível mostrar que podemos obter estimativas *independentes* da variância populacional comum σ^2 a partir destas duas quantidades. Elas são chamadas de **valores quadrados médios**, e obtemos as seguintes estimativas:

$$s_1^2 = \mathbf{SQE}/(m - 1), \quad \text{Equação 6}$$

$$s_2^2 = \mathbf{SQD}/(N - m), \quad \text{Equação 7}$$

em que m é o número de grupos, e N é o tamanho amostral total, aqui 20. Como estas estimativas de variância são construídas a partir de dois tipos diferentes de variabilidade, quanto mais elas diferirem, mais evidência existe de diferença nas médias.

A estatística de teste é

$$F = s_1^2/s_2^2, \quad \text{Equação 8}$$

e comparamos este valor com uma distribuição F com $m - 1$ e $N - m$ graus de liberdade

para obter um p -valor.

Observações:

A função Análise de Variância de um fator realiza uma análise de variância simples, que somente investiga a hipótese de que as médias de várias mostras são iguais. Geralmente a

análise é um processo estatístico de que se utiliza para determinar se as médias de duas mostras ou mais vêm da mesma população. A tabela ANOVA de um fator pede que inclua a seguinte informação.

- Faixa de entrada. Escreva a referência correspondente à faixa de dados da planilha que você deseje analisar. A faixa de entrada deve incluir pelo menos duas faixas juntas, organizadas em colunas (como se vê a seguir) ou em filas.
- Faixa de saída. Escreva a referência correspondente à célula superior esquerda da faixa onde você deseja que os resultados apareçam.

4 Resultados e discussão

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos na utilização de cada técnica de análise juntamente com a discussão destes resultados. Para cada técnica de análise empregada está reservado um subcapítulo de resultados e discussões. Estes serão apresentados na forma de gráficos, tabelas, figuras e equações teóricas.

4.1 Soldas AA6181 e Mg AZ31

As soldas do alumínio AA 6181 e do magnésio AZ31 foram realizadas com sucesso através da matriz de parâmetros utilizada. Foi realizada uma inspeção visual das soldas, e foram registradas imagens do acabamento superficial das mesmas através da lupa de aumento, conforme se observa na Figura 29, para a liga AA 6181 e na Figura 30 para liga Mg AZ31.

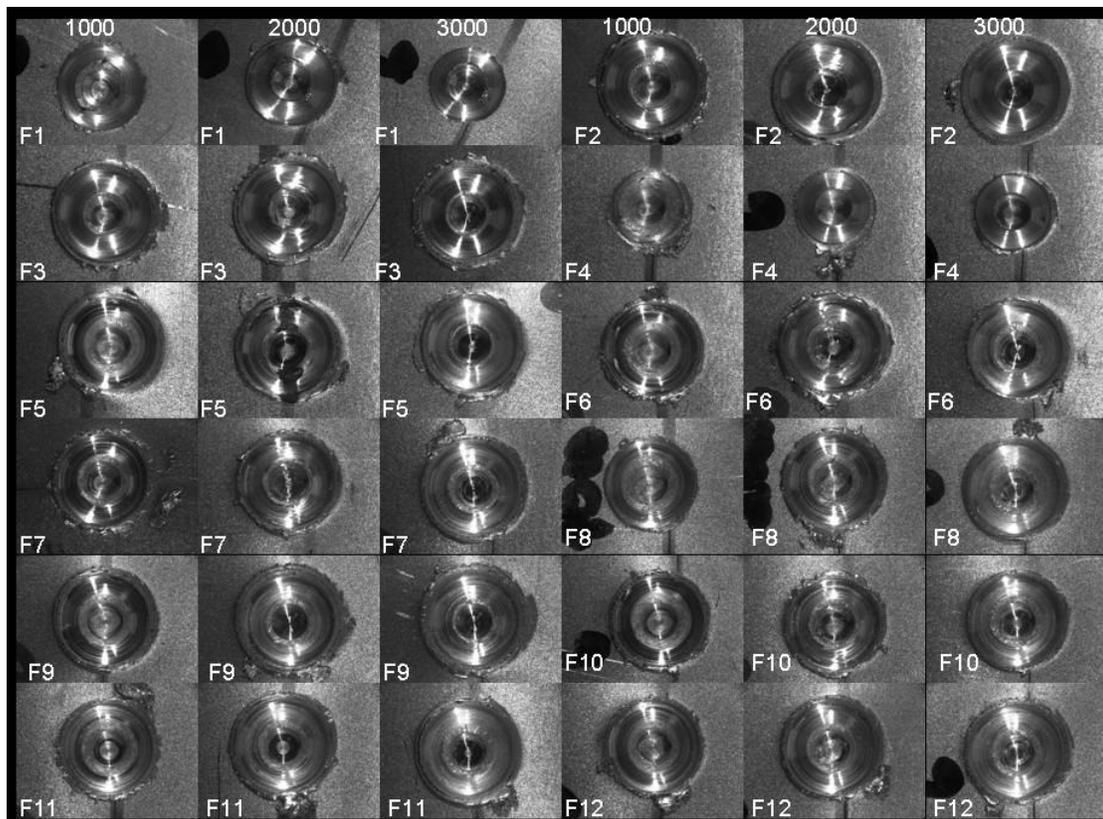


Figura 29- Imagem do aspecto visual das soldas ponto para a liga AA 6181-T4. As colunas apresentam soldas com mesmas velocidades de rotação (a ferramenta utilizada está indicada na própria imagem).

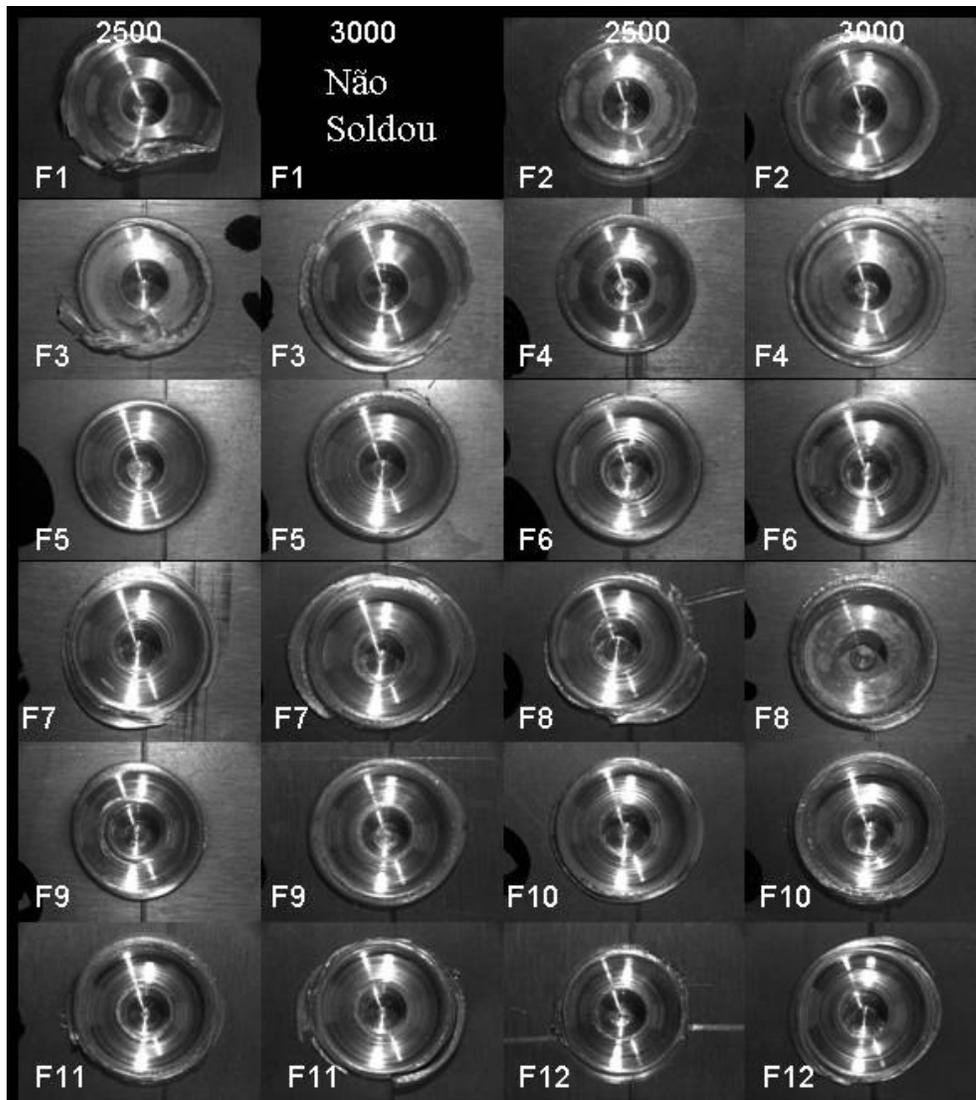


Figura 30- Imagem do aspecto visual das soldas ponto para a liga Mg AZ31. As colunas apresentam soldas com mesmas velocidades de rotação (a ferramenta utilizada está indicada na própria imagem).

Algumas peculiaridades com relação às soldas puderam ser observadas. Ambas soldas deixam uma impressão onde se observa a marca do ombro e do pino. Algumas condições de soldagem utilizadas para o alumínio apresentaram produção de rebarba. O acabamento superficial apresentado foi bom, com um aspecto polido, embora algumas soldas aparentemente tiveram uma maior formação de rebarba no material, onde foram produzidas soldas que na aparência tiveram contato excessivo do ombro da ferramenta com a superfície. Também pôde ser observado a grande adesão de Mg na ferramenta. A Figura 31 mostra a diferença entre duas diferentes impressões deixadas pela mesma ferramenta.

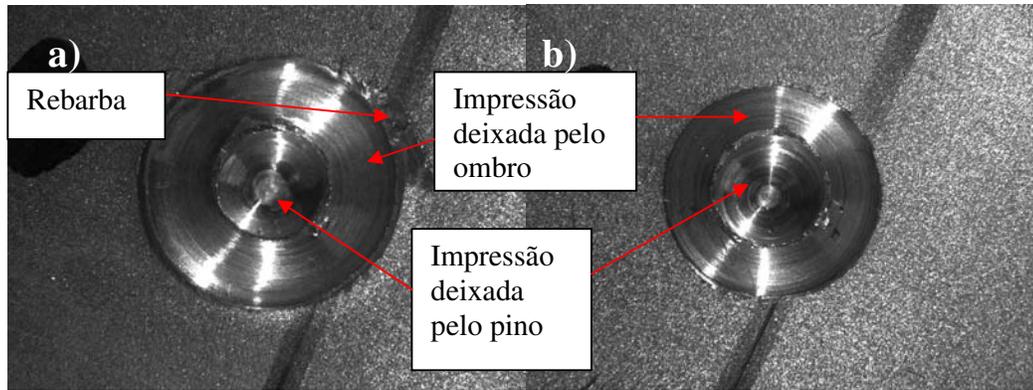


Figura 31-Imagem mostrando duas impressões deixadas pela ferramenta onde foi usada a mesma ferramenta (F1) e parâmetros e variando a velocidade de rotação. a) 2000 RPM e b) 3000 RPM. Material AA 6181.



Figura 32- Imagem mostrando a formação excessiva de rebarba (região destacada em vermelho) em uma solda da liga AA 6181. Amostra F3 2000 RPM.

As soldas realizadas no magnésio apresentaram um excelente acabamento superficial, um estado quase polido na região de contato com o ombro da ferramenta, porém muitas apresentaram também a produção excessiva de rebarba, conforme é mostrado na Figura 33.

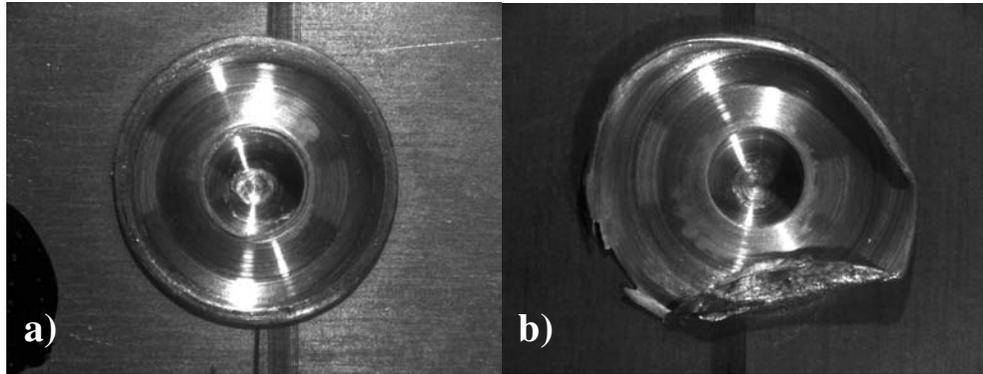


Figura 33- Amostras soldadas de magnésio, onde a) se observa um bom acabamento superficial e b) formação excessiva de rebarba.

4.2 Monitoramento de Força e Torque

As medições de força e torque durante o processo de SPFMM foram realizadas empregando a célula de carga do próprio equipamento.

4.2.1 AA 6181-T4

As medições mostraram a formação básica de dois picos de força durante cada ciclo do processo. Gerlich e North [16, 17, 18] denominaram estes picos de F1 e F2, que são os picos que indicam o início da penetração do pino na chapa superior e o contato do ombro da ferramenta com da chapa superior. Existe ainda um platô que corresponde ao tempo de mistura do processo (dwell time). A Figura 34 mostra o pico típico de força obtido do processo.

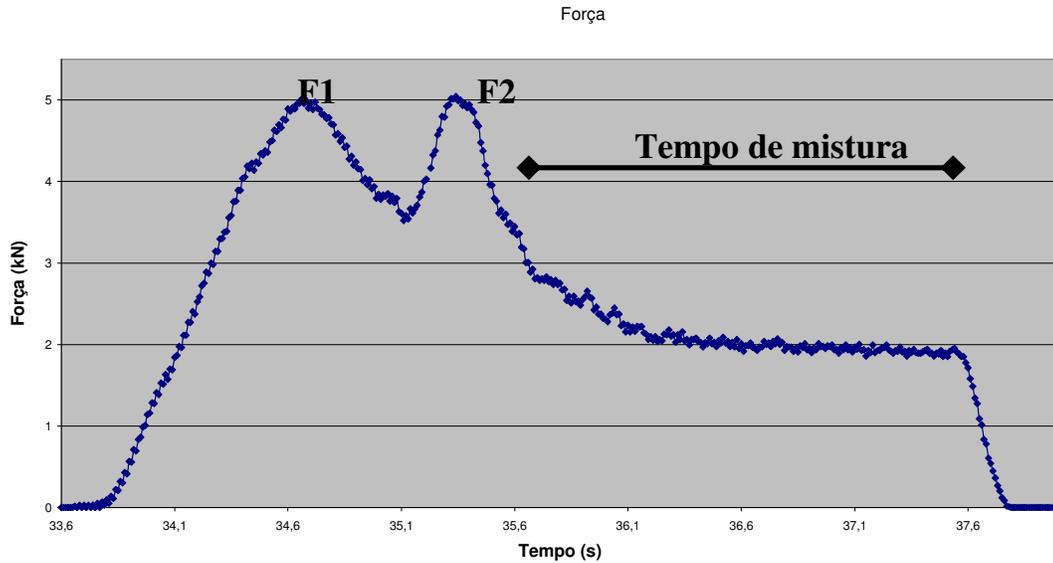


Figura 34- Pico de força obtido para amostra F1-1000RPM onde podem ser observados os picos F1 e F2 e ainda o platô do tempo de mistura.

A altura máxima dos picos F1 e F2 apresentaram comportamento similar em quase todos os casos, sendo o pico F2 maior que o pico F1. Houve alguns poucos casos em que o pico F2 foi de menor e também igual altura que o pico F1. Conforme foi mencionado em capítulos anteriores, o processo foi realizado através do controle de deslocamento, sendo a força deste modo uma variável dependente.

De uma maneira geral, os resultados obtidos foram semelhantes. Em todos os casos tanto a força quanto o torque foram decrescendo com o aumento da velocidade de rotação. A menor velocidade de rotação envolveu maiores força no processo e, também, maiores valores de torque. A Figura 35 mostra um gráfico com valores obtidos de torque e força para o processo de SPFMM com as diferentes ferramentas e velocidades de rotação utilizadas.

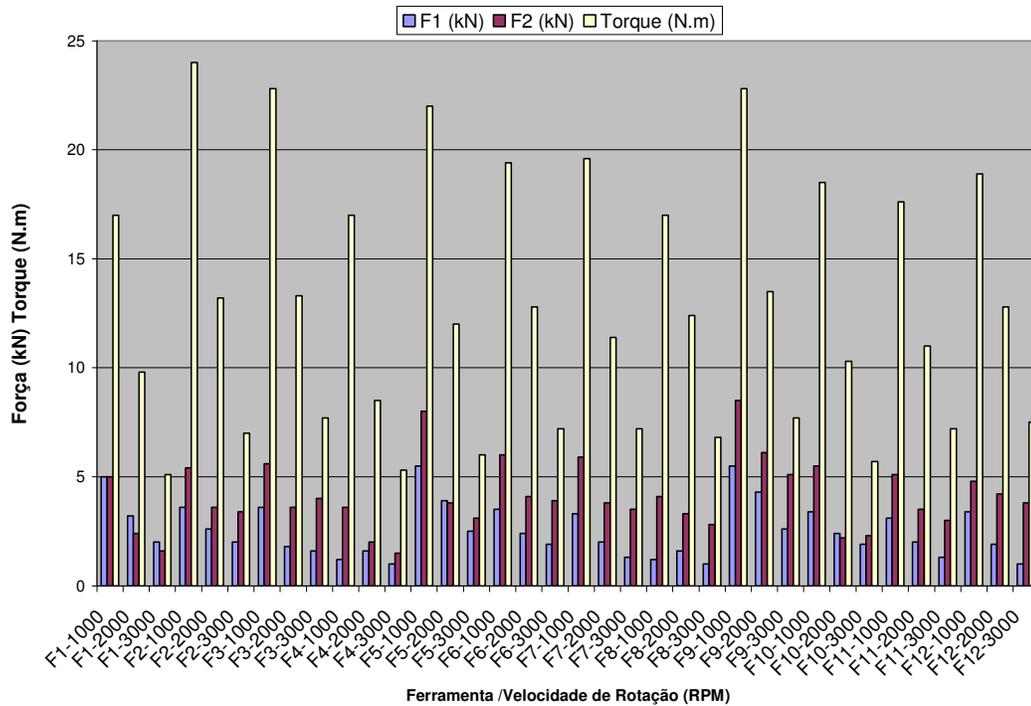


Figura 35- Gráfico mostrando os valores obtidos de torque e força (picos F1 e F2) para o processo de SPFMM.

O valor do torque durante o processo determina que regime predomina no processo. Uma condição de “stick” ou “slip”, ou seja, a condição de deslizamento ou de emplastramento do material ao redor da ferramenta rotativa. De acordo com alguns autores [44-46], as condições de emplastramento/deslizamento modificarão o tamanho da região deformada ao redor da ferramenta. O aumento da velocidade de rotação ocorre uma tendência de se diminuir a quantidade de material misturado nas regiões adjacentes ao pino. Este aumento de rotação que deveria causar o aumento do torque tem um limite, que é considerado quando ocorre a troca de regime de emplastramento para deslizamento do material na ferramenta. Quando estamos em regime de deslizamento, ou slip, ou mesmo quando ocorre a chamada “derrapagem da ferramenta” de acordo com Gerlich [47], ocorre uma queda brusca no torque devido à formação de um filme ao redor da ferramenta. Este filme apresenta uma baixa viscosidade, deste modo apresentando um menor coeficiente de fricção, o que faz com que uma menor quantidade de material seja deformada pela ação da ferramenta.

O pino A apresentou os maiores valores de força que os outros pinos na combinação com os ombros 2Sc e 3 Sc, sendo uma exceção a combinação com o ombro côncavo. Esta maior força axial era esperada devido ao fato da seção transversal deste pino ser maior que a dos

outros pinos, o que implicaria em uma força maior para penetração nas chapas. No caso do ombro côncavo, como o ombro deixa um espaço para armazenar o material que é expelido pela penetração do pino os valores de força envolvidos foram bastante semelhantes, com o pino D apresentando os menores valores dentre os quatro tipos de pino.

Os valores reduzidos de força obtidos em altas velocidades de rotação indicam que a condição de deslizamento também tem certa influência na força axial, ou seja, uma maior velocidade de rotação pode facilitar a penetração da ferramenta no material. Adicionalmente a utilização de menores velocidade de rotação aumentaria a região plastificada aumentando, neste caso, a área soldada.

A influência da ferramenta sobre o torque durante o processo foi bastante diferenciada. Conforme foi dito antes, o aumento da velocidade de rotação implicou em redução linear no torque do processo. Os dados abaixo foram obtidos fixando-se uma das partes da ferramenta intercambiável (ombro ou pino) e variando-se a outra parte, para se obter dados individuais do pino ou do ombro.

Ombro fixo:

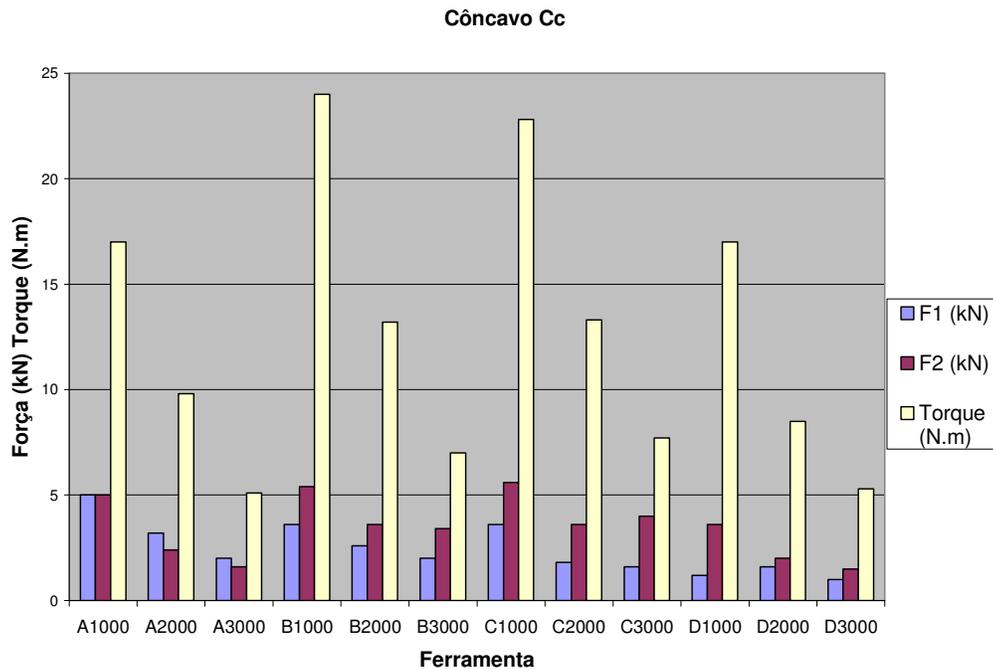


Figura 36- Diagrama mostrando a relação entre os pinos e respectivas velocidades de rotação, se fixando ombro côncavo da ferramenta.

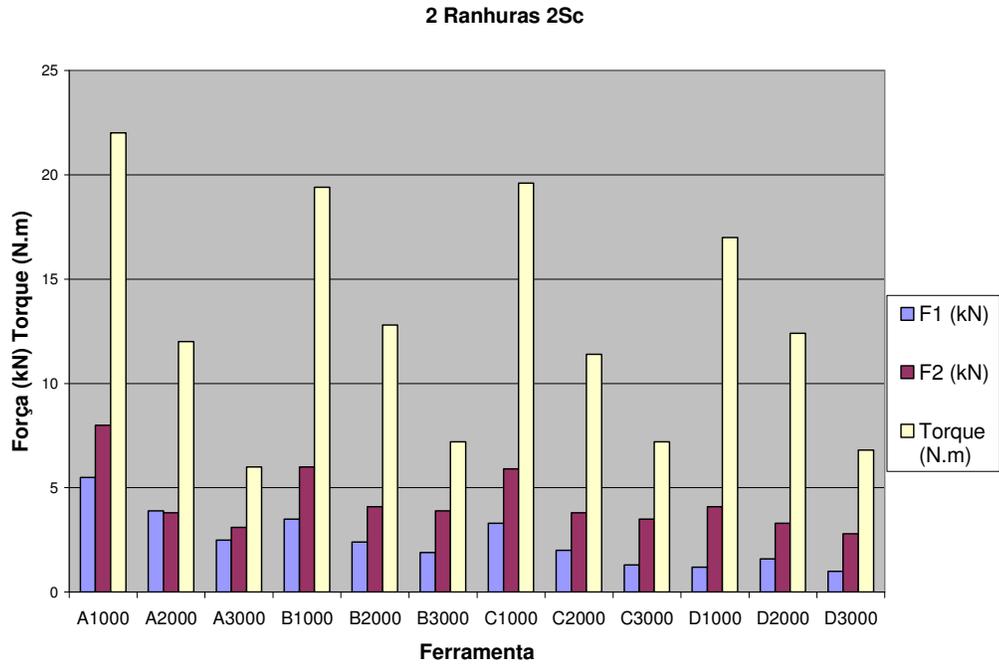


Figura 37- Diagrama mostrando a relação entre os pinos e respectivas velocidades de rotação, se fixando ombro com duas ranhuras da ferramenta.

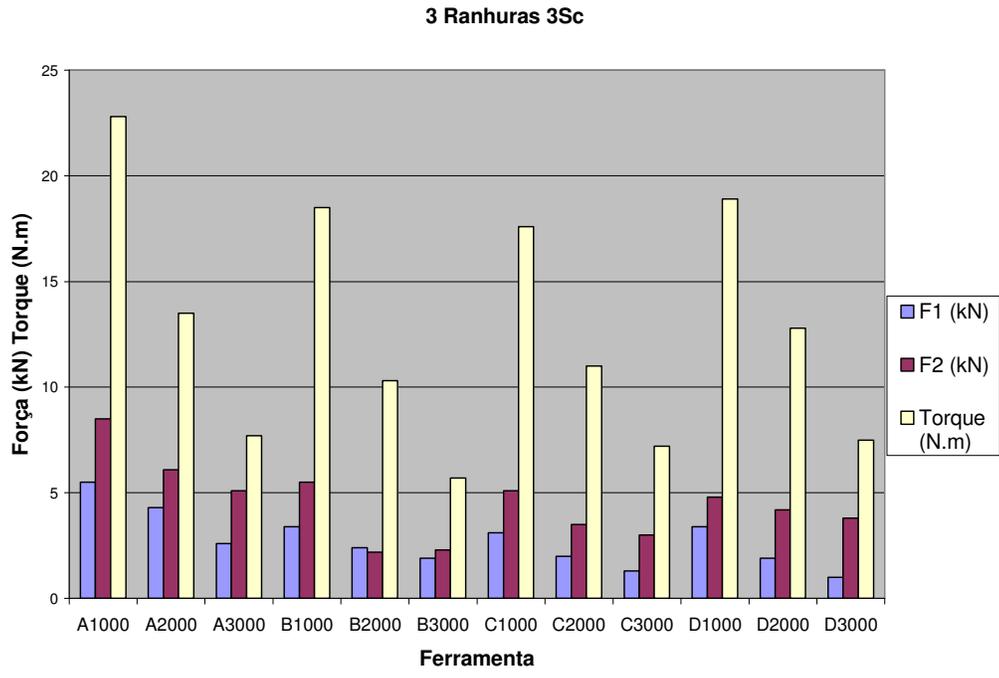


Figura 38- Diagrama mostrando a relação entre os pinos e respectivas velocidades de rotação, se fixando ombro com três ranhuras da ferramenta.

A influência dos diferentes ombros das ferramentas sobre o torque está indicada na Figura 39.

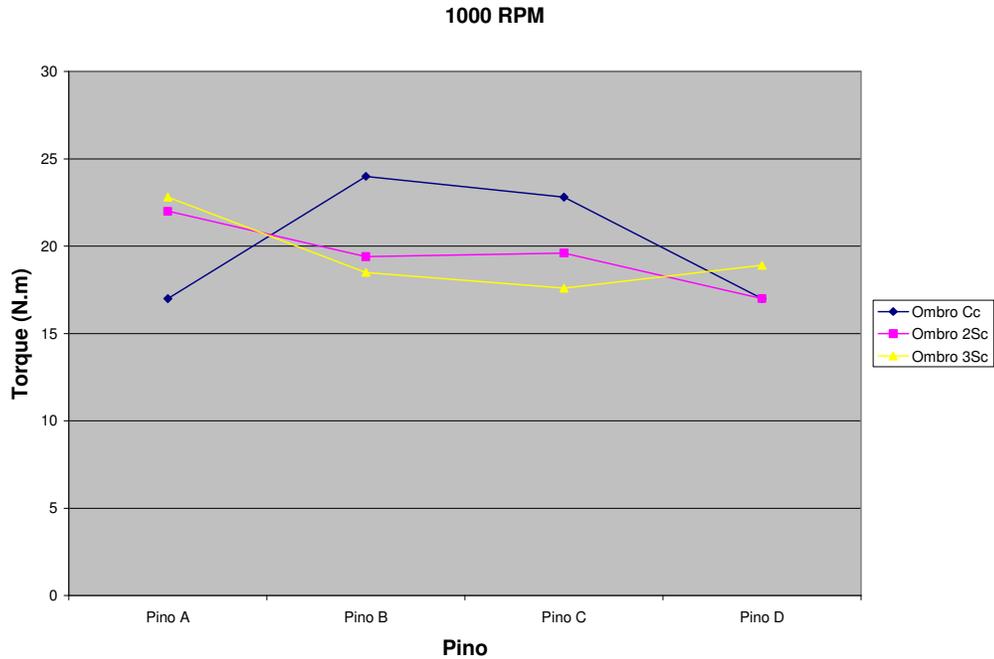


Figura 39- Relação entre o torque produzido de acordo com as diferentes ferramentas utilizadas.

Pode ser percebido que para o ombro côncavo os perfis dos pinos B e C produzem maiores torques durante o processo. Ainda pode ser observado que o pino cilíndrico produz o maior torque para os ombros com ranhuras. Para os pinos B e C, que apresentam perfis semelhantes, os maiores valores de torque foram obtidos com a combinação com o ombro côncavo. Já para o pino D, as três combinações apresentaram valores de torque semelhantes. Foi utilizada a velocidade de rotação de 1000 RPM devido ao fato de ser o maior torque obtido entre as três velocidades utilizadas em todos os casos.

Pino Fixo

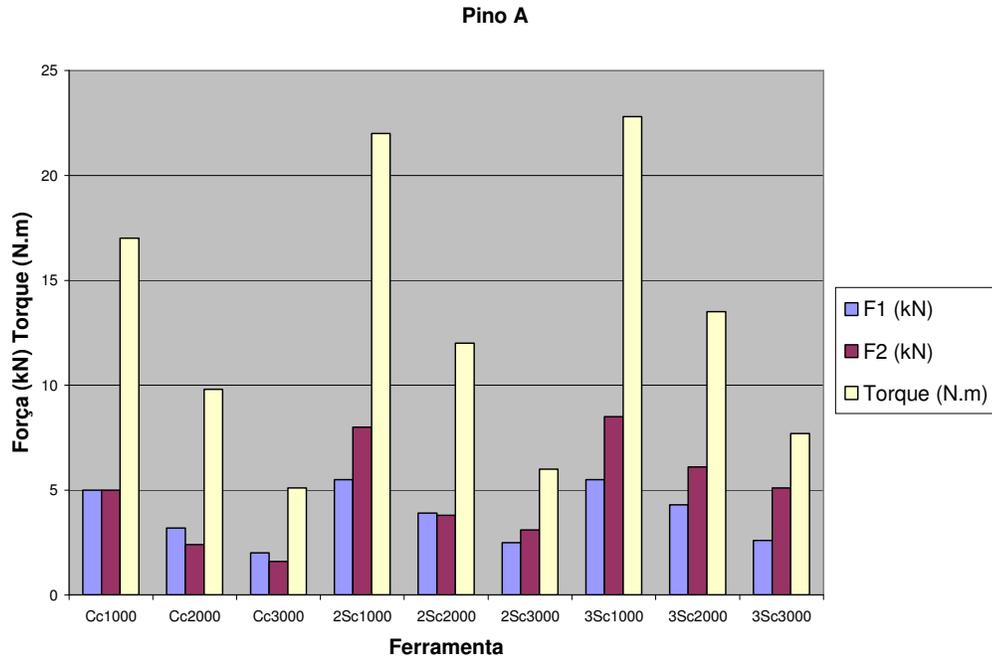


Figura 40- Imagem mostrando a relação entre diferentes ombros e respectivas velocidades de rotação, se fixando o pino A.

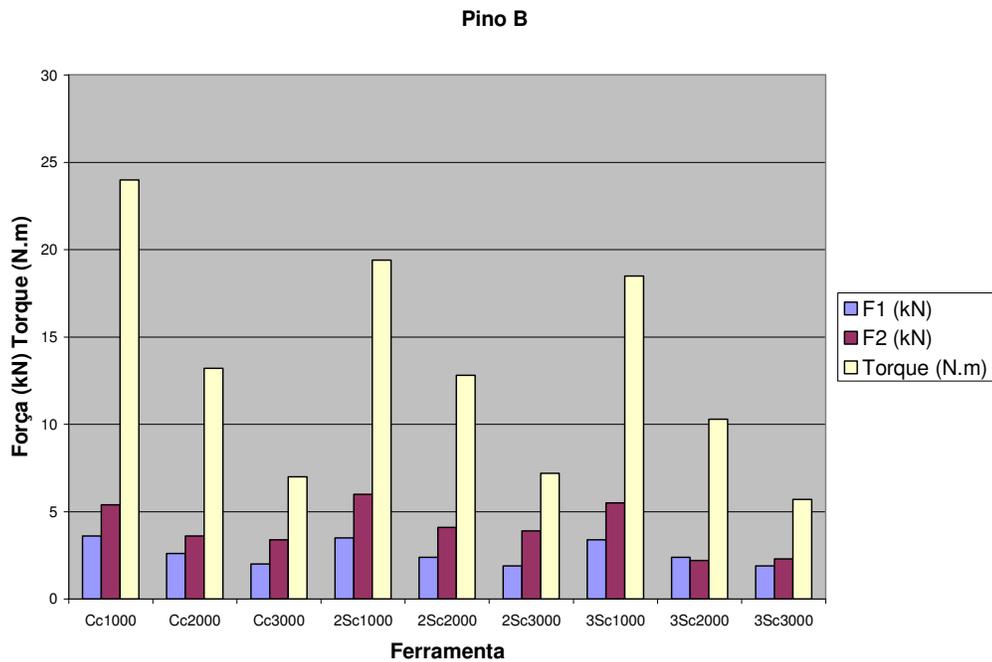


Figura 41- Imagem mostrando a relação entre diferentes ombros e respectivas velocidades de rotação, se fixando o pino B.

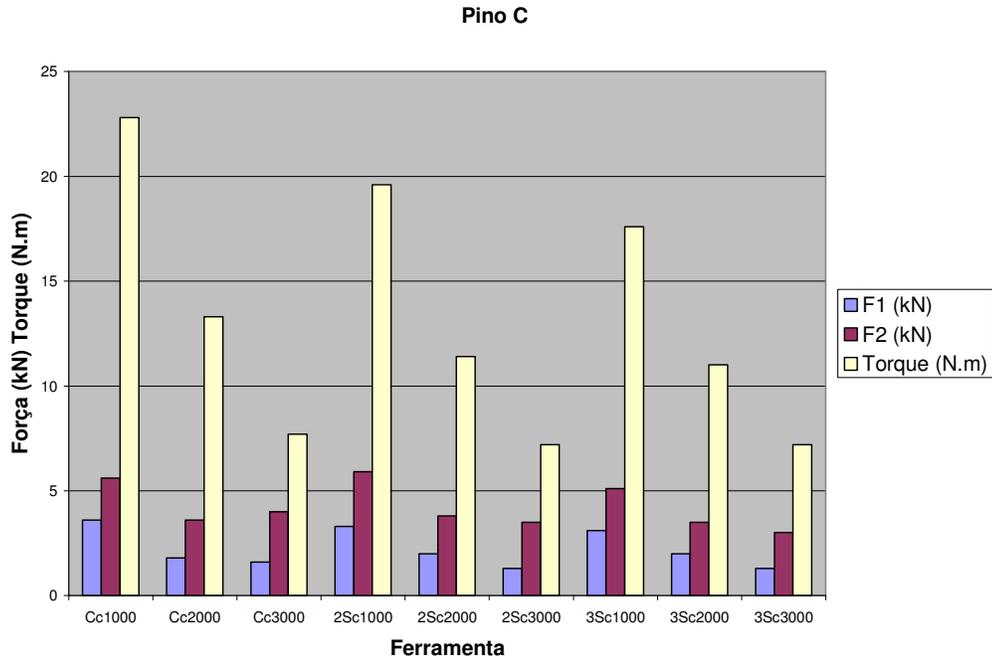


Figura 42- Imagem mostrando a relação entre diferentes ombros e respectivas velocidades de rotação, se fixando o pino C.

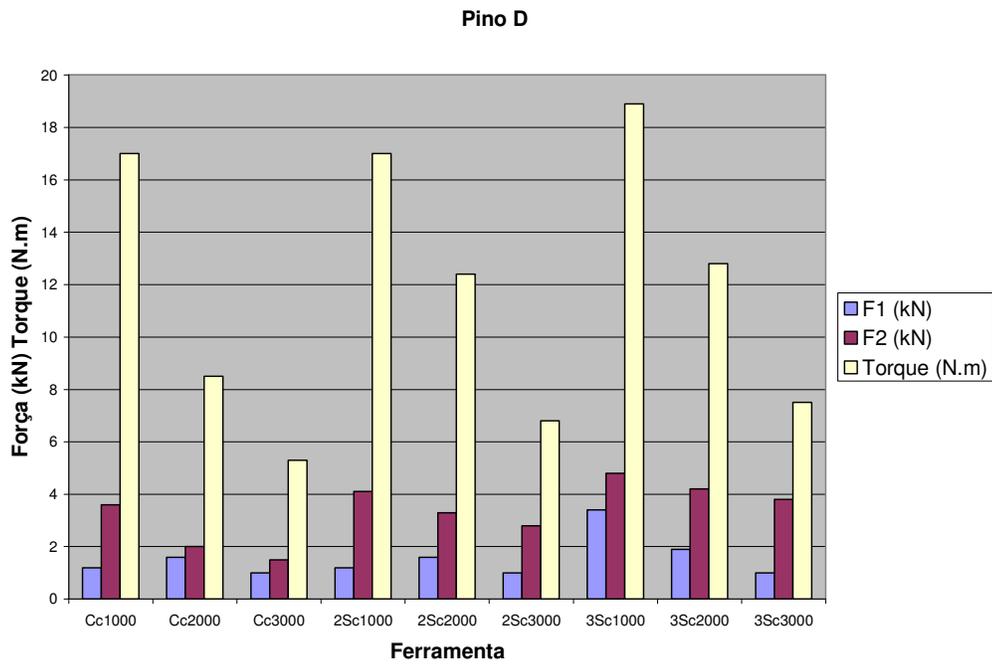


Figura 43- Imagem mostrando a relação entre diferentes ombros e respectivas velocidades de rotação, se fixando o pino D.

A Figura 44 mostra a influência do pino para as amostras de 1000 RPM.

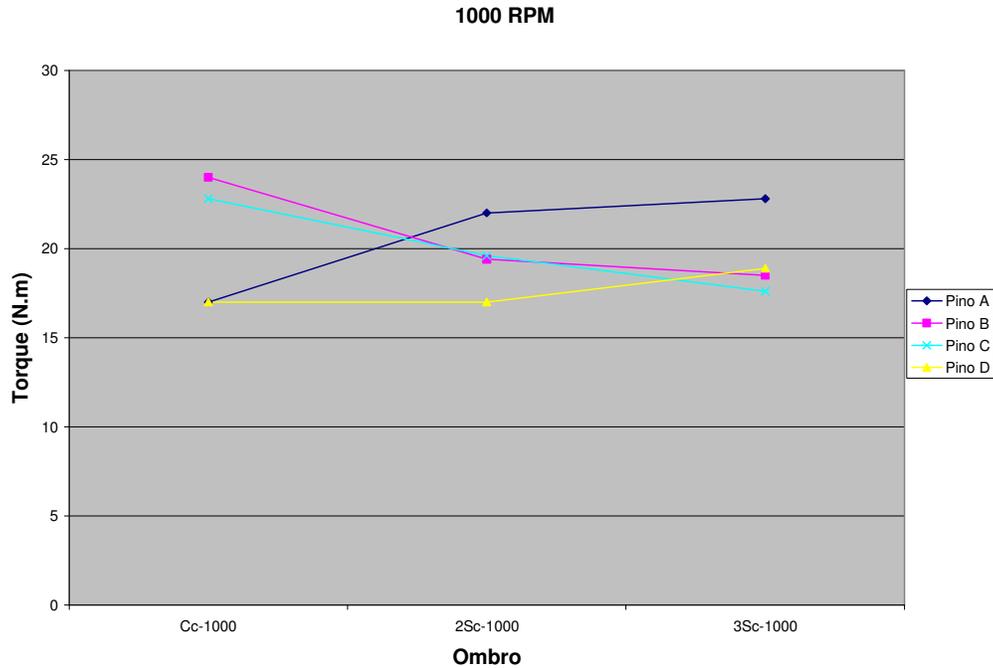


Figura 44- Relação entre o torque produzido de acordo com as diferentes ferramentas utilizadas.

A influência do pino sobre o torque também pôde ser observada. Pôde ser observada uma tendência semelhante para os pinos B e C, que são os que apresentam geometrias mais semelhantes. Os pinos A e D mostraram uma tendência levemente semelhante, porém o pino A apresentou um aumento gradativo bem maior que o observado no pino D.

Foi medida também a área abaixo da curva torque versus tempo, que indica a energia utilizada no processo. Esperava-se que uma maior energia gerada no processo promovesse uma camada de ligação (CL: espessura medida desde o furo remanescente até o final da interface entre as duas chapas), o que geraria uma maior resistência mecânica. Entretanto, não foi observada como via de regra esta hipótese. A Figura 45 mostra a curva típica da variação do torque no processo com relação ao tempo de processo, e a Figura 46 mostra a relação entre os valores obtidos de CL e a energia gerada no processo.

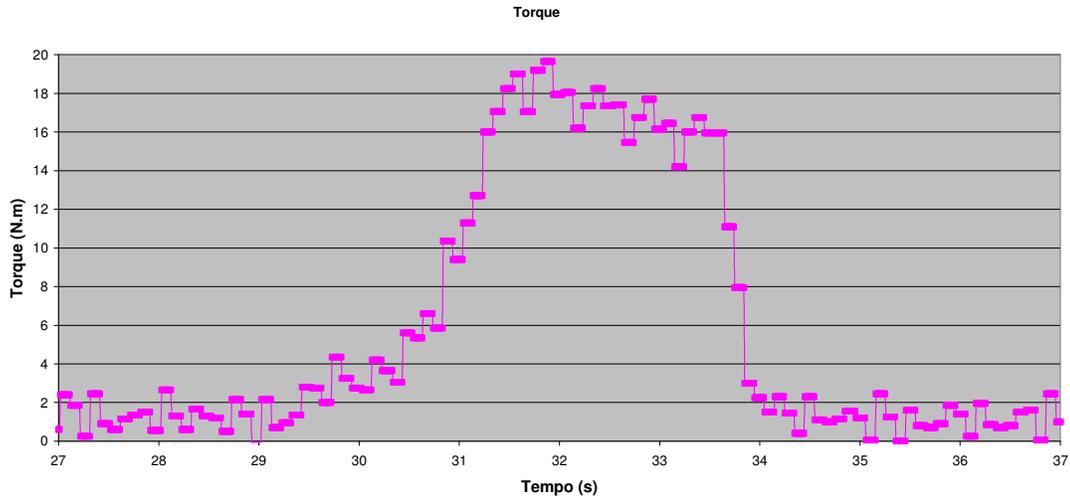


Figura 45-Curva torque vs tempo de processo para a amostra F7- soldada com 1000 RPM.

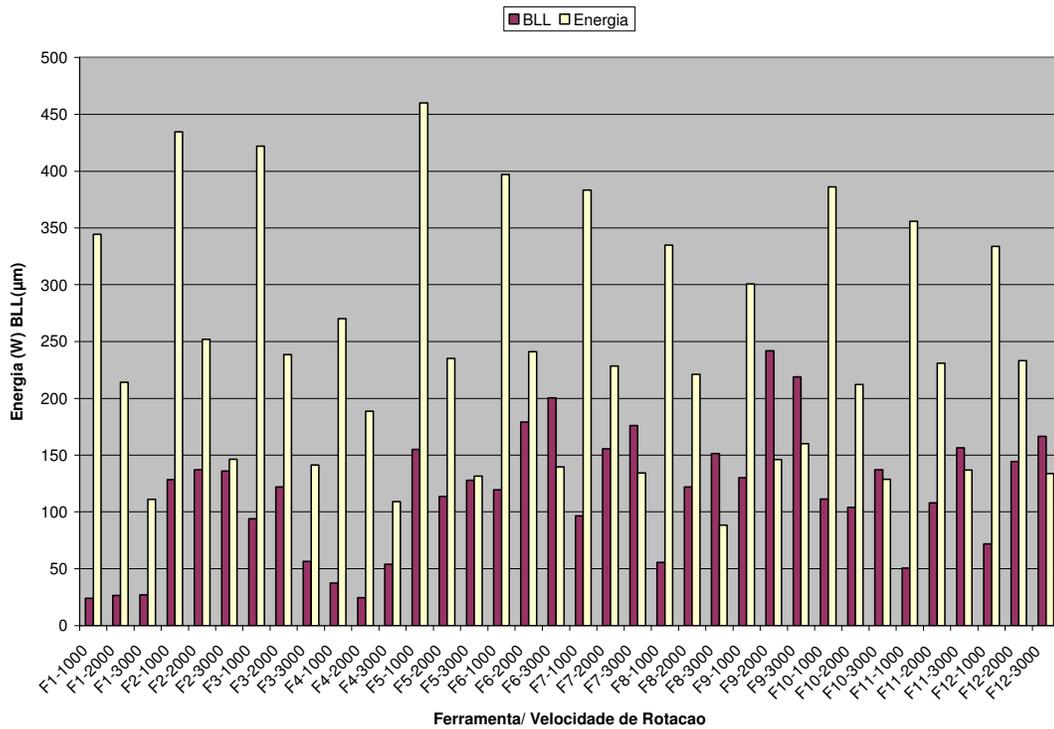


Figura 46- Valores obtidos de CL e suas respectivas energias alcançadas durante o processo.

North e Su [30], e também Tier [48], destacam que a velocidade de rotação desenvolve um importante papel no desempenho mecânico das juntas soldadas. Deste modo, é possível que o aporte de energia tenha também uma forte correlação com o desempenho mecânico. Assumindo que toda a energia mecânica aplicada durante o processo resulte em energia térmica, Su e North [30] apresentam a seguinte equação para SPFMM:

$$Q_{applied} = \sum_{n=1}^{n=N} \text{Tool Vertical } Force(n)(x_n - x_{n-1}) + \sum_{n=1}^{n=N} \text{Tool rotation } Torque(n)\omega(n)\Delta t$$

Equação 9

Onde “ $Q_{applied}$ ” é a energia térmica resultante do processo, “Force” é a força axial aplicada devido ao movimento vertical da ferramenta, “X” é a profundidade de penetração da ferramenta, “Torque” é o torque associado a rotação da ferramenta, “ ω ” é a velocidade angular da ferramenta (rad/s) e “ Δt ” é o tempo de processo.

De acordo com Su e North [30] para a solda SPFMM da liga AA6061-T6 a quantidade de energia térmica para a segunda parte da equação é aproximadamente 200 vezes maior que a energia associada à primeira parte da equação. Deste modo, pode-se assumir que a primeira parte da equação é irrelevante e pode ser eliminada. Portanto, a equação de uma maneira simplificada pode ser escrita da seguinte forma:

$$Q_{applied} = \sum_{n=1}^{n=N} Torque(n)\omega(n)\Delta t$$

Equação 10

Também no trabalho de Su e North [30] foi observada a redução do torque máximo alcançado no processo quando se utiliza maiores velocidades de rotação. Os autores atribuem tal fenômeno a redução da viscosidade do material em altas rotações. Deste modo assume-se que o termo “Torque. ω ” da equação 2 é quase uma constante e, então, é possível concluir que a principal variável que afeta o aporte térmico de energia é o tempo de processo. Como o tempo de processo não foi variado nos ensaios realizados, pois se buscava tempos curtos de processo equivalentes aos tempos estimados para a solda ponto por resistência, essa variação não pode ser observada.

4.2.2 Mg AZ31

Para o magnésio as medições apontaram valores mais baixos de torque em comparação com o alumínio, isso pode ser associado a mais baixa resistência mecânica do material. Não foram observadas diferenças relevantes entre os dois valores empregados de velocidade de rotação, provavelmente devido a pouca diferença de velocidade.

Velocidades mais baixas de rotação foram testadas sem sucesso, não se obtendo a consolidação da solda. A Figura 47 mostra um exemplo da evolução da força durante o processo de soldagem por SPFMM do magnésio.

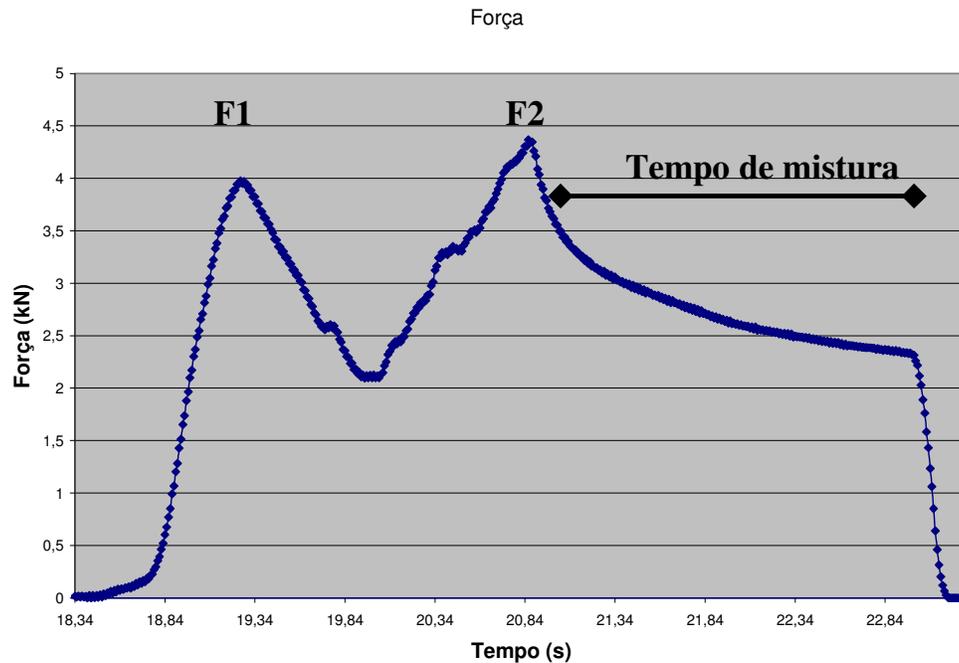


Figura 47- Evolução da força durante o processo de soldagem por SPFMM do magnésio AZ31 onde se observa os picos F1 e F2 e o tempo de mistura (dwell time). Amostra F5-3000 RPM.

Os valores obtidos de forças e torques medidos durante o processo para a soldagem da liga de magnésio foram dispostos em um gráfico observado na Figura 48.

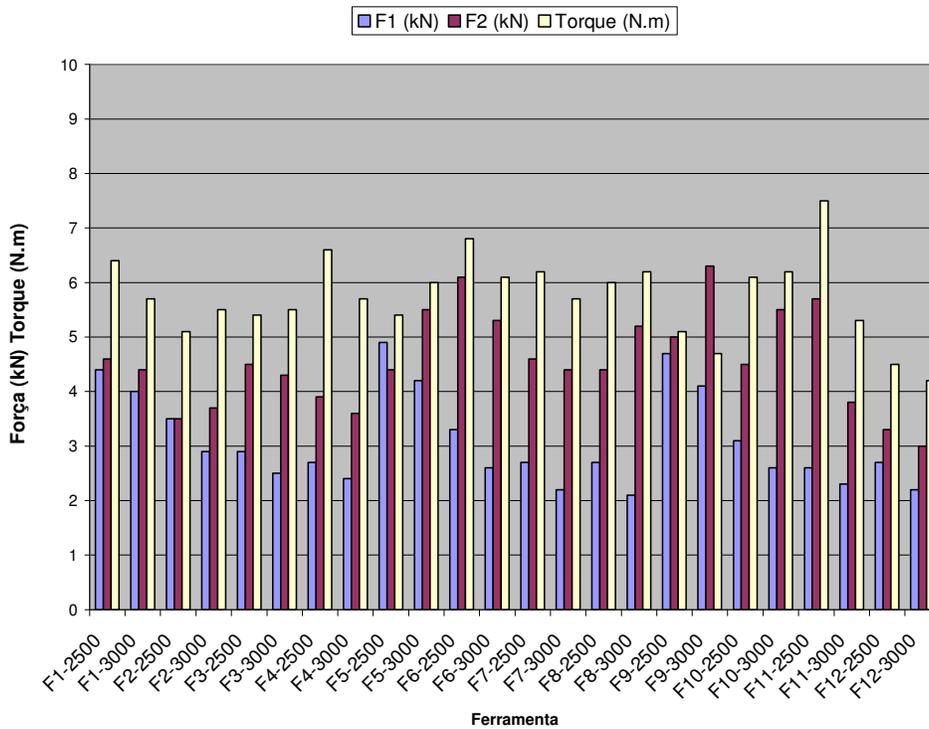


Figura 48- Valores máximos de força e torque obtidos na soldagem de magnésio.

Os dados a seguir relacionam os valores dos torques e forças do processo mantendo-se o ombro fixo:

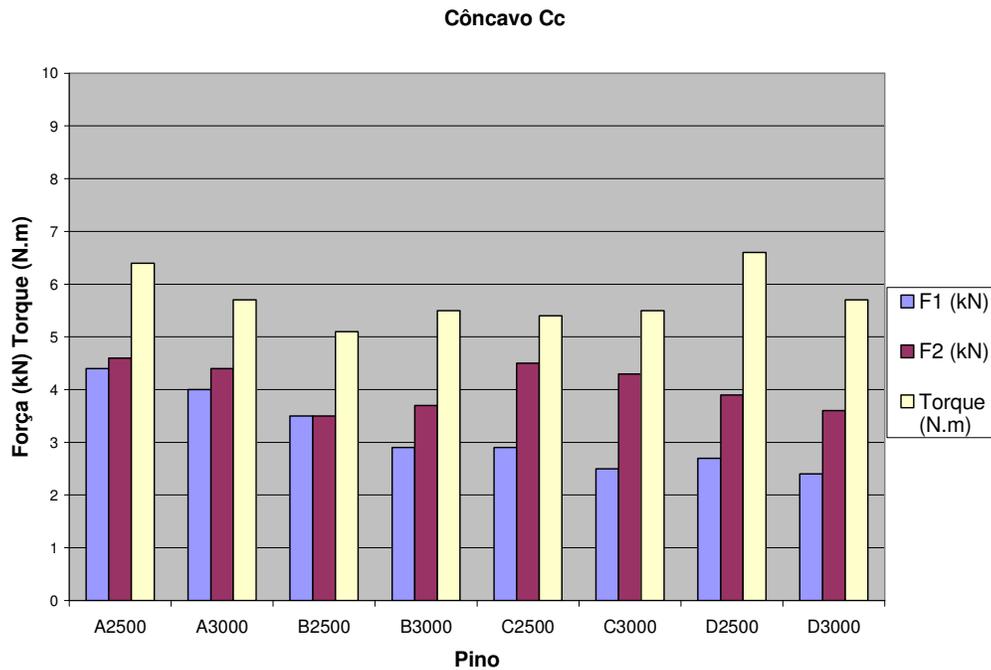


Figura 49- Diagrama mostrando a relação entre os pinos e respectivas velocidades de rotação, se fixando ombro côncavo da ferramenta.

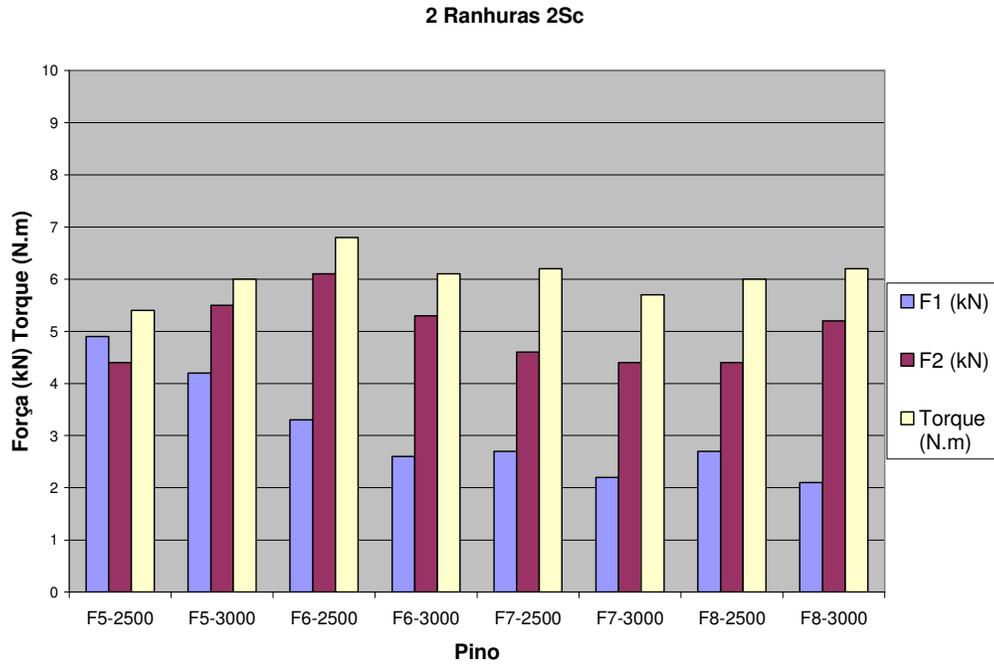


Figura 50- Diagrama mostrando a relação entre os pinos e respectivas velocidades de rotação, se fixando ombro com duas ranhuras da ferramenta.

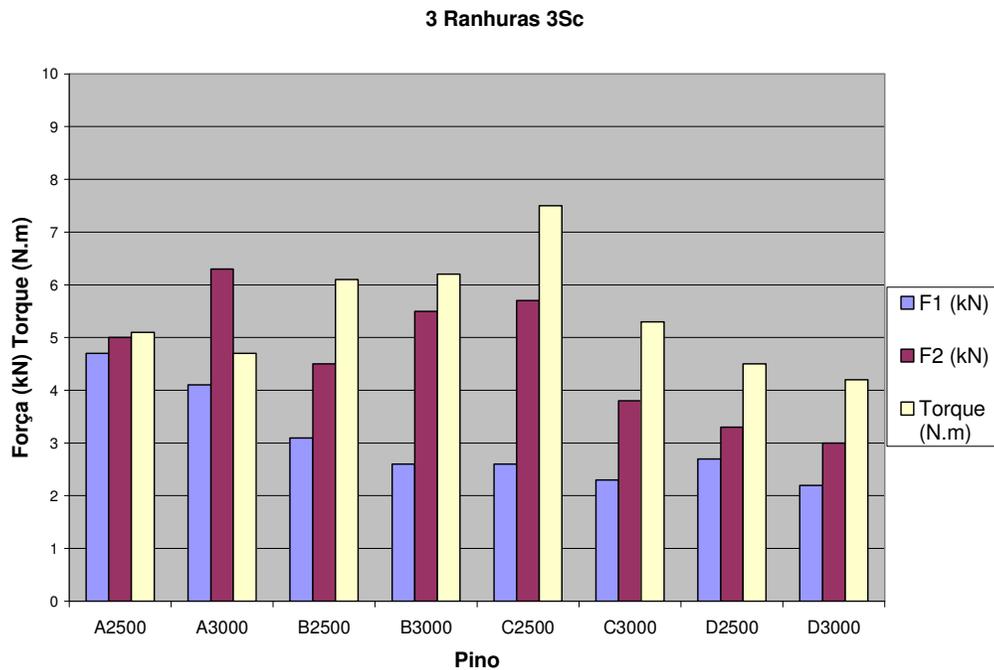


Figura 51- Diagrama mostrando a relação entre os pinos e respectivas velocidades de rotação, se fixando ombro com três ranhuras da ferramenta.

Diferentemente do alumínio, os valores não seguiram um padrão. Foi estabelecida, então, uma relação entre torques e forças medidos durante o processo mantendo-se os pinos das

ferramentas constantes, e variando-se o ombro. Para tentar estabelecer se existe algum padrão nestas relações. A Figura 52 mostra o efeito do ombro sobre o torque produzido.

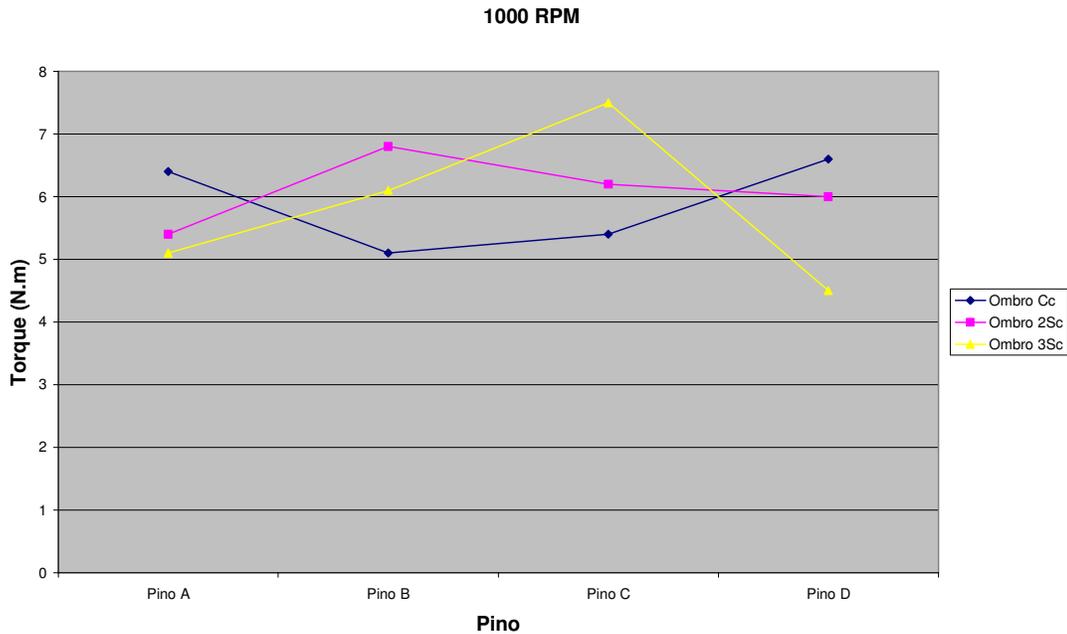


Figura 52- Relação entre o torque produzido de acordo com as diferentes ferramentas utilizadas.

Neste caso pode-se observar um comportamento similar entre os ombros que apresentam duas e três ranhuras helicoidais. Onde se percebeu valores mais altos de torque para os perfis de pinos B e C, que eram os mais semelhantes entre si, o ombro côncavo mostrou um comportamento contrário, apresentando menores valores de torque para as combinações com os perfis de pino B e C. Muito provavelmente a quantidade de material preso à ferramenta vai modificar os valores produzidos de torque durante o processo, desta forma, os melhores perfis a serem escolhidos para a produção das soldas serão os perfis que impedirem a aderência do material na ferramenta. O pino D é um caso típico de perfil indesejado para estes casos, pois os três prolongamentos do pino que no alumínio são interessantes para capturar material da chapa superior e misturá-lo ao material da chapa inferior atuam neste caso como um local onde o magnésio adere e fica. Não sendo misturado com a chapa inferior.

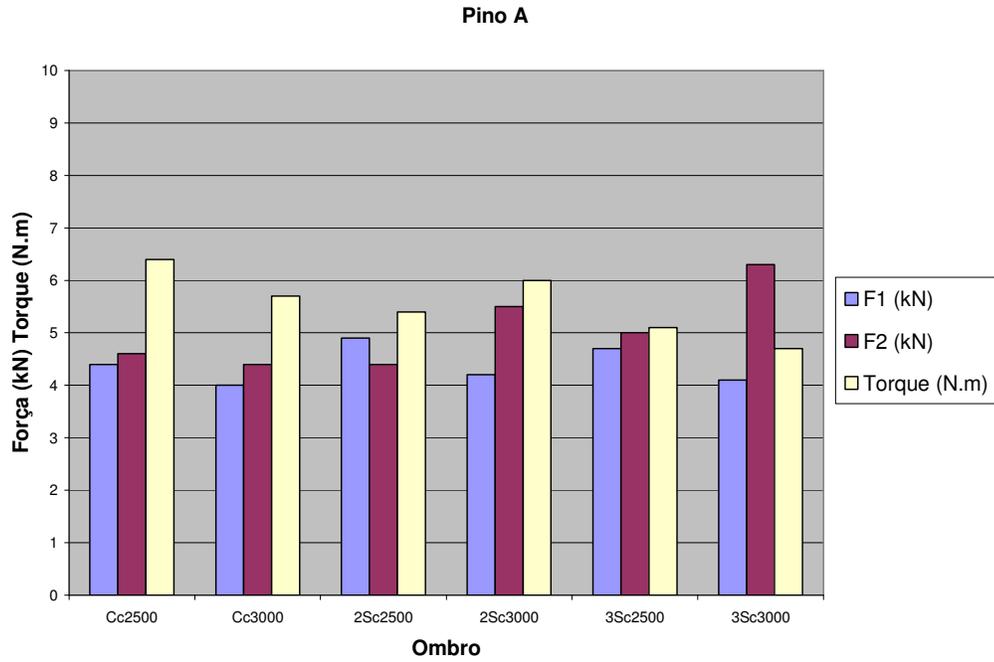


Figura 53- Diagrama mostrando a relação entre diferentes ombros e respectivas velocidades de rotação, se fixando o pino A.

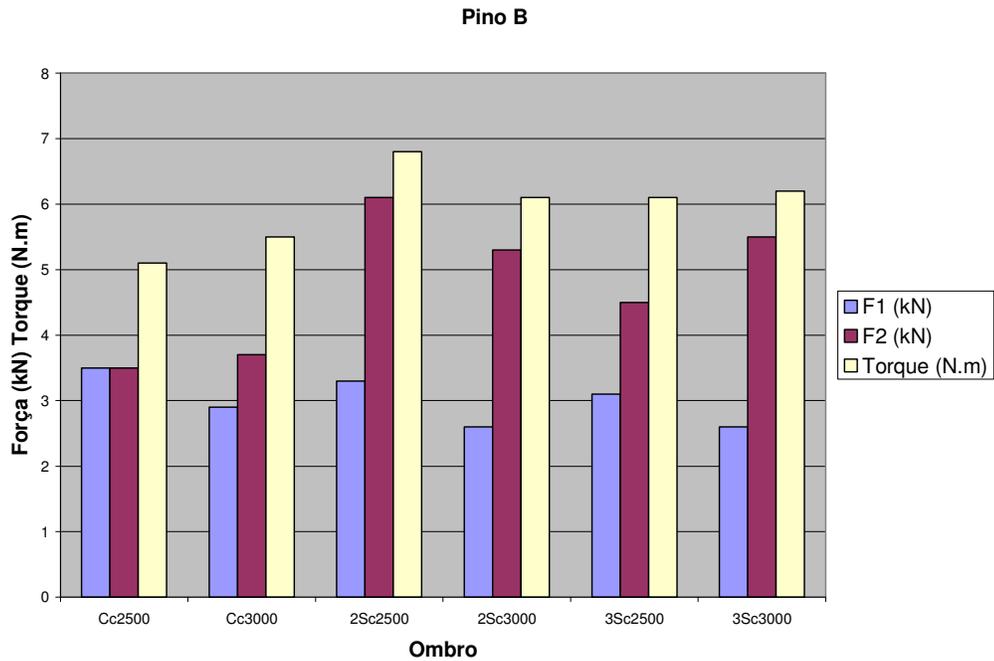


Figura 54- Diagrama mostrando a relação entre diferentes ombros e respectivas velocidades de rotação, se fixando o pino B.

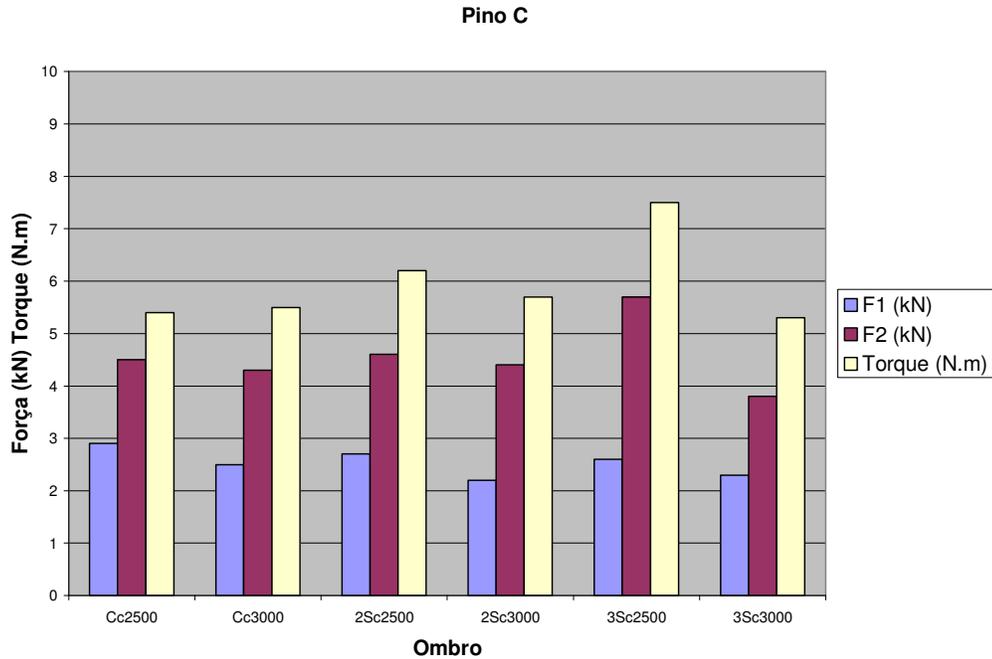


Figura 55- Diagrama mostrando a relação entre diferentes ombros e respectivas velocidades de rotação, se fixando o pino C.

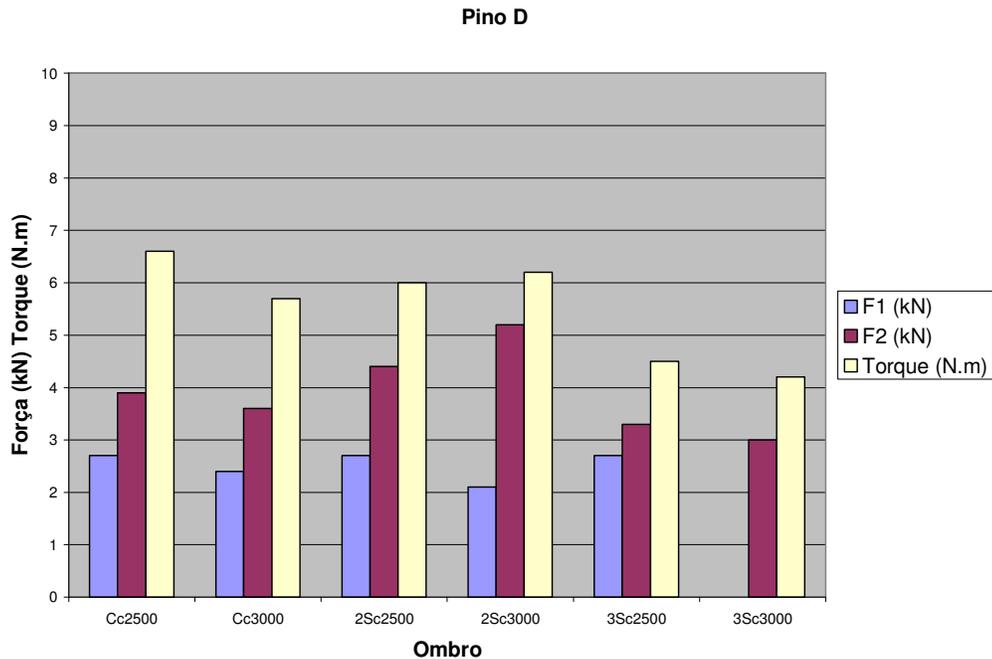


Figura 56- Diagrama mostrando a relação entre diferentes ombros e respectivas velocidades de rotação, se fixando o pino D.

A força apresentou picos F1 menores que F2 na maioria das vezes. Porém, também houve casos de pico F1 igual ou maior que F2, assim como aconteceu para o alumínio. Uma tendência que não se observou para o magnésio e ficou bastante marcante para o alumínio

foi o decréscimo quase linear do torque com o aumento da velocidade de rotação. Este comportamento aleatório pode ser explicado pela característica do material de emplastar na ferramenta. Os valores obtidos de torque máximo foram dispostos em diagramas para tentar obter alguma relação entre a ferramenta e o torque produzido. A Figura 57 mostra o efeito do ombro no torque e a mostra o efeito do pino.

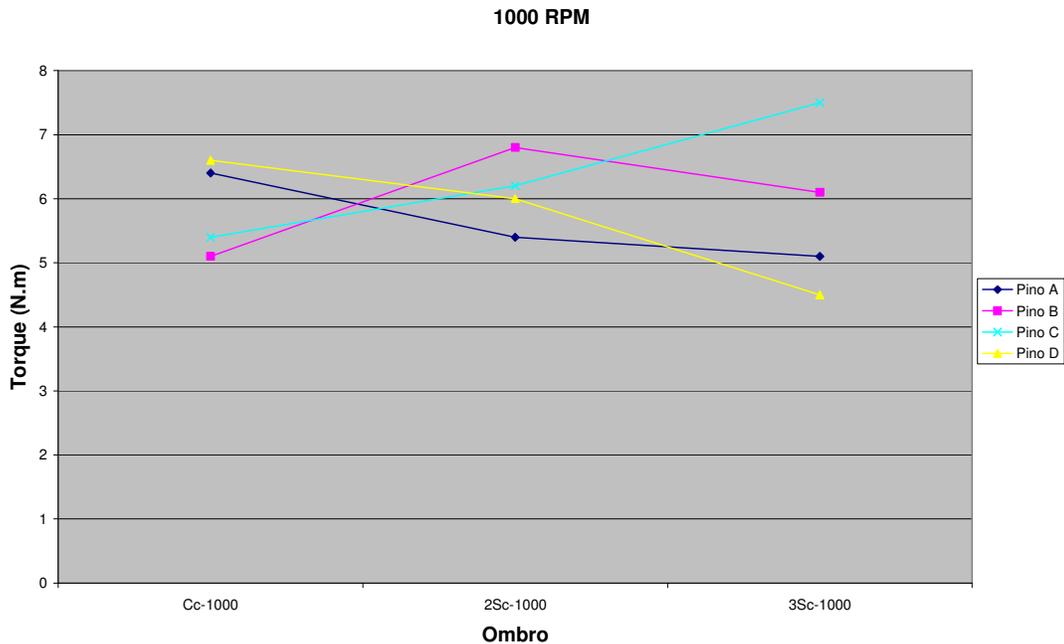


Figura 57- Relação entre o torque produzido de acordo com as diferentes ferramentas utilizadas.

Novamente neste caso os perfis mais semelhantes mostram comportamentos similares. A combinação dos pinos A e D com o ombro côncavo produziram os torques mais altos juntamente com as combinações dos pinos B e C com o ombro com três helicóides.

4.3 Caracterização metalográfica

4.3.1 AA 6181

As seções transversais preparadas para metalografia foram atacadas com o reagente Barker's para poder ser feita a sua observação em microscopia ótica. As macrografias destas amostras podem ser observadas nas figuras que seguem e estão dispostas de acordo com a ferramenta utilizada.

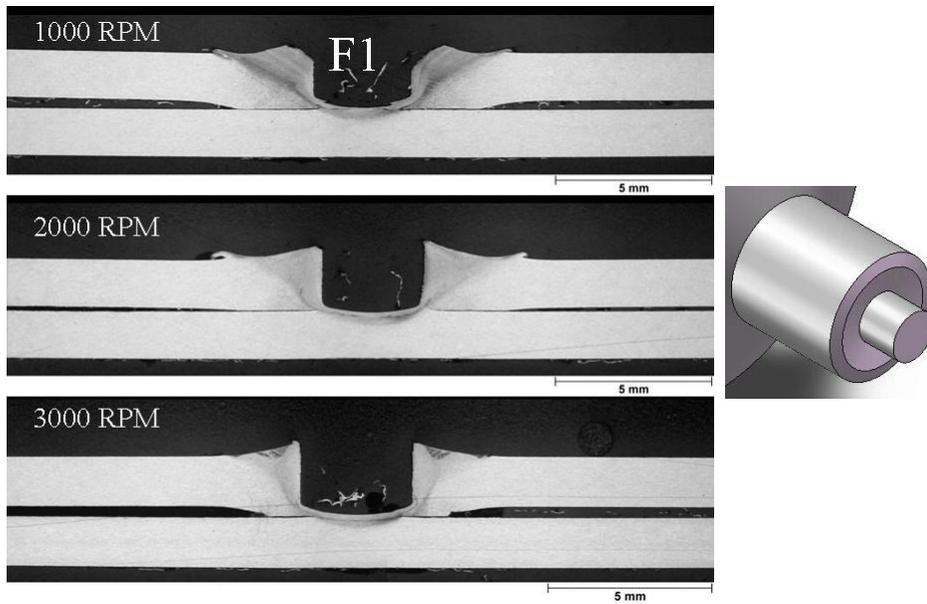


Figura 58- Macrografia das amostras soldadas nas três velocidades de rotação com a ferramenta F1.

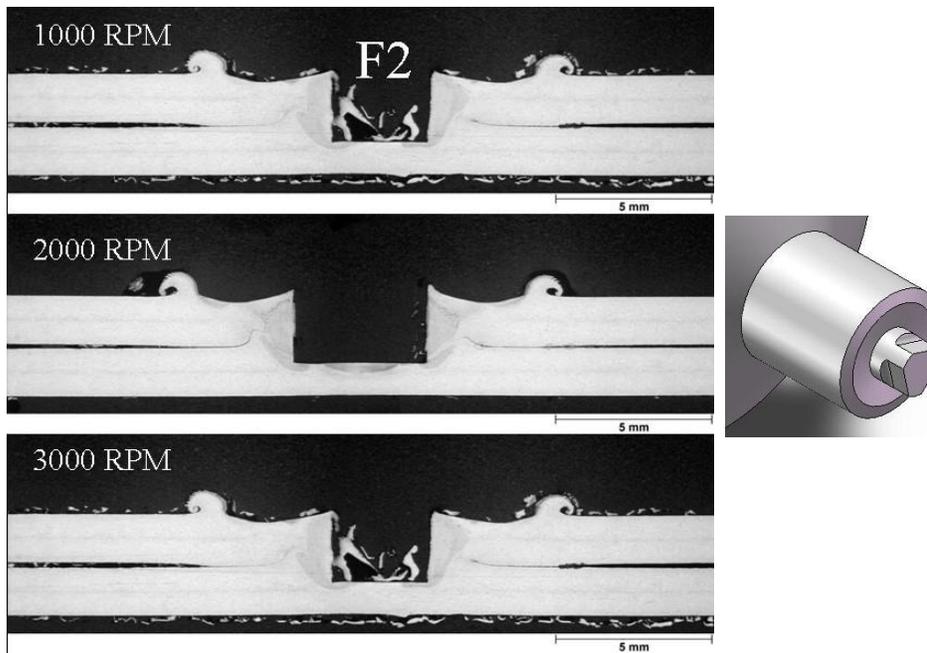


Figura 59- Macrografia das amostras soldadas nas três velocidades de rotação com a ferramenta F2.

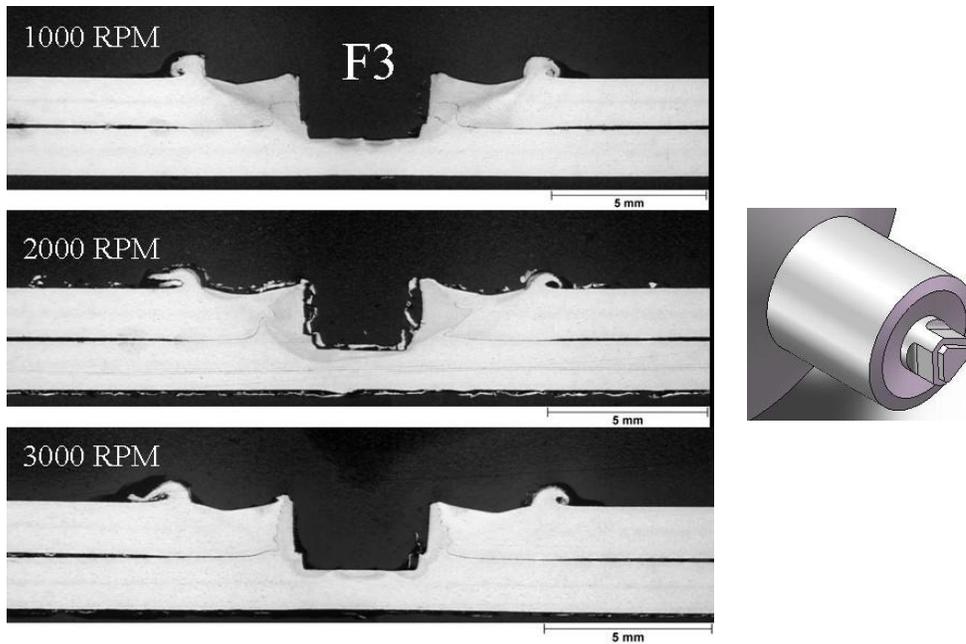


Figura 60- Macrografia das amostras soldadas nas três velocidades de rotação com a ferramenta F3.

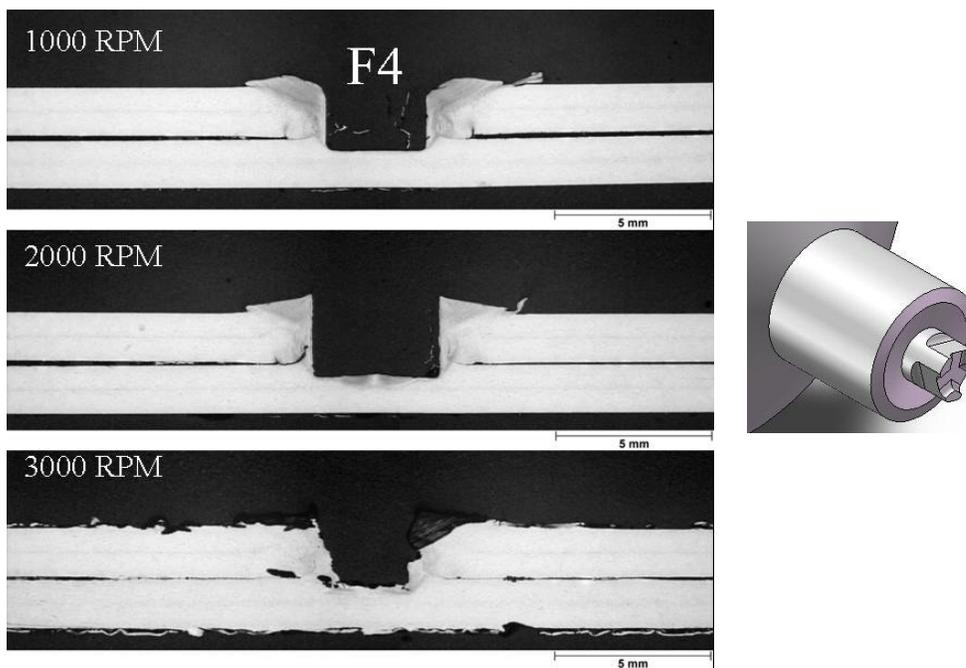


Figura 61- Macrografia das amostras soldadas nas três velocidades de rotação com a ferramenta F4.

As imagens da Figura 58 até a Figura 61 mostram os resultados obtidos nas macrografias realizadas para amostras soldadas utilizando-se o ombro côncavo e as quatro variedades de pino. O que se pode observar é que a região côncava do ombro é preenchida por material expelido da junta. Por isso se observa um ressalto nas bordas no furo remanescente. A

largura da zona de mistura foi maior para amostras soldadas em menores velocidades de rotação, seguindo o mesmo princípio da SPFMMPFR e da SFMM. A condição de contato entre a ferramenta e a junta (emplastramento ou deslizamento) que determinam a quantidade de material envolvido no processo.

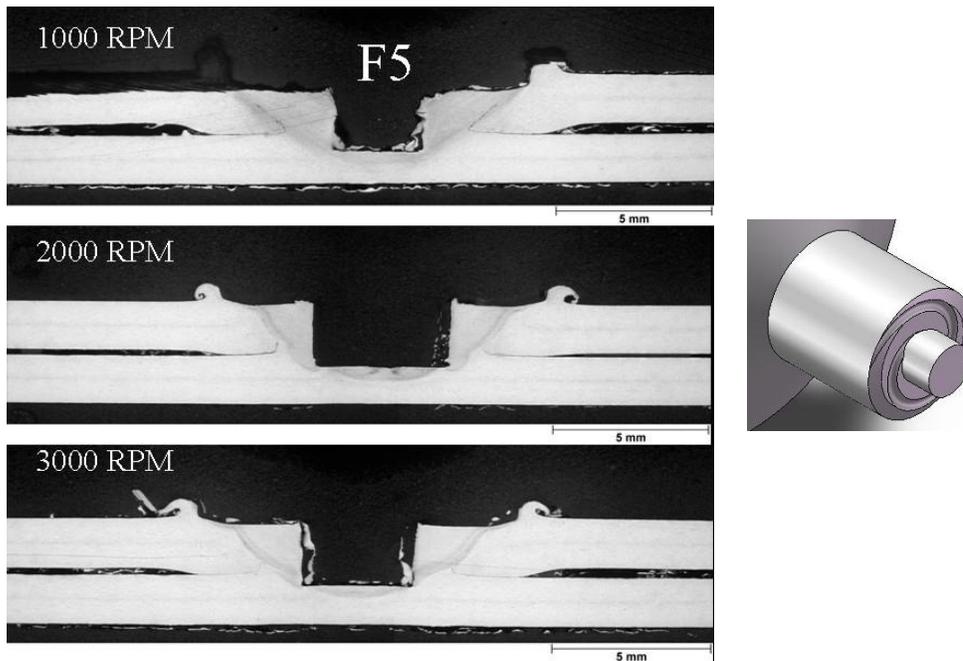


Figura 62-Macrografia das amostras soldadas nas três velocidades de rotação com a ferramenta F5.

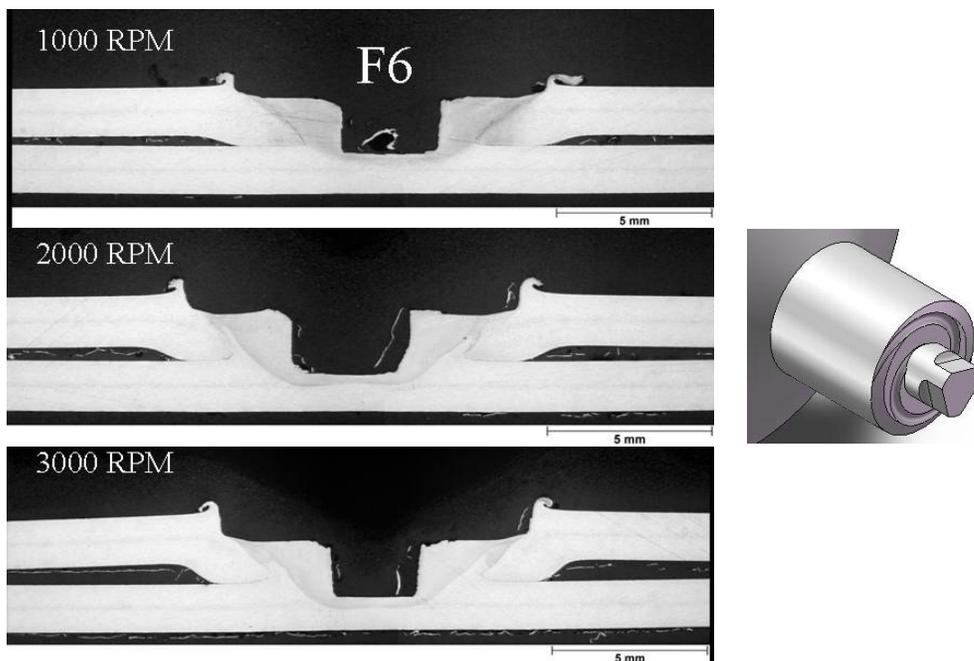


Figura 63- Macrografia das amostras soldadas nas três velocidades de rotação com a ferramenta F6.

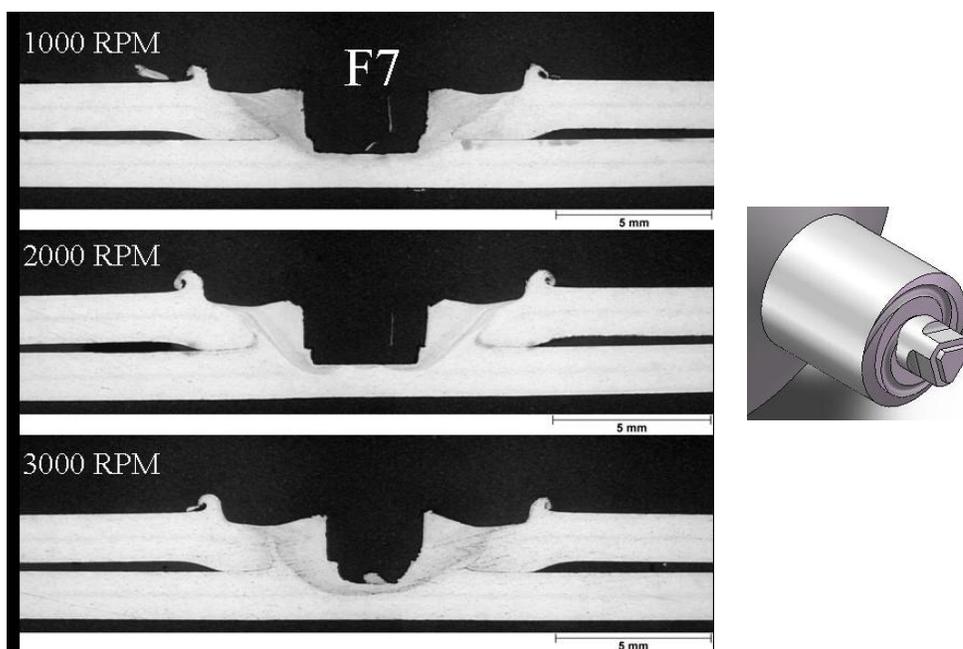


Figura 64- Macrografia das amostras soldadas nas três velocidades de rotação com a ferramenta F7.

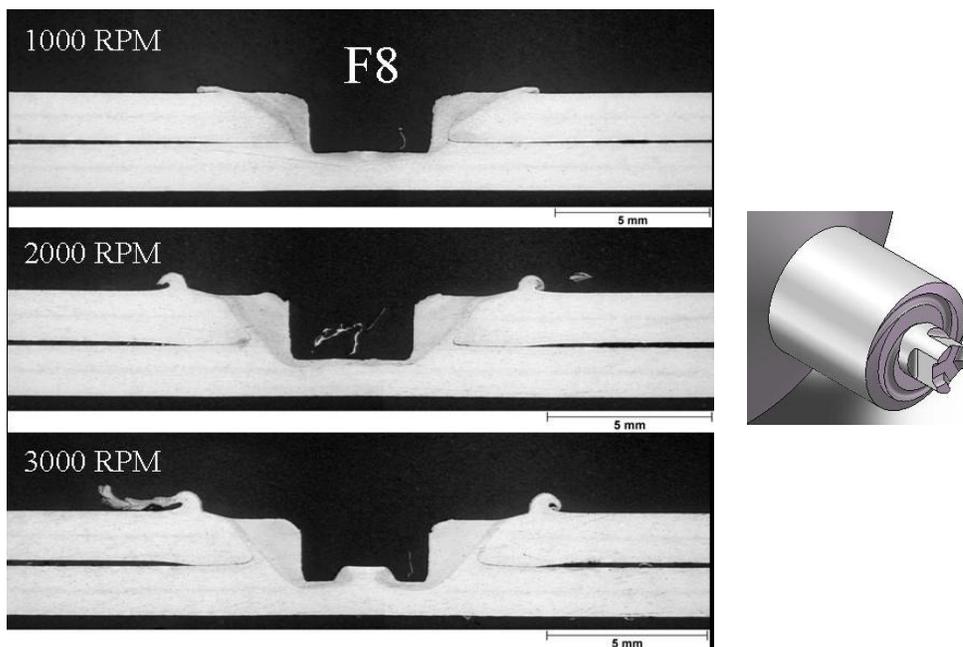


Figura 65- Macrografia das amostras soldadas nas três velocidades de rotação com a ferramenta F8.

As imagens da Figura 62 até a Figura 65 mostram os resultados obtidos nas macrografias realizadas para amostras soldadas utilizando-se o ombro com duas espirais e as quatro variedades de pino. O ressalto que aparecia nas bordas do furo não foi observado neste

caso, onde o ombro tem um perfil mais plano. Novamente as amostras que foram soldadas em maiores velocidades de rotação apresentaram uma menor zona de mistura, entretanto, com maiores velocidades de rotação que se obtiveram as maiores camadas de ligação.

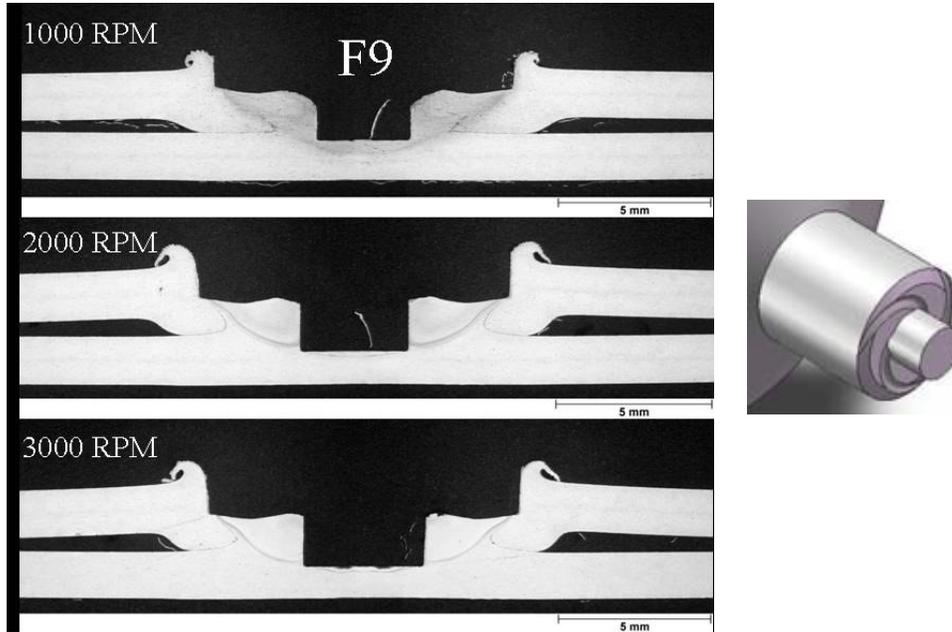


Figura 66-Macrografia das amostras soldadas nas três velocidades de rotação com a ferramenta F9.

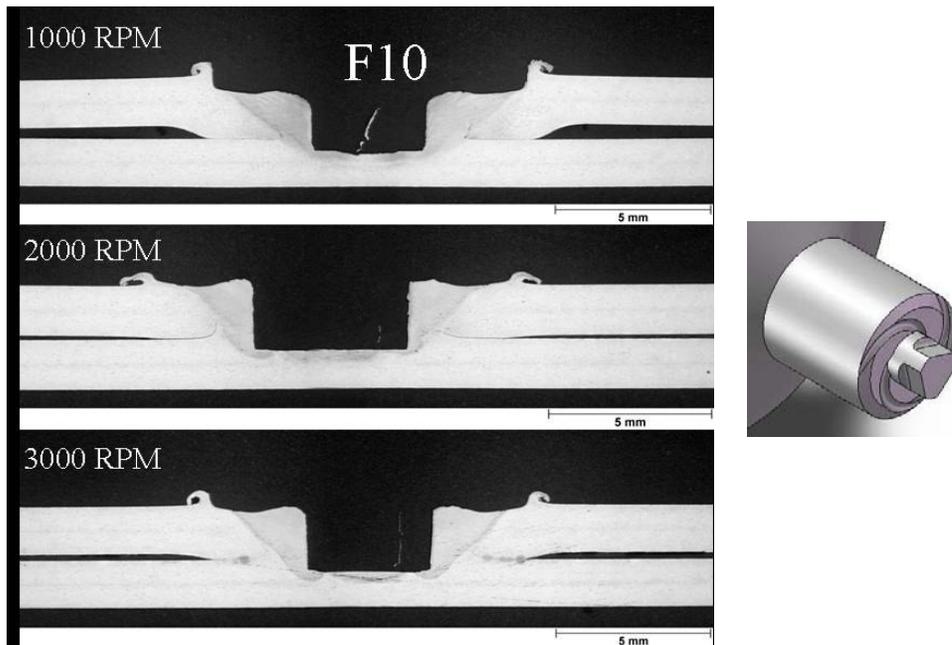


Figura 67-Macrografia das amostras soldadas nas três velocidades de rotação com a ferramenta F10.

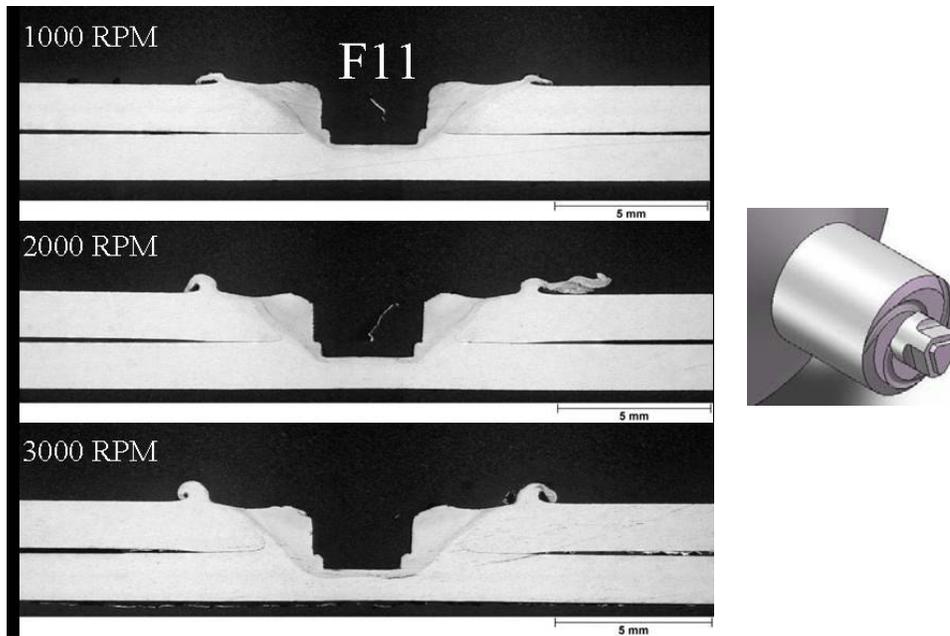


Figura 68- Macrografia das amostras soldadas nas três velocidades de rotação com a ferramenta F11.

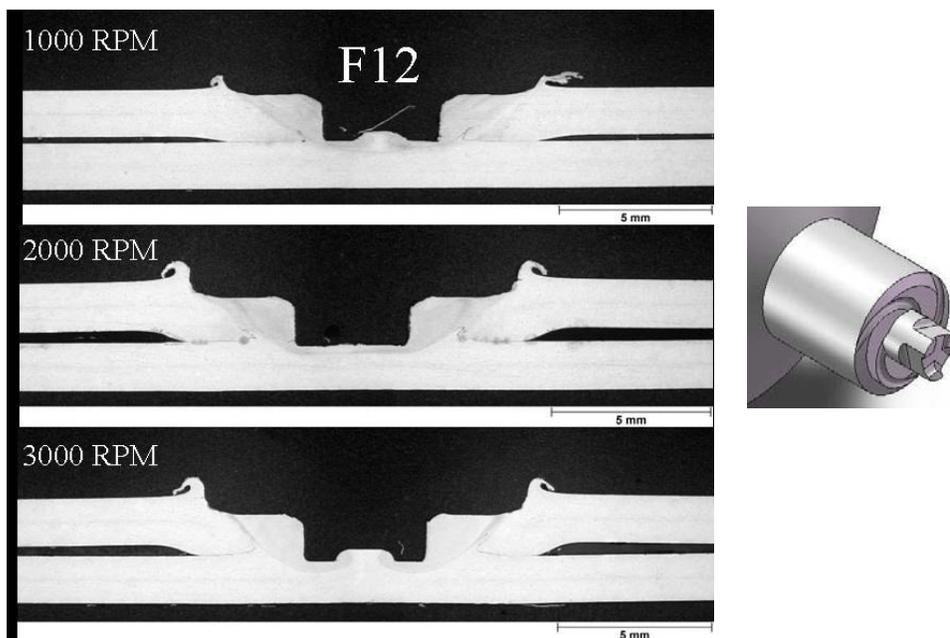


Figura 69- Macrografia das amostras soldadas nas três velocidades de rotação com a ferramenta F12.

As imagens da Figura 66 até a Figura 69 mostram os resultados obtidos nas macrografias realizadas para amostras soldadas utilizando-se o ombro com três espirais e as quatro variedades de pino. As mesmas tendências observadas para amostras soldadas com ombro de duas espirais foram observadas para as amostras soldadas com o ombro de três espirais. Os valores de comprimento da camada de ligação foram dispostos em um gráfico para

poder ser avaliada a influência das diferentes ferramentas e velocidades de rotação sobre o comprimento desta camada.

A Figura 70 mostra que o ombro côncavo produziu as soldas com as menores larguras de CL dentre os três ombros utilizados. Provavelmente a cavidade côncava é preenchida com material da chapa superior, aliviando a pressão da região da interface, o que pode fazer com que naquela região ocorra menor plastificação de material. Os pinos apresentaram diferentes comportamentos com relação aos diferentes ombros, o pino A, por exemplo, apresentou à menor largura de CL dentre todas as ferramentas quando utilizado com o ombro côncavo, porém, quando utilizado juntamente com o ombro de três espirais, obteve o maior valor de CL. Isto dá indícios da interação entre o ombro e o pino da ferramenta. Ou seja, uma combinação pode ser benéfica enquanto a outra não.

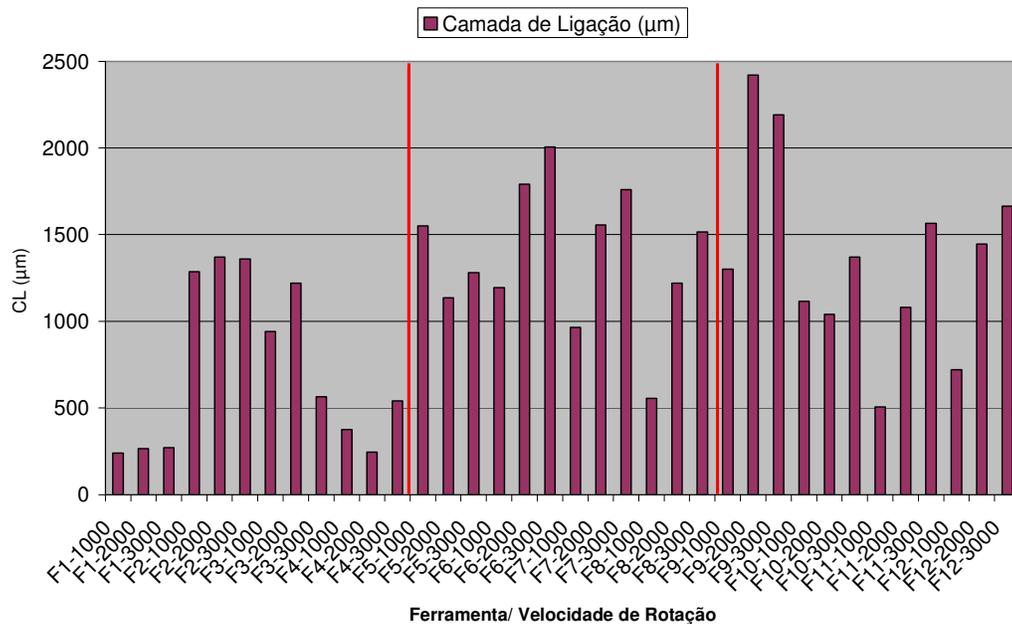


Figura 70- Valores obtidos de CL para amostras soldadas de alumínio. Os valores foram medidos nas amostras de metalografia. As linhas vermelhas separam os diferentes ombros utilizados.

As macros apresentam basicamente a formação de três diferentes zonas na solda. A Zona de mistura (ZM), ou zona de mistura, formada logo abaixo da região de contato do ombro da ferramenta com a chapa superior. Uma região adjacente a ZM chamada Thermo Mechanically Affected Zone, ou região termo-mecanicamente afetada (ZTMA), que é uma região onde se observa grãos deformados ou mesmo parcialmente recristalizados. É uma região onde os efeitos do pino e do ombro não são tão fortes quanto na ZM. Existe ainda,

mesmo que não se observe através da macrografia, a presença de uma zona termicamente afetada (ZTA), que é a zona onde apenas a influência dos gradientes de temperatura formados no processo tem relevância. A Figura 71 mostra as diferentes zonas observadas na macrografia.

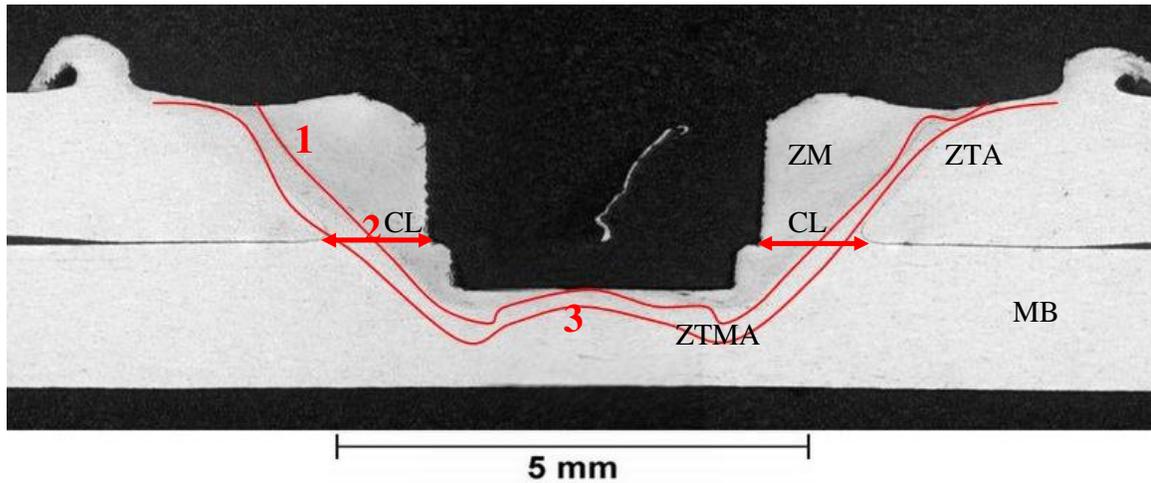


Figura 71- Imagem mostrando as diferentes zonas da solda observadas em microscopia ótica. Ferramenta F7, 1000 RPM.

Z. Feng [14] atribui a resistência mecânica da solda à largura da camada de ligação (CL). A camada de ligação é a coroa circular que se forma após a solda ser consolidada e que será a região efetiva que suportará os carregamentos. A Figura 72 mostra diferentes espessuras de CL formadas com uma mesma ferramenta, porém com velocidades de rotação diferentes.

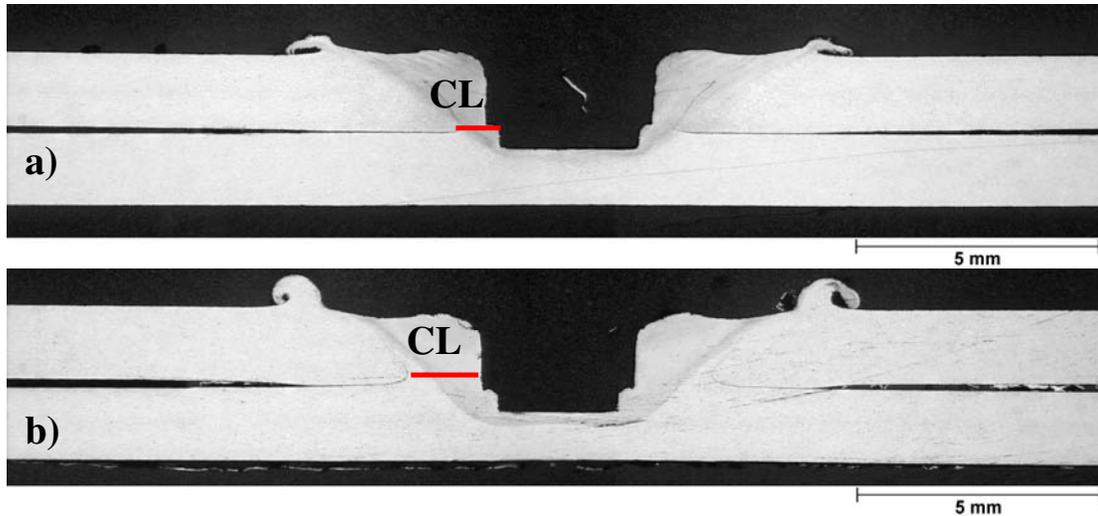


Figura 72- A imagem mostra corpos de prova soldados com a mesma ferramenta (F11), porém com velocidades de rotação diferentes, onde pode ser percebida a diferença de espessuras de CL. a) 1000 RPM e b) 3000 RPM.

De uma maneira geral, as espessuras de CL aumentaram com o aumento da velocidade de rotação. De onde pode se esperar, também, que serão obtidos maiores valores de resistência mecânica para estas condições de soldagem. Mishra et al [49] encontrou baixos valores de CL em seu trabalho utilizando velocidades de rotação de 1500- 3000 RPM na soldagem da liga AA 5754. Entretanto, sugere que valores maiores de CL podem ser obtidos através da modificação da geometria da ferramenta e dos parâmetros de processo. desta forma, acredita-se que o aumento da velocidade de rotação, mesmo reduzindo o tamanho da ZM, pode acarretar em maiores espessuras de CL. Adison et al [20], verificou em seu trabalho efeito semelhante, para maiores velocidades de rotação se obteve maiores forças cisalhantes no ensaio de cisalhamento, assim como a região soldada foi maior. Aparentemente, a utilização de maiores velocidades de rotação ocasiona um maior fluxo de material da chapa inferior para a chapa superior aumentando, deste modo, a região soldada. Para uma melhor avaliação desta correlação, medições de temperatura devem ser feitas na região de interface e caracterizações de fluxo de material de amostras soldadas com diferentes velocidades de rotação devem ser feitas. Estes pontos devem ser desenvolvidos em trabalhos futuros.

Foram realizadas imagens das amostras nas regiões indicadas na Figura 71. A Figura 73 mostra a região 1 em magnificações diferentes, onde pode ser observada a ZM, com seus grãos recristalizados e também os grãos deformados da ZTMA.

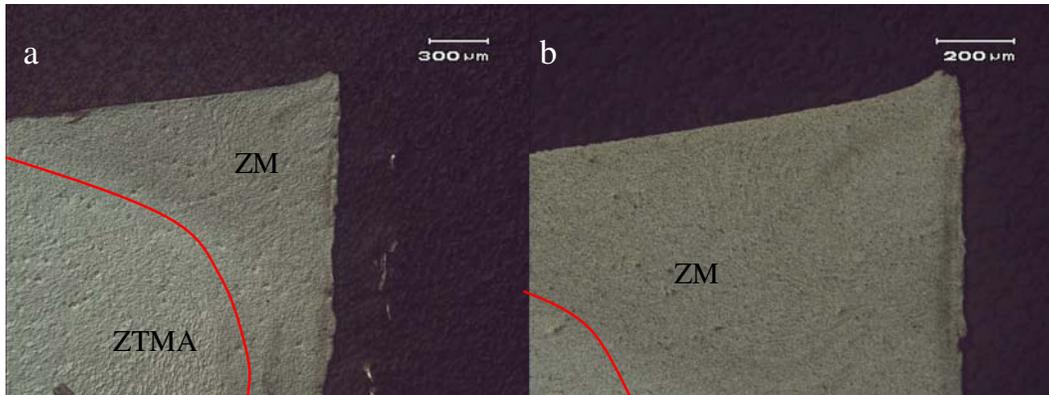


Figura 73- Imagem mostrando a micrografia da região 1, onde pode ser observada a ZM do material. a) Menor aumento e b) maior aumento. Amostra F4-2000 RPM.

A Figura 74 mostra a região da interface entre a chapa superior e inferior (região 2), onde pode ser observado detalhadamente a deformação característica dos grãos da ZTMA.

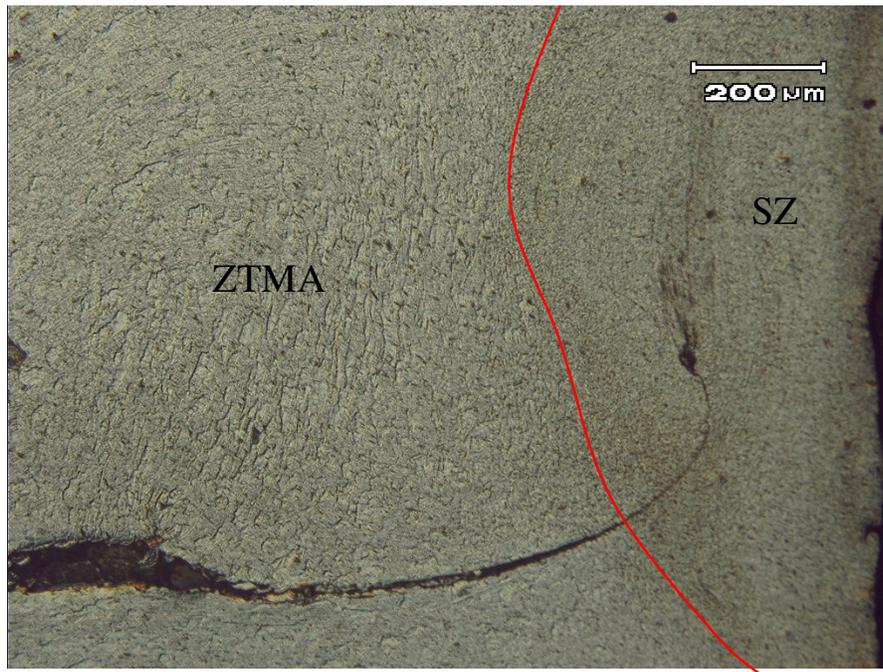


Figura 74- Imagem mostrando a microestrutura da região 2, onde se observa os grãos deformados da ZTMA, a interface entre as chapas inferior e superior e ainda uma parte da ZM. Amostra F4-2000 RPM.

A Figura 75 mostra a mesma foto anterior com o efeito de negativo de fotografia aplicado à imagem, o que contrasta melhor o contorno de grão e onde podemos observar bem a variação do tamanho e forma do grão de acordo com a região da solda.

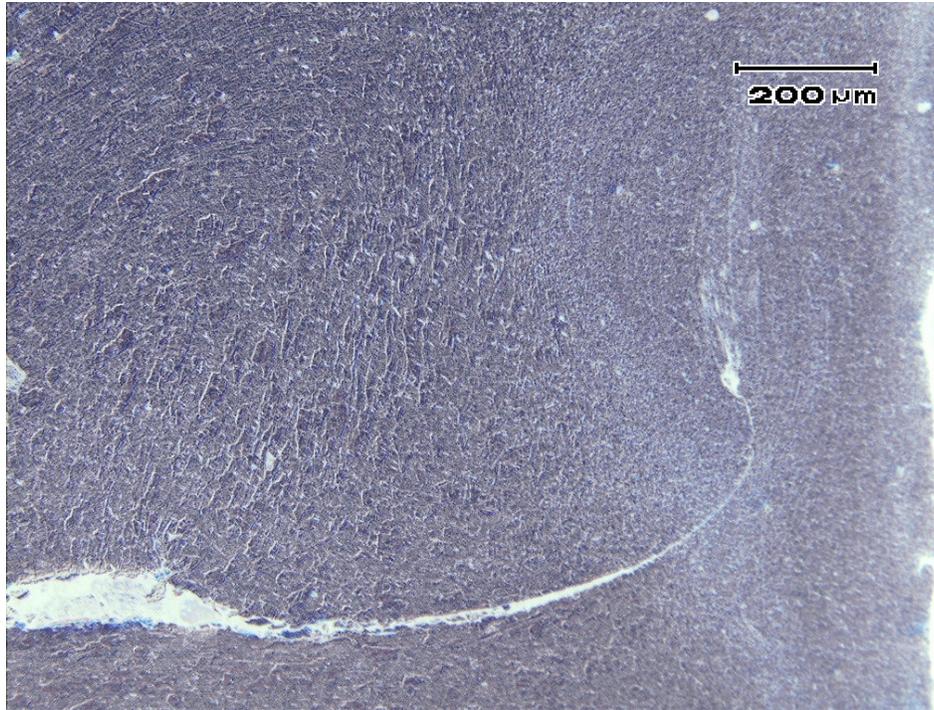


Figura 75- Mesma imagem anterior com efeito de negativo para realçar o contraste dos grãos. Amostra F4-2000 RPM.

A distinção entre as diferentes zonas é gradual, deste modo se torna difícil delinear a posição exata de cada uma delas. A observação da ZTA é facilitada através de ensaios de perfis de microdureza. A microestrutura do material de base (BM) pode ser observada na Figura 76. Pode-se perceber a clara diferença entre a microestrutura da ZM (Figura 77) e do BM, onde podemos encontrar no BM partículas de segunda fase alongadas em forma de bastão, e grãos maiores, enquanto na ZM os grãos e as partículas de segunda fase, provavelmente quebrados devido à alta energia de deformação presente no processo, são menores.



Figura 76- Micrografias do material de base (MB) mostrando partículas de segunda fase alongadas, com orientação preferencial e grãos poligonais. Amostra F4-2000 RPM.



Figura 77- Micrografia da zona de mistura (ZM). Nesta figura se observa os grãos recristalizados e as partículas de segunda fase quebradas e de menor tamanho, sem orientação preferencial. Amostra F4-2000 RPM.

Na região 3, mostrada na Figura 71, pode ser percebida a presença das três zonas, ZM, ZTMA e BM.

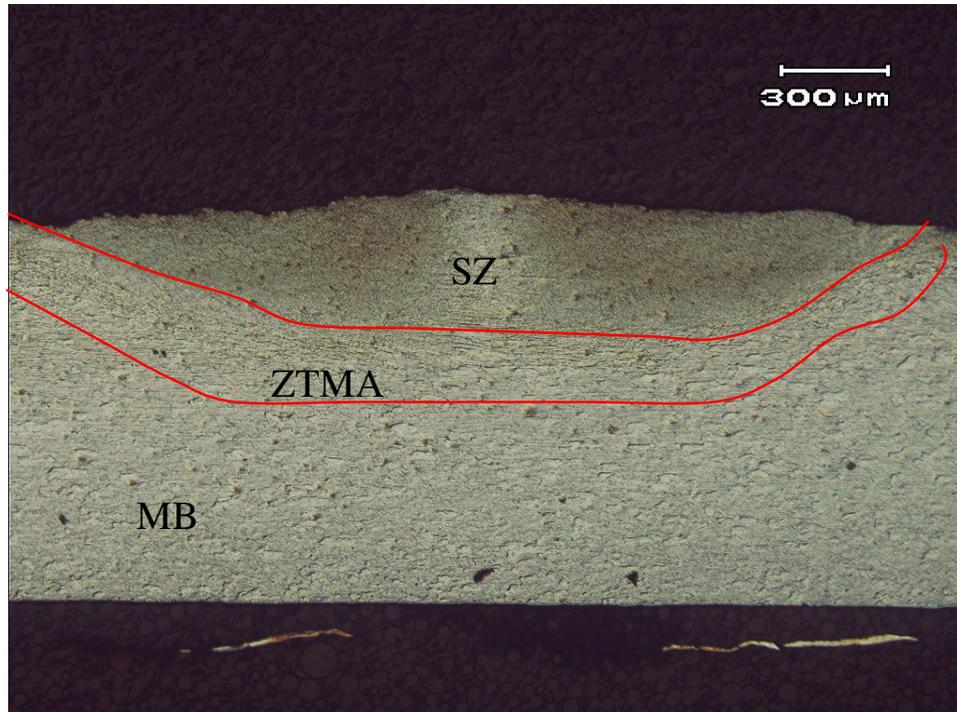


Figura 78- Imagem da região 3, mostrando a presença das três zonas da solda. Acredita-se que existe a presença de uma ZTA entre o material base e a ZTMA. Amostra F4-2000.

4.3.2 Mg AZ31

As seções transversais preparadas para metalografia foram atacadas com o reagente Picral-Acético (5mL ácido acético, 6g ácido pícrico, 10mL de H₂O e 100mL de etanol) para poder ser feita a sua observação em microscopia ótica e lupa microscópica. Provavelmente devido a utilização de velocidades de rotação de valores próximos (2500 e 3000 RPM), os resultados não apresentaram grande variação entre si. Deste modo, somente será mostrado uma macrografia para apresentar as diferentes zonas formadas. A Figura 79 mostra as diferentes zonas formadas na soldagem das chapas de alumínio, assim como a forte deformação e formação de cavaco que ocorreu em grande parte das amostras da liga AZ31 soldadas por SPFMM.

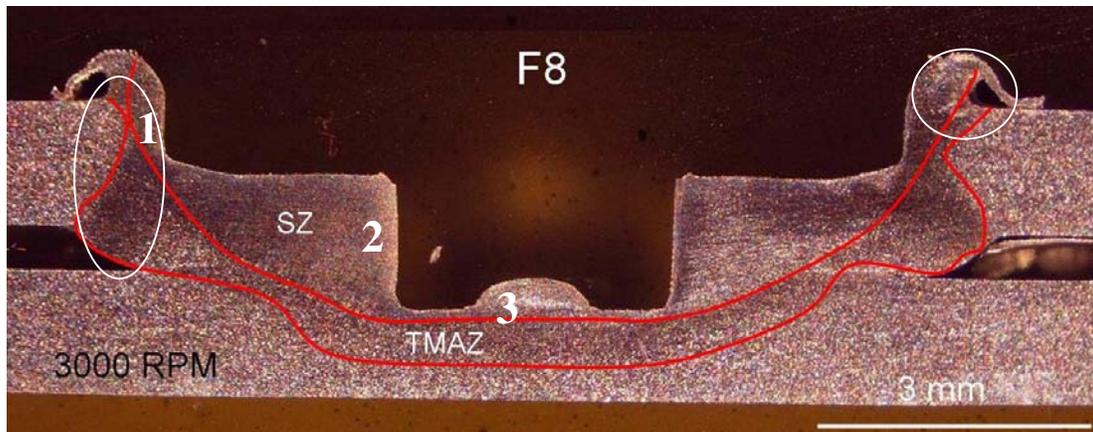


Figura 79- A figura mostra as zonas formadas na soldagem das amostras de Mg e as regiões de análise de micrografia (1, 2 e 3). A elipse maior mostra a região de grande deformação na chapa superior enquanto a elipse menor mostra a formação de rebarba. Amostra F8, 3000 RPM.

A microestrutura do material de base mostrou grãos equiaxiais, com partículas de segunda fase dispersas. Ainda foi observada a formação de maclas de deformação, que podem ser originadas nas etapas de preparação metalográfica. A microestrutura do material de base é mostrada na Figura 80 e na Figura 81.

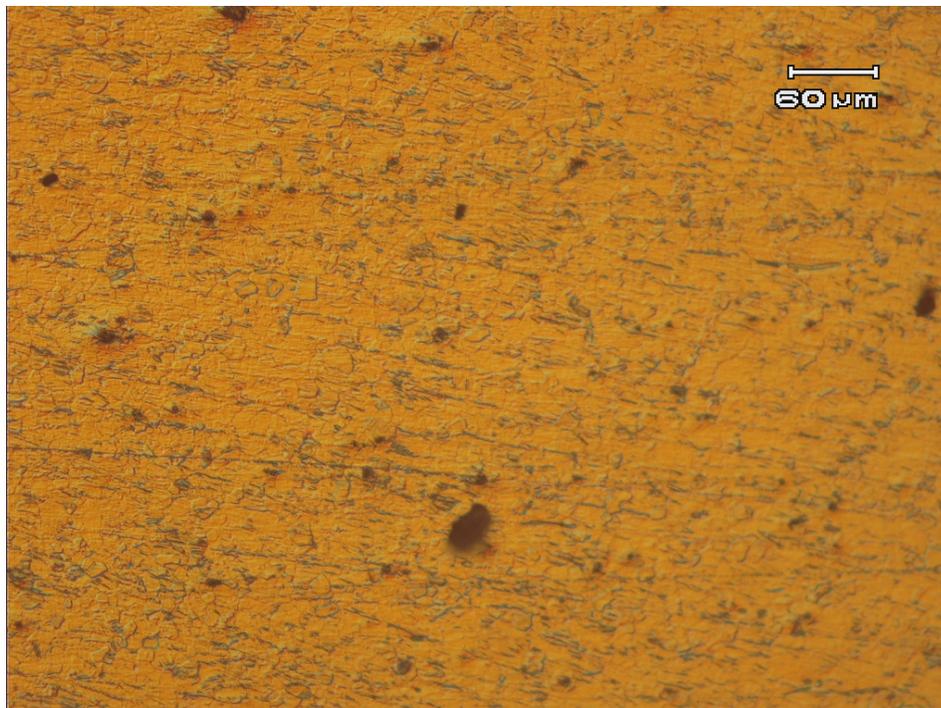


Figura 80- Micrografia do material de base, mostrando os grãos equiaxiais e partículas de segunda fase dispersas. Amostra F8, 3000 RPM.

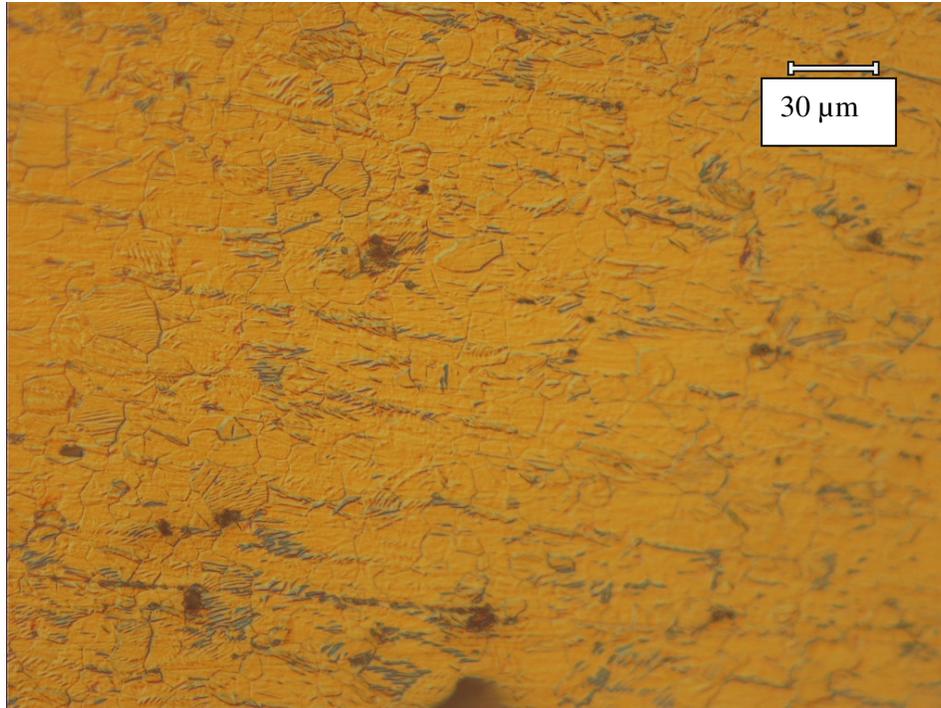


Figura 81-Micrografia do material de base em maior aumento, onde se percebe além das partículas de segunda fase dispersas, a formação de maclas de deformação. Amostra F8, 3000 RPM.

A região 1 (Figura 79) é uma região que não foi percebida em todas as soldas, já que é um local de contato da parte lateral do ombro da ferramenta com o núcleo do material. A microestrutura desta região não foi muito afetada, embora os grãos sofram alguma distorção devido ao fluxo de material, pois não é uma região de alta energia como a região adjacente ao pino da ferramenta. A Figura 82 e a Figura 83 mostram a micrografia realizada nesta região. Não foi observada também uma grande diferença entre os diferentes perfis de ferramenta. Provavelmente, o material que adere na ferramenta durante a soldagem do magnésio causa esta influência na soldagem deste tipo de liga.



Figura 82- Micrografia da região 1. Amostra F8, 3000 RPM.

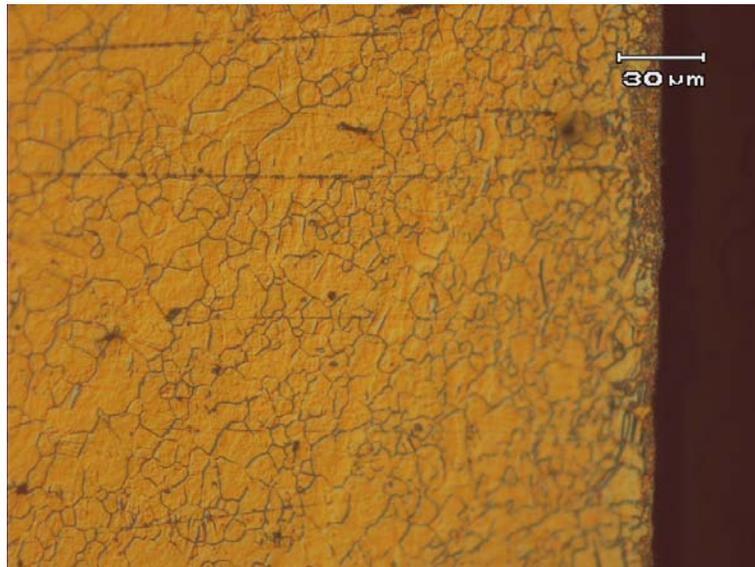


Figura 83- Micrografia da região 1 em maior aumento. Amostra F8, 3000 RPM.

A região 2 (Figura 79) apresentou grãos recristalizados devido a alta energia mecânica e térmica originada na mesma. A Figura 84 mostra a região 2 na mesma magnificação da figura anterior, onde pode ser percebida a diferença no tamanho de grão.

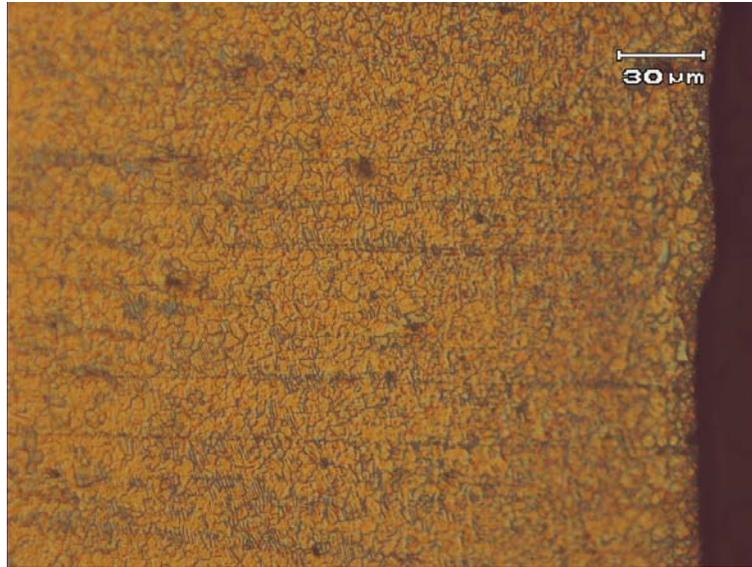


Figura 84- Micrografia da região 2, onde se percebe a grande diferença no tamanho de grão. Amostra F8, 3000 RPM.

A região 3 (Figura 79) consiste na parte situada entre as 3 protuberâncias da pino de três superfícies planas mais três dentes (ferramenta F8). Esta região acolhe material plastificado que é movido pelo dente da ferramenta. Apresenta grãos recristalizados, pois também é uma região de alta energia de deformação e temperatura. Isto devido ao fluxo de material e térmico por estar na periferia do pino da ferramenta. A Figura 85 e a Figura 86 mostram a microestrutura desta região.

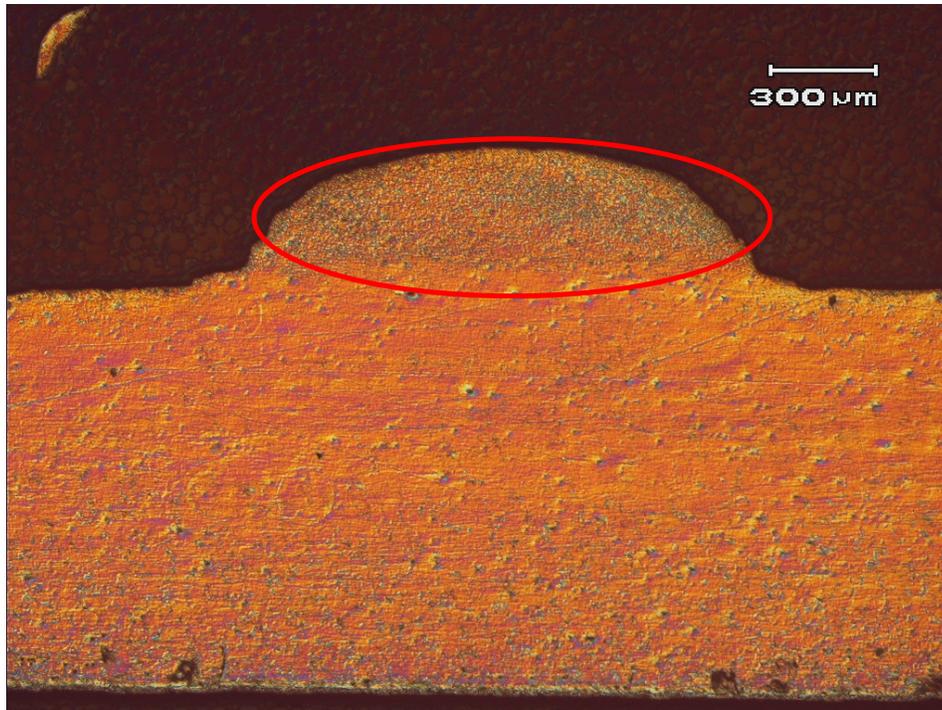


Figura 85- Micrografia da região 3(ellipse vermelha). Amostra F8, 3000 RPM.

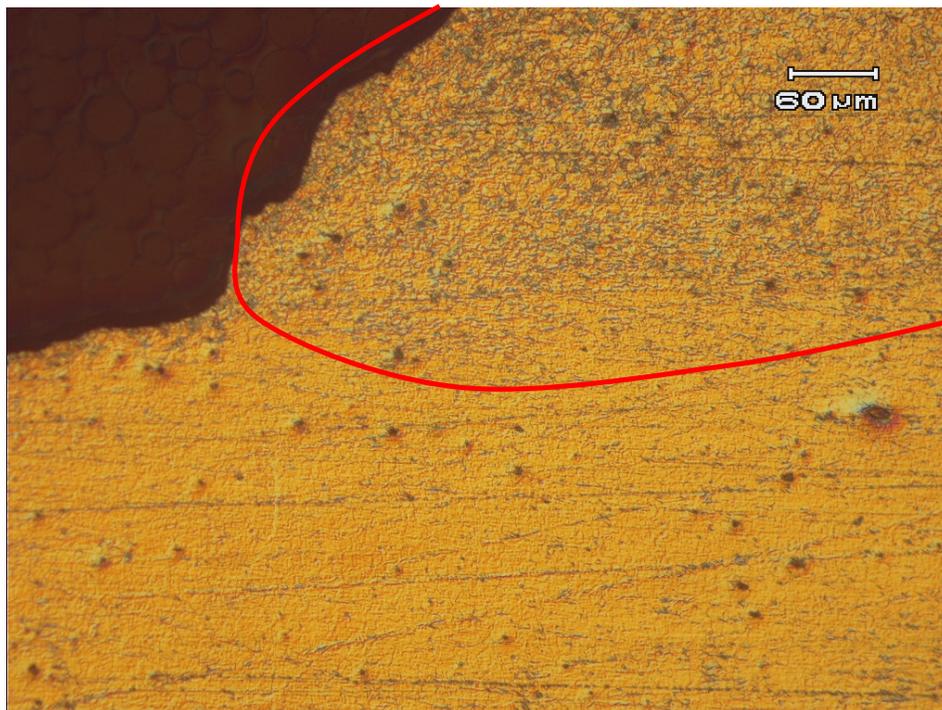


Figura 86- Micrografia da região 3 em maior aumento, mostrando a interface. Amostra F8, 3000 RPM.

4.3.3 Fluxo de material

Para as amostras de fluxo de material foi variado apenas o pino da ferramenta. O ombro e os outros parâmetros de soldagem foram mantidos constantes, foi utilizada uma velocidade de rotação de 3000 RPM (a que produziu na média uma maior CL), profundidade de penetração de 3 mm e taxa de penetração de 1 mm/s. As amostras foram preparadas da mesma forma que amostras de metalografia. Foram observadas sem ataque químico para poder se obter uma idéia de visualização do fluxo de material. A Figura 87 mostra a macro para o corpo de prova soldado com a ferramenta F9.



Figura 87- Macrografia mostrando amostra soldada para visualização do fluxo de material. Ferramenta F9.

O contraste entre o cobre e o alumínio possibilita a visualização de uma parte do fluxo de material, porém, o processo é tridimensional, deste modo vamos obter uma estimativa parcial das características deste fluxo. A Figura 88 e a Figura 89 mostram a direção do fluxo de material, assim como é possível observar grande quantidade de cobre não misturado presente na região abaixo do pino, o que indica que este material foi em grande parte comprimido até chegar àquela região.

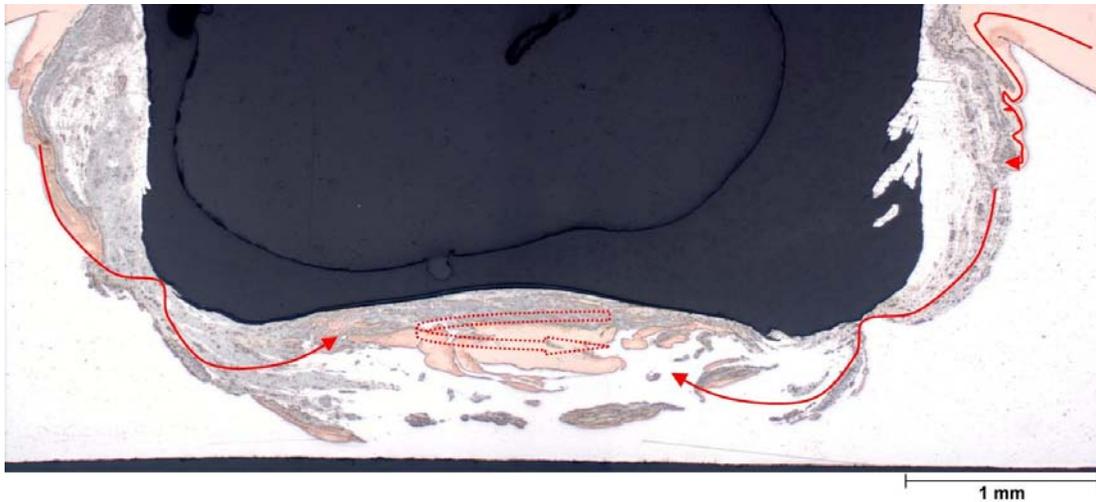


Figura 88- Detalhe mostrando a direção do fluxo de material no processo. As setas indicam para onde se dá o transporte de material.



Figura 89- Detalhe mostrando o fluxo de material na região abaixo do pino da ferramenta, onde se observa grande concentração de cobre não misturado ao alumínio. Ferramenta F9.

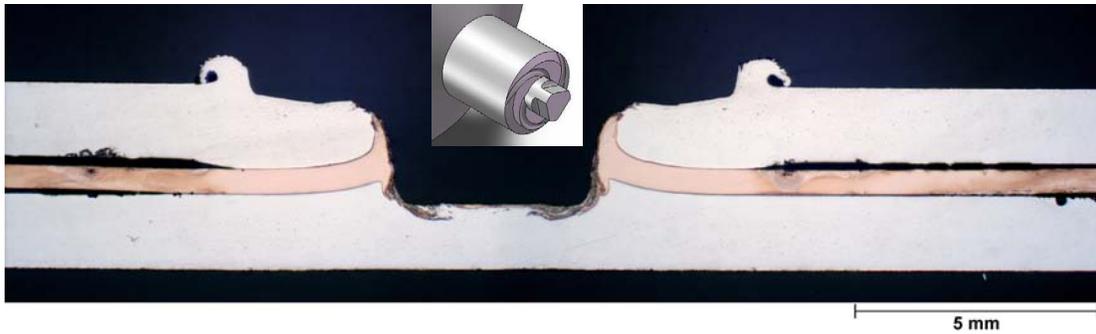


Figura 90- Macrografia mostrando amostra soldada para visualização do fluxo de material. Ferramenta F10.

Nesta amostra, não se percebe tanta concentração de cobre na região abaixo do pino, também se percebe que a quantidade de cobre que foi apenas movido para baixo é menor. A Figura 91 e a Figura 92 mostram algumas indicações de direção de fluxo de material nesta amostra com um maior aumento.



Figura 91- Detalhe mostrando a direção do fluxo de material no processo. As setas indicam para onde se dá o transporte de material. Ferramenta F10.

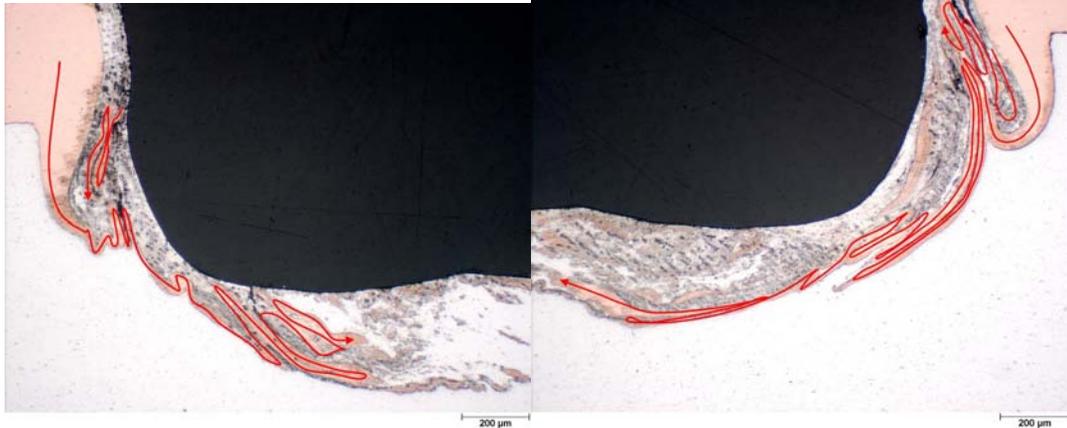


Figura 92- Detalhe em maior aumento mostrando o fluxo em ambos os lados da metalografia. Ferramenta F10.

Na ferramenta F11, como o pino apresenta um pequeno degrau, acarreta em uma maior pressão de contato nas chapas. Neste caso pode ser observada uma maior quantidade de cobre subindo para chapa superior. A quantidade de cobre armazenado abaixo do pino é menor que em todos os outros tipos de ferramenta. O perfil do fluxo muda um pouco, em algumas regiões parecendo apresentar deslocamento em helicóides. A Figura 93 mostra uma visão geral da macro e a Figura 94 e a Figura 95 mostram as zonas detalhadas.

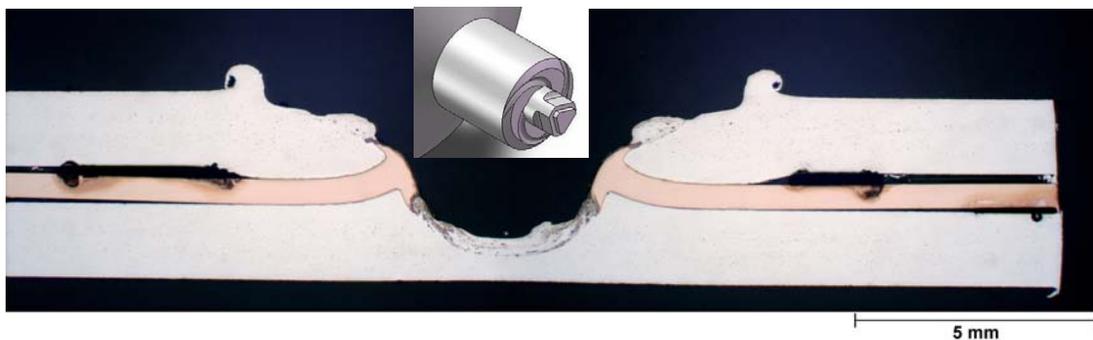


Figura 93- Macrografia mostrando amostra soldada para visualização do fluxo de material. Ferramenta F11.

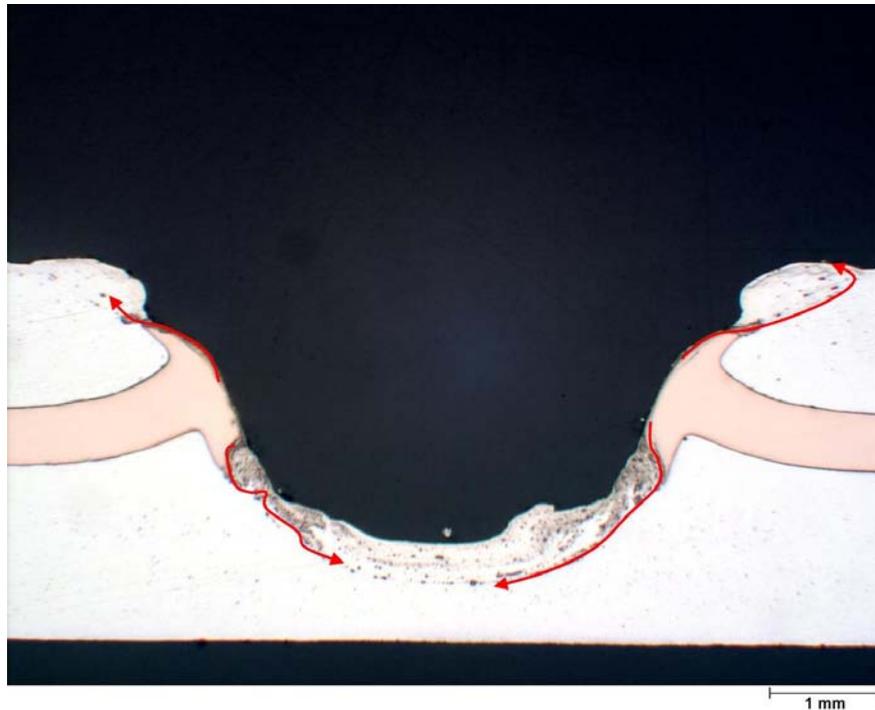


Figura 94- Detalhe mostrando a direção do fluxo de material no processo. As setas indicam para onde se dá o transporte de material. Ferramenta F11.

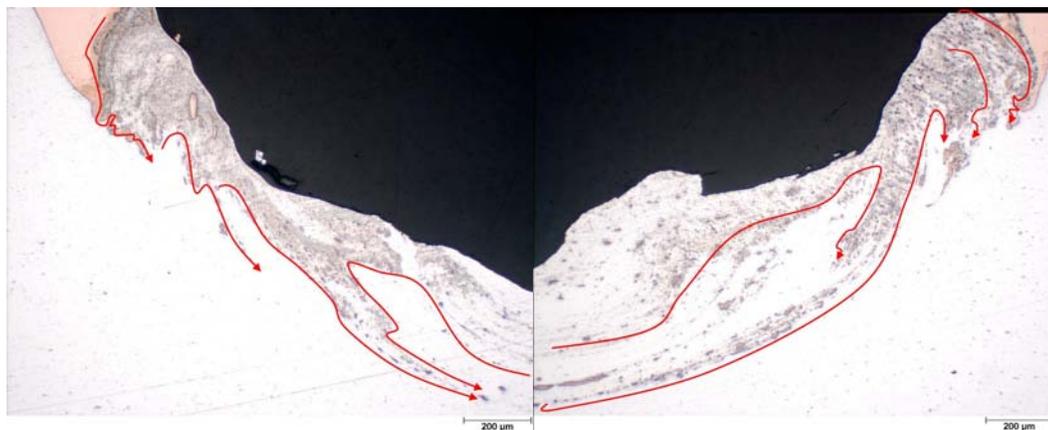


Figura 95- Detalhe das zonas em detalhe mostrando o fluxo em ambos os lados da metalografia. Ferramenta F11.

A ferramenta F12 apresentou o fluxo de material mais peculiar entre os analisados. Além de grande transporte de cobre para a região abaixo do pino, uma grande parte de alumínio foi movida até a interface entre pino/ material adjacente. Esta concentração de cobre na região abaixo do pino se deve ao formato da ferramenta, que deve aprisionar uma quantidade de material entre os dentes quando penetra nas chapas. As imagens referentes às metalografias para amostras soldadas com a ferramenta F12 podem ser observadas da Figura 96 à Figura 100.

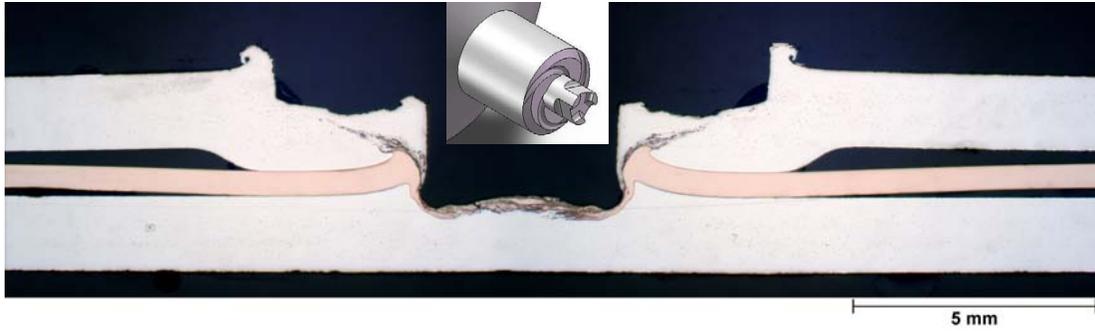


Figura 96- Macrografia mostrando amostra soldada para visualização do fluxo de material. Ferramenta F12.

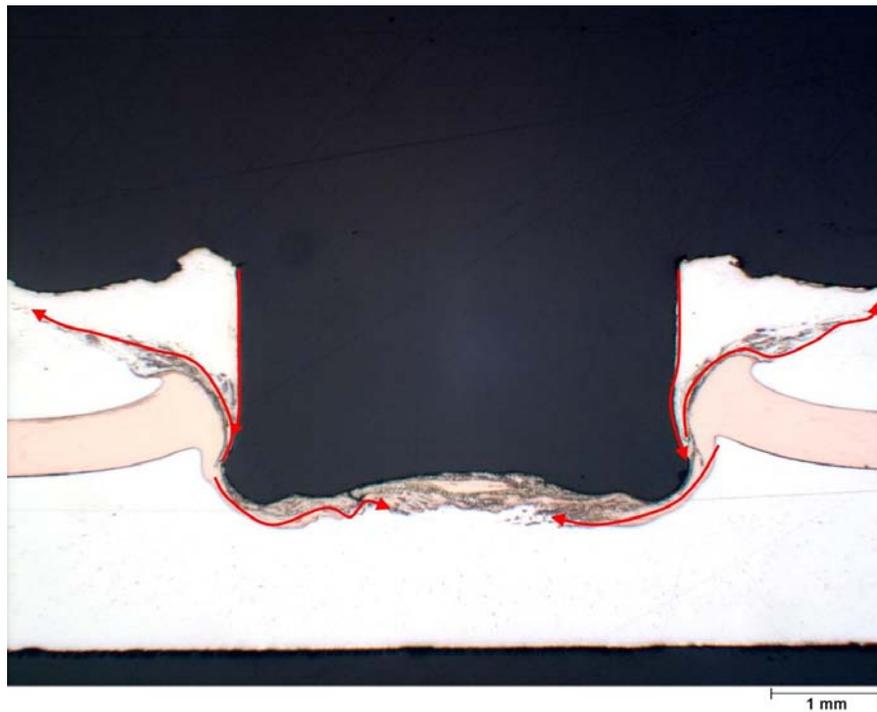


Figura 97- Detalhe mostrando a direção do fluxo de material no processo. As setas indicam para onde se dá o transporte de material. Ferramenta F12.

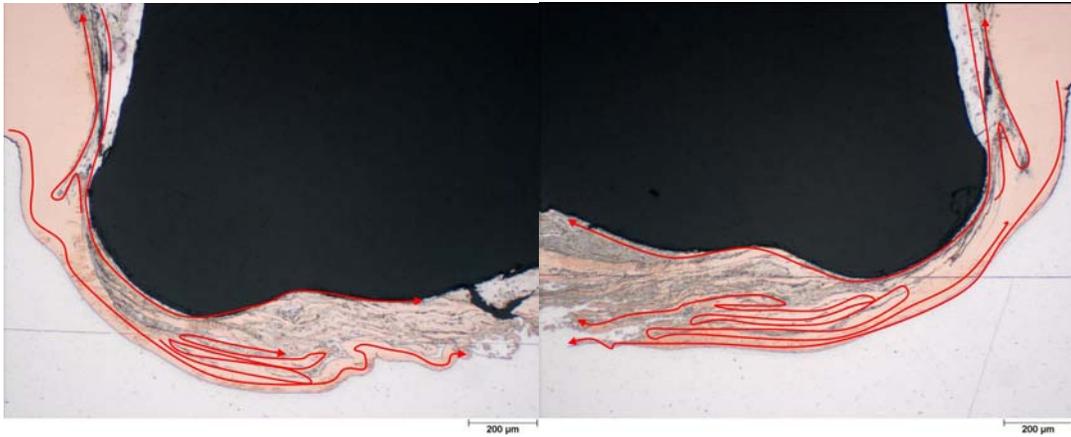


Figura 98- Imagens das zonas em detalhe mostrando o fluxo em ambos os lados da metalografia. Ferramenta F12.

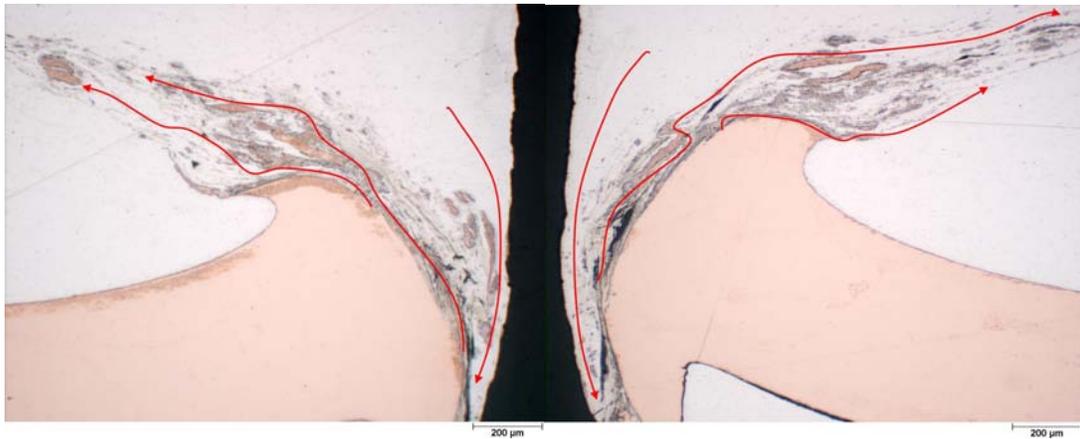


Figura 99- Imagens das zonas em detalhe mostrando o fluxo em ambos os lados da metalografia. Ferramenta F12.

Este padrão de fluxo segue o exemplo citado na Figura 17, com a formação dos dois padrões, interno e externo.



Figura 100- Imagem mostrando a região abaixo do pino onde se observa uma maior quantidade de cobre. Ferramenta F12.

Na Figura 101 pode-se perceber a semelhança do perfil da ZM entre a amostra de fluxo de material e a própria ZM de uma amostra soldada com o mesmo pino.

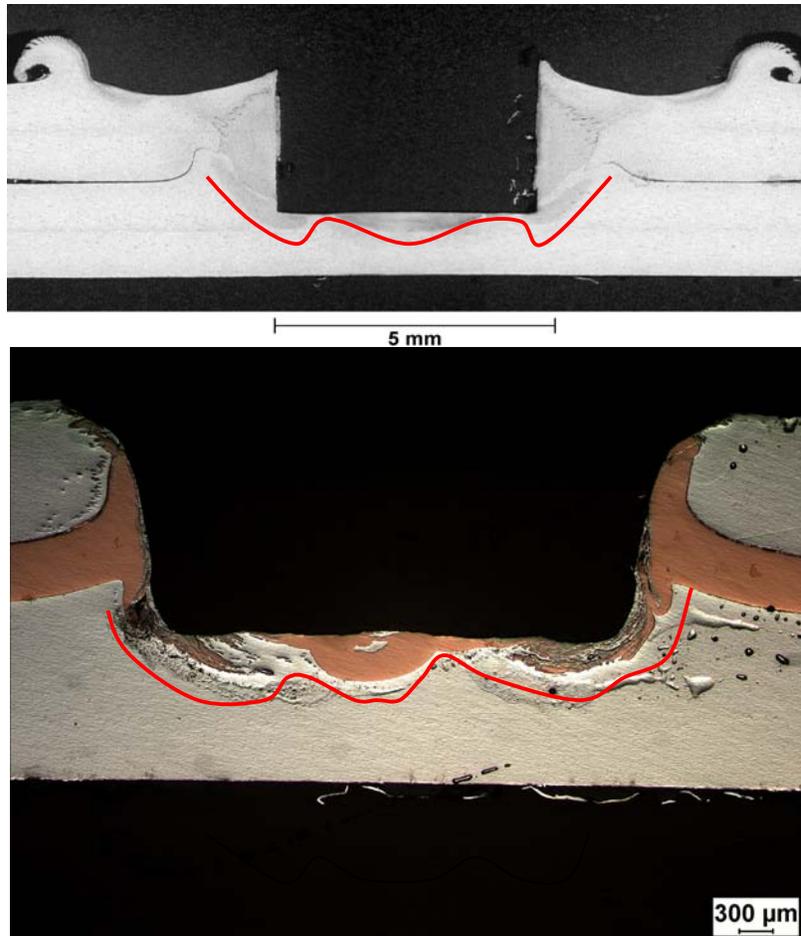


Figura 101- Imagem mostrando a semelhança no perfil da ZM na região abaixo do pino para uma amostra soldada com a ferramenta F2 (pino B).

Dentre as amostras apresentando o fluxo de material de cada pino, o pino que apresentou um perfil mais interessante ferramenta F12. A Figura 99 mostra uma troca de material de onde se leva o alumínio através do padrão interno de fluxo de material para a chapa de baixo e, concomitantemente, o fluxo externo leva o cobre em direção a chapa superior formando o “hooking” ou gancho. O gancho se forma na interface das chapas superior e inferior, e dá o que se chama de engate mecânico na junta, conforme mostra Kyffin em seu trabalho [50, 51] A Figura 102 mostra um corpo de prova soldado onde foi formado o gancho e outro sem a formação do gancho.

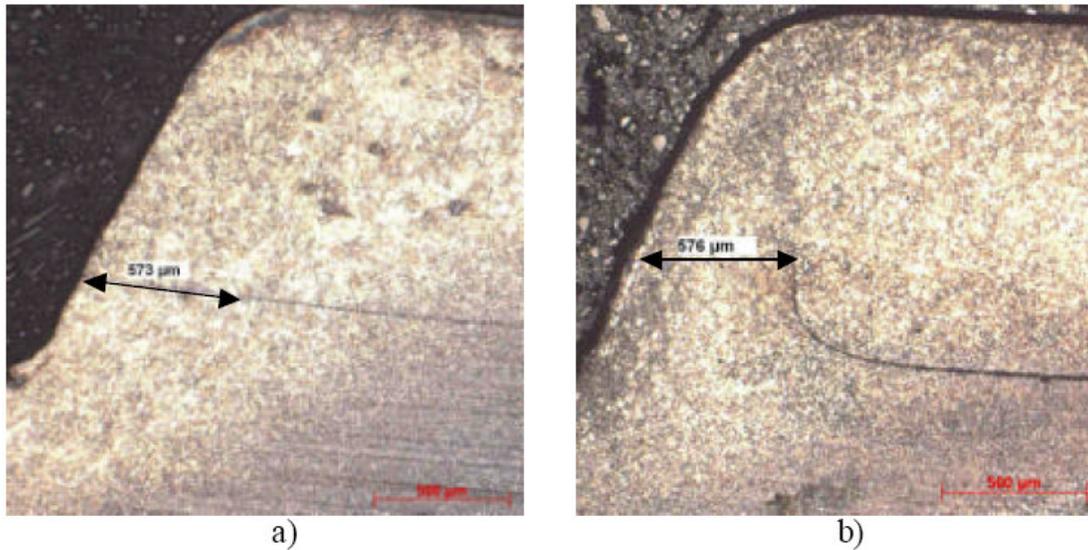


Figura 102-Amostras de aço soldadas por Kyffin et al [50] mostrando a formação do gancho (b) e sem a formação do gancho (a).

A formação do gancho modifica a direção de início da fratura de um caminho onde existe pouco material para resistir para outra direção com maior quantidade de material, onde a resistência mecânica é maior. Kyffin observou nas amostras onde houve a formação do gancho na interface uma resistência mecânica 40% maior que nas amostras onde não houve a formação do gancho na interface.

4.4 Caracterização Mecânica

4.4.1 Ensaio de tração do material de base

4.4.1.1 AA 6181-T4

Foram realizados ensaios de tração em amostras do material de base nos sentidos longitudinal e transversal. Os gráficos apresentados na Figura 103 mostram a curva tensão x deformação para ambas as direções do material.

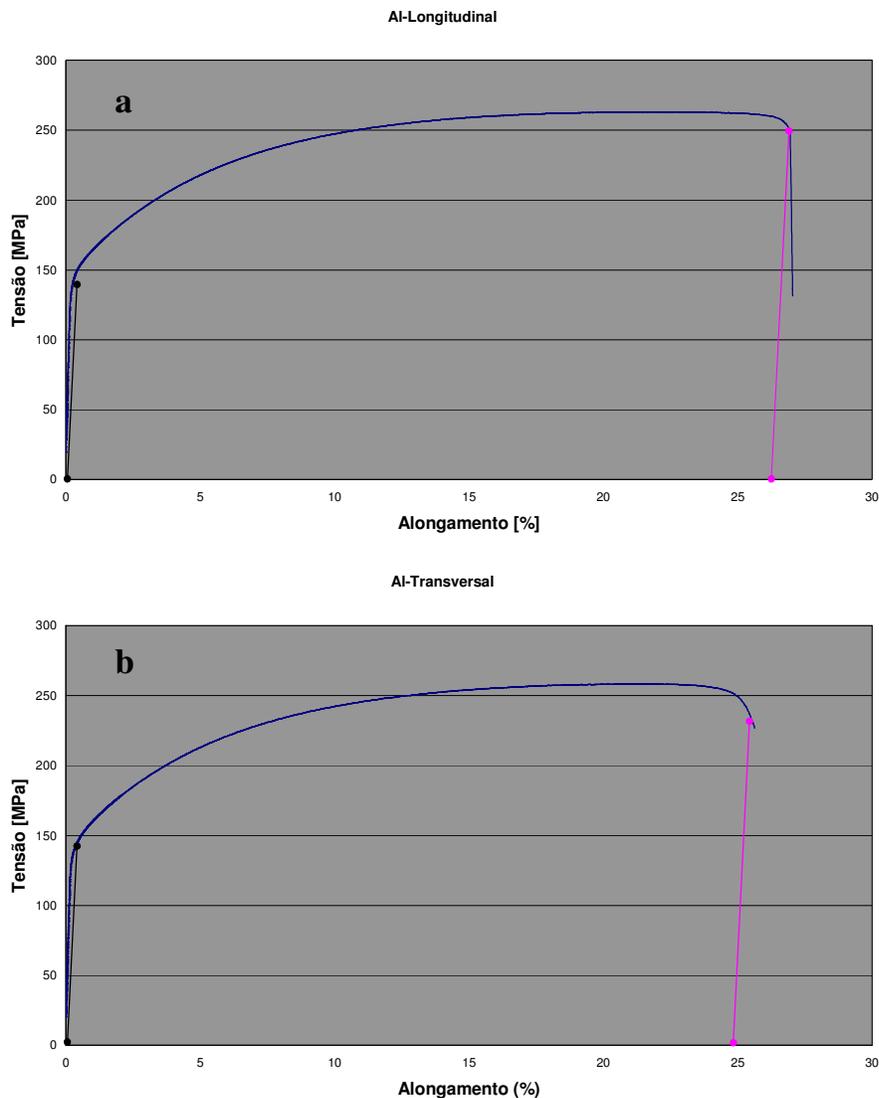


Figura 103- Curva tensão vs deformação para a liga AA6181 nos sentidos longitudinal (a) e transversal (b) ao sentido de laminação.

Os resultados obtidos paralela e perpendicularmente à direção de laminação do material foram bastante semelhantes, o que indica que o grau de anisotropia do material não está alto. Os principais valores obtidos do gráfico estão apresentados na Tabela 9.

Tabela 9- Valores obtidos da curva para as direções longitudinal e transversal ao sentido de laminação.

Orientação	Longitudinal	Transversal
Tensão máxima (MPa)	263,1	258,4
Alongamento na ruptura (%)	26,8	23,6
Base de medida de 25 mm		

4.4.1.2 Mg AZ31

Foram realizados ensaios de tração em amostras do material de base nos sentidos longitudinal e transversal. Os gráficos apresentados na Figura 104 mostram a curva tensão x deformação para ambas as direções do material.

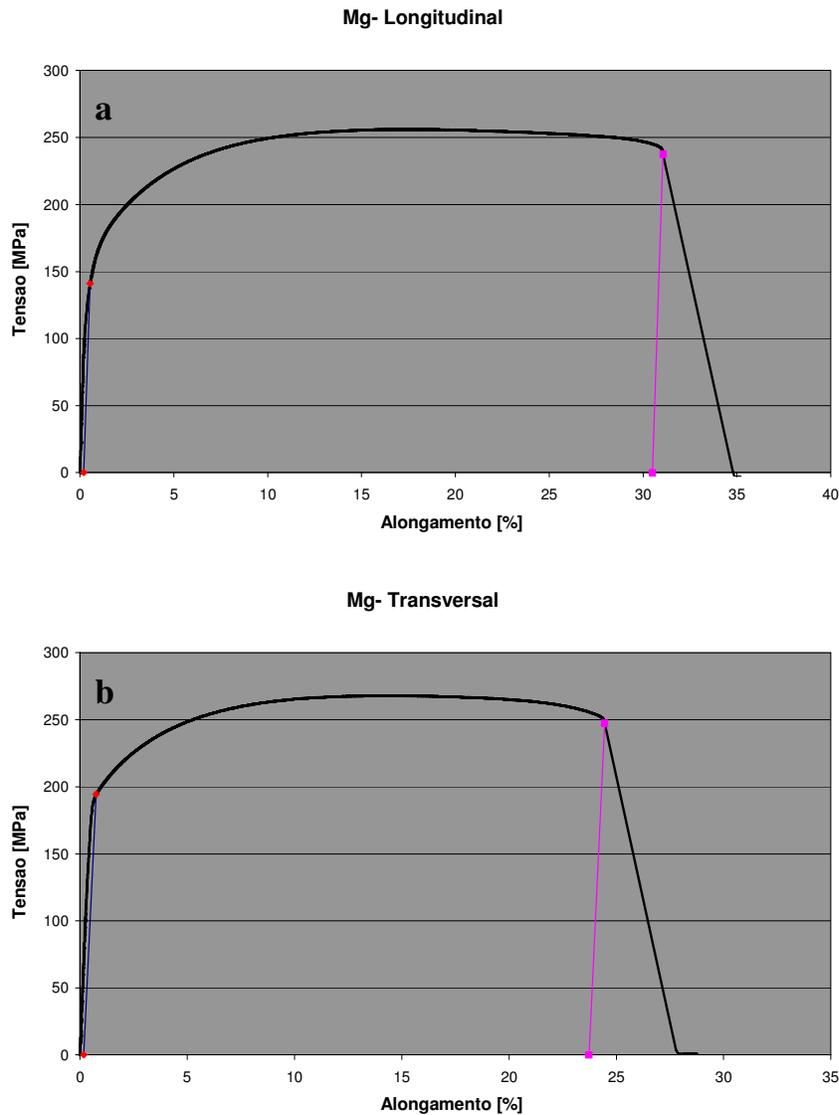


Figura 104- Curva tensão vs deformação para a liga Mg AZ31 nos sentidos longitudinal (a) e transversal (b) ao sentido de laminação.

O magnésio apresentou um grau maior de anisotropia. O alongamento foi bem maior para a amostra longitudinal, e a resistência mecânica média do transversal ficou um pouco acima do longitudinal. Os principais valores obtidos da curva estão mostrados na Tabela 10.

Tabela 10- Valores obtidos da curva para as direções longitudinal e transversal ao sentido de laminação.

Orientação	Longitudinal	Transversal
Tensão máxima (MPa)	253,5	264,5
Alongamento na ruptura (%) Base de medida de 25 mm	29,1	24,3

4.4.2 Ensaio de cisalhamento

4.4.2.1 AA 6181

Foram ensaiadas quatro amostras para cada condição. Os resultados médios foram plotados em forma de gráfico, conforme se observa na Figura 105. Pode ser observado junto ao valor obtido no ensaio de cisalhamento o respectivo valor da área efetiva soldada, ou camada de ligação (CL), onde se percebe uma tendência. Quanto maior a CL, maior é a resistência ao cisalhamento obtida.

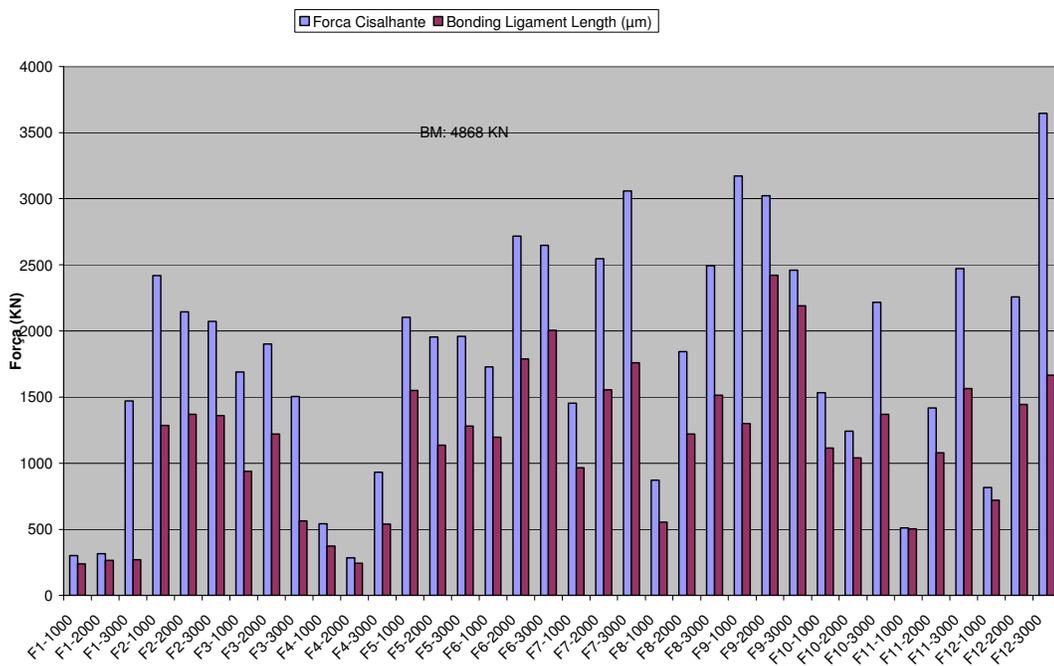


Figura 105- Resultados do teste de cisalhamento realizado nas amostras de alumínio de acordo com a ferramenta utilizada.

As amostras ensaiadas apresentam uma clara evidência que o fluxo de material da chapa de baixo para a chapa de cima que será responsável por esta formação de uma maior CL, ou seja, em alguns casos a ferramenta não conseguiu fazer com que houvesse a mistura entre

os materiais da chapa superior e inferior (região escurecida ao redor da região brilhante), conforme se observa na Figura 106. Vale lembrar que o processo é realizado com controle de deslocamento, portanto as forças variam de acordo com o aporte térmico produzido pelas condições do processo.

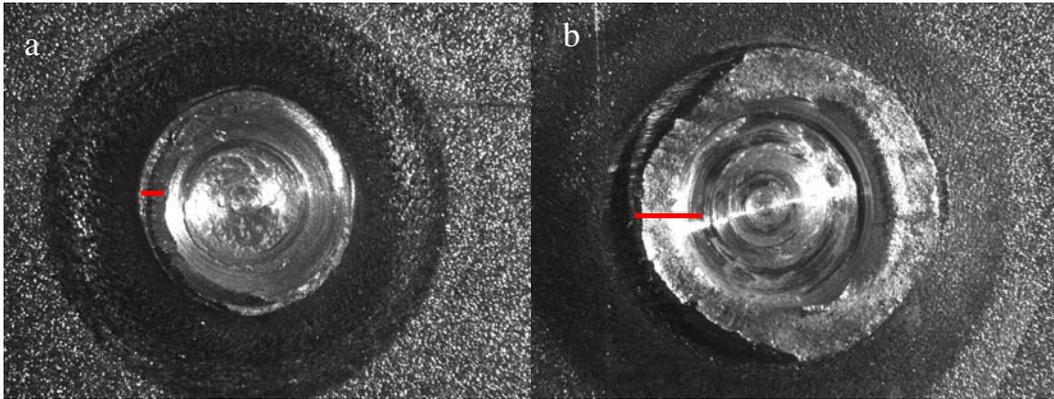


Figura 106- Duas amostras ensaiadas mostrando (a) uma pequena CL (amostra F1-1000RPM) e (b) uma grande CL (amostra F8-3000).

A amostra F1-1000 (CL de $240\mu\text{m}$) apresentou uma média de força de cisalhamento de 207 N, enquanto a amostra F8-3000 (CL de $1510\mu\text{m}$) apresentou uma força cisalhante média de 2460 N, ou seja, mais de 10 vezes maior a resistência com o aumento de aproximadamente 630% do CL.

O modo como as amostras falharam durante o ensaio foi variado. Existem basicamente três tipos de modo de falha durante o ensaio de cisalhamento, que são:

Falha por cisalhamento: Ou falha através da solda, onde a superfície de fratura é paralela a superfície de contato das chapas, atravessando a ZM.

Falha por arrancamento: Falha que ocorre no contorno na ZM na chapa superior, mantendo a chapa inferior íntegra.

Falha por arrancamento inclusive da chapa inferior: Falha que ocorre no contorno da ZM, porém além da chapa superior, ela desce para chapa inferior também.

O aspecto das falhas pode ser observado na Figura 107.

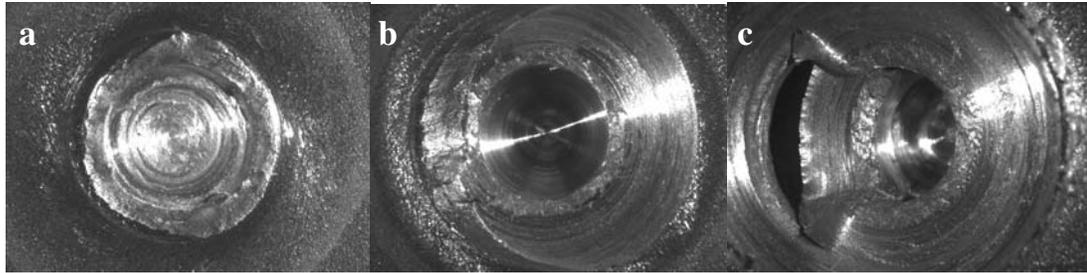


Figura 107- Modos de falha a) Cisalhamento, b) arrancamento e c) arrancamento inclusive da chapa inferior.

De acordo com Gerlich [18], o modo de falha de cisalhamento implica em uma fratura de baixa energia, ou seja, rompimento em tensões mais baixas com pouca deformação. Portanto, deve-se procurar a consolidação de uma junta soldada que apresente o modo de falha b ou c, que são falhas de maior energia envolvida. Neste caso, a formação ou não do gancho favorecerá a fratura por arrancamento, já que o gancho desvia a direção de fratura para seguir contornando a ZM. As fraturas ocorreram sem seguir um padrão, em uma mesma condição puderam ser observados até mesmo os três diferentes modos de falha, sendo que algumas apresentaram modo misto.

4.4.2.2 Mg AZ31

Para as amostras e magnésio também foram ensaiadas quatro amostras para cada condição. O resultado foi montado em forma de gráfico e é mostrado conforme se observa na Figura 108.

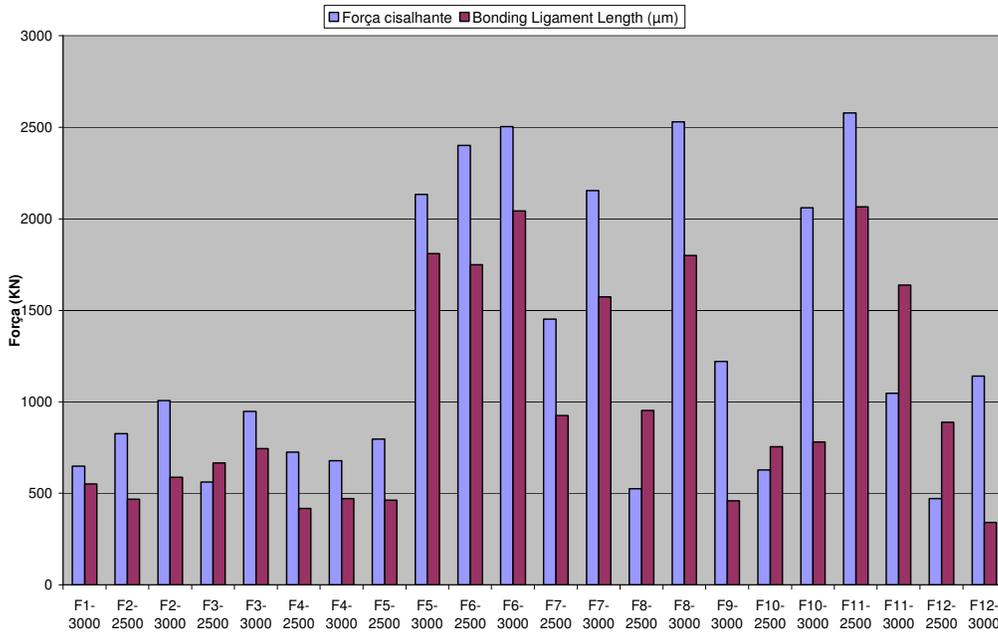


Figura 108- Resultados do teste de cisalhamento realizado nas amostras de magnésio de acordo com a ferramenta utilizada.

Pode ser observado junto ao valor obtido no ensaio de cisalhamento o respectivo valor de CL, onde se percebe a mesma tendência. Novamente, quanto maior a CL, maior é a resistência ao cisalhamento obtida. Os processos alternativos de SPFMM [20,24,25] comprovam que o aumento da área soldada proporcionará uma maior resistência tanto ao cisalhamento quanto ao ensaio de tração em cruz.

Os modos de falha observados nas amostras de magnésio foram basicamente arrancamento e por cisalhamento, conforme se observa na Figura 109.

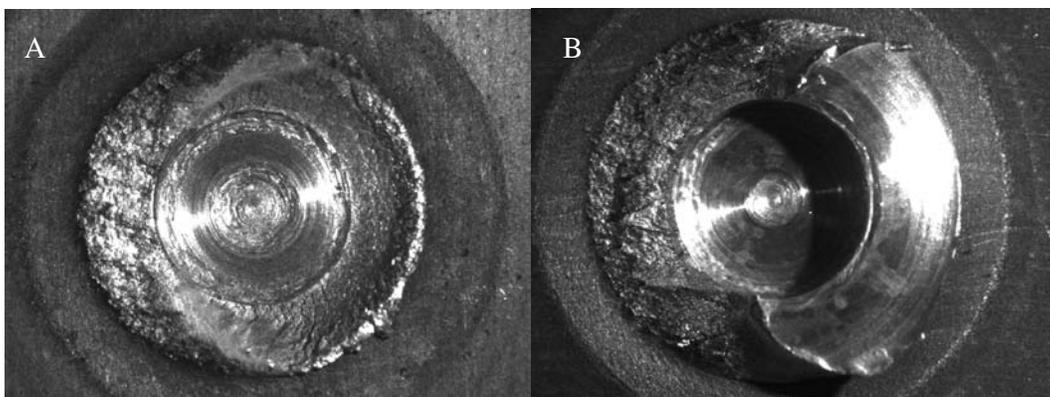


Figura 109- Amostras de ensaio de cisalhamento mostrando os dois tipos de falhas obtidos . a) Falha por cisalhamento. Amostra F6-2500, b) Falha por arrancamento. Amostra F6-3000.

4.4.2.3 Análise de fraturas no MEV

4.4.2.3.1 Alumínio

As amostras foram levadas ao microscópio eletrônico de varredura (MEV) para ser observados seus respectivos micromecanismos de falha. Para tanto, foram selecionadas amostras da mesma ferramenta, com velocidades de rotação diferentes. Para o alumínio foi escolhida a condição F6-1000 que resultou numa fratura tipo shear failure, e a condição F6-3000 que resultou numa fratura tipo pull out. A imagem das duas fraturas pode ser observada na Figura 110.

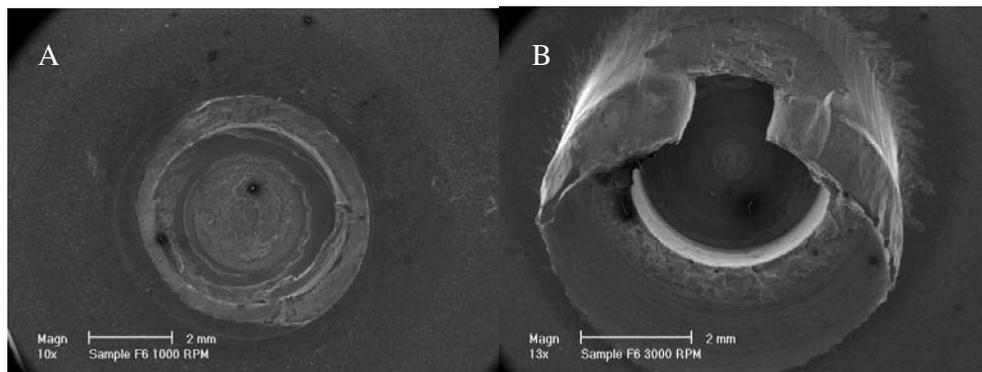


Figura 110- Imagem mostrando o aspecto geral dos dois tipos de falha obtidos nas amostras soldadas com a ferramenta F6. a) Falha por cisalhamento obtido com a velocidade de 1000 RPM e b) Falha por arrancamento obtido com a velocidade de 3000 RPM.

Na Figura 110 podemos observar as marcas ao redor da fratura que indicam o sentido de rotação da ferramenta. Outra evidência é a maior deformação sofrida na fratura B, onde o CL também é maior.

Os micromecanismos de fratura observados em ambas as amostras são mostrados na Figura 111, para a fratura A e na Figura 112, para a fratura B.

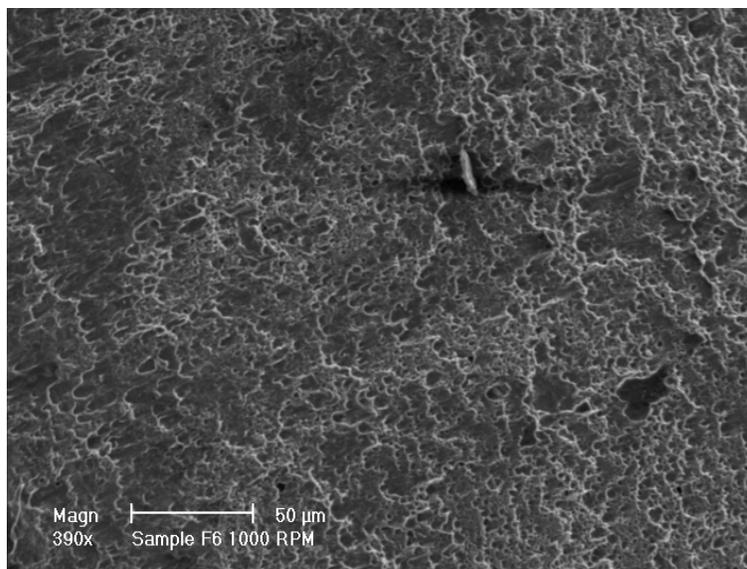


Figura 111- Fractografia mostrando os micromecanismos de falha da fratura A, onde se observa que foi por coalescimento de microcavidades.

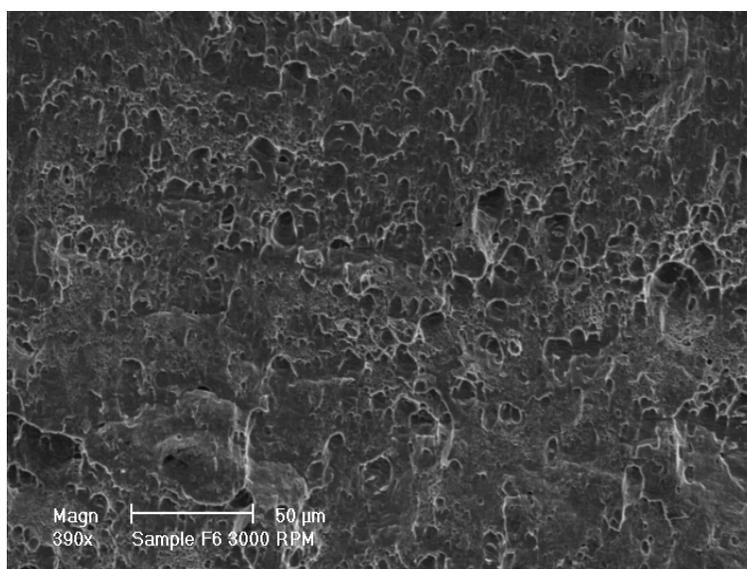


Figura 112- Fractografia mostrando os micromecanismos de falha da fratura B, onde se observa que foi por coalescimento de microcavidades.

Uma variação dentre os dois mecanismos microscópicos de fratura que se pode observar é a diferença no tamanho dos poros, a amostra soldada com maior velocidade de rotação apresenta poros maiores e em menor quantidade (Fratura B), enquanto a amostra soldada com menor velocidade de rotação apresentou poros menores e em maiores quantidades (Fratura A). Segundo Su [37] a falha do tipo arrancamento é uma fratura de mais alta energia, que envolve maior deformação. Analisando o micromecanismo de fratura, se observa uma fratura mais dútil (A) na amostra soldada com menor velocidade de rotação

com fratura do tipo arrancamento. Deste modo foi montado um gráfico do ensaio destas amostras com as duas curvas. A força foi transformada em tensão de cisalhamento dividindo-se pela área (onde se utilizou os valores de CL). A Figura 113 mostra que no ensaio da fratura A, uma maior deformação foi obtida. Também se observa que o valor da área abaixo da curva (energia envolvida no ensaio) foi mais de cinco vezes maior para a fratura A, assim como o deslocamento total da máquina até o final do ensaio.

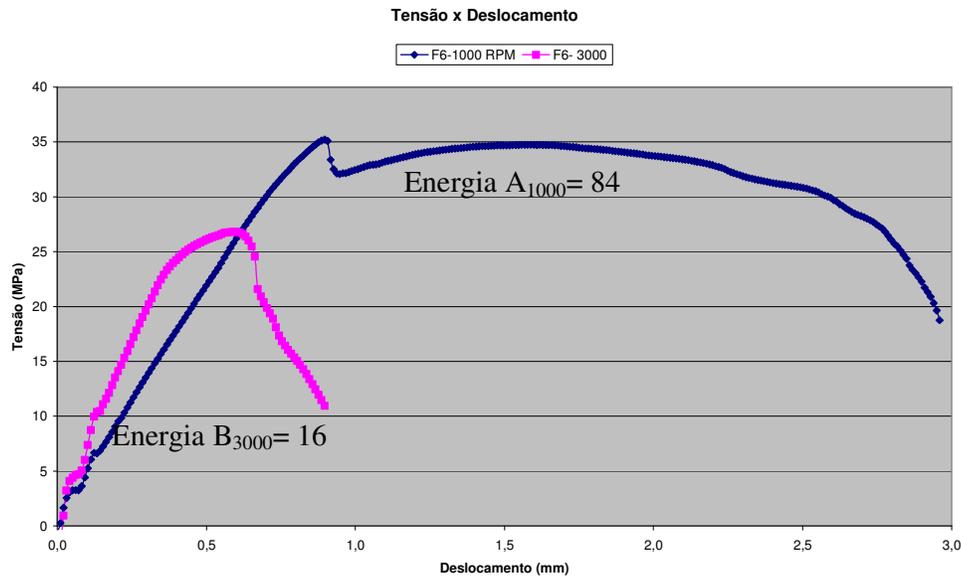


Figura 113- Curvas obtidas no ensaio de cisalhamento das amostras de Al soldadas com a ferramenta F6, velocidades de 1000 e 3000 RPM.

4.4.2.3.2 Magnésio

Para as amostras de magnésio, os modos de fratura se inverteram. A amostra com maior velocidade de rotação (3000 RPM) teve falha do tipo cisalhamento, enquanto a amostra com menor velocidade de rotação (2500 RPM) apresentou fratura do tipo arrancamento, conforme a Figura 114.

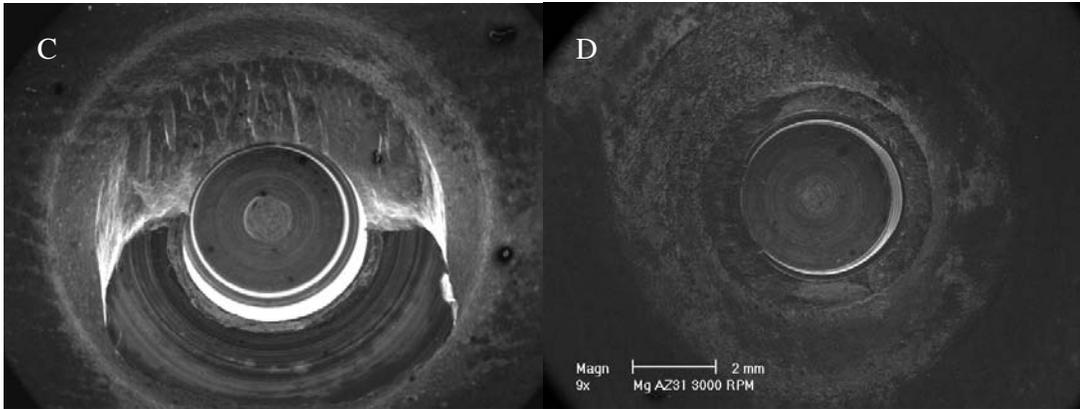


Figura 114- Imagem mostrando o aspecto geral dos dois tipos de falha obtidos nas amostras soldadas com a ferramenta F6. a) Pull out obtido com a velocidade de 2500 RPM e b) Shear failure obtido com a velocidade de 3000 RPM.

Pode-se observar neste caso que a CL foi maior para a amostra que apresentou a falha tipo arrancamento.

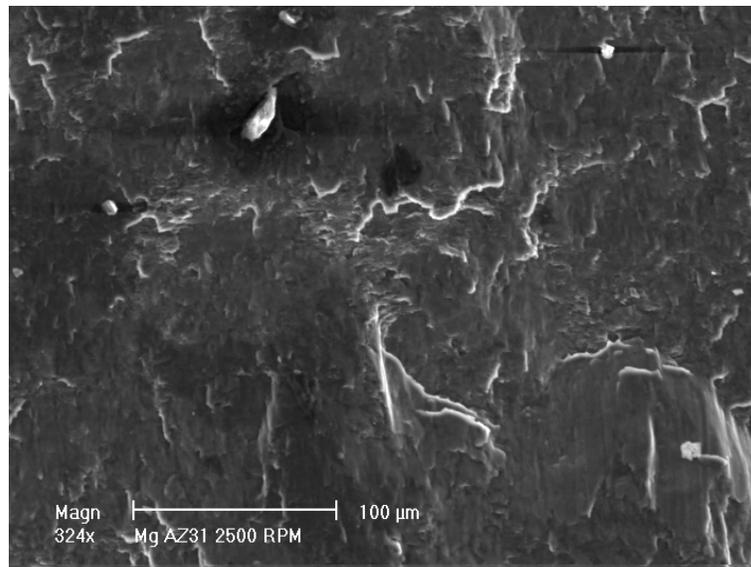


Figura 115- Imagem mostrando os micromecanismos de falha da fratura C.

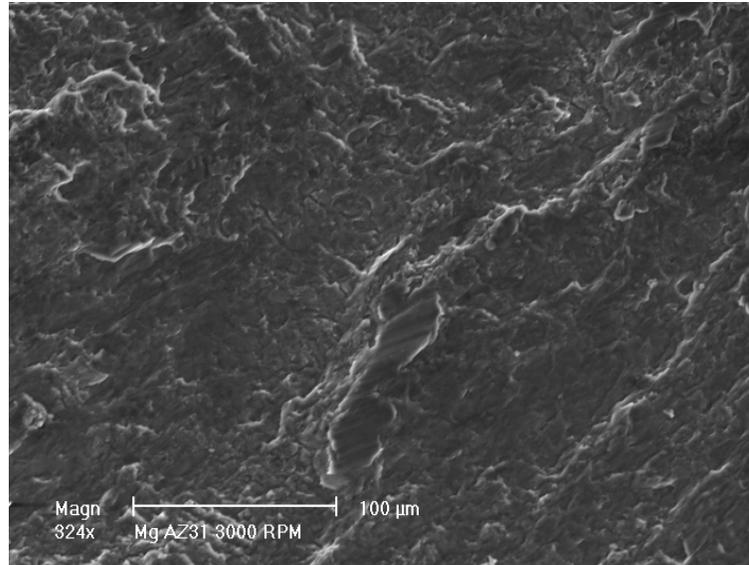


Figura 116- Imagem mostrando os micromecanismos de falha da fratura D.

As imagens não mostraram formação de microcavidades nas fraturas, como nas amostras do AA6181. Apresentaram uma região lisa na fratura C, mostrando um aspecto mais frágil com relação ao aspecto da fratura D, que se mostrou mais rugosa. Devido à estrutura cristalina do material (Hcp) e da pouca diferença entre as velocidades de rotação não se pôde observar grandes diferenças nos micromecanismos de fratura. Porém, as curvas dos ensaios das amostras soldadas com a ferramenta F11 mostraram a mesma diferença de energia (área abaixo da curva tensão x deformação) comparando-se amostra soldada com a maior e menor velocidade de rotação. A Figura 117 mostra o resultado obtido para as amostras F11 com as respectivas áreas abaixo da curva tensão x deslocamento.

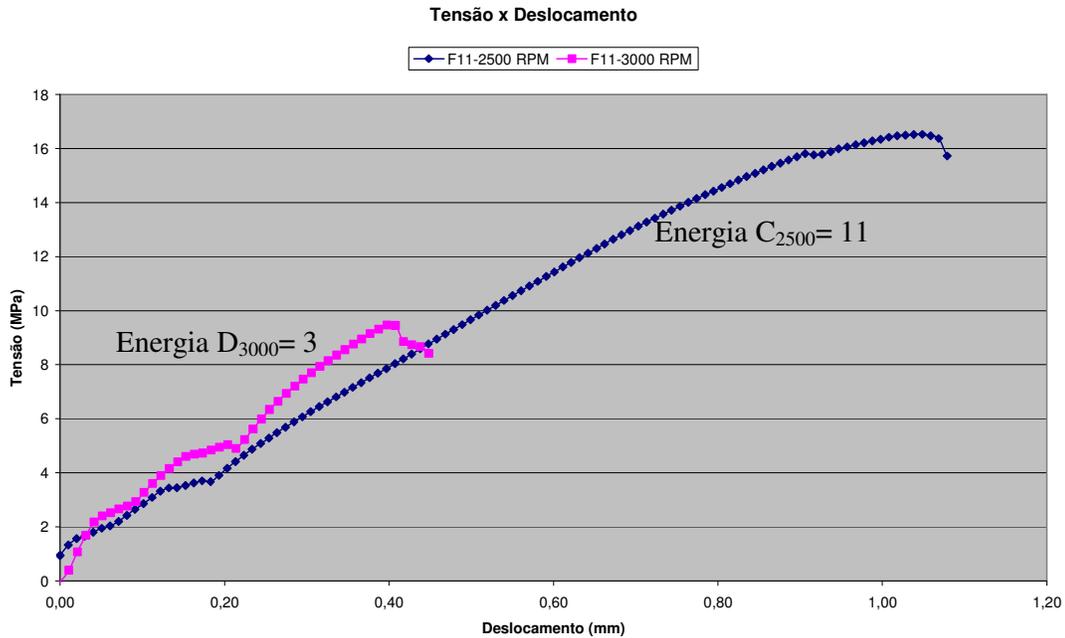


Figura 117- Curvas obtidas no ensaio de cisalhamento das amostras de Mg soldadas com a ferramenta F11, velocidades de 2500 e 3000 RPM.

4.4.3 Perfis de microdureza

4.4.3.1 AA 6181

Foram realizados dois perfis de microdureza por condição de soldagem. Os perfis não apresentaram diferenças entre si. O que se pôde perceber foi à diminuição de dureza nos perfis na região da ZM, e também a presença das três diferentes zonas ZM, ZTMA e ZTA. A Figura 118 mostra um perfil típico realizado na amostra F7-1000 RPM sobreposto a uma macrografia, onde podem ser identificadas as diferentes zonas.

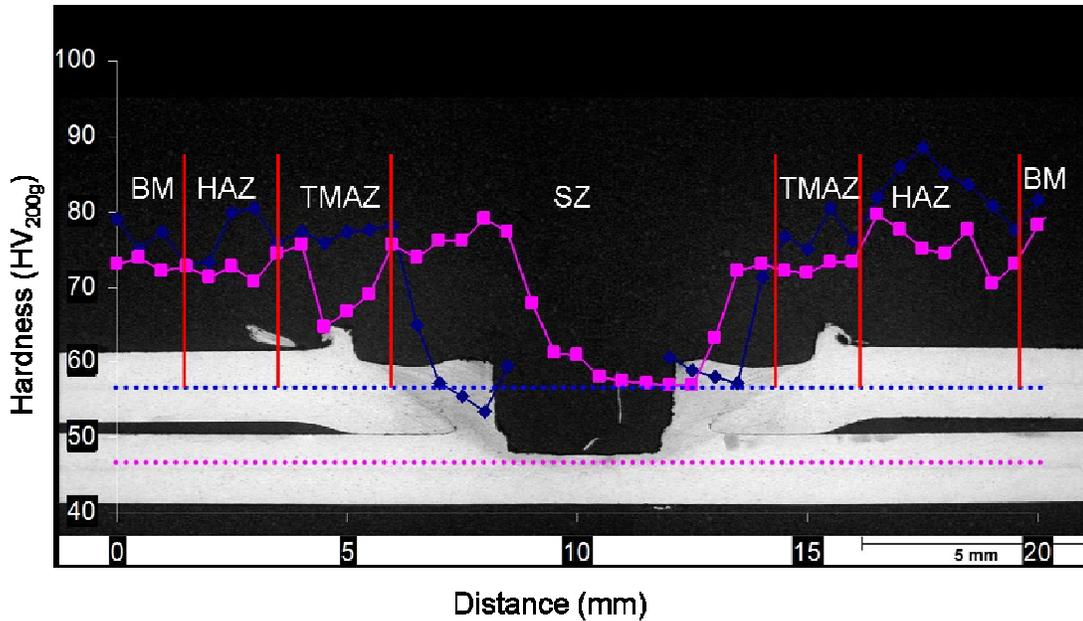


Figura 118- Perfil de microdureza realizado na amostra F7-1000 RPM. Onde se observa a presença das quatro diferentes zonas.

A redução de dureza na região da ZM se deve, provavelmente, a recristalização ocorrida devido às altas energias térmicas e de deformação presentes na região durante o processo. Os demais perfis das outras condições serão inseridos nos Apêndices.

4.4.3.2 Mg AZ31

Foram realizados dois perfis de microdureza por condição de soldagem. Os perfis não apresentaram diferenças entre si, diferentemente das amostras de alumínio, a microdureza na região da ZM aumentou, talvez devido à redução no tamanho de grão, a identificação das diferentes zonas ficou prejudicada devido à dispersão dos valores medidos de microdureza. O perfil de microdureza realizado na amostra F6- 3000 RPM é mostrado na Figura 119.

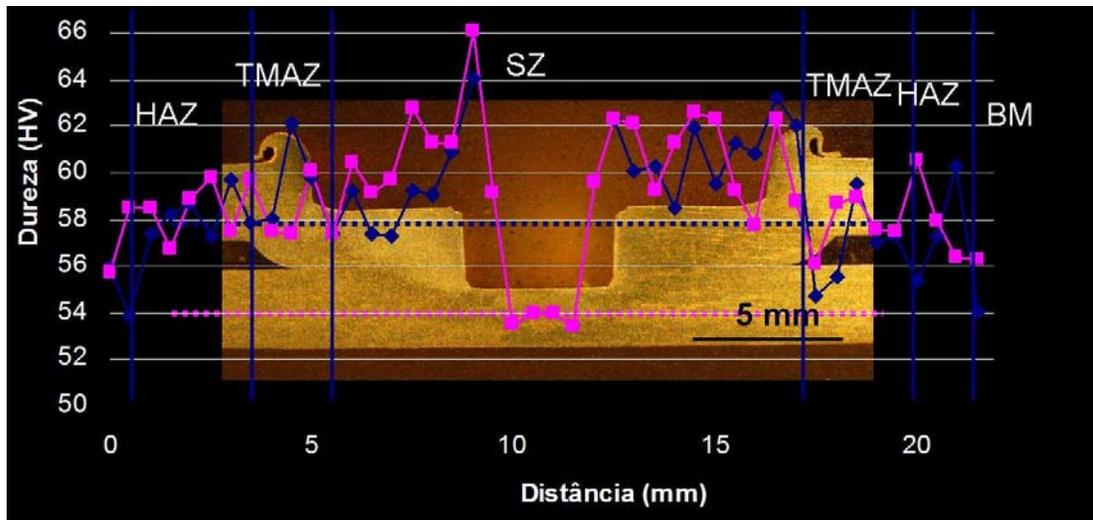


Figura 119- Perfil de microdureza realizado na amostra F6-3000 RPM. Onde se observa as diferentes zonas formadas.

A redução de dureza na ZM também ocorreu para as amostras de magnésio, porém, em regiões mais próximas (regiões laterais) ao furo remanescente deixado pelo pino da ferramenta houve um aumento de dureza. Tal aumento se deve muito provavelmente a redução no tamanho de grão nestas regiões, conforme mostrado na Figura 83 e na Figura 84. Os demais perfis das outras condições serão inseridos nos Apêndices.

4.5 Análise de dados

Os resultados foram obtidos através da Análise de Variância (ANOVA) utilizando-se o módulo de análise de dados do Microsoft Excel. Os dados foram analisados separadamente, sendo que foi feita uma análise para cada ombro, buscando verificar a interação entre a influência (significância) do pino e da velocidade sobre a resistência ao cisalhamento.

Para tanto, foram colocadas juntas na ANOVA todos os resultados de ensaio de cisalhamento (no caso o resultado dos quatro corpos de prova ensaiados para cada condição de soldagem).

4.5.1 AA 6181

OMBRO CÔNCAVO

Utilizando-se a tabela ANOVA puderam ser verificados os seguintes resultados mostrados na Tabela 11:

Tabela 11- Resultados obtidos para o ombro côncavo das amostras de Al.

Fonte da variação	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Velocidade	174389,5	2	87194,74	0,499063	0,611238	3,259446
Pinos	24827487	3	8275829	47,36705	1,39E-12	2,866266
V x P	1977762	6	329627	1,886634	0,110003	2,363751
Erro	6289812	36	174717			
Total	33269451	47				

Para o parâmetro ser considerado significativo, o valor calculado de F deve ser superior ao valor de F crítico. Portanto, no caso do ombro côncavo, o valor de F calculado pode ser considerado significativo apenas com relação ao pino utilizado. Isto quer dizer que a velocidade do processo pode ser escolhida de maneira que seja mais conveniente para quem utilizará o processo e que a interação entre as velocidades e os pinos não foi significativa. Fazendo-se a comparação entre as médias chega-se ao seguinte gráfico mostrado na Figura 120:

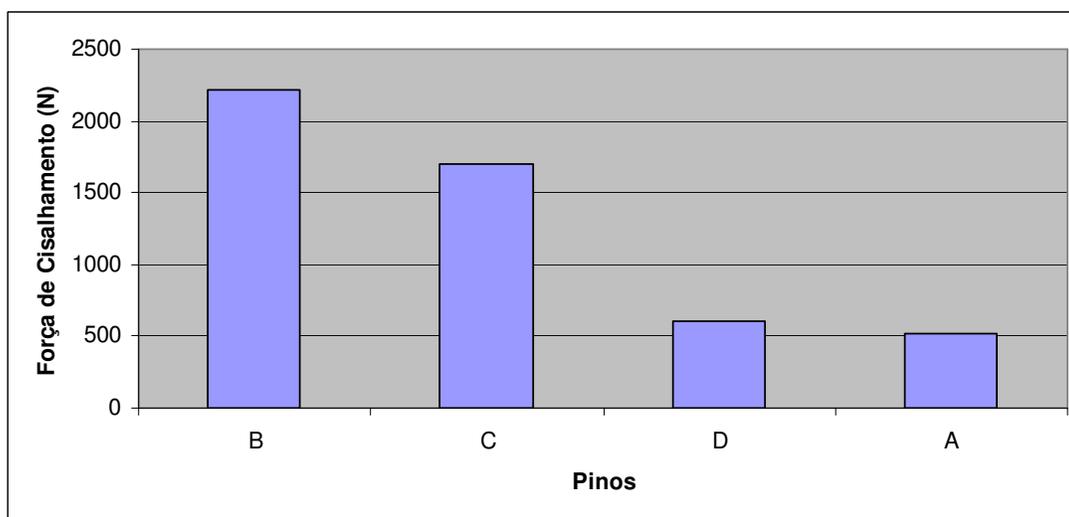


Figura 120- Comparação de médias múltiplas dos pinos utilizados para o ombro Cc.

Com estes resultados e utilizando este tipo de análise dos dados pode ser afirmado que o melhor pino a ser utilizado é o pino B, como a velocidade não se mostrou como um parâmetro significativo neste caso (F menor que F crítico), ela pode ser escolhida utilizando-se outro critério (redução de custos no processo, etc.).

OMBRO COM DUAS ESPIRAIS

Utilizando a tabela ANOVA para analisar o ombro com duas espirais se obteve o resultado mostrado na Tabela 12:

Tabela 12- Resultados obtidos para o ombro com duas espirais das amostras de Al.

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Velocidade	3617807	2	1808903	4,232586	0,02234	3,259446
Pinos	1085565	3	361855	0,846691	0,477468	2,866266
V x P	6815812	6	1135969	2,658011	0,03077	2,363751
Erro	15385516	36	427375,4			
Total	26904699	47				

Para este caso, os valores de F ficaram acima dos valores de F crítico para os parâmetros velocidade e, ainda, mostrou que a velocidade tem influência sobre o Pino escolhido. Portanto, os valores de velocidade e V x P são ambos significativos. A melhor condição analisada foi utilizando o pino B, com a velocidade intermediária de 2000 RPM. O gráfico mostrando a comparação entre as médias múltiplas é mostrado na Figura 121.

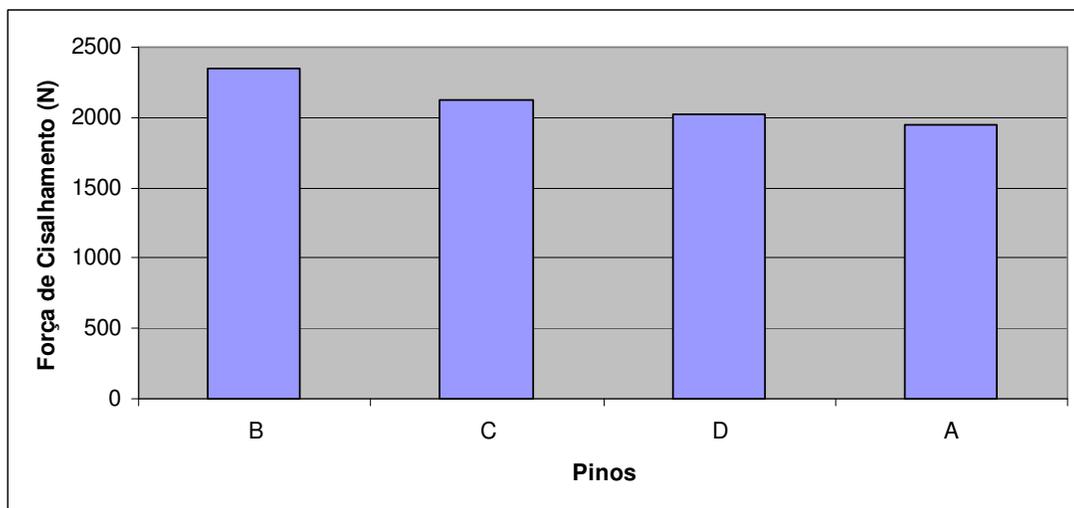


Figura 121- Comparação de médias múltiplas dos pinos utilizados para o ombro 2Sc.

Estes resultados afirmam que o pino a ser utilizado pode seguir outro critério de escolha, como na situação anterior para o ombro côncavo, porém, como a velocidade foi um parâmetro significativo, deve ser utilizada a de 3000 RPM.

OMBRO COM TRÊS ESPIRAIS

Para o ombro com três espirais o resultado aplicando a tabela ANOVA foi o mostrado na Tabela 13:

Tabela 13- Resultados obtidos para o ombro com três espirais das amostras de Al.

Fonte da variação	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Velocidade	6497603	2	3248802	10,98308	0,000189	3,259446
Pinos	14569236	3	4856412	16,41786	6,9E-07	2,866266
V x P	13472411	6	2245402	7,590932	2,61E-05	2,363751
Erro	10648819	36	295800,5			
Total	45188069	47				

Estes resultados mostram que os valores de F foram superiores aos valores de F crítico para todos os parâmetros Ainda pôde ser percebido que há a interação dos parâmetros V x P. Isto significa que são todos significativos, ou seja, nenhum deles pode ser variado independentemente. O gráfico mostrando a comparação entre as médias múltiplas é mostrado na Figura 122.

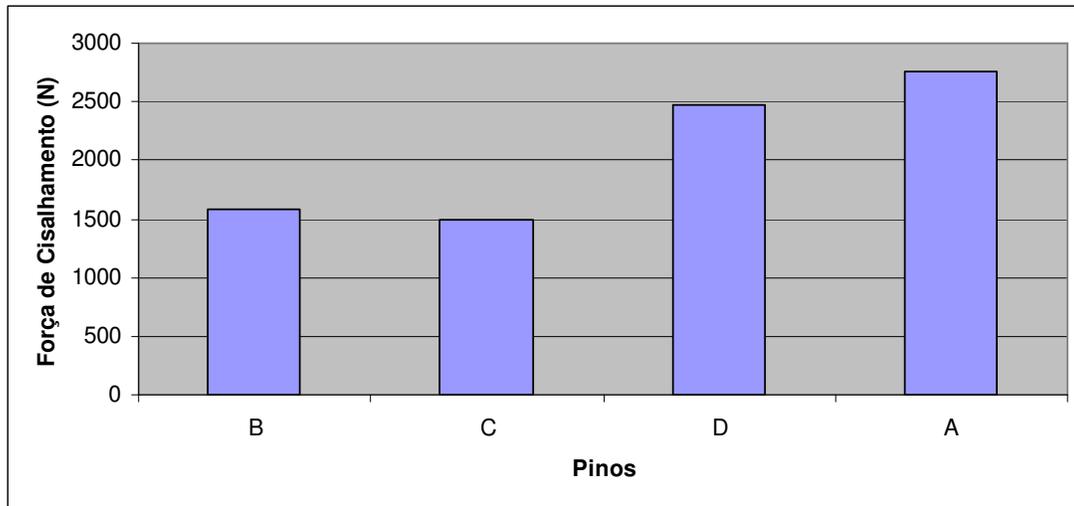


Figura 122- Comparação de médias múltiplas dos pinos utilizados para o ombro 3Sc.

Estes resultados afirmam que o melhor pino a ser utilizado é o pino A com a velocidade de 1000 RPM. Como os resultados todos foram significativos este deve ser o critério de escolha de ferramenta e velocidade de rotação.

4.5.2 Mg AZ31

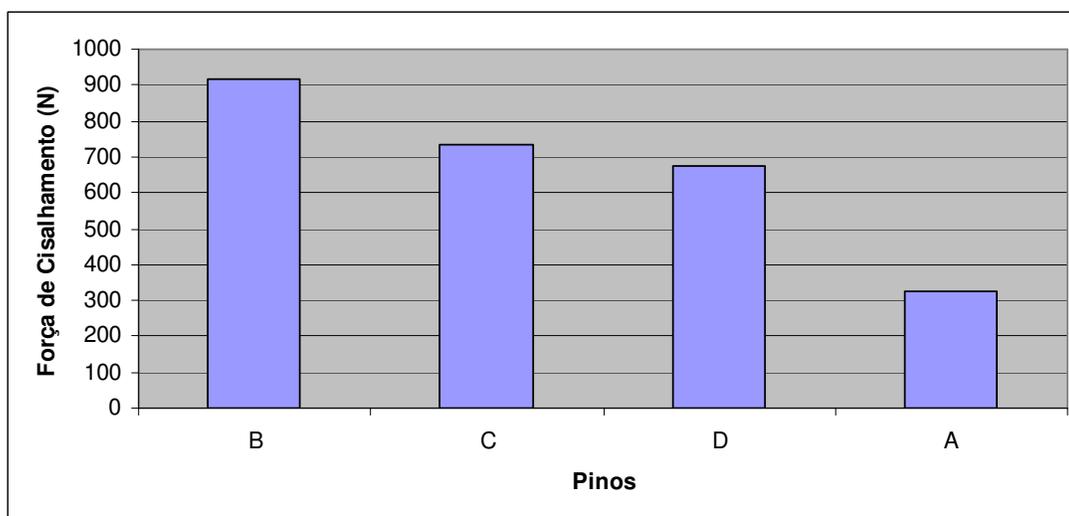
OMBRO CÔNCAVO

A tabela ANOVA para os resultados obtidos nas amostras de magnésio são mostrados na Tabela 14.

Tabela 14- Resultados obtidos para o ombro côncavo das amostras de Mg.

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Velocidade	784205,9	1	784205,9	54,35073	1,3E-07	4,259677
Pinos	1477298	3	492432,6	34,12888	8,04E-09	3,008787
V x P	482045,7	3	160681,9	11,13633	9E-05	3,008787
Erro	346286,8	24	14428,62			
Total	3089836	31				

Estes resultados mostram que os valores de F foram superiores aos valores de F crítico para todos os parâmetros, ainda pode ser percebido que há a interação dos parâmetros V x P. Isto significa que são todos significativos, ou seja, nenhum deles pode ser variado independentemente. O gráfico mostrando a comparação entre as médias múltiplas é mostrado na Figura 123.

**Figura 123- Comparação de médias múltiplas dos pinos utilizados para o ombro côncavo.**

Com estes resultados e utilizando-se este tipo de análise dos dados pode ser afirmado que o melhor pino a ser utilizado é o pino B, com a velocidade de 3000 RPM.

OMBRO COM DUAS ESPIRAIS

A tabela ANOVA para os resultados obtidos nas amostras de magnésio em ombro com duas espirais são mostrados na Tabela 15.

Tabela 15- Resultados obtidos para o ombro 2Sc das amostras de Mg.

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Velocidade	8776657	1	8776657	319,6049	2,25E-15	4,259677
Pinos	4901029	3	1633676	59,49086	2,93E-11	3,008787
V x P	3971953	3	1323984	48,21333	2,59E-10	3,008787
Erro	659063	24	27460,96			
Total	18308701	31				

Os resultados mostram também valores de F superiores aos valores de F crítico para todos os parâmetros, ainda pode ser percebido que os há a interação dos parâmetros V x P. Isto significa que são todos significativos, ou seja, nenhum deles pode ser variado independentemente. O gráfico mostrando a comparação entre as médias múltiplas é mostrado na Figura 124.

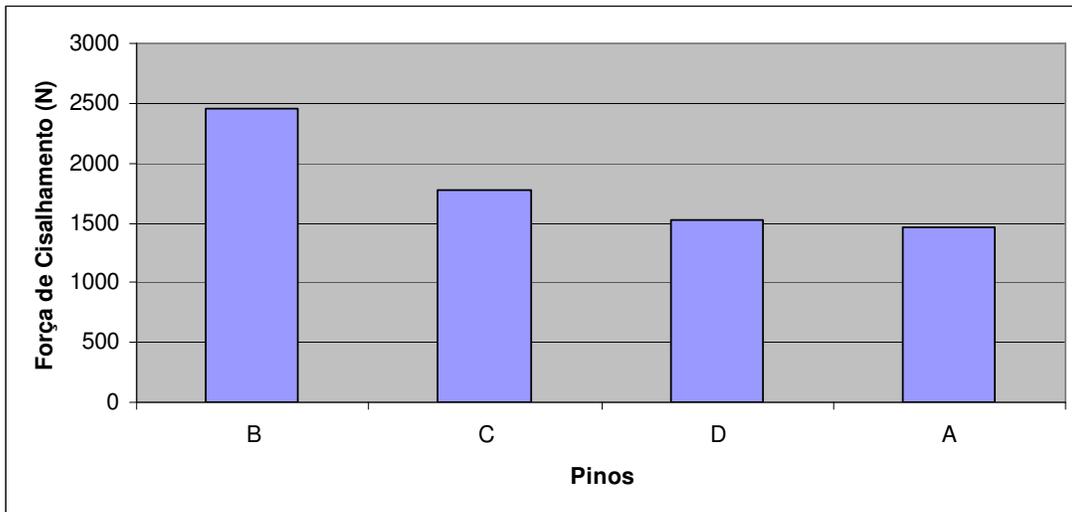


Figura 124- Comparação de médias múltiplas dos pinos utilizados para o ombro 2Sc.

Com estes resultados e utilizando-se este tipo de análise dos dados pode ser afirmado que o melhor pino a ser utilizado é o pino B, com a velocidade de 3000 RPM.

OMBRO COM TRÊS ESPIRAIS

A tabela ANOVA para os resultados obtidos nas amostras de magnésio em ombro com duas espirais são mostrados na Tabela 16

Tabela 16- Resultados obtidos para o ombro 3Sc das amostras de Mg.

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Velocidade	481519	1	481519	26,84023	2,63E-05	4,259677
Pinos	5862716	3	1954239	108,9307	4,1E-14	3,008787
V x P	8910916	3	2970305	165,567	3,62E-16	3,008787
Erro	430564,8	24	17940,2			
Total	15685716	31				

Como aconteceu em todas as amostras de magnésio, os resultados mostram também valores de F superiores aos valores de F crítico para todos os parâmetros. Pode ainda ser percebido que há a interação dos parâmetros V x P. Isto significa que são todos

significativos, ou seja, nenhum deles pode ser variado independentemente. O gráfico mostrando a comparação entre as médias múltiplas é mostrado na Figura 125.

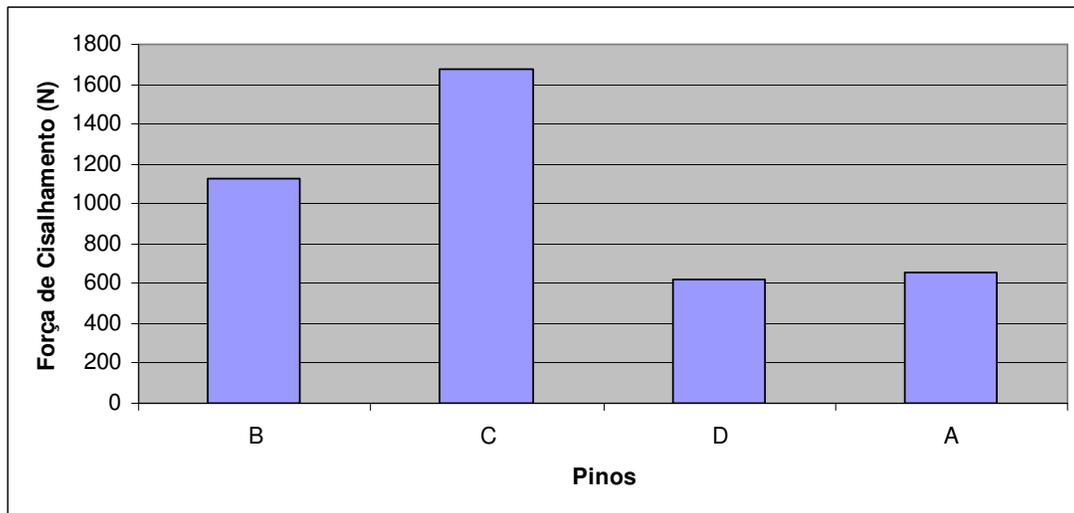


Figura 125- Comparação de médias múltiplas dos pinos utilizados para o ombro 3Sc.

Estes resultados afirmam que o melhor pino a ser utilizado é o pino C, com a velocidade de 2500 RPM.

5 Conclusões

Neste trabalho foi investigado o efeito do perfil de ferramentas sobre as propriedades de juntas soldadas por SPFMM das ligas AA 6181 e AZ31, com diferentes velocidades de rotação. Deste modo as seguintes conclusões podem ser apresentadas:

Com relação ao material AA 6181:

- 1- Foi possível realizar a soldagem por SPFMM das amostras de alumínio utilizando a matriz de parâmetros desenvolvida, bem como os perfis de ferramentas projetados.
- 2- A utilização de velocidades de rotação mais altas leva a obtenção de uma maior CL e, em consequência, uma maior resistência mecânica da junta soldada.
- 3- A metalografia indicou a formação de duas zonas distintas, a ZM e a ZTMA. Porém, os perfis de microdureza indicam a presença também de uma ZTA além do material de base.
- 4- A metalografia mostrou a formação de grãos menores na região da ZM, com partículas de segunda fase também menores, provavelmente quebradas durante o processo, diferentemente da região do material de base onde as partículas de segunda fase têm forma de bastão. Os grãos menores recristalizados presentes na ZM provavelmente se devem as altas energias térmicas e de deformação presentes no processo nesta região.
- 5- A ZTMA apresenta grãos deformados que, ao contrário da ZM, não tiveram energia suficiente para que ocorra a recristalização dos mesmos.
- 6- A ZM apresentou uma tendência de ser menor de acordo com a velocidade de rotação utilizada,. Maiores velocidades de rotação mostraram na maioria das vezes menor ZM.
- 7- Os perfis de microdureza mostraram uma menor dureza na região da ZM, o que se deve muito provavelmente a fenômenos de recristalização naquela região, onde os grãos não estão encruados como na ZTMA.
- 8- O fluxo de material corroborou a teoria de dois padrões de fluxo concomitantes, um interno e outro externo, com movimento de material das chapas inferiores para as superiores em um destes padrões e transporte de material da chapa superior para inferior no outro padrão.
- 9- A utilização de maiores velocidades de rotação implicou em valores mais baixos de torque alcançados durante o processo, o que implicou em uma menor energia total do processo.

- 10- As forças geradas no processo seguiram um padrão, formando um pico primário F1, que ocorre quando a ferramenta começa a penetrar nas chapas. Após o contato do ombro com a chapa superior se percebe a formação do pico secundário de força F2, seguido de uma região onde a força se mantém constante, que é a etapa do tempo de mistura de dois segundos estipulado no processo.
- 11- A análise de dados realizada com os resultados obtidos nos ensaios de cisalhamento mostrou uma discrepância nos resultados. A análise de dados separada por diferentes ombros da ferramenta levou a conclusão de que para o ombro côncavo as o melhor pino foi o pino B, sendo que a velocidade não mostrou ser um parâmetro significativo, o que nos dá liberdade de escolher a velocidade que convir por outro critério de escolha. Para o ombro de duas espirais o pino não mostrou ser um parâmetro significativo, podendo ser utilizado outro critério de escolha do pino. E a melhor velocidade foi a de 3000 RPM, que neste caso foi um parâmetro significativo. Para o ombro de três espirais, todos os parâmetros foram significativos, o que significa que a melhor condição a ser utilizada é o pino C, com a velocidade de rotação de 1000 RPM.
- 12- A utilização de velocidades de rotação menores produziu menor CL na maioria dos casos. Porém, se observou uma deformação maior na fratura e maior energia durante o ensaio de cisalhamento.

Com relação ao material AZ31:

- 1- Foi possível realizar a soldagem por SPFMM das amostras de magnésio utilizando a matriz de parâmetros desenvolvida, bem como os perfis de ferramentas projetados.
- 2- A utilização de velocidades de rotação mais altas leva a se obter uma maior CL e, em consequência, uma maior resistência mecânica da junta soldada.
- 3- Velocidades de rotação abaixo de 2500 RPM mantendo os outros parâmetros constantes não promoveram a consolidação da junta soldada.
- 4- A metalografia indicou a formação de duas zonas distintas, a ZM e a ZTMA. Porém, os perfis de microdureza indicam a presença também de uma ZTA além do material de base.
- 5- Não se observou um padrão de tamanho da ZM de acordo com a velocidade de rotação utilizada.

- 6- A utilização de maiores velocidades de rotação implicou em valores mais baixos de torque alcançados durante o processo, o que implicou em uma menor energia total do processo.
- 7- As forças geradas no processo seguiram um padrão, formando um pico primário F1, que ocorre quando a ferramenta começa a penetrar nas chapas. Após o contato do ombro com a chapa superior se percebe a formação do pico secundário de força F2, seguido de uma região onde a força se mantém constante, que é a etapa do tempo de mistura de dois segundos estipulado no processo.
- 8- A análise de dados para os ensaios de cisalhamento realizados nas juntas de magnésio não mostraram a mesma discrepância observada nas amostras de alumínio. As análises também foram realizadas por cada ombro utilizado e em todos os casos todos os valores obtidos foram significativos, o que significa que esta análise indica os melhores parâmetros a serem utilizados. Para o ombro côncavo, a melhor condição de soldagem é utilizar o pino B, com velocidade de 3000 RPM. Para o ombro com duas espirais o pino a ser utilizado é também o B com velocidade de rotação de 3000 RPM. Para o ombro com três espirais a melhor condição é usar o pino C com velocidade de rotação de 2500 RPM.
- 9- A utilização de velocidades de rotação menores produziu menor CL na maioria dos casos. Neste material também se observou uma deformação maior na fratura e maior energia durante o ensaio de cisalhamento. A idéia de aumentar a CL porém utilizando-se baixas velocidade de rotação é interessante.

Referências Bibliográficas

- 1 C. Schilling, J.F. dos Santos, Verfahren und vorrichtung zum verbiden von wenigstens zwei aneinanderliegenden werkstücken nach der methode des reibrührschweißens, German Patent DE 199 55 737 B4 2005.11.10. B
- 2 C. Schilling and J.F. dos Santos, Method and device for joining at least two adjoining work pieces by friction welding, European Patent EP 1 230 062 B1, 17.05.2006.
- 3 C. Schilling and J.F. dos Santos, Method and device for joining at least two adjoining work pieces by friction welding, United States Patent US 6,722,556 B2, April 20, 2004.
- 4 Materials World, Vol. 12, No. 3, pp. 37-38, March 2004.
- 5 www.matweb.com
- 6 T. Nagasawa, M. Otsuka, T. Yokota, T. Ueki. "Structure and Mechanical Properties of Friction Stir Weld Joints of Magnesium Alloy AZ31". 2000.
- 7 H. Zhang, S.B. Lin, L. Wu, J.C. Feng, S.L. Ma. "Defects Formation Procedure and Mathematical Model for Defect Free Friction Stir Welding of Magnesium Alloy". 2005.
- 8 Magnesium wrought alloys for automotive applications", by Rudolf Gradinger (ARC Leichtmetallkompetenzzentrum Ranshofen GmbH, Ranshofen-Austria) and Peter Stolfig (Stolfig GmbH, Geisenfeld-Germany).
- 9 J. Yan, Z. Wu, Z. Li, L. Li, S. Yang. "Microstructure characteristics and performance of dissimilar welds between magnesium alloy and aluminium formed by friction stirring". 2005.
- 10 C.I. Chang, C.J. Lee, J.C. Huang. "Relationship between grain size and Zener-Holloman parameter during friction stir processing in AZ31 Mg alloys". 2004.
- 11 D. Zhang, M. Suzuki, K. Maruyama, "Microstructural evolution of a heat-resistant magnesium alloy due to friction stir welding". 2005.
- 12 N. Neelanmegham, H.I. Kaplan, B.R. Powell. Magnesium Technology. 2005.
- 13 A. Gerlich, P. Su, T.H. North and G. J. Bendzsak, "Friction Stir Spot Welding of Aluminum and Magnesium Alloys", 2005. Materials Forum Volume 29.
- 14 Z. Feng, M. L. Santella , S. A. David, R.J. Steel, S. M. Packer, T. Pan, M. Kuo and R.S. Bhatnagar, "Friction Stir Spot Welding of Advanced High-Strength Steels- A Feasibility Study", 2005. SAE international Annual Meeting.
- 15 C. Schilling, A. v. Strombeck, J.F. dos Santos and N. v Heesen, "A Preliminary Investigation on the Static Properties of Friction Stir Spot Welds. "2nd International Symposium on Friction Stir Welding, June 26-28, 2000, Gothemburg, Sweden.

-
- 16 A. Gerlich, P. Su, T. H. North and G. J. Bendzsak, "Mechanism of Stir Zone Formation during Friction Stir Spot welding". Metallurgical and Materials Transactions. June 2006.
- 17 A. Gerlich, P. Su and T.H. North, Peak Temperatures and Microstructures in Al and Mg Alloy FSW Spot Welds, Science and Technology of Welding and Joining, December 2004.
- 18 A Gerlich, G A Cingara and T H North, "Microstructure and strain rate in Al 7075-T6 spot welds", March 2006, Metallurgical and Materials Transactions A.
- 19 T.Y. Pan, M.L. Santella, P.K. Mallick, A. Frederick, Spot friction welding of thin AZ31 magnesium alloy, Friction Stir Welding and Processing IV, TMS 2007, 323-331.
- 20 A.C. Addison, A.J. Robelou, Friction Stir Spot Welding: Principal parameters and their effects, Proceedings of the 5th International Symposium on Friction Stir Welding – 5th ISFSW, 14-16 September 2004, Metz, France.
- 21 A. Gerlich, P. Su. T.H North, Tool penetration during friction stir spot welding of Al and Mg alloys, Journal of Materials Science 40 (2005 A), p 6473-6481.
- 22 T.-Y. Pan, W. Zhu, W. Schwartz. Spot Friction Welding – A New Joining Method for Aluminium Sheets. In: Proceedings of International Automotive Body Congress – IABC 2005, Vol. 2, September 20-21 2005, Ann Arbor, Michigan, 95-99.
- 23 K. Okamoto, F. Hunt, S. Hirano, Development of Friction Stir Welding Technique and Machine for Aluminum Sheet Metal Assembly – Friction Stir Welding of Aluminum for Automotive Applications (2) - 2005 SAE Congress, Detroit, SAE Technical paper SP-1959, p 121-125.
- 24 H. Badarinarayan, F. Hunt, K. Okamoto. Friction Stir Stitch Welding – Process Development and Mechanical Property Evaluation. 6th International Symposium of Friction Stir Welding ISFSW6, 10-13 October 2006, Montreal, Canada
- 25 B.T. Tweedy, C.A. Widener, D.A. Burford, The effect of surface treatments on the faying surface of friction stir spot welds, Friction Stir Welding and Processing IV, TMS 2007, 333-340.
- 26 P. Su, A. Gerlich, T.H. North and G.J. Bendzsak, "Material flow during friction stir spot welding". Sci. Technol. Welding and Joining, August 2005.
- 27 Gerlich A, Su P, Yamamoto M and North T. H, Effect of Welding Parameters on the Strain rate and microstructure of Friction Stir Spot Welded 2024 Aluminum Alloy, Journal of Materials Science, Accepted October 3 2006.
- 28 P. Su, A. Gerlich, T.H. North and G.J. Bendzsak, Intermixing in Dissimilar Friction Stir Spot Welds, Metallurgical and Materials Transactions A, Volume 38A, March 2007, 585-595.

-
- 29 S. Kalagara and K. H. Muci-küchler, W.J. Arbegast, Preliminary study of material flow in friction stir spot welding using copper as marker material, Friction Stir Welding and Processing IV, TMS 2007, 349-358.
- 30 P. Su, A. Gerlich, T.H. North and G.J. Bendzsak, Energy Utilization and Generation During Friction Stir Spot Welding, Science and Technology of Welding and Joining 2006 Vol 11 No 2, 163-169. A
- 31 A. Gerlich, G.Avrarnovic-Cingara and T. H. North, The influence of processing parameters on microstructure of Al 5754 friction stir spot welding, Materials Science Forum Vols 519-521 (2006), p 1107-1112. Proceedings of 10th International conference, Aluminum alloys, (ICCA 10), Vancouver, Canada, 2006. B
- 32 T.H. North, G. J. Bendzsak, P. Su, G.A. Cingara and C. Maldonado, Understanding Friction Welding, Proceedings of the Inter-University Research Seminar (IURS 2000), Tsinghua University, Beijing, August 2005. B
- 33 Y. Tozaki, Y. Uematsu, K. Tokaji, Effect of Welding condition on Tensile Strength of dissimilar friction stir spot welds between different aluminium alloys, Proceedings of the 6th International Symposium of Friction Stir Welding, 6th ISFSW, 10-13 October, 2006.
- 34 P. Su, A. Gerlich, T.H. North and G.J. Bendzsak, Energy generation and stir zone dimensions in friction stir spot weldings, SAE technical series, 2006, 2006-01-0971. Warrendale, USA. SAE. B
- 35 M. Valant, E. Yarrapareddy and R. Kovacevic, A novel tool design for friction stir spot welding, Proceedings of the 7th International Conference on Trends in Welding Research, May 16-20, 2005, Callaway Gardens Resort, Pine Mountain, Georgia, USA.
- 36 D. E. Clark, K. S. Miller and C. R. Tolle, "Tool Design in Friction Stir Processing: Dynamic Forces and Material Flow". 7th International Conference of Trends in Welding Research, May 16-20, Pine Mountain, Georgia, USA.
- 37 P. Su, A. Gerlich and T. H. North, "Friction Stir Spot Welding of Aluminum and Magnesium Alloys". 5th SAE International Annual Meeting, 2005.
- 38 A. Gerlich, P. Su, T.H. North, Friction Stir Spot Welding of Mg-Alloys for automotive applications, Magnesium Technology 2005, p 383-388, TMS 2005. (D)
- 39 T. A. Freeney et al, "Effect of welding parameters on properties of 5052 Al friction stir spot weldings", 2006 SAE congress, Detroit, SAE Technical paper 2006-01- 0969, Book number SP 2034, Warrendale, USA. SAE.

-
- 40 R. S. Mishra, T.A. Freeney, S. Webb, Y.L. Chen, X.Q. Garden, D.R. Herlinh and G.J. Grant, Friction stir spot welding of 6016 aluminum alloy, Friction Stir Welding and Processing IV, TMS 2007, 341-347.
- 41 P. Su, A. Gerlich et al, Similar and Dissimilar Friction Stir Spot Welding of Mg- Alloy, Proceedings of the Magnesium Technology in global age Symposium, 2006. D
- 42 T.H. North, G. J. Bendzsak, P. Su, G.A. Cingara and C. Maldonado, Understanding Friction Welding, Proceedings of the Inter-University Research Seminar (IURS 2000), Tsinghua University, Beijing, August 2005. B.
- 43 DIN EN ISO 14273:2002-03 Specimens Dimensions and Procedure for Shear Testing Resistance Spot, Seam and Embossed Projection Welds.
- 44 H. Schmidt and J. Hattel „A local model for the thermomechanical conditions in friction stir welding“ Modelling And Simulation in Materials Science and Engineering. Pag. 77-93, 2005.
- 45 R.S. Mishra and Z. Y. Ma, „Friction Stir Welding and Processing“. Reports: A Review Journal. Pag 1-78, (2005).
- 46 Da Silva, M. Tier, T. Rosendo, F.D. Ramos, C. Mazzaferro, J. Mazzaferro, L. Bergmann, T.R. Strohaecker, J.F. dos Santos, Friction Spot and Friction Stir Spot Welding Processes – A Literature Review, Bulletin of National R&D Institute for Welding and Material Testing, ISSN 1453-0392, 3/2007.
- 47 A. Gerlich, M. Yamamoto and T. North, “Local melting and tool slippage during friction stir spot welding of Al-alloys”, Journal of Materials Science. Volume 43, pag. 02-11, 2008.
- 48 M. Tier1, T. Rosendo, C.W. Olea, C. Mazzaferro, F.D. Ramos, M. Bayer, J.F. dos Santos, A.A.M. da Silva, J. Mazzaferro and T.R. Strohaecker. „The Influence of Weld Microstructure on Mechanical Properties of Refill Friction Spot Welding of 5042 Aluminium Alloy“. 7th International Symposium on Friction Stir Welding Awaji Island, Japan, 20-22nd May 2008
- 49 R.S. Mishra, M. W. Mahoney „Friction Stir Welding and Processing“ Von Rajiv S. Mishra, Murray W. Mahoney ,ASM International, 2007. ISBN 0871708485, 9780871708489, páginas 262-272.
- 50 Kyffin W.J, Threadgill P. L, Lalvani H, Wynne B. P, Progress in FSSW of DP800 High Strength Automotive Steel, 6th International Symposium of Friction Stir Welding, 6th ISFSW 10-14 September 2006, Canada.

51 W. J. Kyffin, A. C. Addison, J. Martin, and P. L. Threadgill, "Recent Developments in Friction Stir Spot Welding of Automotive Steels". Sheet Metal Welding Conference XII, Livonia, MI. May, 9-12 2006.

ANEXOS

Perfis de microdureza de amostras de alumínio

Ferramenta F1:

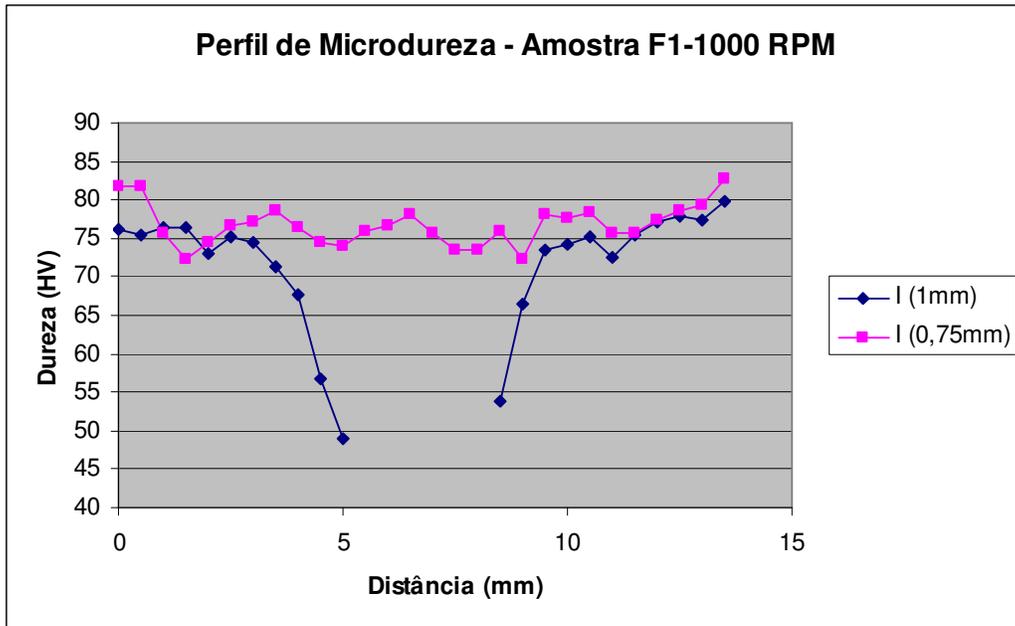


Figura A- 1- Perfil de microdureza da amostra soldada com a ferramenta F1 com 1000 RPM.

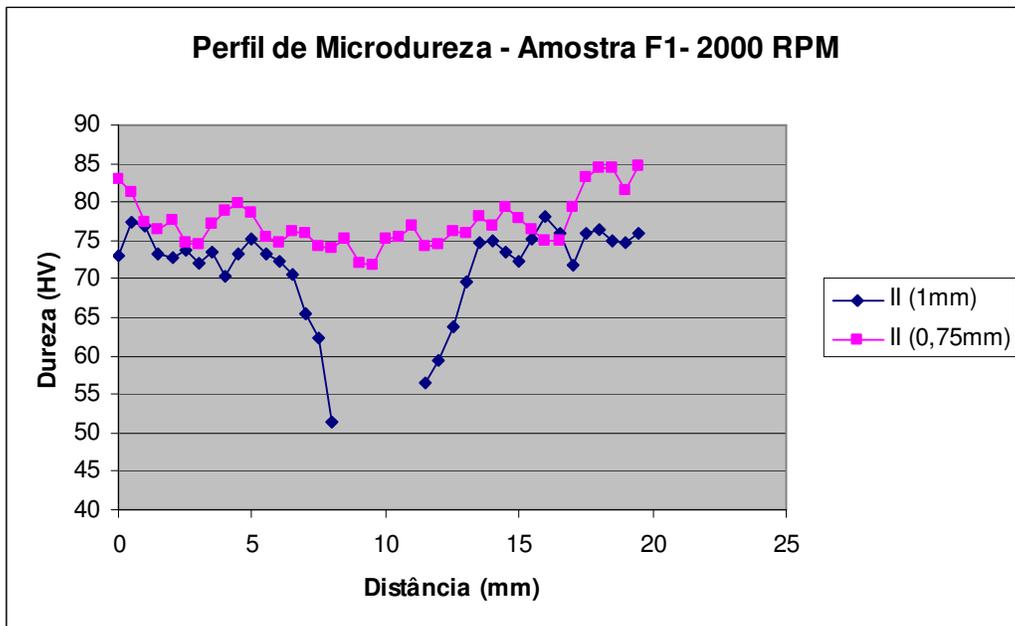


Figura A- 2- Perfil de microdureza da amostra soldada com a ferramenta F1 com 2000 RPM.

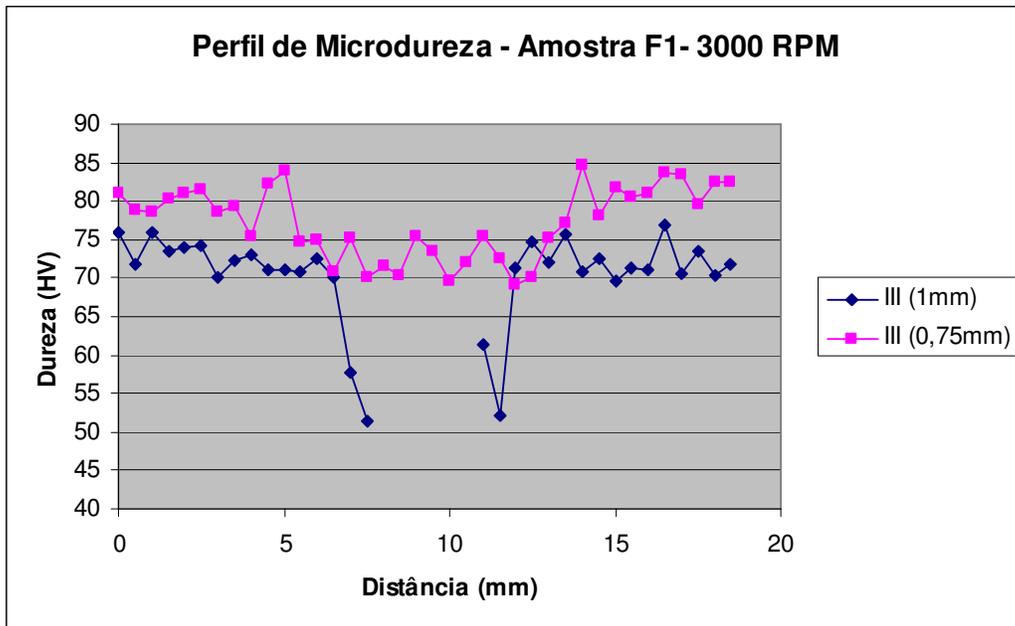


Figura A- 3- Perfil de microdureza da amostra soldada com a ferramenta F1 com 3000 RPM.

Ferramenta F2:

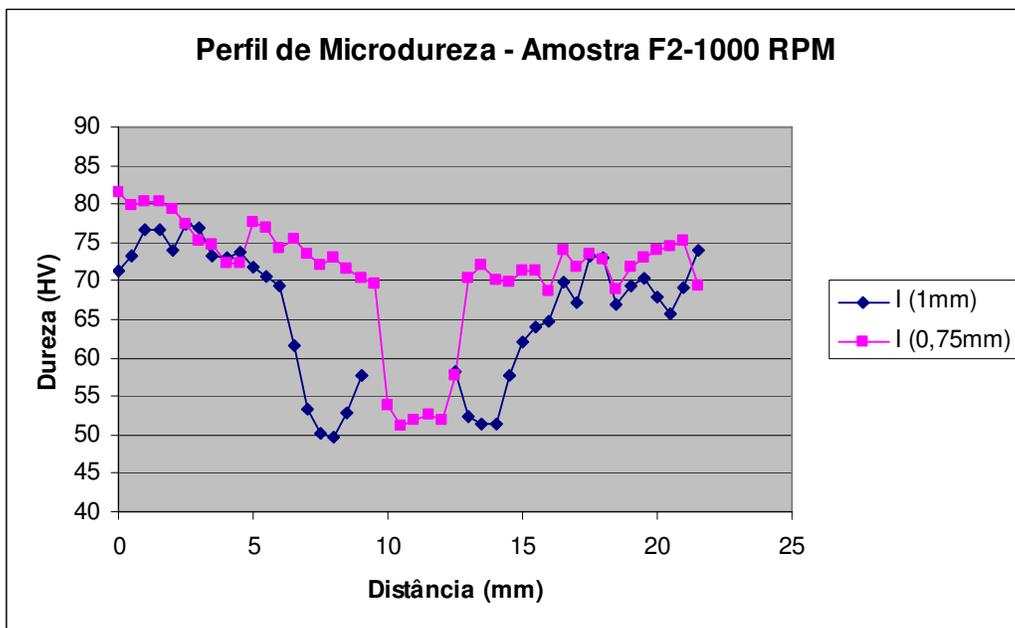


Figura A- 4- Perfil de microdureza da amostra soldada com a ferramenta F2 com 1000 RPM.

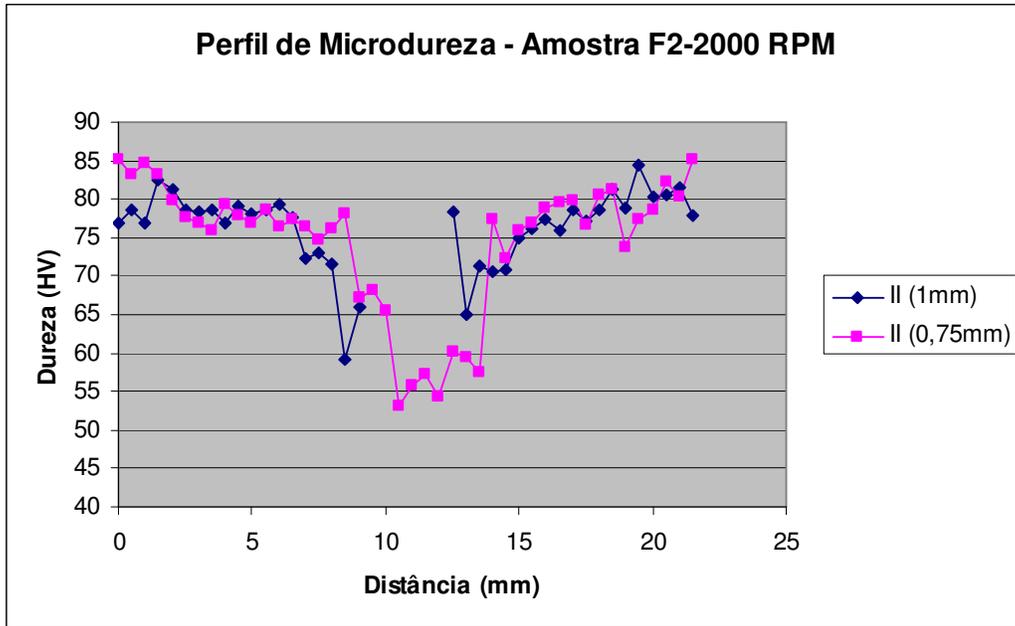


Figura A- 5- Perfil de microdureza da amostra soldada com a ferramenta F2 com 2000 RPM.

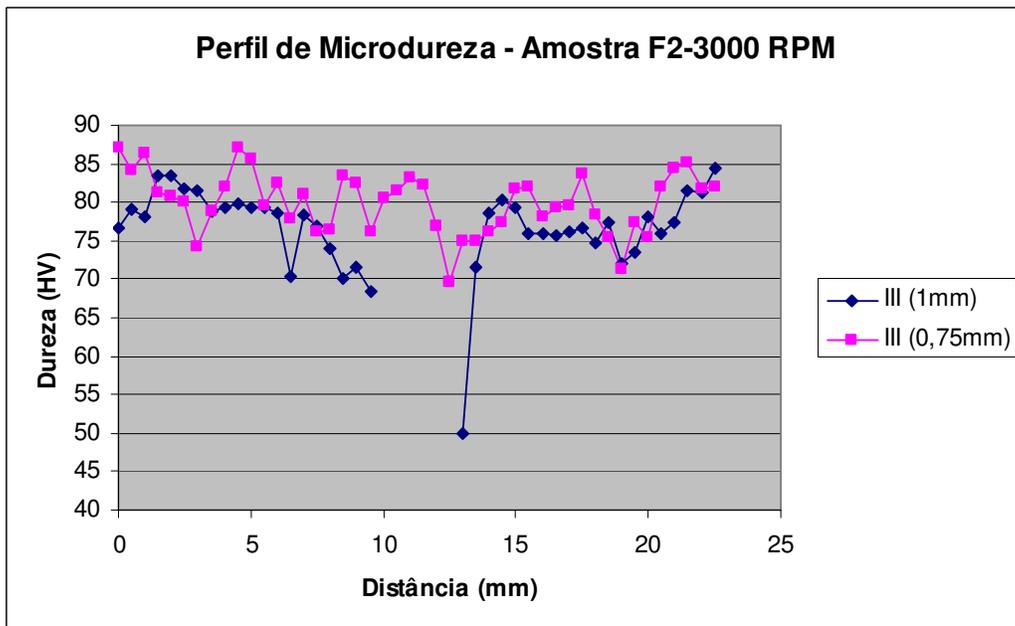


Figura A- 6- Perfil de microdureza da amostra soldada com a ferramenta F2 com 3000 RPM.

Ferramenta F3:

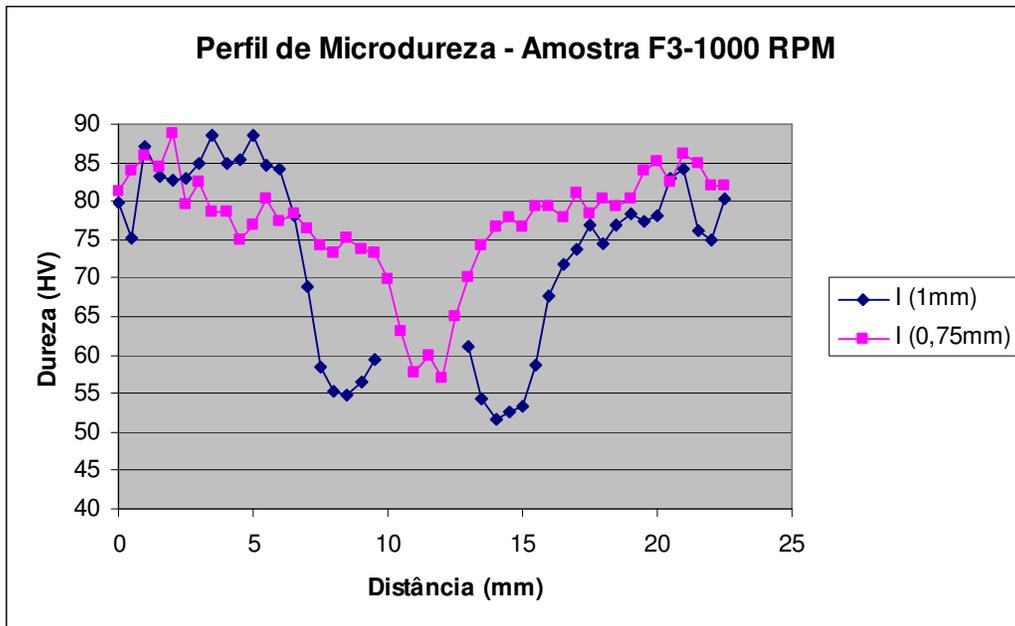


Figura A- 7- Perfil de microdureza da amostra soldada com a ferramenta F3 com 1000 RPM.

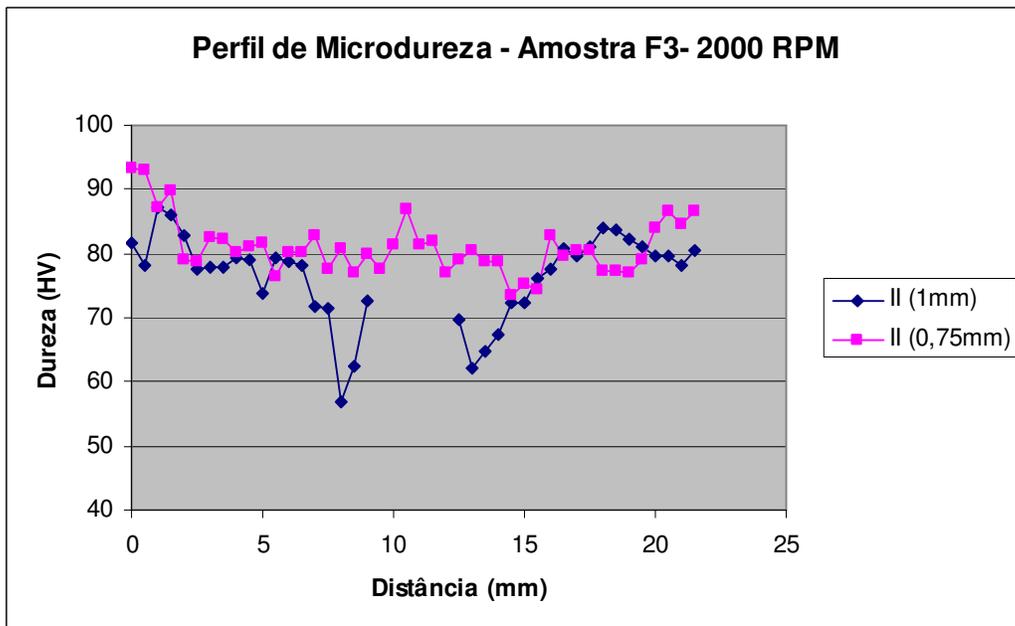


Figura A- 8- Perfil de microdureza da amostra soldada com a ferramenta F3 com 2000 RPM.

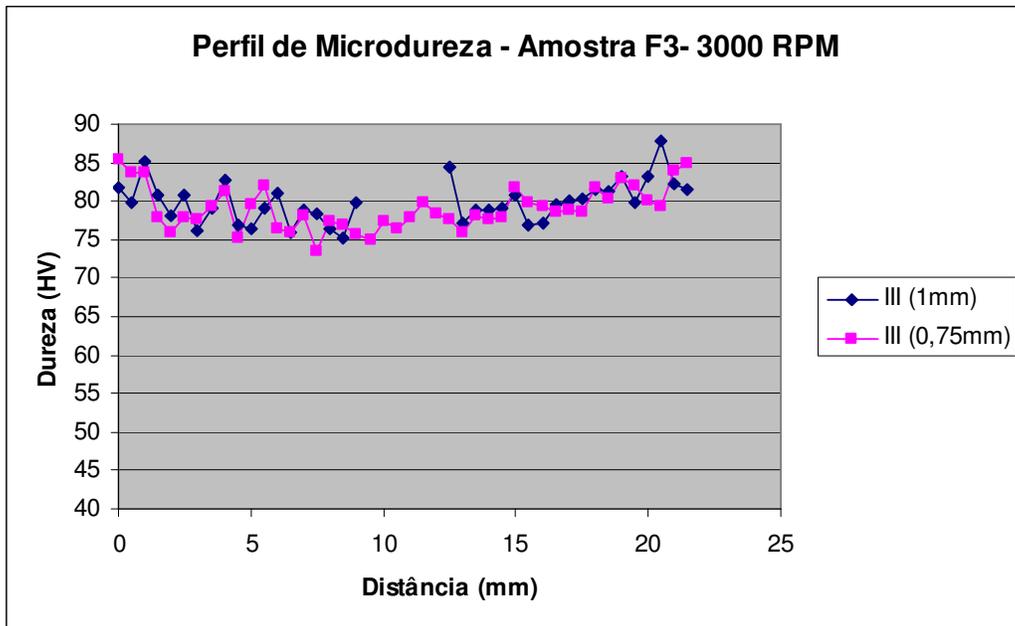


Figura A- 9- Perfil de microdureza da amostra soldada com a ferramenta F3 com 3000 RPM.

Ferramenta F4:

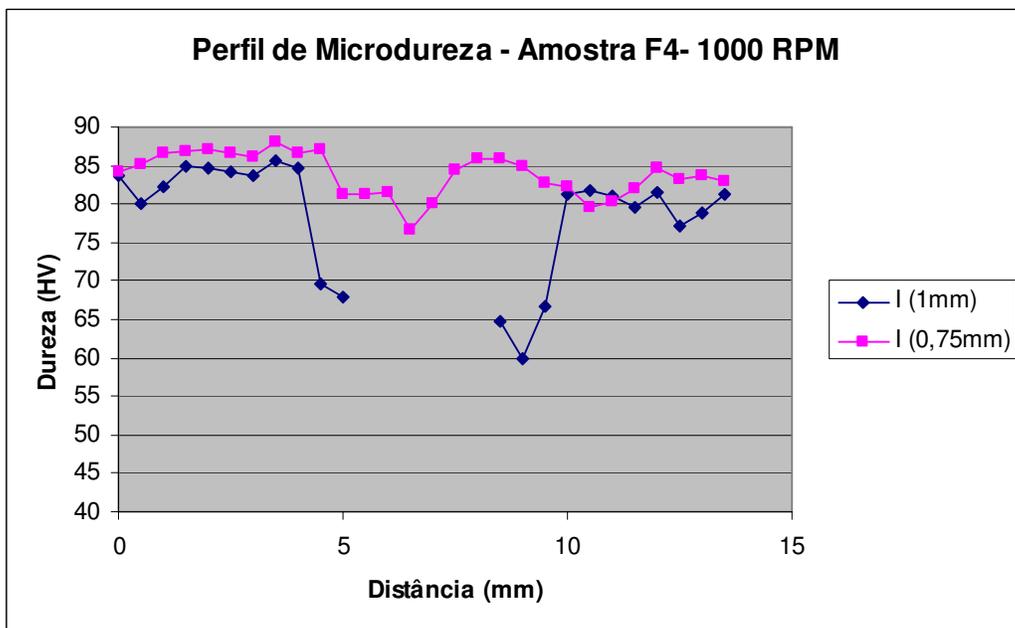


Figura A- 10- Perfil de microdureza da amostra soldada com a ferramenta F4 com 1000 RPM.

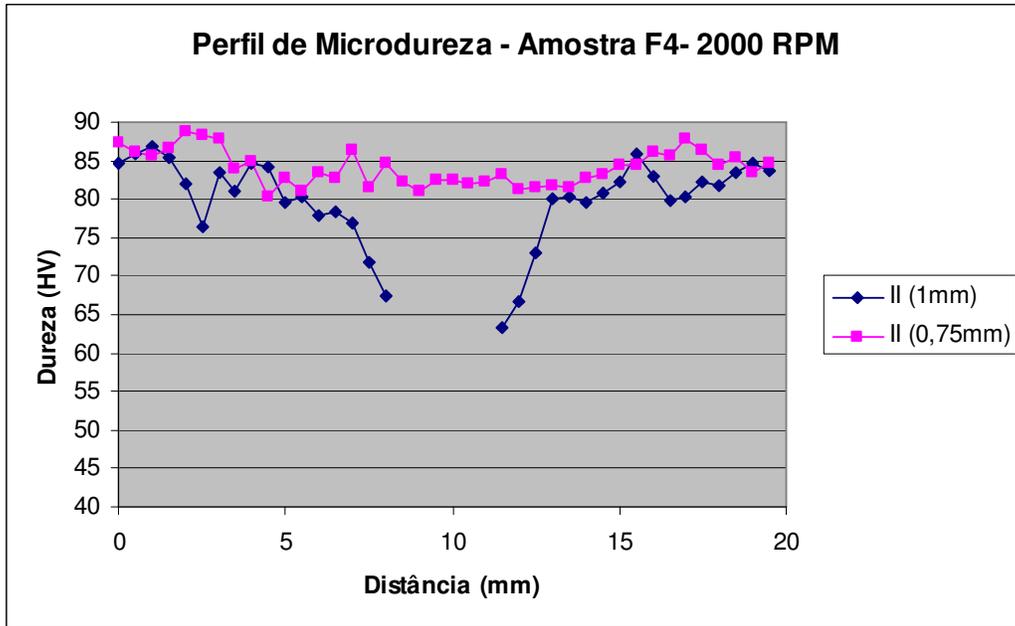


Figura A- 11- Perfil de microdureza da amostra soldada com a ferramenta F4 com 2000 RPM.

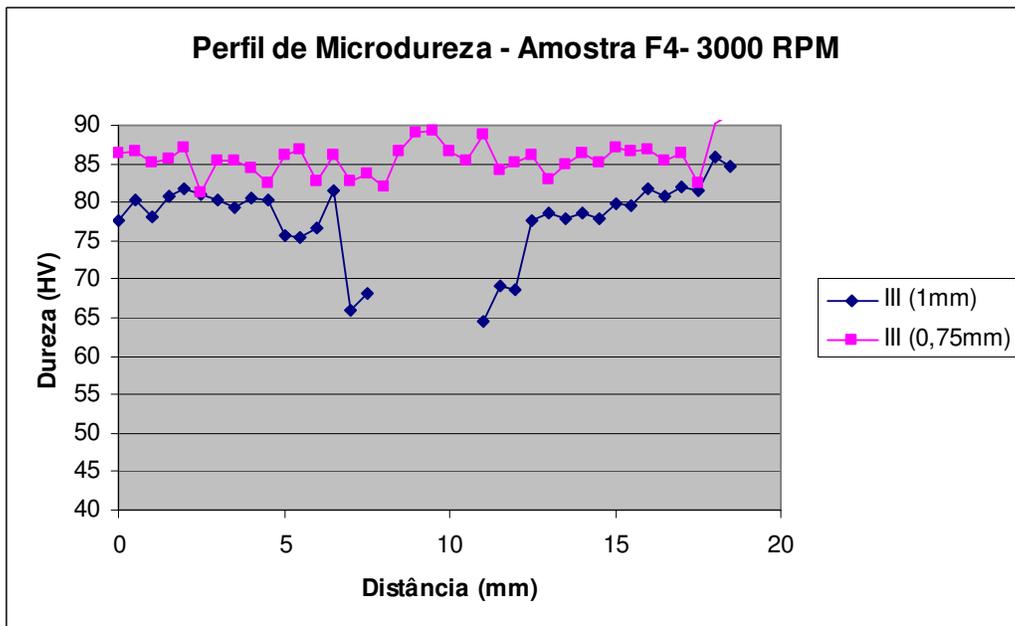


Figura A- 12- Perfil de microdureza da amostra soldada com a ferramenta F4 com 3000 RPM.

Ferramenta F5:

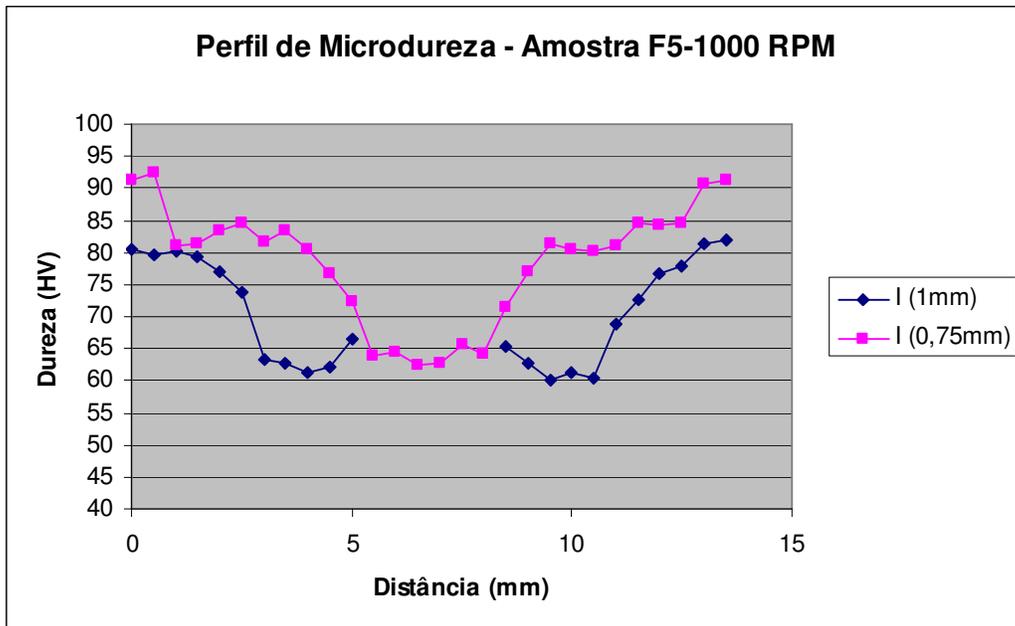


Figura A- 13- Perfil de microdureza da amostra soldada com a ferramenta F5 com 1000 RPM.

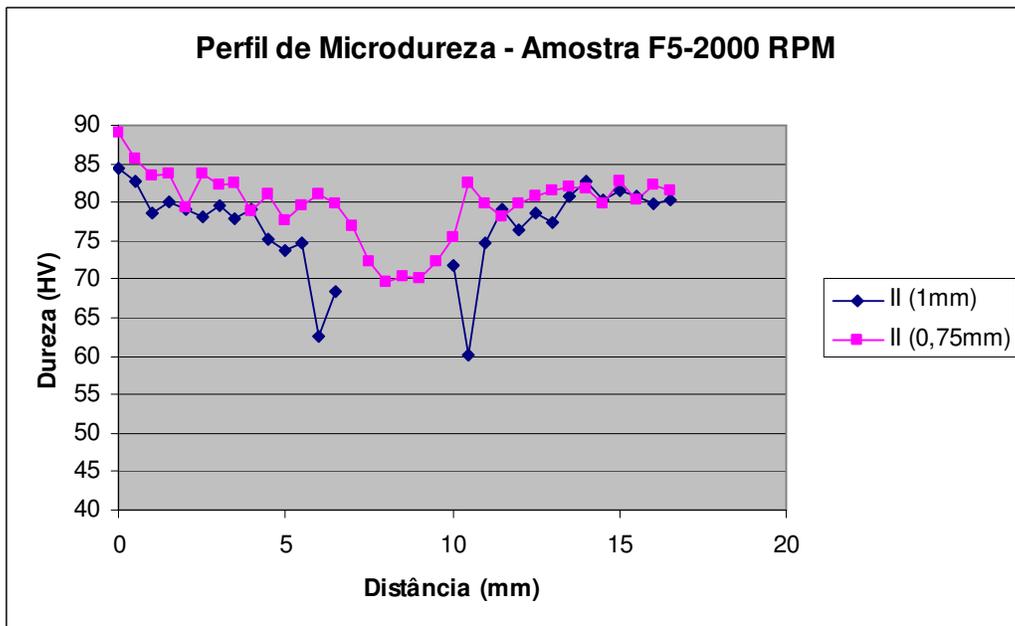


Figura A- 14- Perfil de microdureza da amostra soldada com a ferramenta F5 com 2000 RPM.

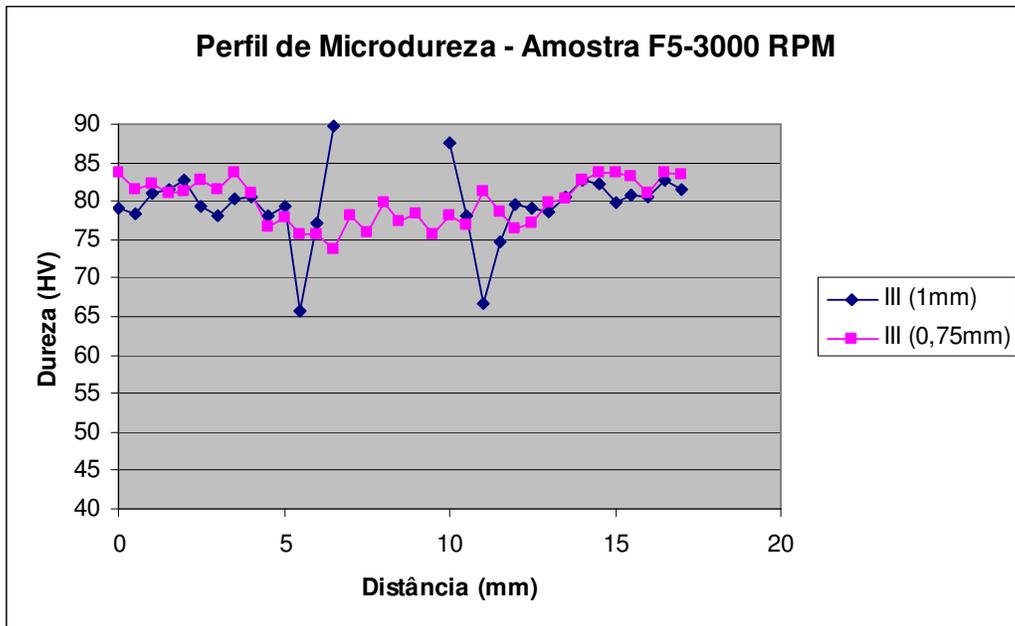


Figura A- 15- Perfil de microdureza da amostra soldada com a ferramenta F5 com 3000 RPM.

Ferramenta F6:

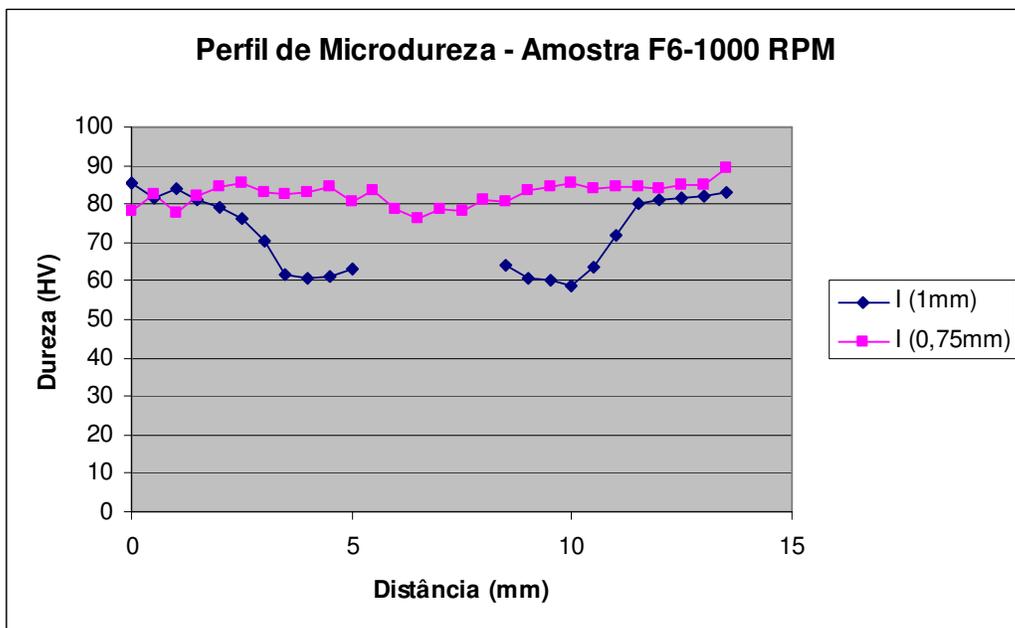


Figura A- 16- Perfil de microdureza da amostra soldada com a ferramenta F6 com 1000 RPM.

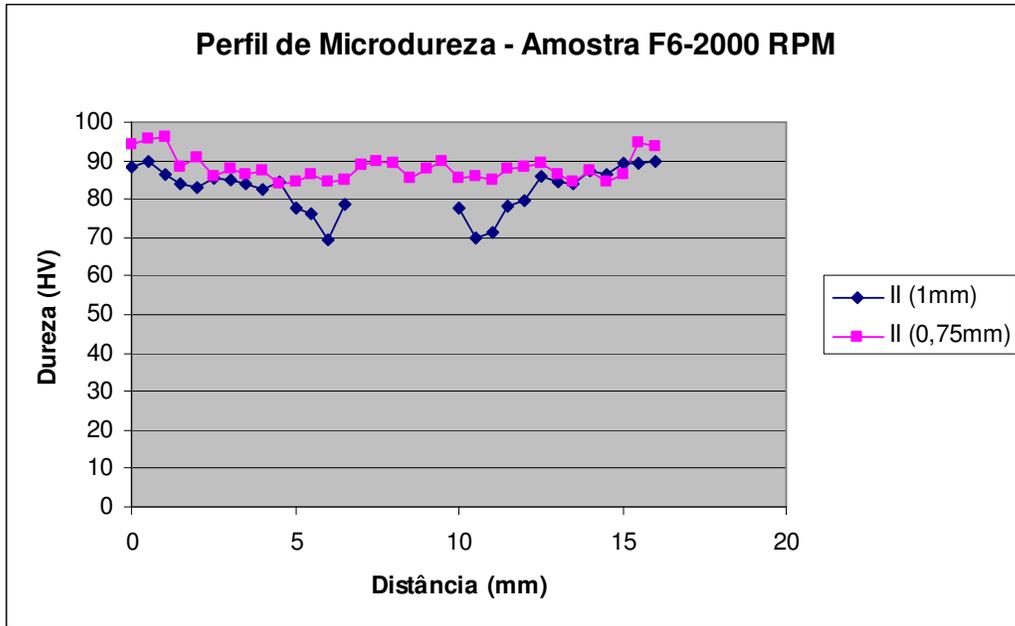


Figura A- 17- Perfil de microdureza da amostra soldada com a ferramenta F6 com 2000 RPM.

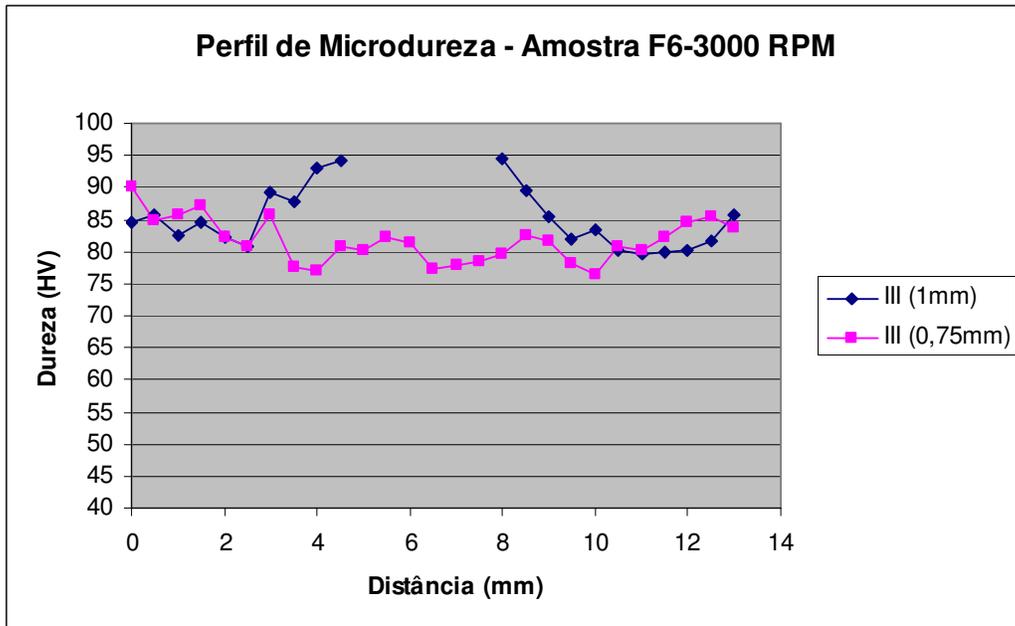


Figura A- 18- Perfil de microdureza da amostra soldada com a ferramenta F6 com 3000 RPM.

Ferramenta F7:

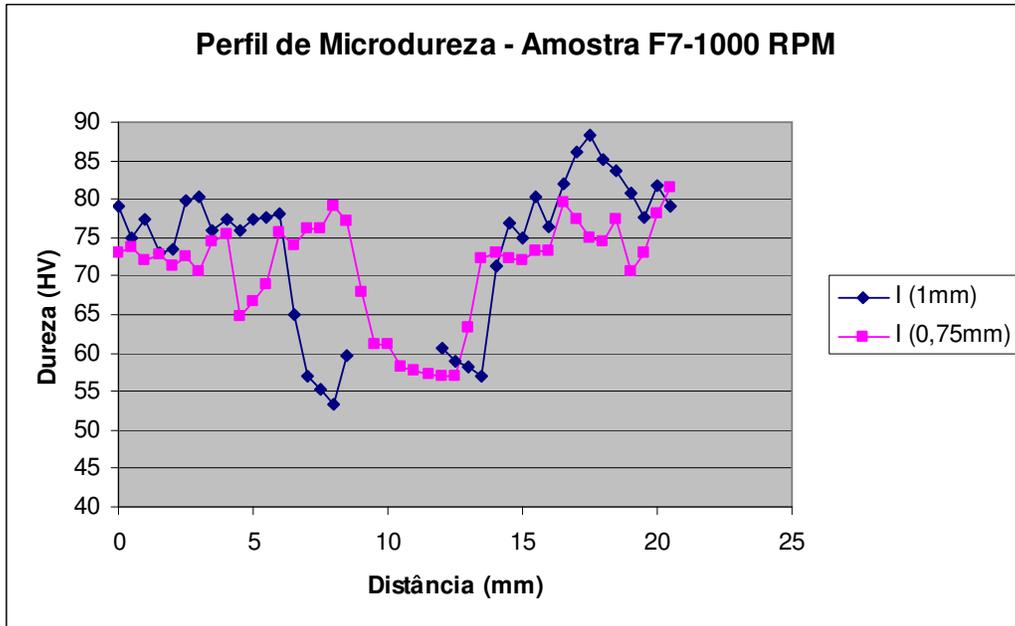


Figura A- 19- Perfil de microdureza da amostra soldada com a ferramenta F7 com 1000 RPM.

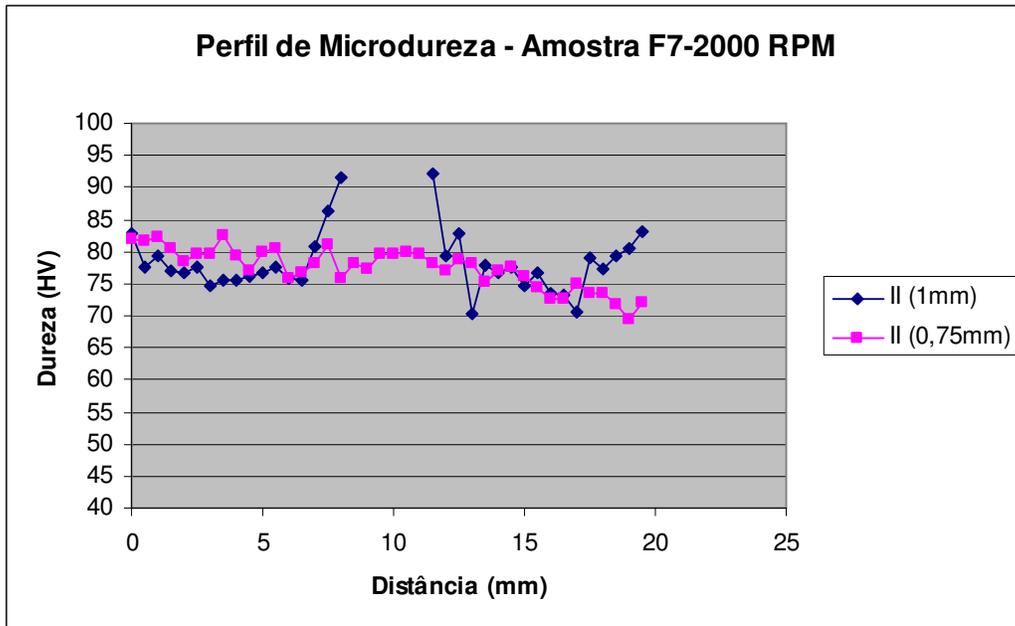


Figura A- 20- Perfil de microdureza da amostra soldada com a ferramenta F7 com 2000 RPM.

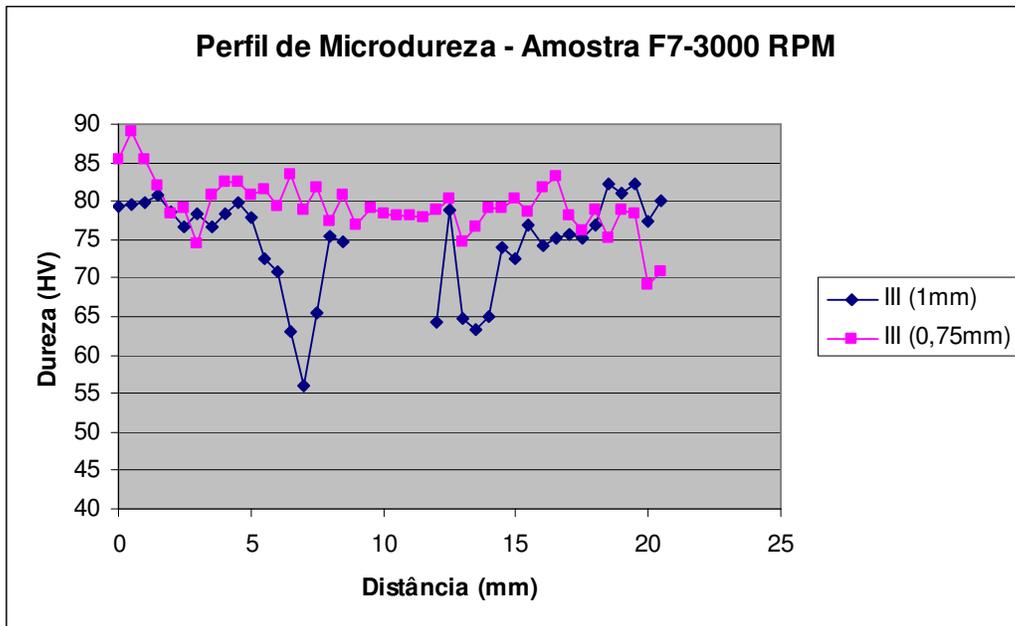


Figura A- 21- Perfil de microdureza da amostra soldada com a ferramenta F1 com 3000 RPM.

Ferramenta F8:

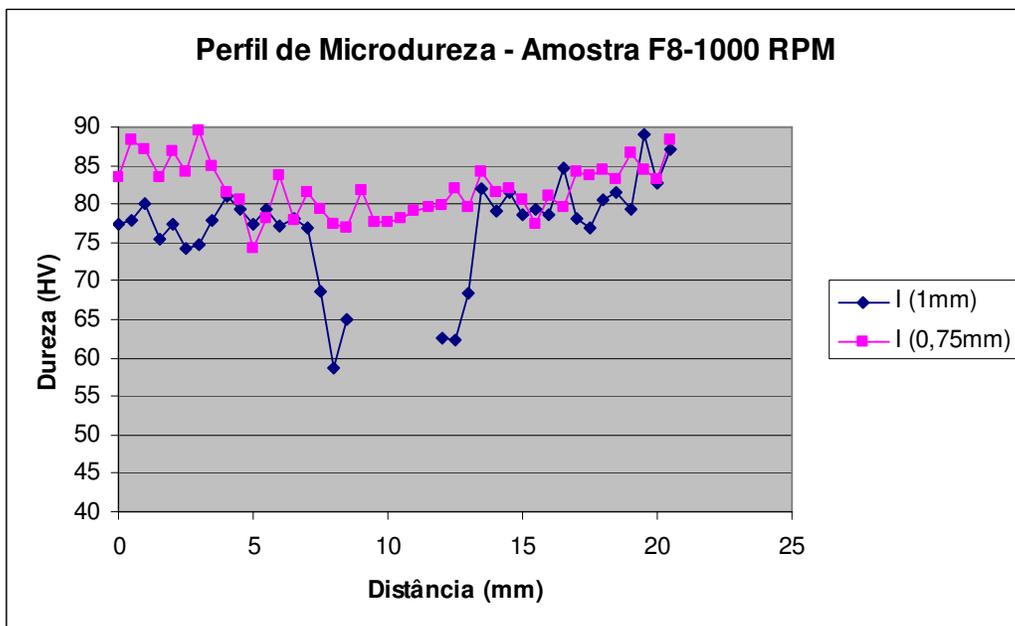


Figura A- 22- Perfil de microdureza da amostra soldada com a ferramenta F8 com 1000 RPM.

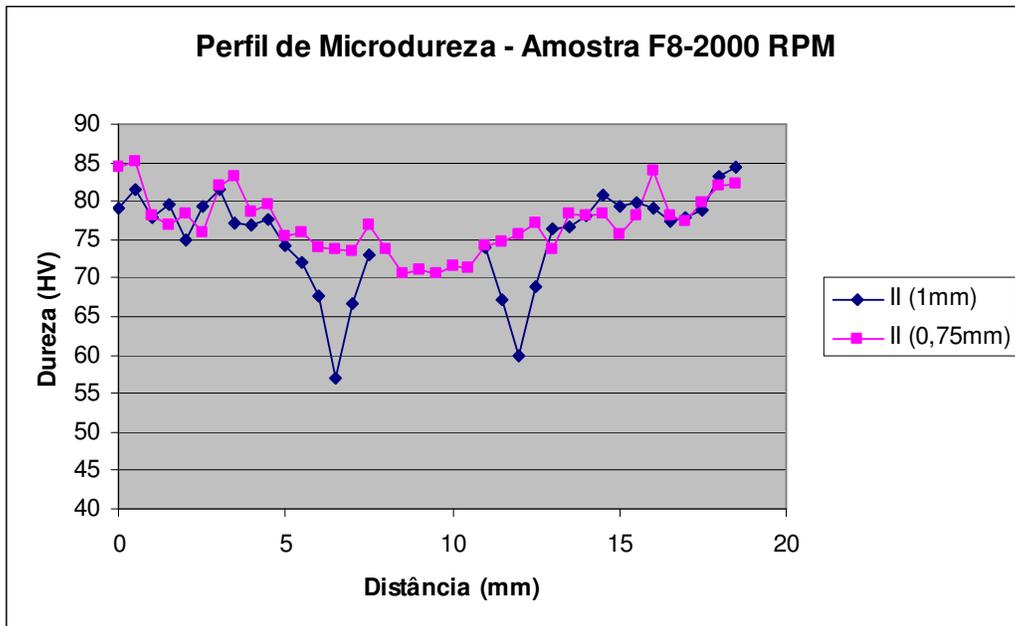


Figura A- 23- Perfil de microdureza da amostra soldada com a ferramenta F8 com 2000 RPM.

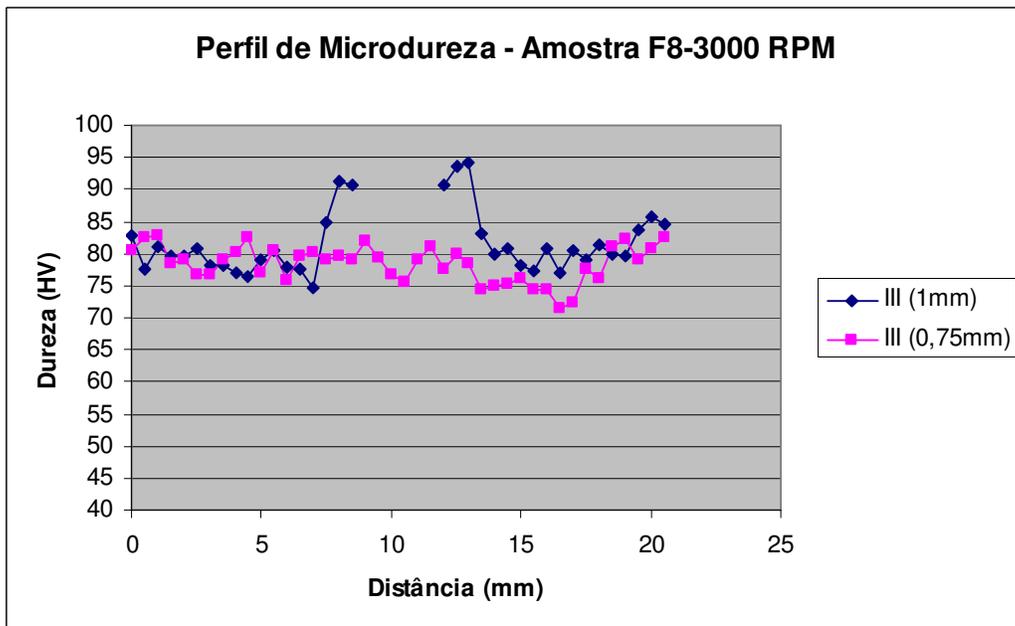


Figura A- 24- Perfil de microdureza da amostra soldada com a ferramenta F8 com 3000 RPM.

Ferramenta F9:

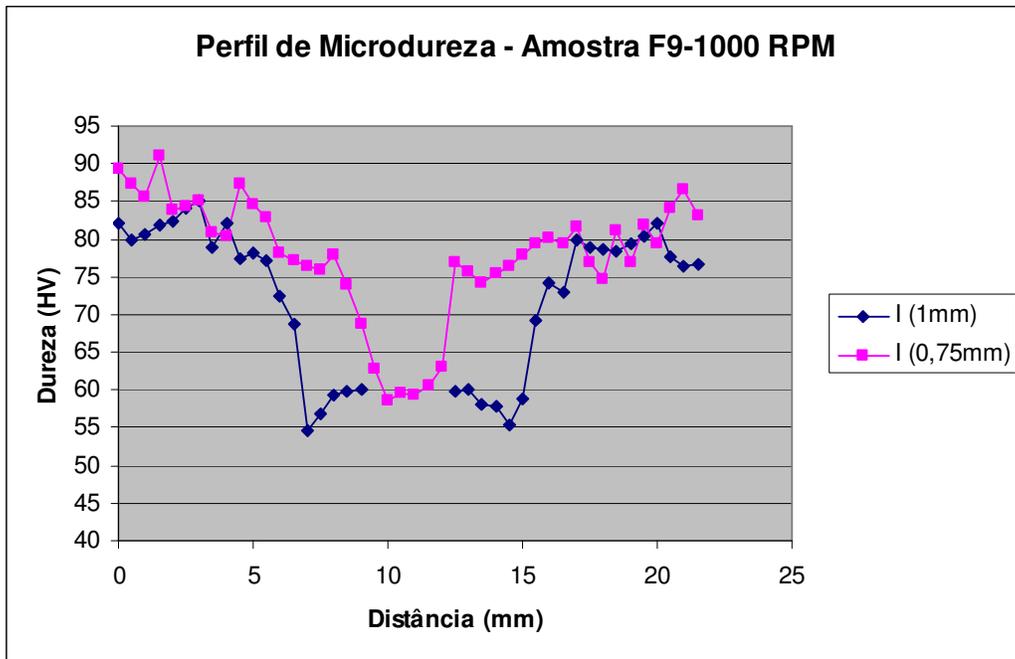


Figura A- 25- Perfil de microdureza da amostra soldada com a ferramenta F9 com 1000 RPM.

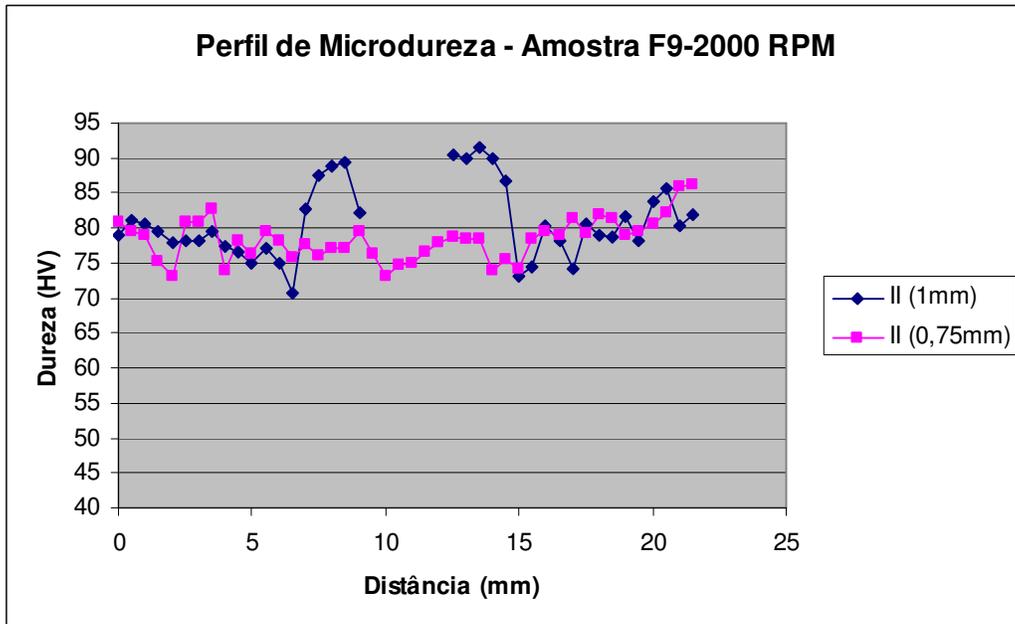


Figura A- 26- Perfil de microdureza da amostra soldada com a ferramenta F9 com 2000 RPM.

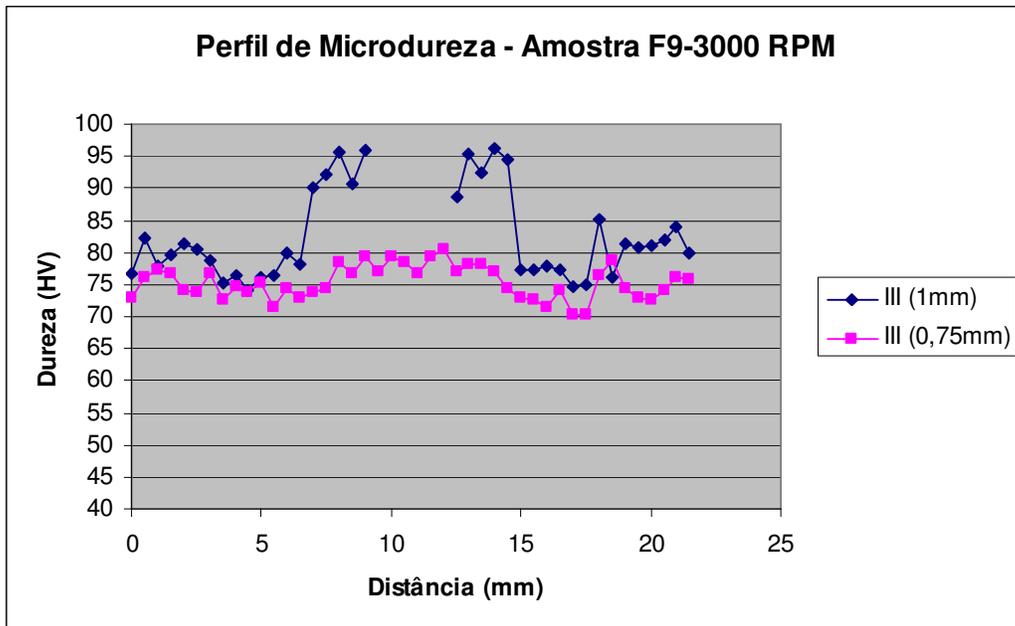


Figura A- 27- Perfil de microdureza da amostra soldada com a ferramenta F9 com 3000 RPM.

Ferramenta F10

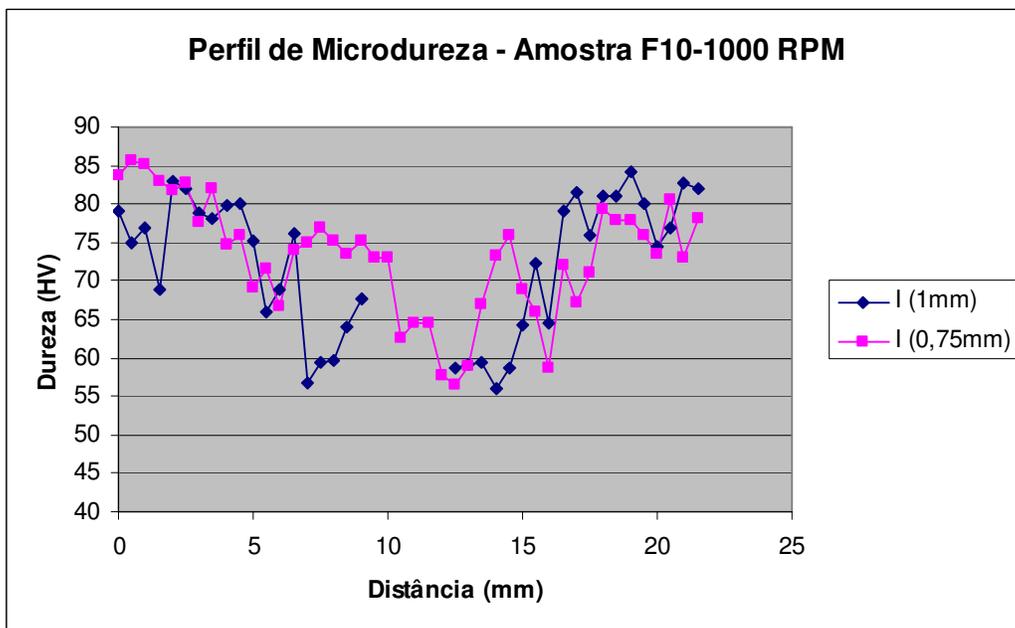


Figura A- 28- Perfil de microdureza da amostra soldada com a ferramenta F10 com 1000 RPM.

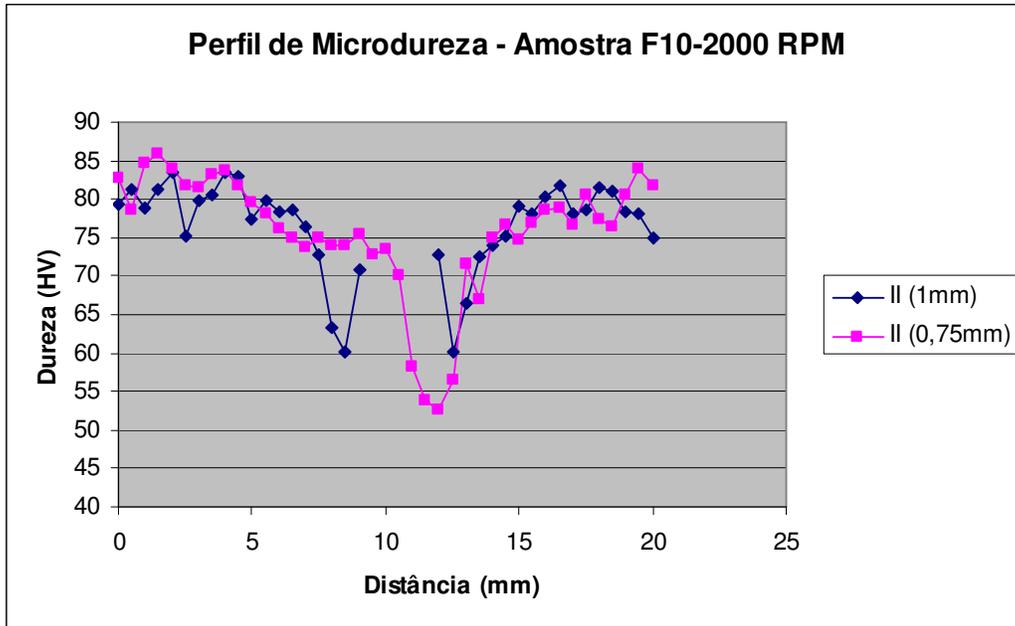


Figura A- 29- Perfil de microdureza da amostra soldada com a ferramenta F10 com 2000 RPM.

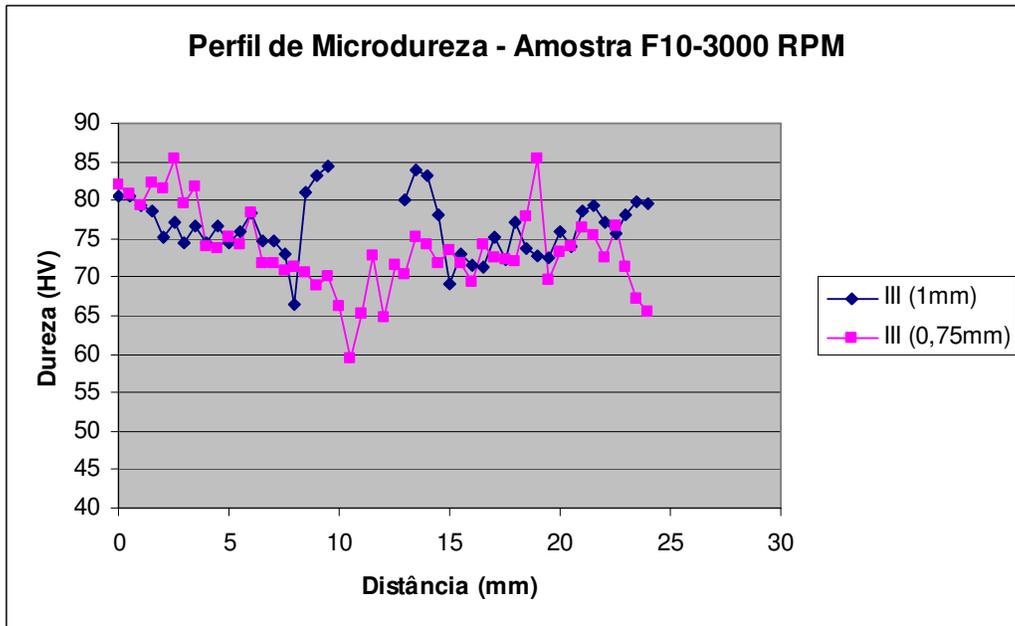


Figura A- 30- Perfil de microdureza da amostra soldada com a ferramenta F10 com 3000 RPM.

Ferramenta F11:

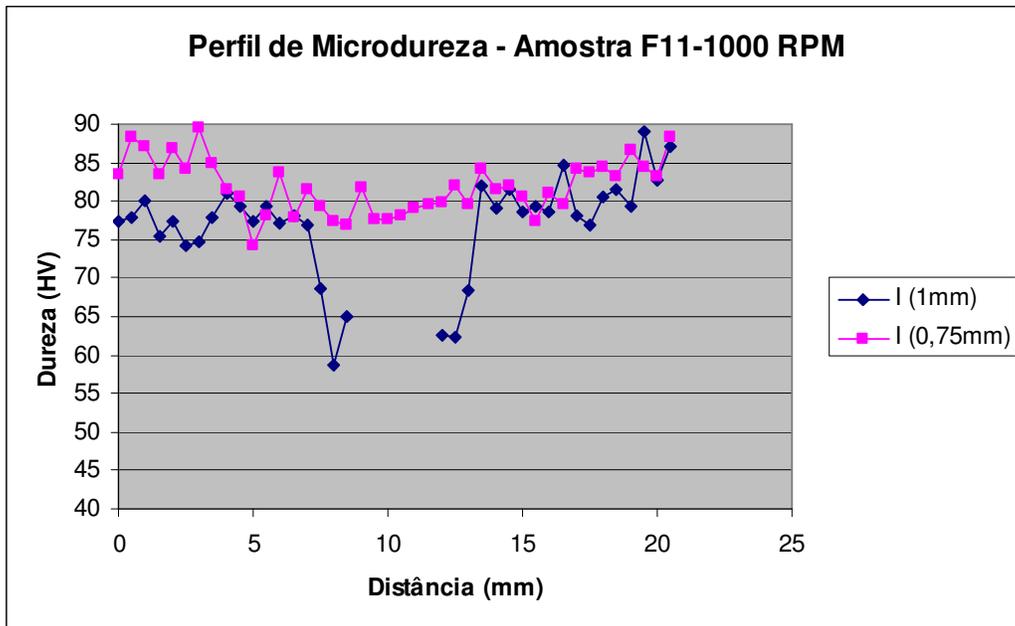


Figura A- 31- Perfil de microdureza da amostra soldada com a ferramenta F11 com 1000 RPM.

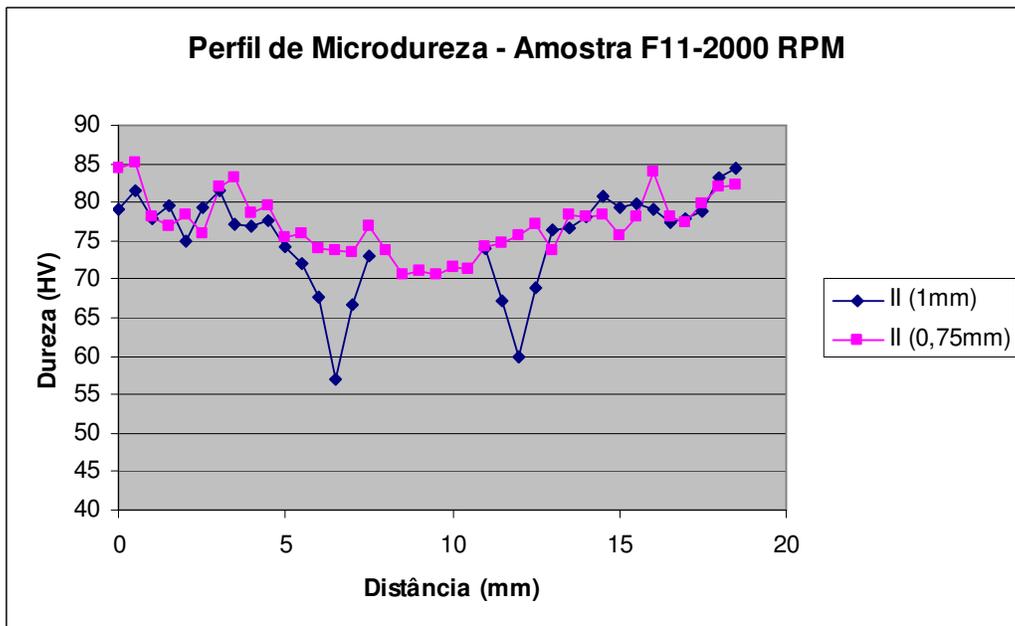


Figura A- 32- Perfil de microdureza da amostra soldada com a ferramenta F11 com 2000 RPM.

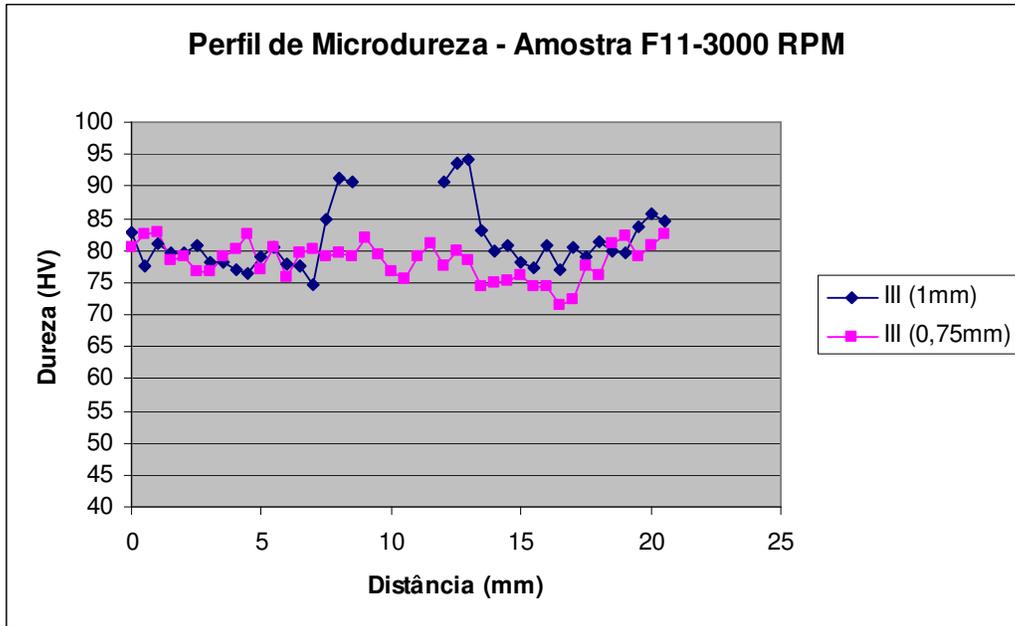


Figura A- 33- Perfil de microdureza da amostra soldada com a ferramenta F11 com 3000 RPM.

Ferramenta F12:

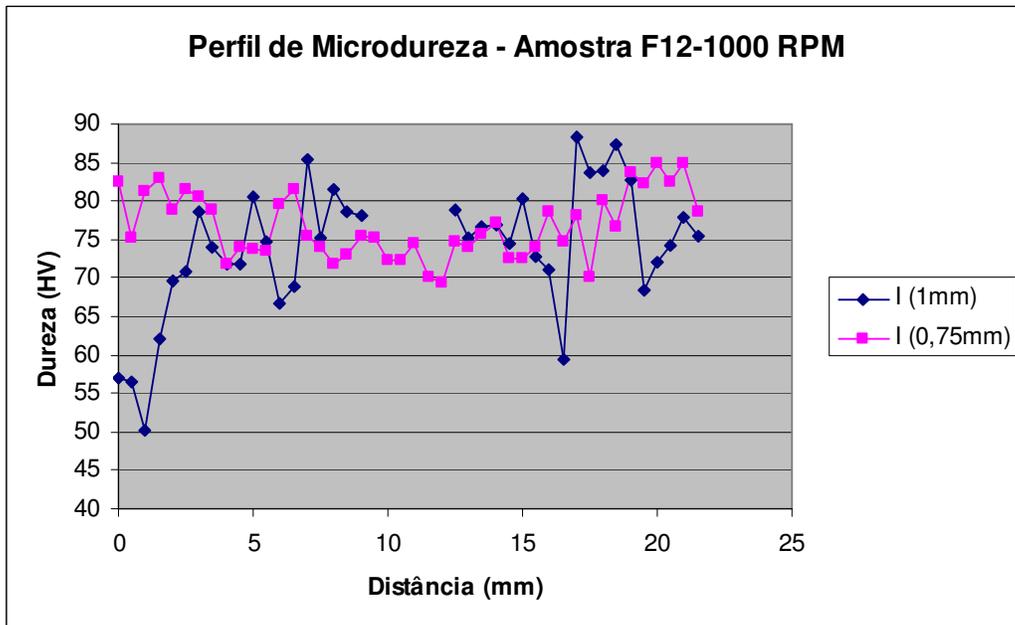


Figura A- 34- Perfil de microdureza da amostra soldada com a ferramenta F12 com 1000 RPM.

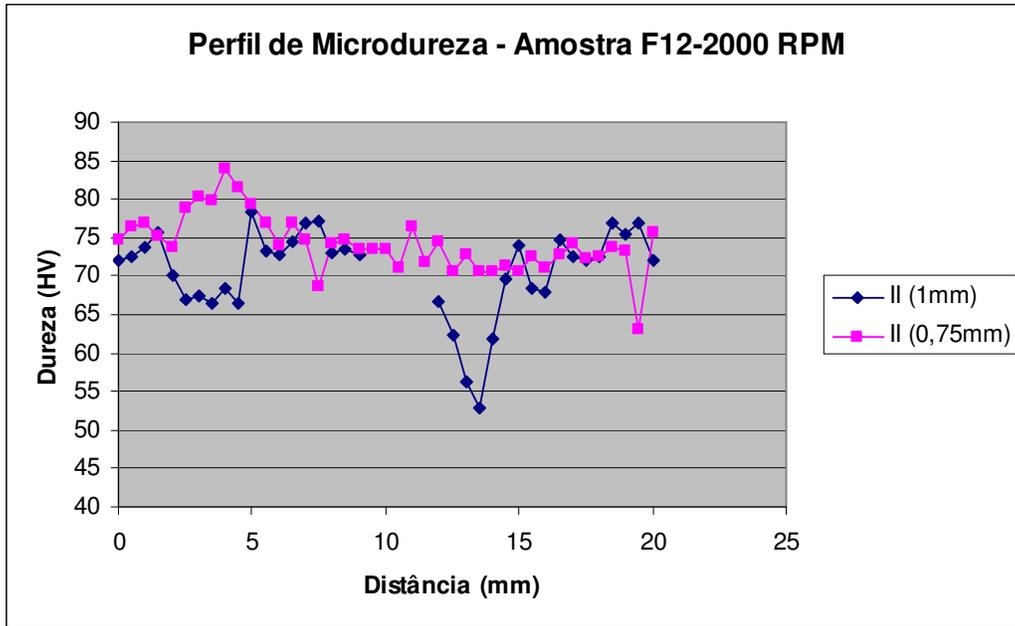


Figura A- 35- Perfil de microdureza da amostra soldada com a ferramenta F12 com 2000 RPM.

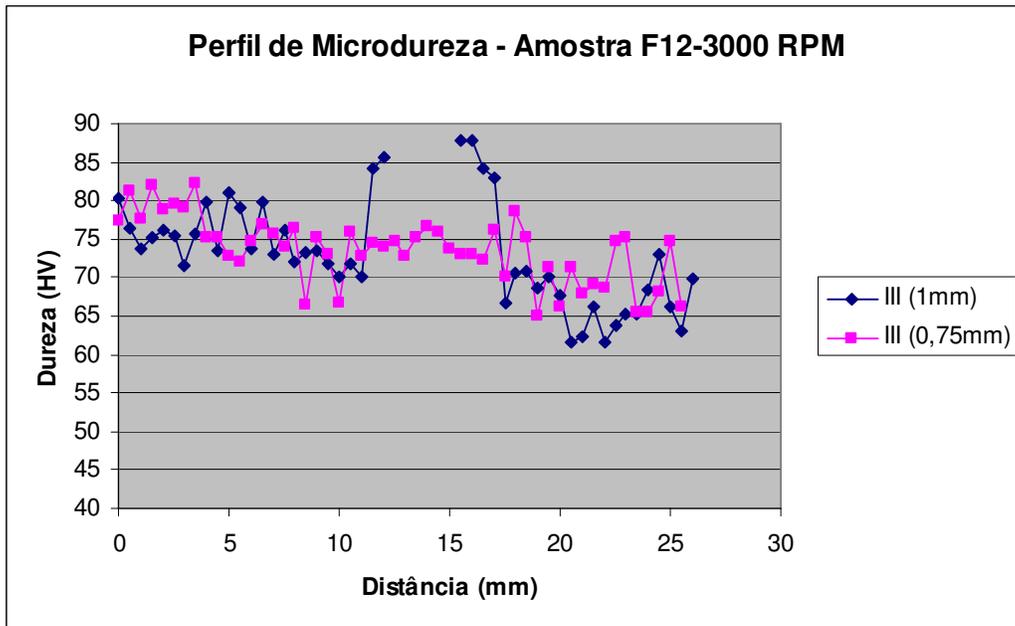


Figura A- 36- Perfil de microdureza da amostra soldada com a ferramenta F12 com 3000 RPM.

Perfis de microdureza de amostras de magnésio

Ferramenta F1:

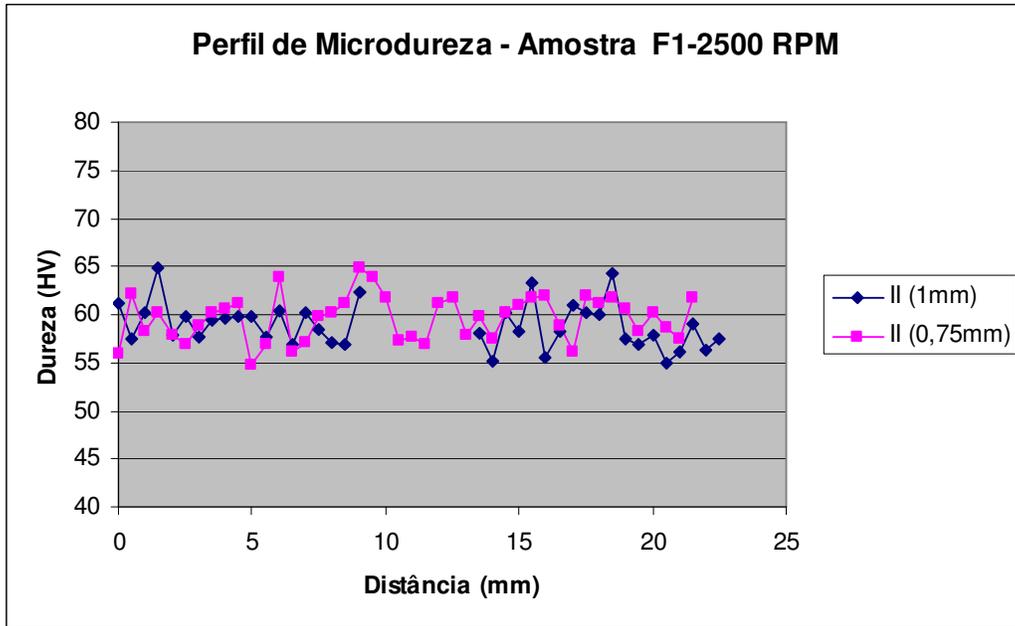


Figura A- 37- Perfil de microdureza da amostra soldada com a ferramenta F1 com 2500 RPM.

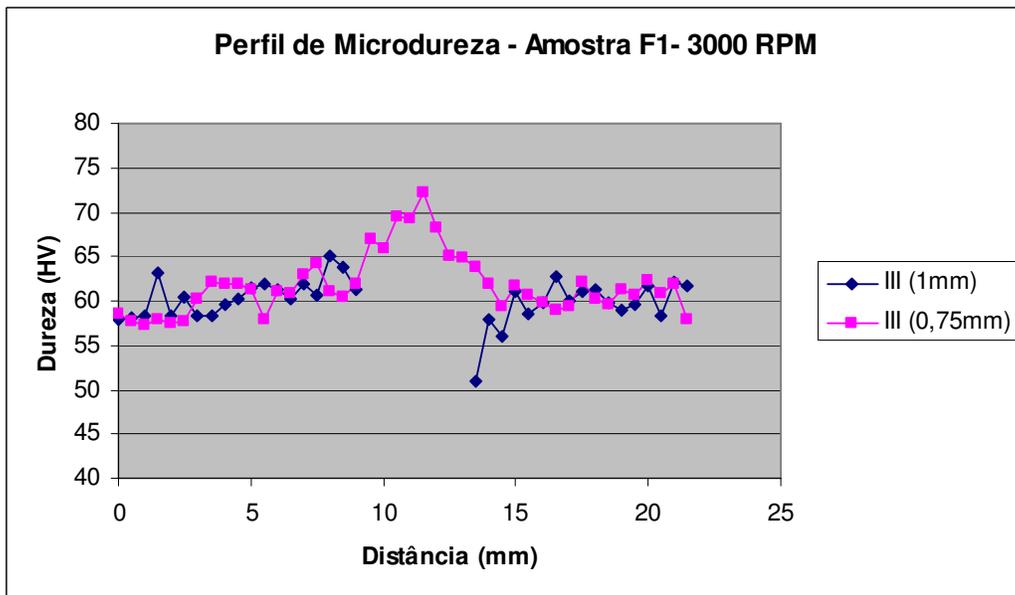


Figura A- 38- Perfil de microdureza da amostra soldada com a ferramenta F1 com 3000 RPM.

Ferramenta F2:

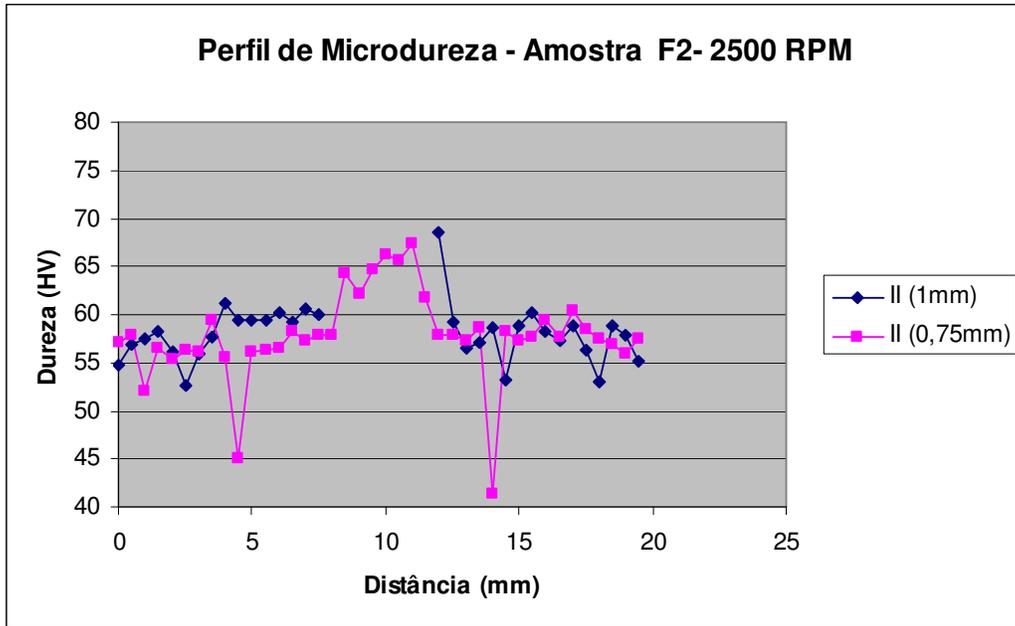


Figura A- 39- Perfil de microdureza da amostra soldada com a ferramenta F2 com 2500 RPM.

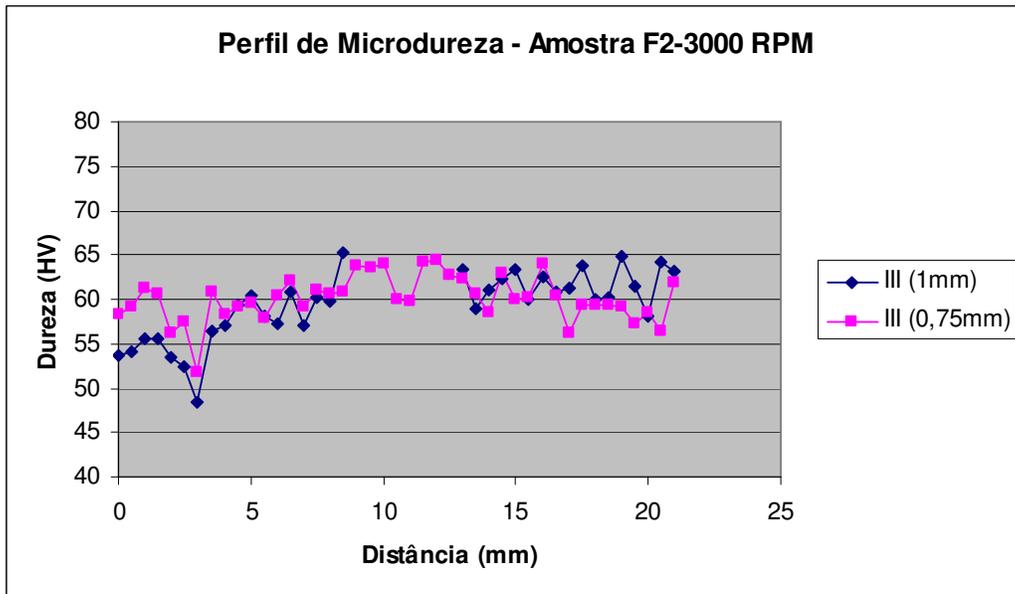


Figura A- 40- Perfil de microdureza da amostra soldada com a ferramenta F2 com 3000 RPM.

Ferramenta F3:

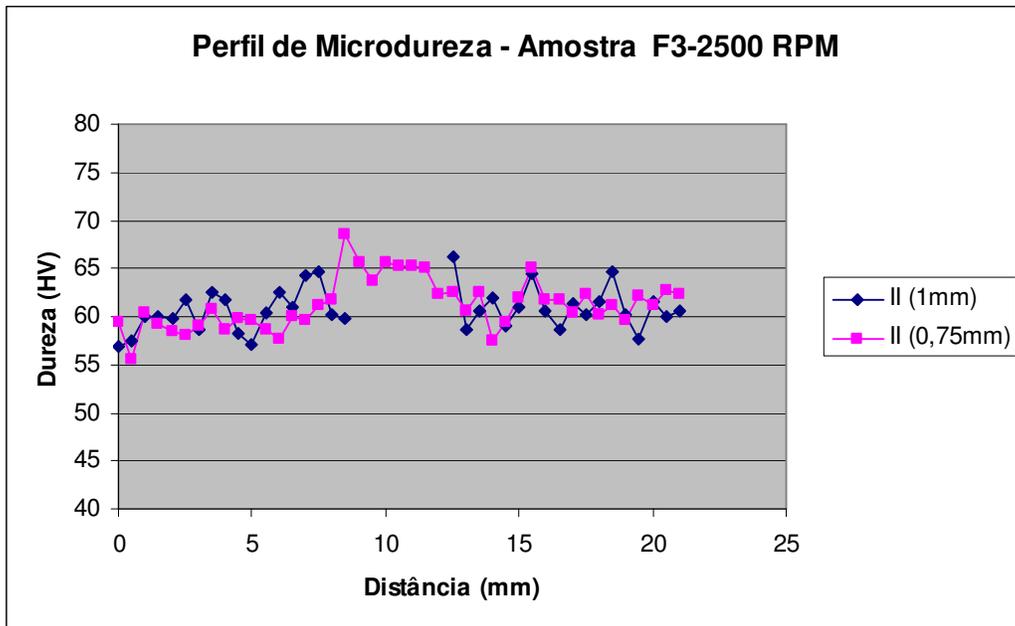


Figura A- 41- Perfil de microdureza da amostra soldada com a ferramenta F3 com 2500 RPM.

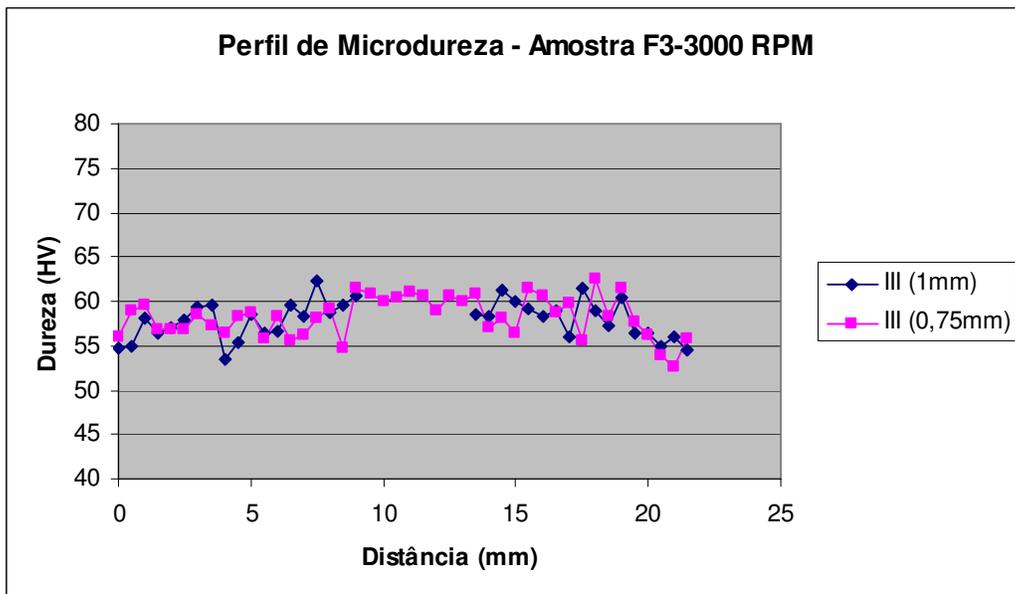


Figura A- 42- Perfil de microdureza da amostra soldada com a ferramenta F3 com 3000 RPM.

Ferramenta F4:

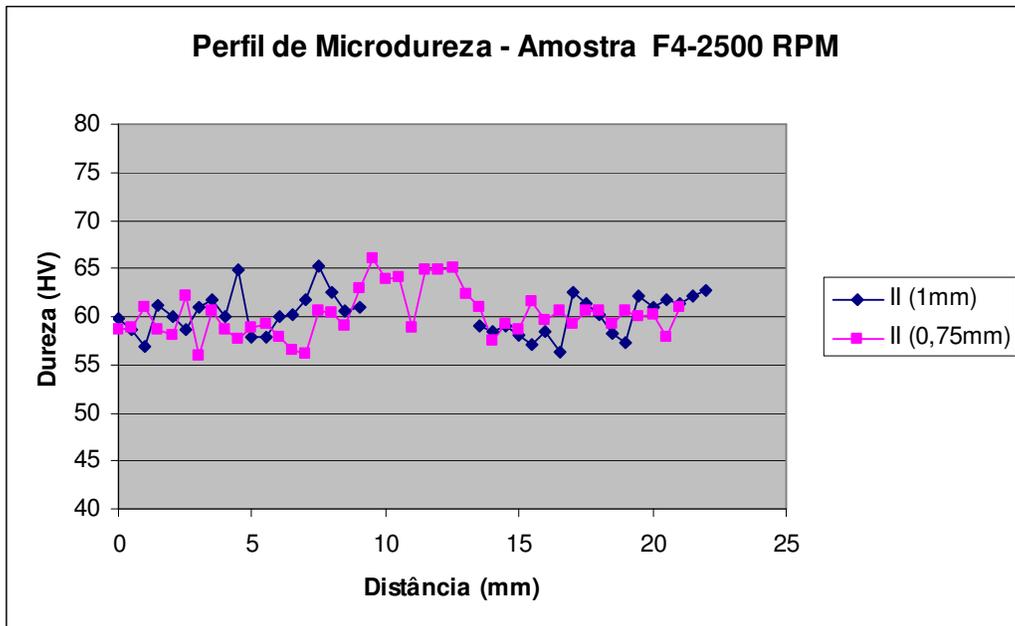


Figura A- 43- Perfil de microdureza da amostra soldada com a ferramenta F4 com 2500 RPM.

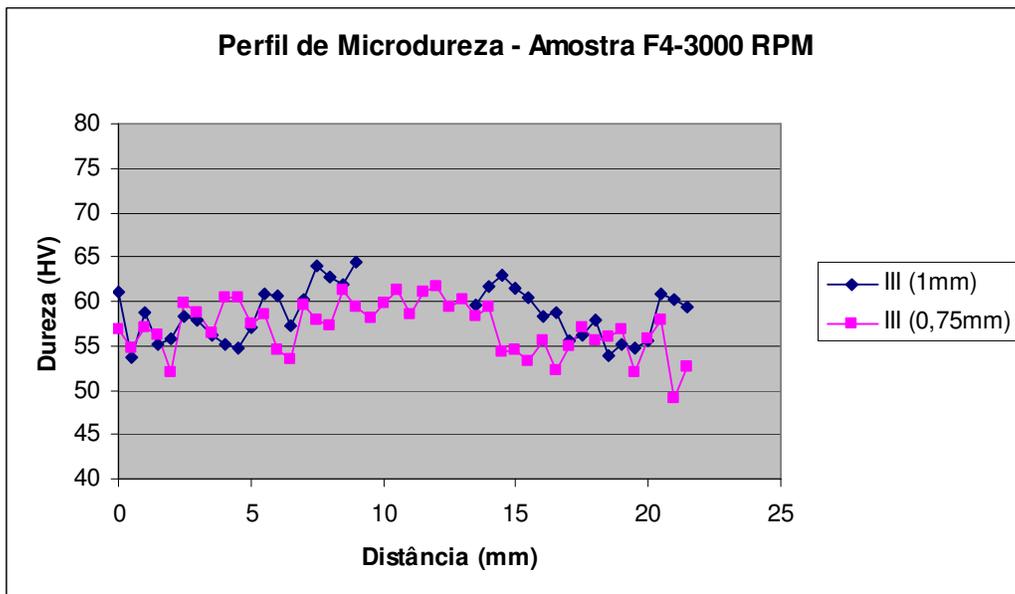


Figura A- 44- Perfil de microdureza da amostra soldada com a ferramenta F4 com 3000 RPM.

Ferramenta F5:

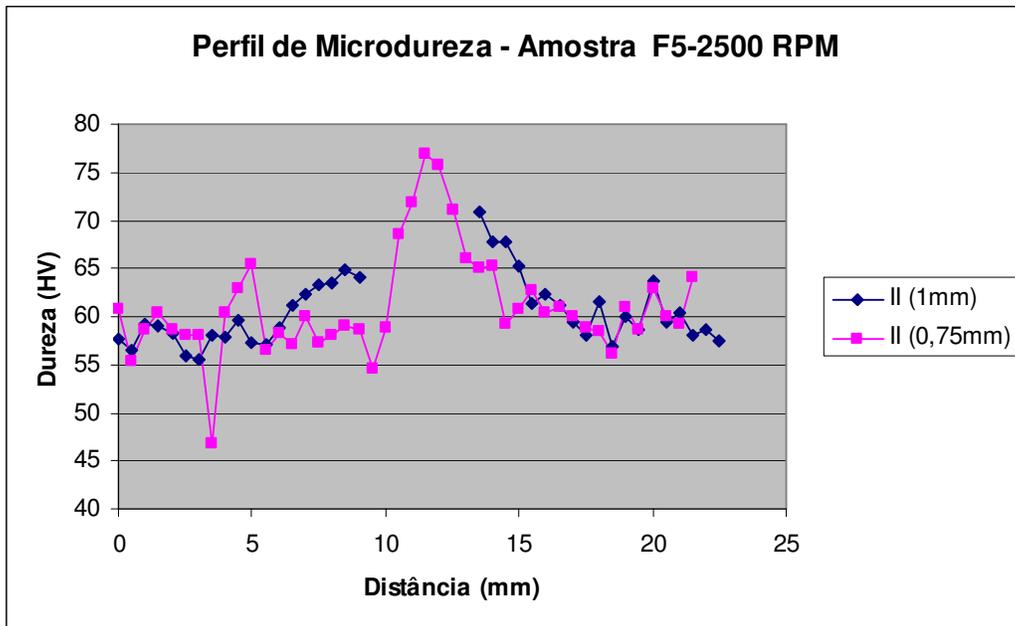


Figura A- 45- Perfil de microdureza da amostra soldada com a ferramenta F5 com 2500 RPM.

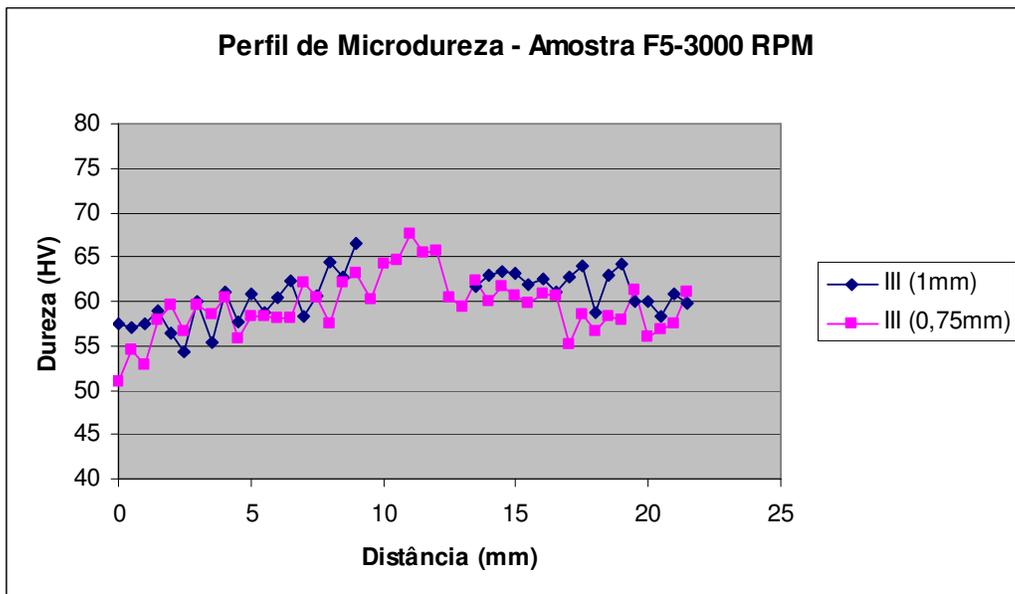


Figura A- 46 Perfil de microdureza da amostra soldada com a ferramenta F5 com 3000 RPM.

Ferramenta F6:

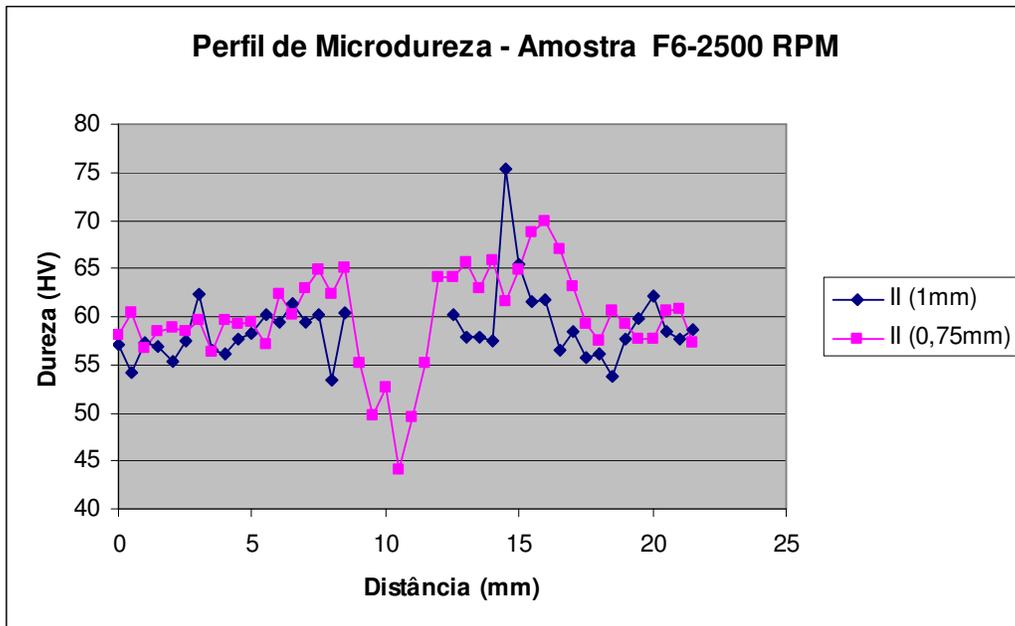


Figura A- 47- Perfil de microdureza da amostra soldada com a ferramenta F6 com 2500 RPM.

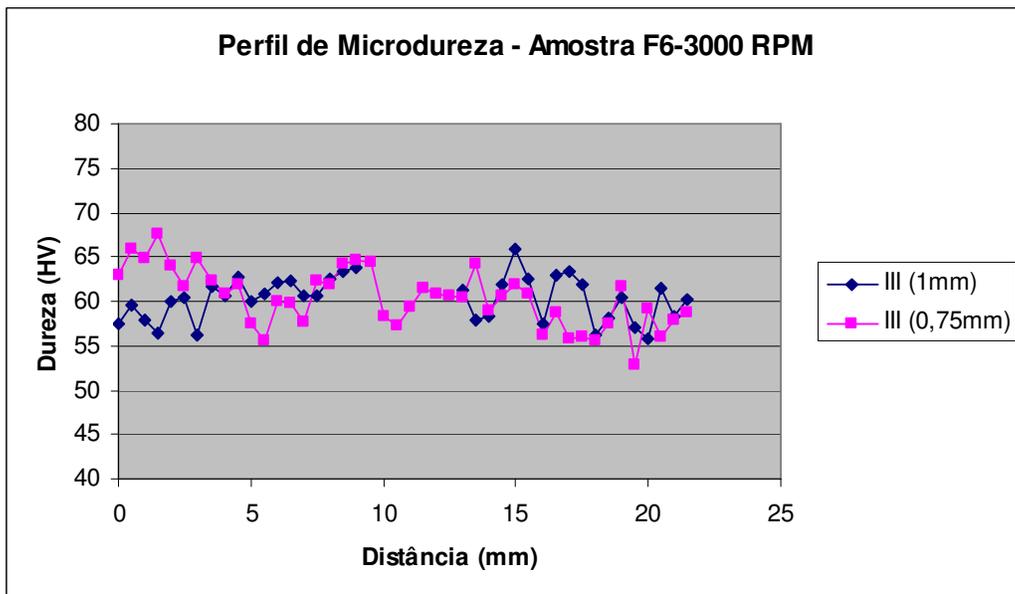


Figura A- 48- Perfil de microdureza da amostra soldada com a ferramenta F6 com 3000 RPM.

Ferramenta F7:

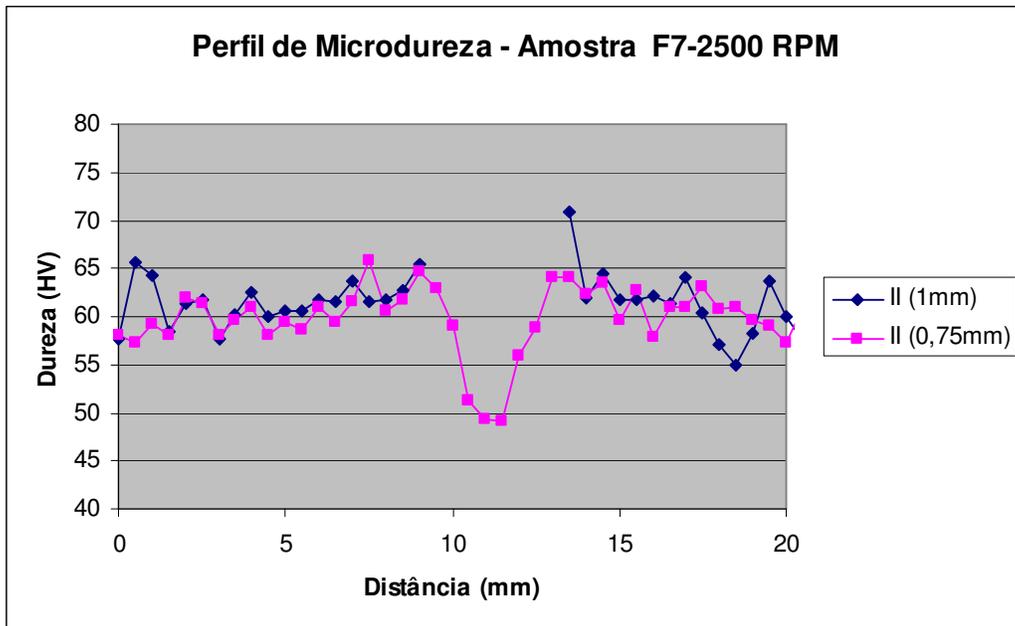


Figura A- 49- Perfil de microdureza da amostra soldada com a ferramenta F7 com 2500 RPM.

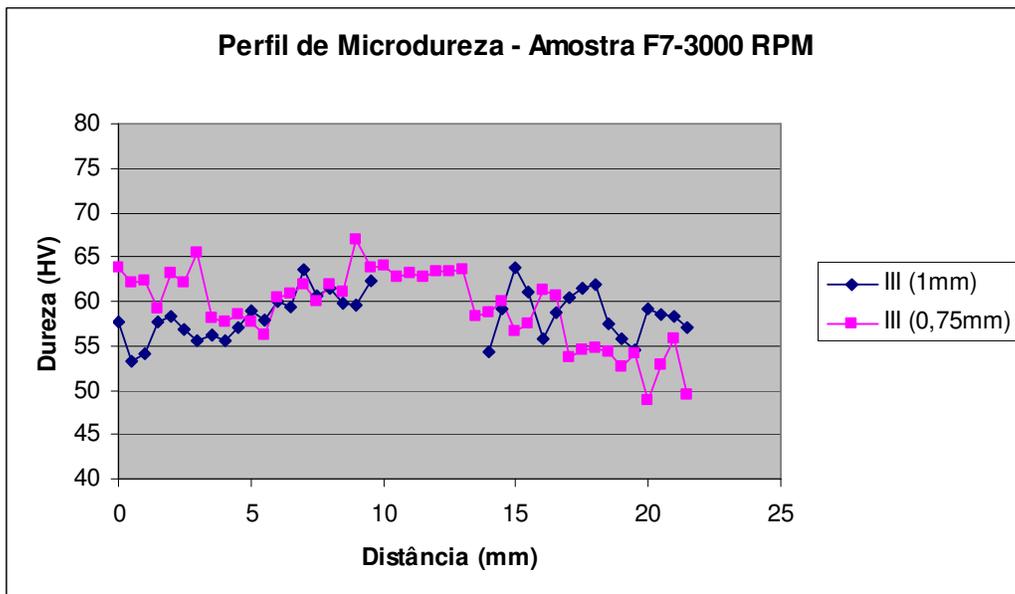


Figura A- 50- Perfil de microdureza da amostra soldada com a ferramenta F7 com 3000 RPM.

Ferramenta F8:

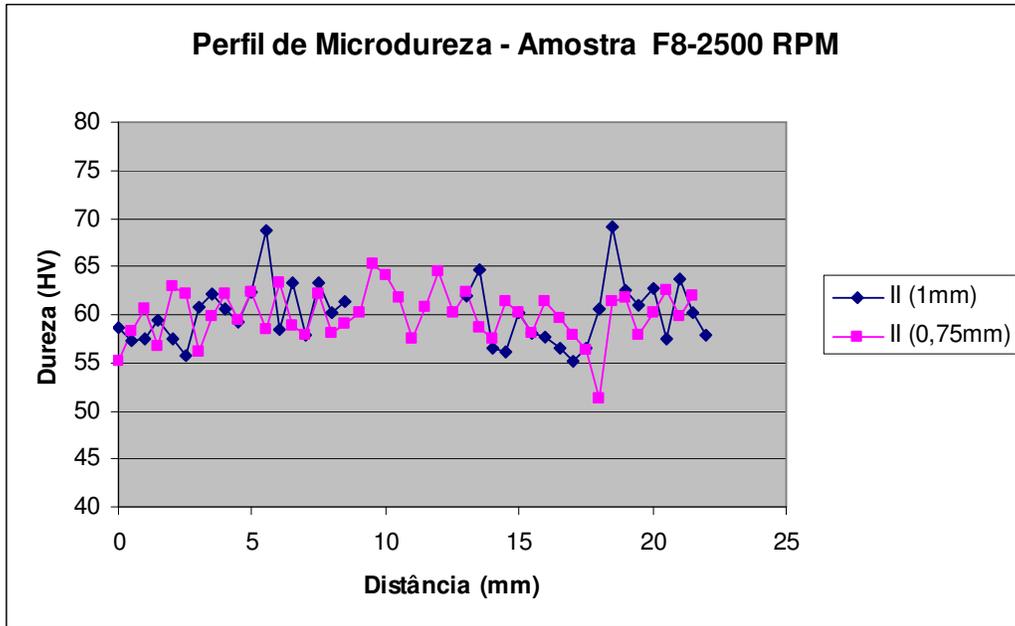


Figura A- 51- Perfil de microdureza da amostra soldada com a ferramenta F8 com 2500 RPM.

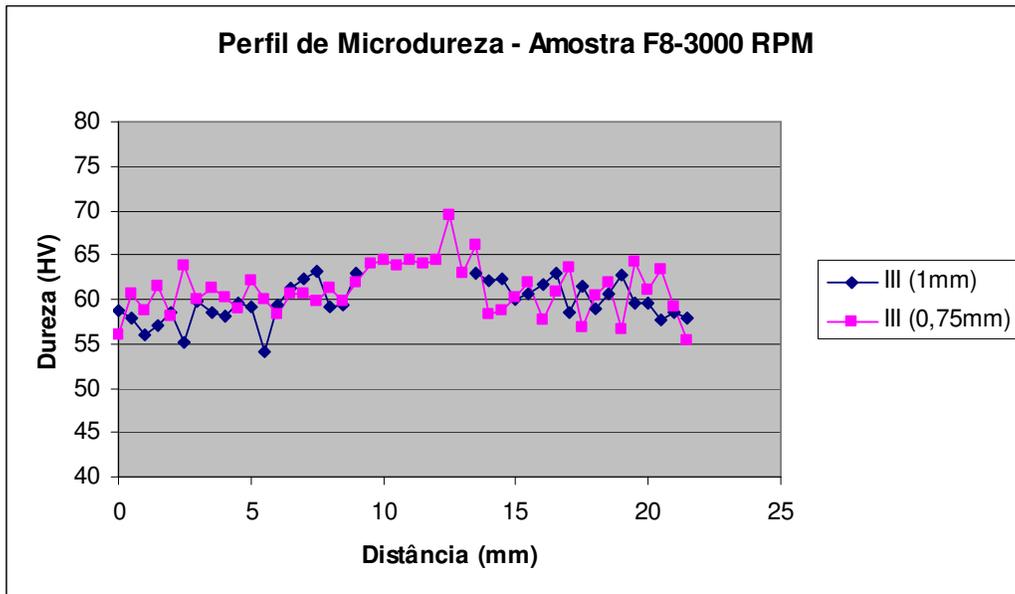


Figura A- 52- Perfil de microdureza da amostra soldada com a ferramenta F8 com 3000 RPM.

Ferramenta F9:

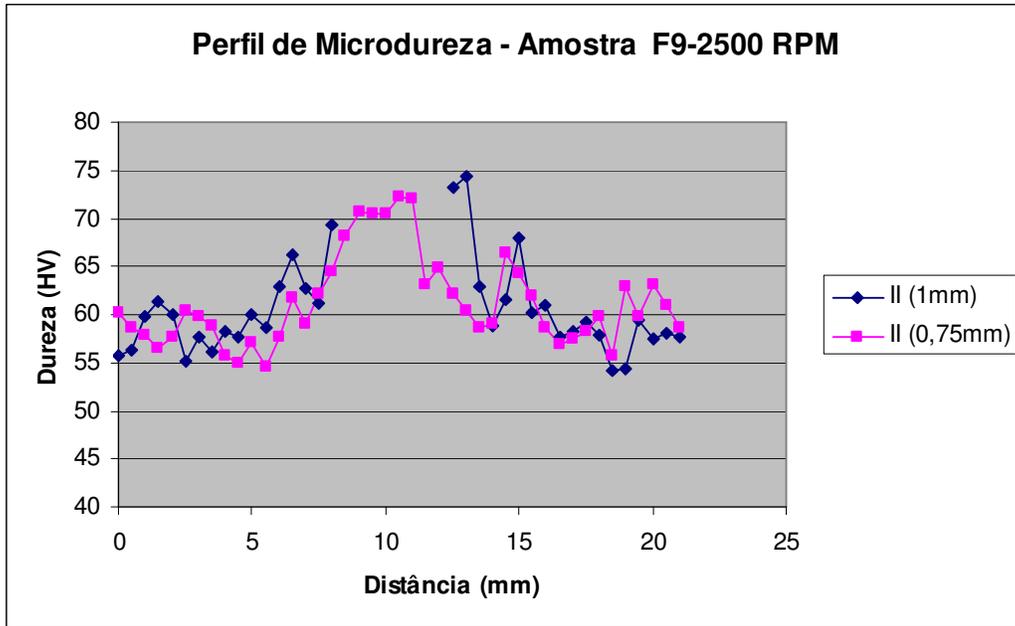


Figura A- 53- Perfil de microdureza da amostra soldada com a ferramenta F9 com 2500 RPM.

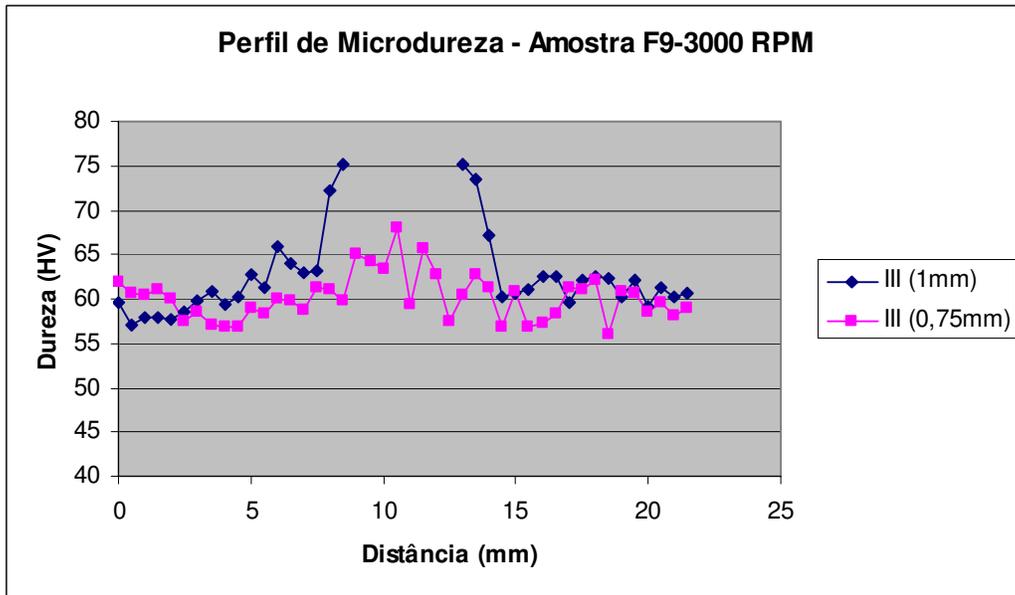


Figura A- 54- Perfil de microdureza da amostra soldada com a ferramenta F9 com 3000 RPM.

Ferramenta F10:

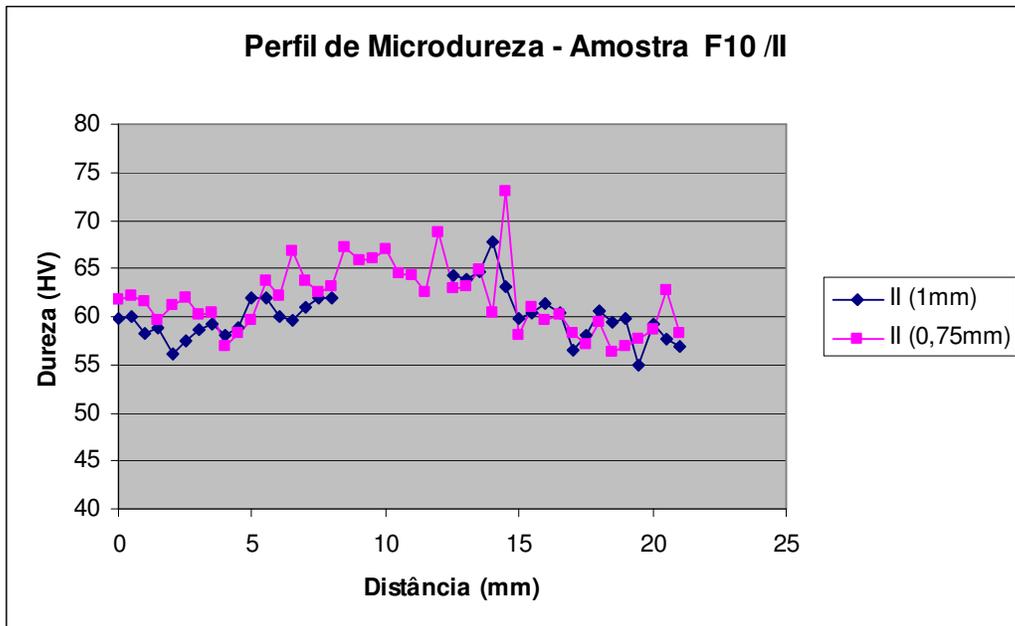


Figura A- 55- Perfil de microdureza da amostra soldada com a ferramenta F10 com 2500 RPM.

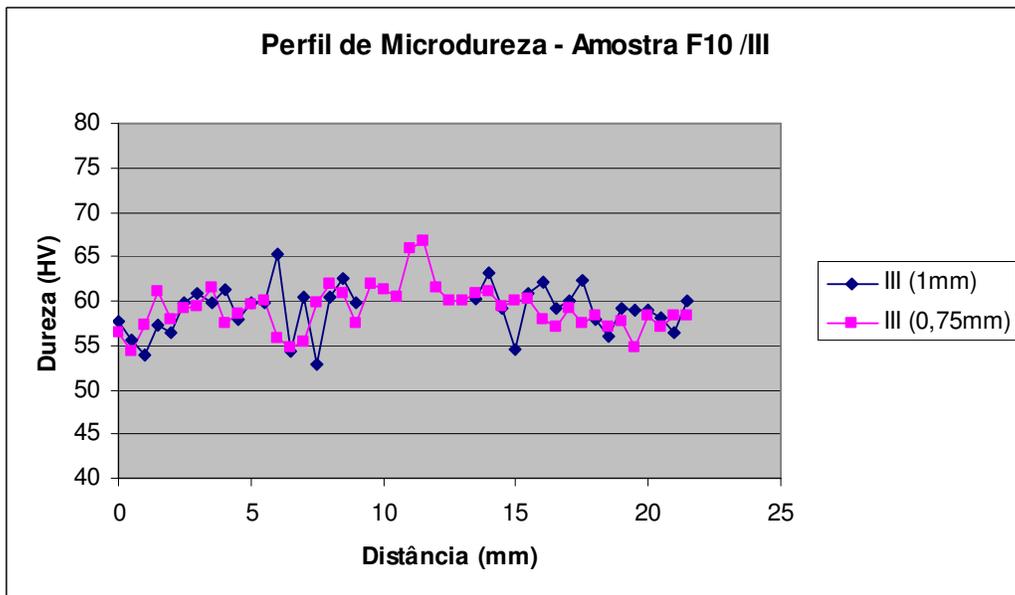


Figura A- 56- Perfil de microdureza da amostra soldada com a ferramenta F10 com 3000 RPM.

Ferramenta F11:

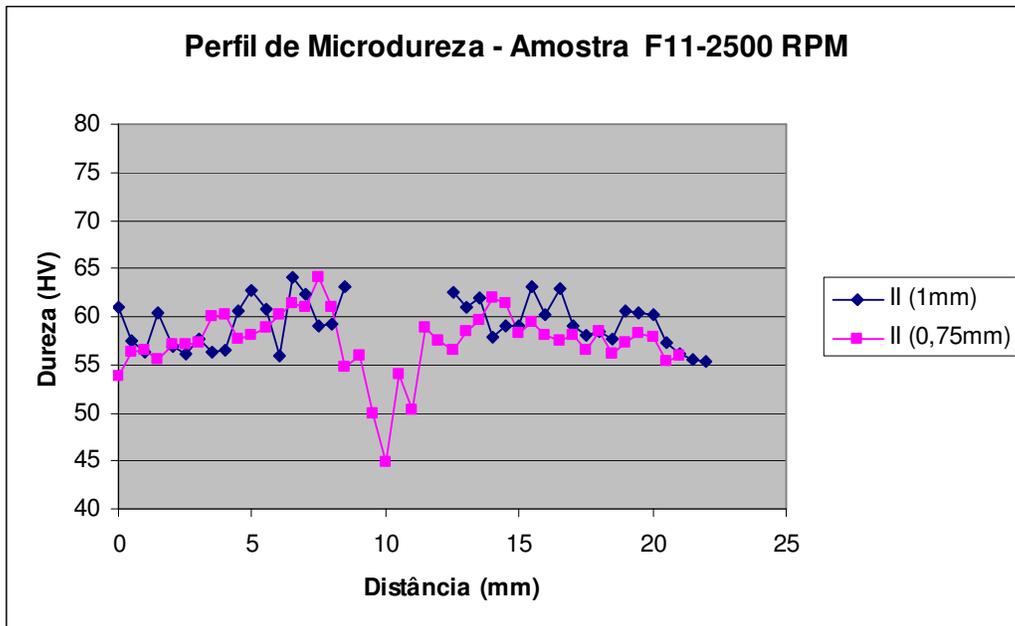


Figura A- 57- Perfil de microdureza da amostra soldada com a ferramenta F11 com 2500 RPM.

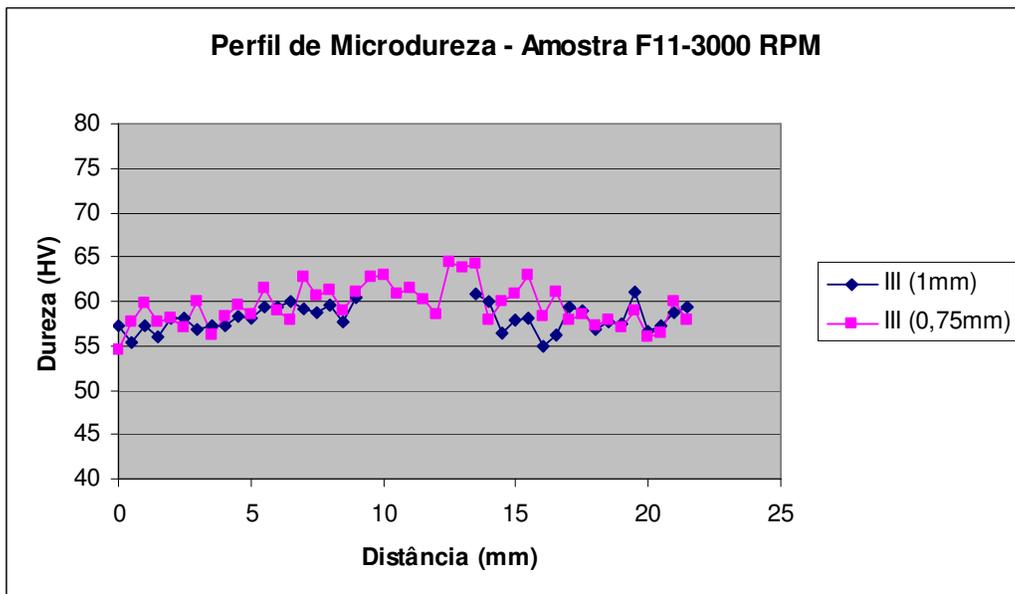


Figura A- 58- Perfil de microdureza da amostra soldada com a ferramenta F11 com 3000 RPM.

Ferramenta F12:

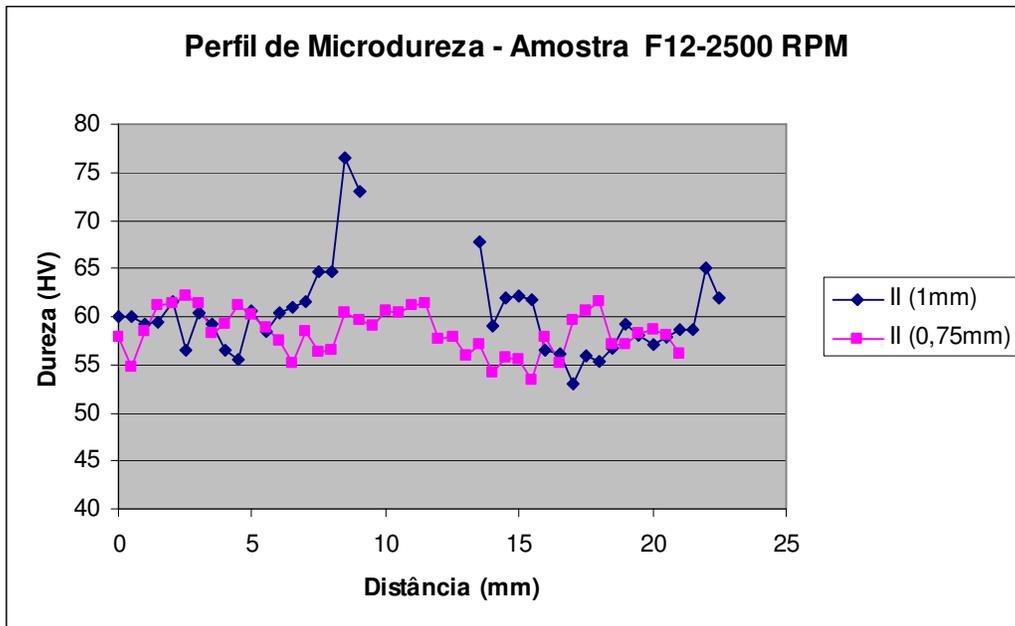


Figura A- 59- Perfil de microdureza da amostra soldada com a ferramenta F12 com 2500 RPM.

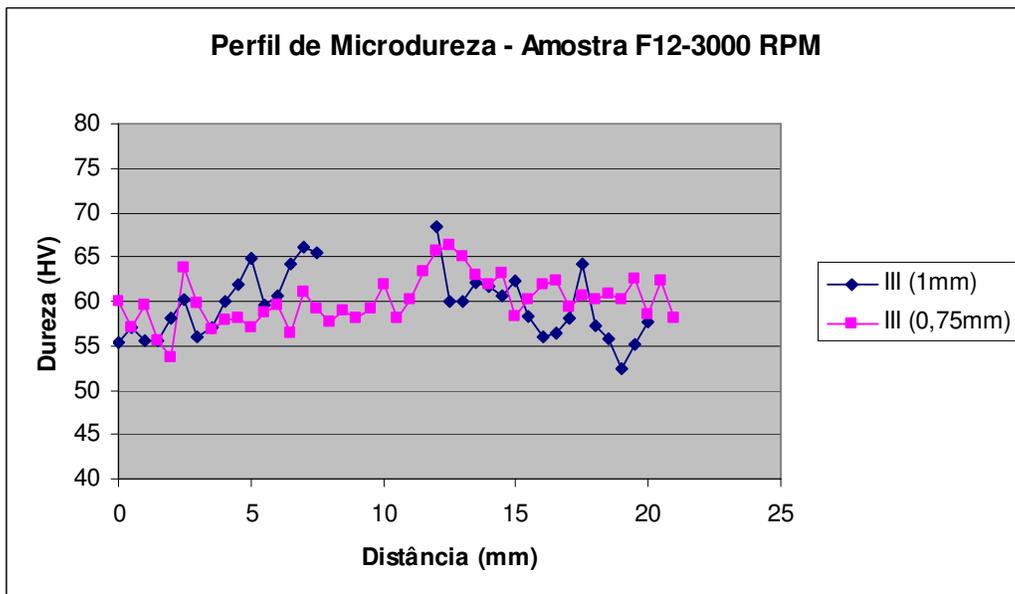


Figura A- 60- Perfil de microdureza da amostra soldada com a ferramenta F12 com 3000 RPM.

Macros Magnésio

As macrografias destas amostras podem ser observadas nas figuras que seguem e estão dispostas de acordo com a ferramenta utilizada.

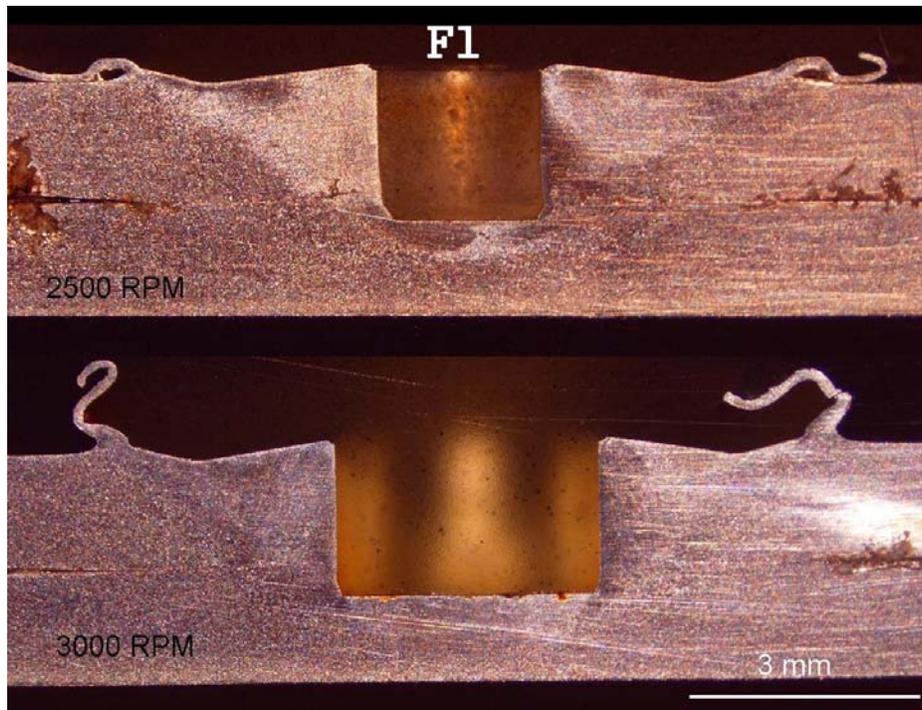


Figura A – 61- Macrografia das amostras soldadas nas duas velocidades de rotação com a ferramenta F1.

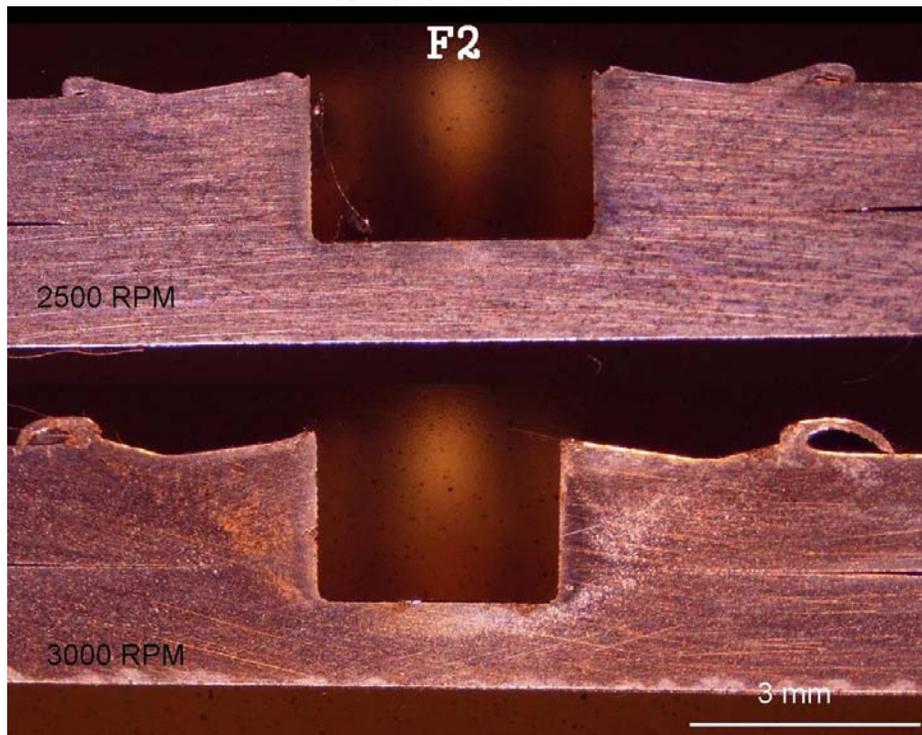


Figura A – 62- Macrografia das amostras soldadas nas duas velocidades de rotação com a ferramenta F2.

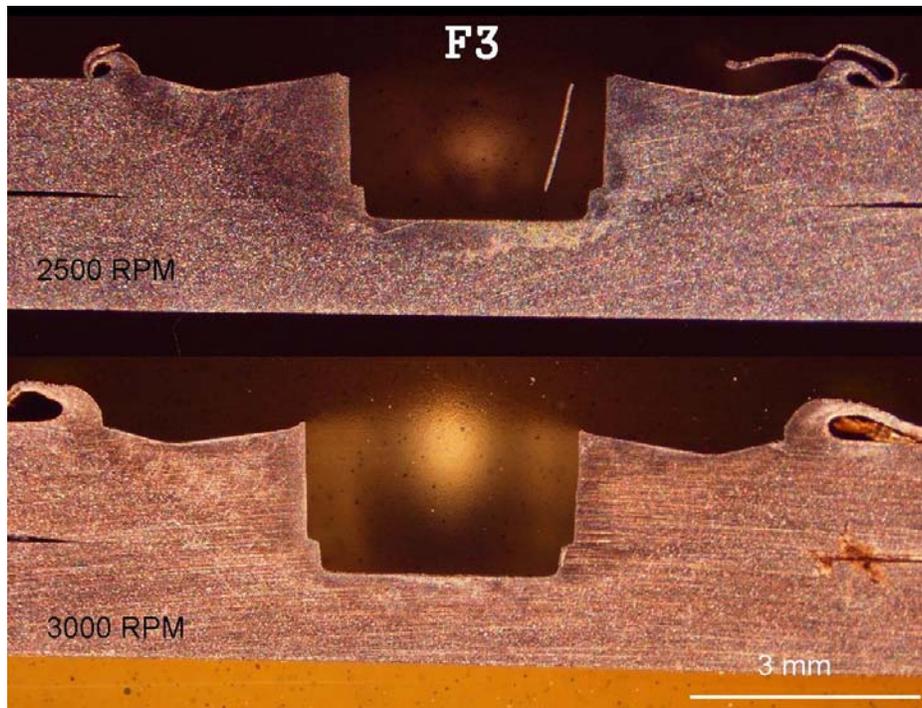


Figura A – 63-Macrografia das amostras soldadas nas duas velocidades de rotação com a ferramenta F3.

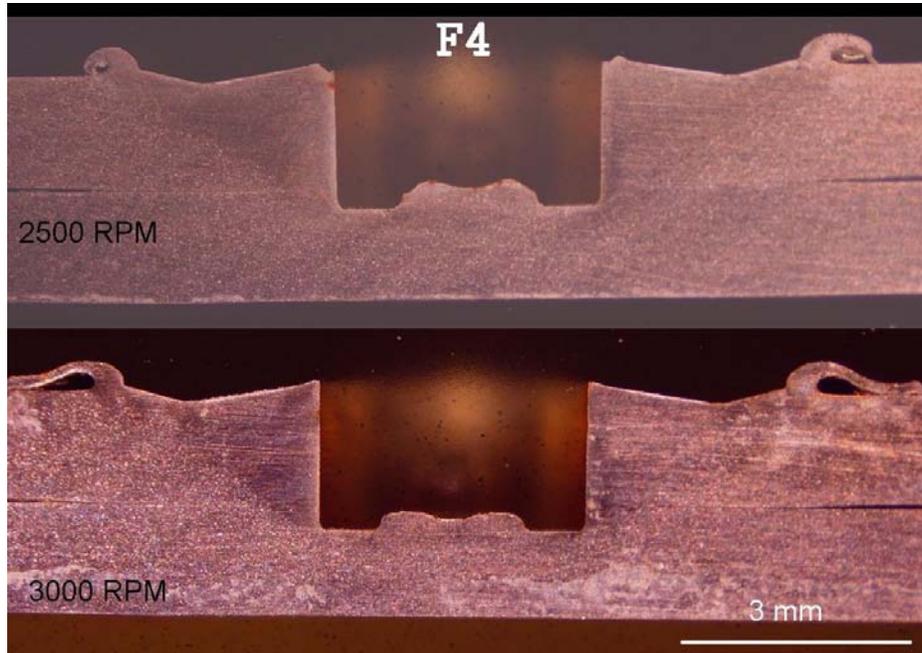


Figura A – 64-Macrografia das amostras soldadas nas duas velocidades de rotação com a ferramenta F4.

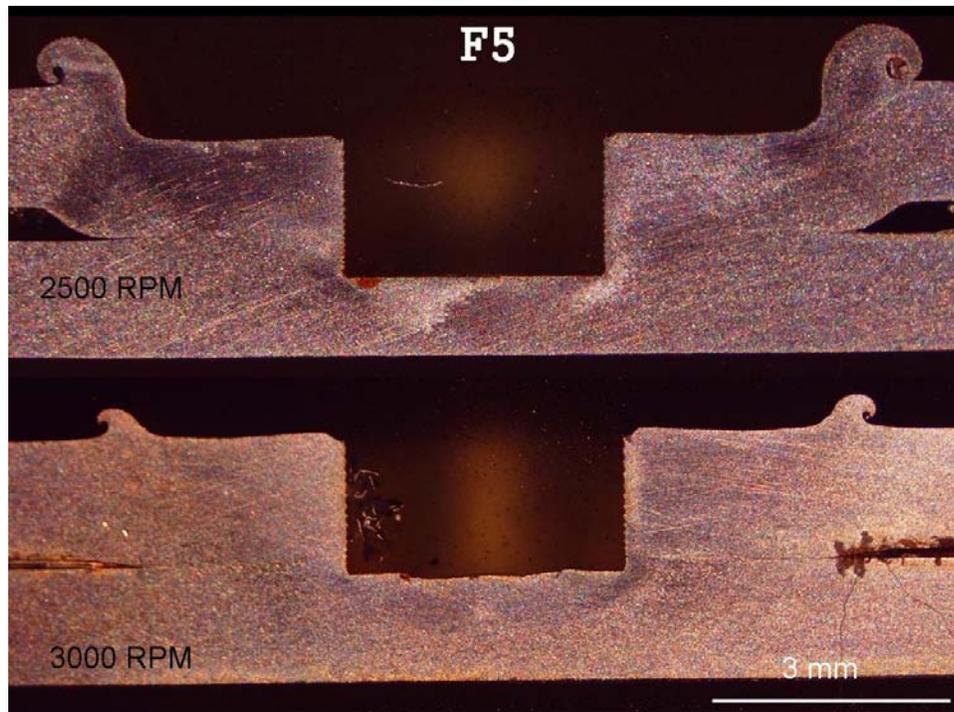


Figura A – 65-Macrografia das amostras soldadas nas duas velocidades de rotação com a ferramenta F5.

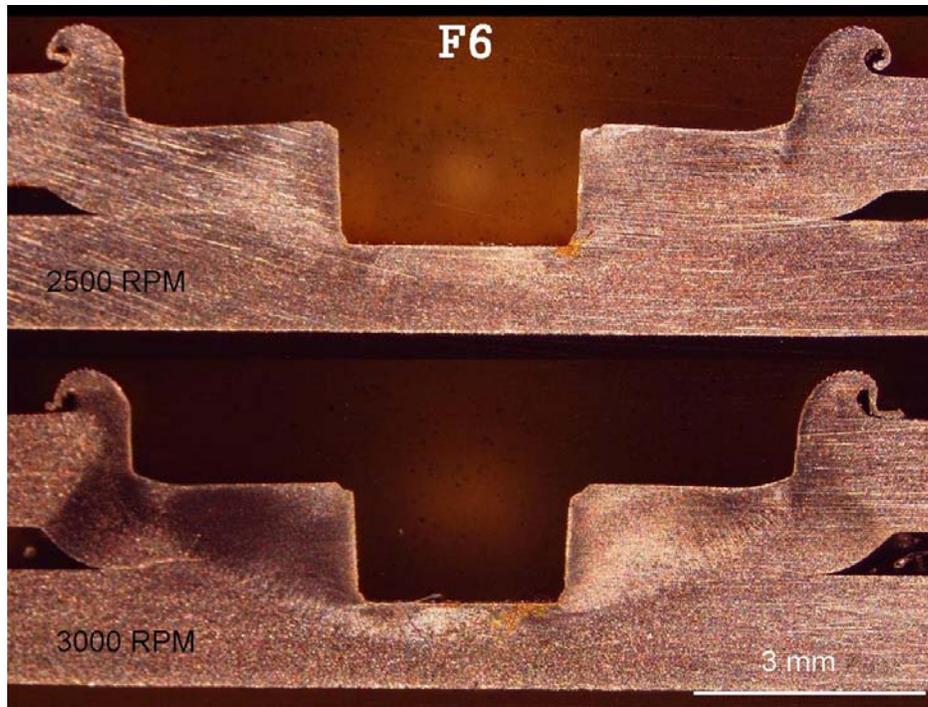


Figura A – 66- Macrografia das amostras soldadas nas duas velocidades de rotação com a ferramenta F6.

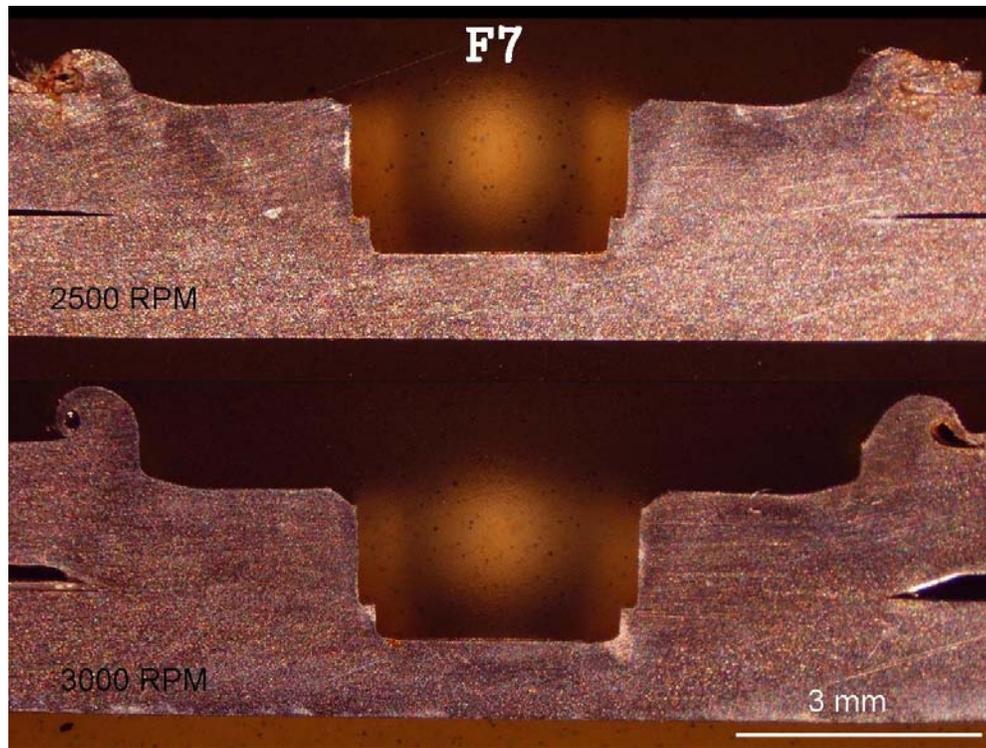


Figura A – 67-Macrografia das amostras soldadas nas duas velocidades de rotação com a ferramenta F7.

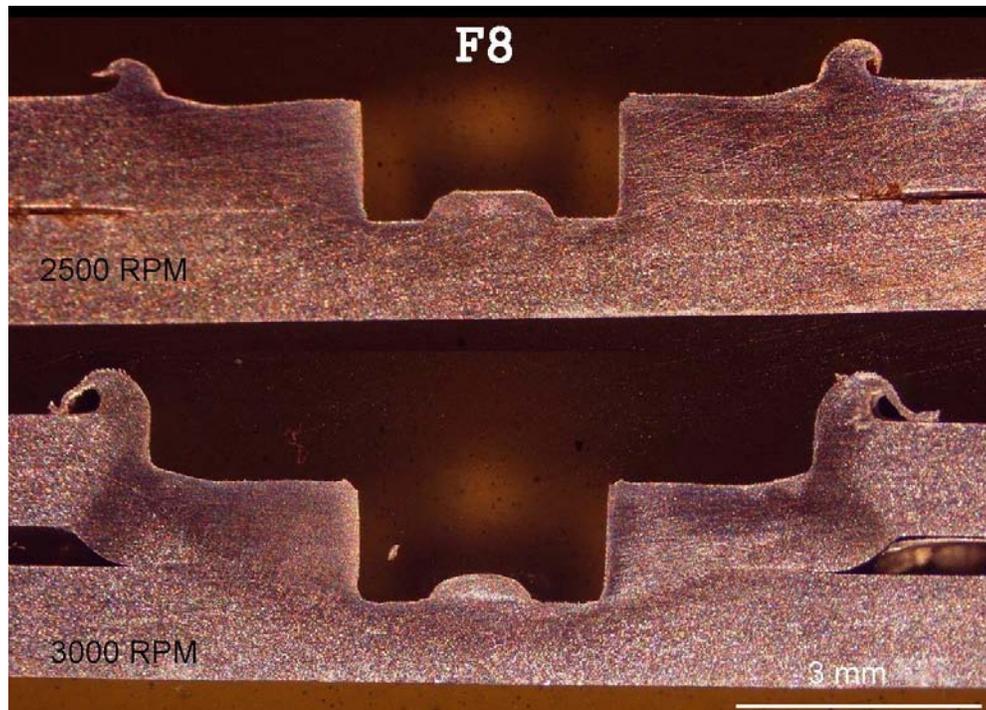


Figura A – 68-Macrografia das amostras soldadas nas duas velocidades de rotação com a ferramenta F8.

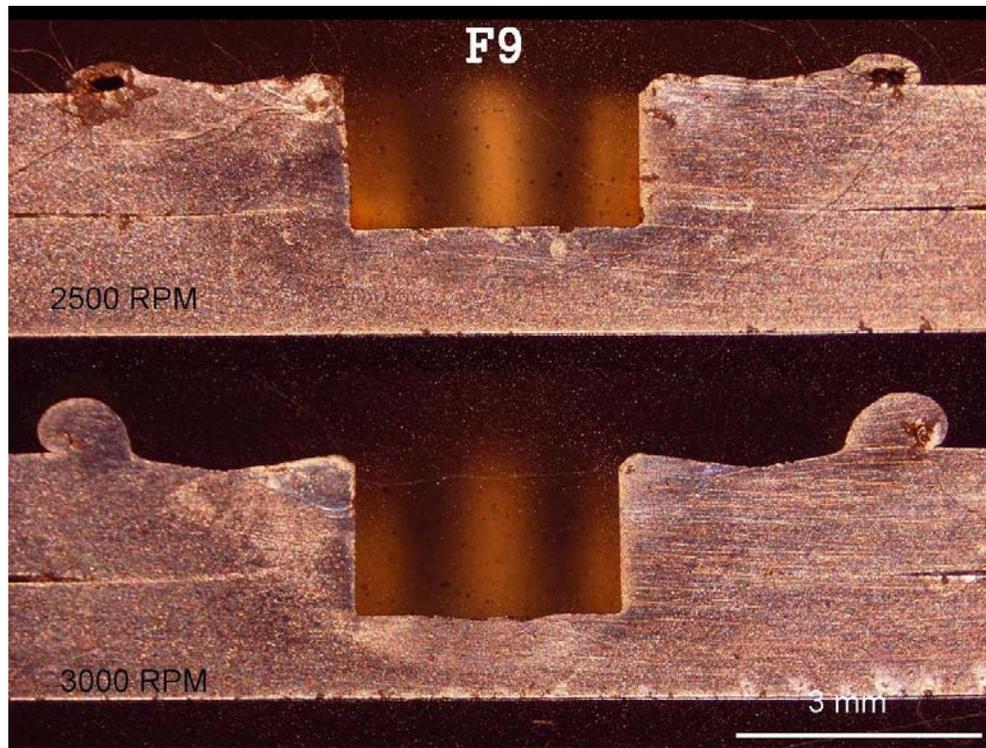


Figura A – 69-Macrografia das amostras soldadas nas duas velocidades de rotação com a ferramenta F9.

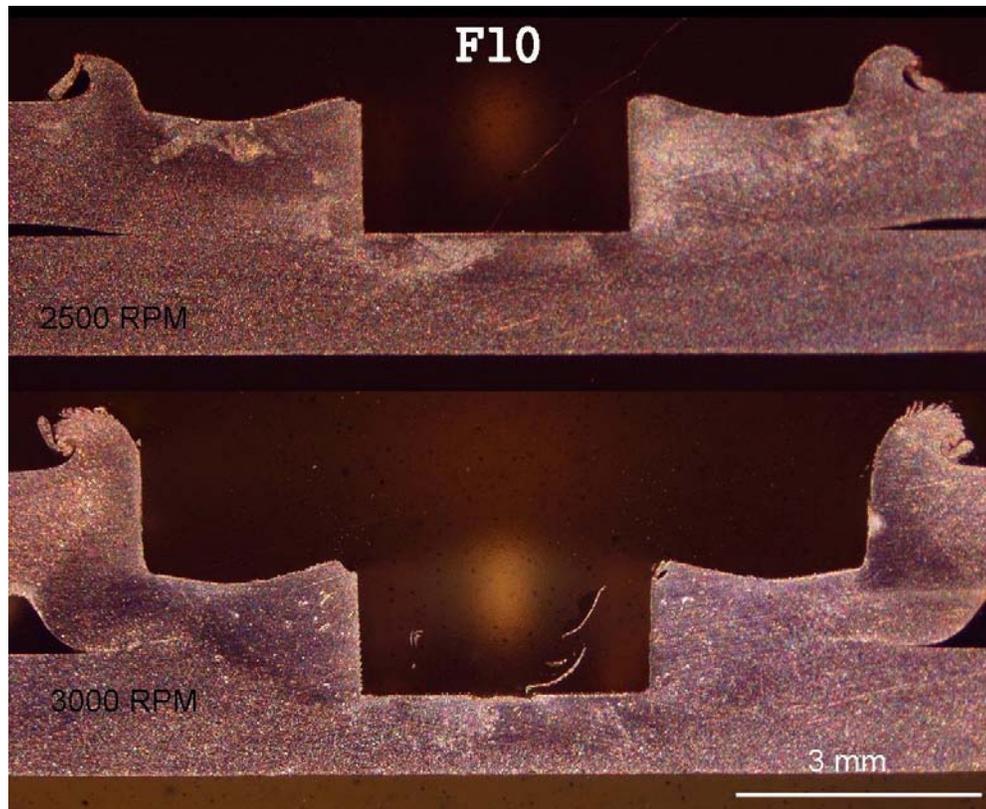


Figura A – 70- Macrografia das amostras soldadas nas duas velocidades de rotação com a ferramenta F10.

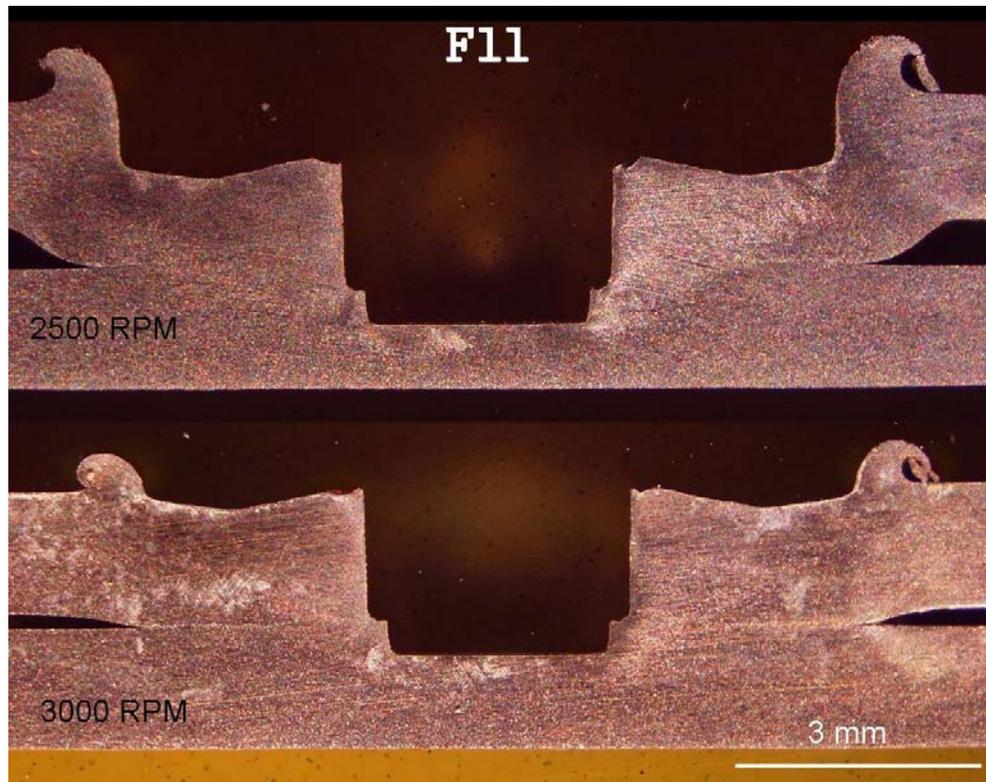


Figura A – 71-Macrografia das amostras soldadas nas duas velocidades de rotação com a ferramenta F11.

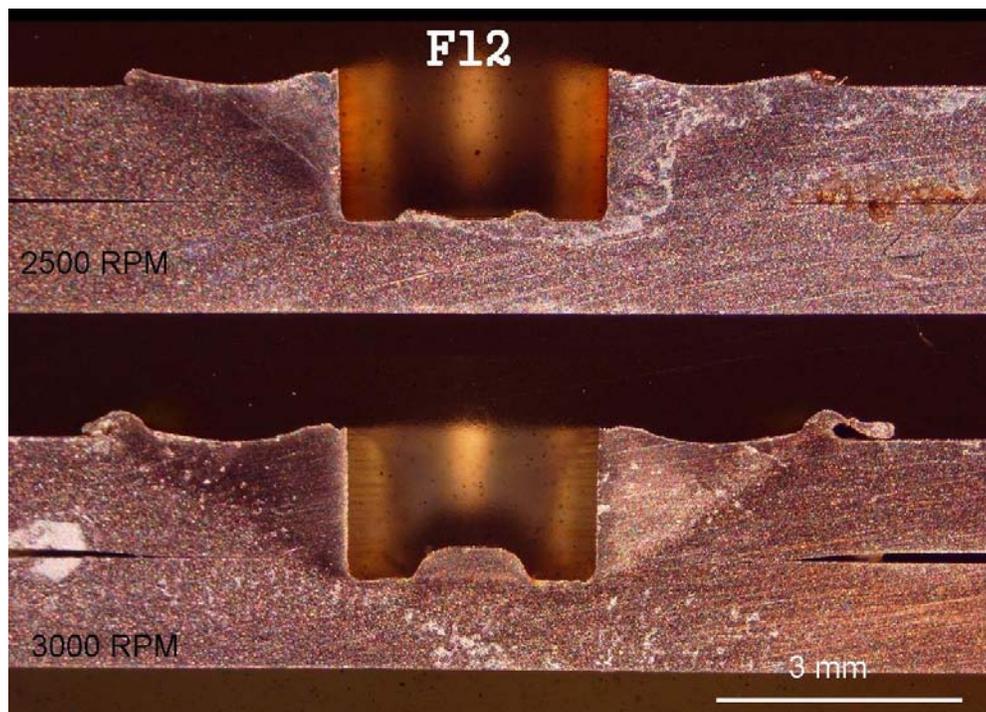


Figura A – 72- Macrografia das amostras soldadas nas duas velocidades de rotação com a ferramenta F12.

Foi possível observar nas macros a formação de duas zonas distintas, a ZM e a ZTMA. A dificuldade em atacar o magnésio pode ter dificultado a revelação tanto da ZTA, quanto mesmo a ZM em algumas amostras. Em algumas condições de soldagem podem ser observados altos níveis de deformação na chapa superior