

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

ESTUDO DO DESEMPENHO MECÂNICO DE SOLDA(S) PONTO POR FRICÇÃO  
(FSpW) DA LIGA AA6181-T4

**Tonilson de Souza Rosendo**

Tese para obtenção do título de Doutor  
em Engenharia

Porto Alegre  
2009

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

ESTUDO DO DESEMPENHO MECÂNICO DE SOLDA(S) PONTO POR FRICÇÃO  
(FSpW) DA LIGA AA6181-T4

TONILSON DE SOUZA ROSENDO  
M. Sc. Engenheiro Industrial Mecânico

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 obtenção do título de Doutor em Engenharia.

Área de concentração: Ciência e Tecnologia dos Materiais

Porto Alegre  
2009

II

Esta tese foi julgada adequada para obtenção do título de Mestre em Engenharia, área de concentração em Ciência e Tecnologia dos Materiais, e aprovada em sua forma final, pelo orientador e pela Banca Examinadora do Programa de Pós-Graduação.

Orientador: Prof. Dr. Telmo R. Strohaecker, PPGEM-UFRGS, Brasil.  
Co-orientador: Dr. Jorge F. dos Santos, GKSS Forschungszentrum, Geesthacht, Alemanha.

Banca examinadora:

Prof. Dr. Hélio Cordeiro de Miranda, UFC/CT/DEMM, Fortaleza, Brasil.  
Prof. Dr. José Antônio Esmério Mazzaferro, UFRGS/PROMEC, Porto Alegre, Brasil.  
Prof. Dr. Marco Antônio Durlo Tier, URI/DECC, Santo Ângelo, Brasil.

Prof. Dr. Carlos Pérez Bergmann  
Coordenador do PPGEM

## AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador Dr. Telmo Roberto Strohaecker e co-orientador Dr. Jorge F. dos Santos pela orientação, pelos ensinamentos e demais contribuições técnicas e pessoais;

Ao Dr. Afonso Reguly pelos ensinamentos durante o curso de Mestrado;

Aos colegas do Centro de Pesquisas GKSS na Alemanha, principalmente Antônio, Bruno, Claudia, Cíntia, César, Fabiano, Gustavo, José Mazzaferro, Knaak, Luciano Bergmann, Petra, Sérgio e Volker que de alguma forma contribuíram à conclusão deste trabalho;

Aos amigos e colegas de moradia na Alemanha Marco e Dida;

A todo o pessoal da família lamefiana pelo companheirismo e acolhida no LAMEF;

Ao Dr. Irionson Bassani pelo incentivo, apoio, companheirismo e contribuições técnicas e pessoais oferecidos na minha chegada em Porto Alegre;

Aos meus professores da graduação M. Sc. Flávio Kieckow, Dr. Irionson Bassani, Dr. Marco Tier e Dr. Sandi Souza pela influência na minha formação;

À família Rocha (da Karine!) pelo apoio e os vários auxílios desprendidos;

À minha família pelo apoio, dedicação, incentivo e compreensão nos momentos de ausência;

À Karine, minha noiva, por suportar a ausência durante o doutorado, pelo incentivo, dedicação e pelos vários momentos juntos;

À Deus pela vida e todas as oportunidades proporcionadas;

À CAPES (Brasil), DAAD (Alemanha) e ao povo brasileiro, pagador de impostos, pelo suporte financeiro.

Para ser bem sucedido é preciso ter dedicação total,  
buscar o seu limite  
e dar o melhor de si mesmo.

(Ayrton Senna)

## SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS .....	IV
SUMÁRIO.....	VI
LISTA DE FIGURAS .....	VII
LISTA DE TABELAS .....	XV
LISTA DE EQUAÇÕES .....	XVI
LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS .....	XVII
RESUMO .....	XVIII
ABSTRACT .....	XIX
1 Introdução.....	1
1.1 Histórico.....	2
1.2 Motivação .....	2
1.3 Objetivos .....	2
1.4 Metodologia.....	3
2 Revisão biBLiográfica.....	4
2.1 Solda ponto por fricção - generalidades .....	4
2.1.1 Microestrutura .....	6
2.1.2 Propriedades mecânicas e aporte de energia .....	7
2.2 Liga de alumínio 6181 .....	10
3 Materiais e métodos .....	13
4 Resultados .....	21
4.1 Análise metalográfica .....	21
4.1.1 Microestrutura .....	22
4.1.2 Tamanho de grão: .....	23
4.1.3 Defeitos de soldagem.....	28
4.1.4 Detalhes geométricos da junta.....	29
4.2 Microdureza .....	30
4.3 Resistência mecânica .....	32
4.4 Análise das fraturas em sollicitação monotônica.....	34
4.4.1 Fratura sob sollicitação de cisalhamento .....	35
4.4.2 Fratura sob sollicitação de tração .....	38
4.5 Análise das fraturas sob sollicitação de fadiga .....	41
5 Discussão dos resultados .....	46
5.1 Características metalúrgicas da solda FSpW .....	46
5.2 Características geométricas da solda FSpW .....	49
5.3 Resistência mecânica sob sollicitação monotônica de cisalhamento.....	53
5.4 Resistência mecânica sob sollicitação monotônica de tração .....	71
5.5 Resumo das análises de falha.....	84
6 Conclusões .....	89
7 Sugestões para TRABALHOS FUTUROS.....	92
8 Referências biBLiográficas .....	93
Anexos.....	99
A.1. Resultados de dureza .....	99
A.2. Condição de soldagem complementar (tempo curto de processamento).....	103
A.3. Ferramenta de soldagem .....	108
A.4. Corpos de prova dos ensaios mecânicos monotônicos .....	111
A.5. Centro de Pesquisas GKSS .....	112

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1.	FASES DO PROCESSO DE SOLDA PONTO POR FRICTION STIR SPOT WELDING.....	4
FIGURA 2.	FIGURA MOSTRANDO, ESQUEMATICAMENTE, A VARIANTE <i>PENETRAÇÃO DA CAMISA</i> DO PROCESSO FSPW [22]. .....	5
FIGURA 3.	FIGURA MOSTRANDO, ESQUEMATICAMENTE, A VARIANTE <i>PENETRAÇÃO DO PINO</i> DO PROCESSO FSPW [22]. .....	6
FIGURA 4.	MICROESTRUTURA DA SECÇÃO TRANSVERSAL DE UMA JUNTA SOBREPOSTA DA LIGA AA7075-T6 SOLDADA POR FSSW MOSTRANDO AS ZONAS DA SOLDA [49][50]. .....	7
FIGURA 5.	MICROESTRUTURA DA SECÇÃO TRANSVERSAL DE UMA JUNTA SOBREPOSTA DA LIGA DE ALUMÍNIO 2024-T3 SOLDADA POR FSPW MOSTRANDO AS ZONAS DA SOLDA [22]. .....	7
FIGURA 6.	ESQUEMA MOSTRANDO A RELAÇÃO ENTRE AS VARIÁVEIS DO PROCESSO E AS PROPRIEDADES FINAIS DA SOLDA EM PROCESSOS A FRICÇÃO. ....	8
FIGURA 7.	RESISTÊNCIA MECÂNICA DE SOLDA FSSW EM FUNÇÃO: (A) DO APORTE DE ENERGIA E (B) DA ÁREA DA SOLDA [51][52]. .....	9
FIGURA 8.	EFEITO DA ÁREA SOLDADA NO MODO DE FRATURA EM SOLDA FSSW [56]. ....	10
FIGURA 9.	MICROGRAFIAS DA LIGA AA6181-T4 NA CONDIÇÃO LAMINADA: (A) DIREÇÃO LONGITUDINAL À DE LAMINAÇÃO E (B) DIREÇÃO TRANSVERSAL À DE LAMINAÇÃO. ....	11
FIGURA 10.	CURVA DE ENSAIO MECÂNICO DE TRAÇÃO MEDIDA NAS DIREÇÕES LONGITUDINAL E TRANSVERSAL EM RELAÇÃO À DIREÇÃO DE LAMINAÇÃO. ....	12
FIGURA 11.	FLUXOGRAMA MOSTRANDO AS ATIVIDADES DESENVOLVIDAS NAS QUATRO FASES DESTA TRABALHO. ....	13
FIGURA 12.	PROTÓTIPO DE MÁQUINA DE SOLDAGEM FSPW E FERRAMENTA UTILIZADA NA PRODUÇÃO DAS SOLDAS ESTUDADAS NESTE TRABALHO. ....	15
FIGURA 13.	EXEMPLO ESQUEMÁTICO DE CORPOS DE PROVA PARA ENSAIOS DE: (A) CISLHAMENTO E (B) TRAÇÃO. ....	16
FIGURA 14.	ESQUEMA DAS SOLDAS PRODUZIDAS PARA ESTUDO NESTE TRABALHO. ....	16
FIGURA 15.	MÁQUINA DE TRAÇÃO SCHENCK-TREBEL RM100 UTILIZADA PARA A AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA MECÂNICA DAS JUNTAS SOLDADAS SOB SOLICITAÇÃO DE CISLHAMENTO E DE TRAÇÃO. ....	17
FIGURA 16.	MÁQUINA DE LIXAMENTO E POLIMENTO AUTOMÁTICO MODELO BUEHLER PHOENIX 4000 UTILIZADA NA PREPARAÇÃO METALGRÁFICA. ....	18
FIGURA 17.	MICROSCÓPIO ÓPTICO LEICA DM IRM UTILIZADO NAS ANÁLISES METALGRÁFICAS. ....	18
FIGURA 18.	MEDIÇÃO DE MICRODUREZA: (A) PONTOS DE MEDIÇÃO DO PERFIL E DO MAPEAMENTO, (B) MICRODURÔMETRO MODELO ZWICK 3212 (C) INDENTADOR ULTRASÔNICO AUTOMÁTICO MODELO BAQ UT 100. ....	19

FIGURA 19.	MÁQUINA SERVO-HIDRÁULICA SCHENCK TREBEL RM 50 UTILIZADA NOS TESTES DE FADIGA.	20
FIGURA 20.	JUNTA SOBREPOSTA DE SOLDA PONTO FSPW APÓS A SOLDAGEM MOSTRANDO DETALHES DO BOTÃO DE SOLDA E O BOM ACABAMENTO SUPERFICIAL DA JUNTA. ....	21
FIGURA 21.	MICROESTRUTURA DE SOLDA PONTO FSPW DA LIGA AA6181-T4 MOSTRANDO DETALHES DA MICROESTRUTURA EM DIFERENTES PONTOS DA JUNTA SOLDADA. SOLDA PRODUZIDA COM A CONDIÇÃO DE SOLDAGEM 42 (1900 RPM COM 3 S DE PROCESSAMENTO).....	22
FIGURA 22.	MACROGRAFIA DA SECÇÃO TRANSVERSAL DE SOLDA PONTO FSPW DA LIGA AA6181-T4 MOSTRANDO AS REGIÕES ONDE FOI FEITA MEDIÇÃO DE TG. SOLDA PRODUZIDA COM A CONDIÇÃO DE SOLDAGEM 39 (1900 RPM / 2,6 S).....	23
FIGURA 23.	TAMANHO DE GRÃO MEDIDO EM REGIÃO AFASTADA DO BOTÃO DE SOLDA, COM MICROESTRUTURA EQUIVALENTE A DO MATERIAL BASE. SOLDA PRODUZIDA COM A CONDIÇÃO DE SOLDAGEM 39 (1900 RPM / 2,6 S). ....	24
FIGURA 24.	TAMANHO DE GRÃO NA ZONA TERMO-MECANICAMENTE AFETADA. SOLDA PRODUZIDA COM A CONDIÇÃO DE SOLDAGEM 39 (1900 RPM / 2,6 S). ....	24
FIGURA 25.	TAMANHO DE GRÃO MEDIDO NA ZONA DE MISTURA. SOLDA PRODUZIDA COM A CONDIÇÃO DE SOLDAGEM 39 (1900 RPM / 2,6 S).....	25
FIGURA 26.	MACROGRAFIA DA SECÇÃO TRANSVERSAL DE SOLDA PONTO FSPW DA LIGA AA6181-T4 MOSTRANDO OS LOCAIS ONDE FORAM FEITAS MEDIÇÕES DE TG. SOLDA PRODUZIDA COM A CONDIÇÃO DE SOLDAGEM 44 (2900 RPM / 3,4 S).....	25
FIGURA 27.	TAMANHO DE GRÃO MEDIDO NO CENTRO DA ZONA DE MISTURA. SOLDA PRODUZIDA COM A CONDIÇÃO DE SOLDAGEM 44 (2900 RPM / 3,4 S). ....	26
FIGURA 28.	TAMANHO DE GRÃO MEDIDO NA PARTE DIREITA DA ZONA DE MISTURA. SOLDA PRODUZIDA COM A CONDIÇÃO DE SOLDAGEM 44 (2900 RPM / 3,4 S). ....	26
FIGURA 29.	TAMANHO DE GRÃO MEDIDO NA PARTE ESQUERDA DA ZONA DE MISTURA. SOLDA PRODUZIDA COM A CONDIÇÃO DE SOLDAGEM 44 (2900 RPM / 3,4 S). ....	27
FIGURA 30.	MANCHAS ESCURAS NA MACROGRAFIA DA AMOSTRA SÃO DECORRENTES DO REFINO DE GRÃO DENTRO DA ZONA DE MISTURA.....	28
FIGURA 31.	DEFEITOS ENCONTRADOS EM ALGUMAS SOLDAS: (A) CONDIÇÃO 32 (2400 RPM / 2 S), (B) CONDIÇÃO 38 (2400 RPM / 2,6 S) E (C) CONDIÇÃO 35 (2900 RPM / 2,2 S).....	29
FIGURA 32.	MACROGRAFIA DA SECÇÃO TRANSVERSAL DE UMA SOLDA FSPW DA LIGA AA6181-T4 MOSTRANDO DETALHES GEOMÉTRICOS CARACTERÍSTICOS DO PROCESSO. SOLDA PRODUZIDA COM A CONDIÇÃO DE SOLDAGEM 38 (2400 RPM / 2,6 S). ....	29
FIGURA 33.	MICROGRAFIAS MOSTRANDO DETALHES DAS FORMAÇÕES GEOMÉTRICAS DA SOLDA FSPW NA LIGA AA6181-T4: (A) UNIÃO PRINCIPAL E (B) CUNHA E UNIÃO SECUNDÁRIA. SOLDA PRODUZIDA COM A CONDIÇÃO DE SOLDAGEM 38 (2400 RPM / 2,6 S). ....	30
FIGURA 34.	PERFIL DE DUREZA DE UMA JUNTA FSPW DA LIGA AA6181-T4 SOLDADA COM A CONDIÇÃO DE SOLDAGEM 40 (2900 RPM / 3 S).....	31
FIGURA 35.	EFEITO DA VELOCIDADE DE ROTAÇÃO NA DUREZA MÁXIMA EM SOLDADAS PRODUZIDAS COM TEMPO DE PROCESSO DE 2 S.....	32
FIGURA 36.	EFEITO DO TEMPO DE SOLDAGEM NO TAMANHO DA ÁREA ENDURECIDA EM SOLDADAS PRODUZIDAS COM VELOCIDADE DE ROTAÇÃO DE 2400 RPM.....	32

FIGURA 37. RESISTÊNCIA MECÂNICA DAS SOLDAS FSPW DA LIGA AA6181-T4 SOB SOLICITAÇÃO DE CISCALHAMENTO.....	33
FIGURA 38. RESISTÊNCIA MECÂNICA DAS SOLDAS FSPW DA LIGA AA6181-T4 SOB SOLICITAÇÃO DE CISCALHAMENTO EM FUNÇÃO DOS PARÂMETROS DE PROCESSO. ....	33
FIGURA 39. RESISTÊNCIA MECÂNICA DAS SOLDAS FSPW DA LIGA AA6181-T4 SOB SOLICITAÇÃO DE TRAÇÃO. ....	34
FIGURA 40. RESISTÊNCIA MECÂNICA DAS SOLDAS FSPW DA LIGA AA6181-T4 SOB SOLICITAÇÃO DE TRAÇÃO EM FUNÇÃO DOS PARÂMETROS DE PROCESSO. ....	34
FIGURA 41. MODOS DE FALHA OBSERVADOS NOS ENSAIOS DE CISCALHAMENTO DAS JUNTAS FSPW DA LIGA AA6181-T4: (A) INTERFACIAL COM TRINCA CIRCUNFERENCIAL, (B) ARRANCAMENTO PARCIAL COM RASGAMENTO E (C) ARRANCAMENTO TOTAL.....	35
FIGURA 42. MODO DE FALHA DO TIPO INTERFACIAL COM TRINCA CIRCUNFERENCIAL OCORRIDO SOB SOLICITAÇÃO MONOTÔNICA DE CISCALHAMENTO. (2400 RPM / 2,2 s). ....	36
FIGURA 43. MODO DE FALHA DO TIPO ARRANCAMENTO PARCIAL COM TRINCA CIRCUNFERENCIAL OCORRIDO SOB SOLICITAÇÃO MONOTÔNICA DE CISCALHAMENTO. (2900 RPM / 2,2 s). ....	36
FIGURA 44. MODO DE FALHA DO TIPO ARRANCAMENTO TOTAL/BOTÃO NA CHAPA SUPERIOR, OCORRIDO SOB SOLICITAÇÃO MONOTÔNICA DE CISCALHAMENTO. (2900 RPM / 3 s) .....	37
FIGURA 45. MODO DE FALHA DO TIPO ARRANCAMENTO TOTAL/BOTÃO NA CHAPA INFERIOR, OCORRIDO SOB SOLICITAÇÃO MONOTÔNICA DE CISCALHAMENTO. (2900 RPM / 2 s). ....	37
FIGURA 46. MODO DE FALHA DO TIPO ARRANCAMENTO TOTAL/FALHA COMPLETA, OCORRIDO SOB SOLICITAÇÃO MONOTÔNICA DE CISCALHAMENTO EM JUNTA FSPW DA LIGA AA6181-T4. (1900 RPM / 2 s). ....	38
FIGURA 47. MODOS DE FALHA OBSERVADOS NOS ENSAIOS DE TRAÇÃO DAS JUNTAS FSPW DA LIGA AA6181-T4: (A) INTERFACIAL, (B) ARRANCAMENTO TOTAL E (C) ARRANCAMENTO PARCIAL.....	38
FIGURA 48. MODO DE FALHA DO TIPO INTERFACIAL SIMPLES OCORRIDO SOB SOLICITAÇÃO MONOTÔNICA DE TRAÇÃO EM JUNTA FSPW DA LIGA AA6181-T4. (1900 RPM / 2 s).....	39
FIGURA 49. MODO DE FALHA DO TIPO INTERFACIAL COM TRINCA CIRCUNFERENCIAL OCORRIDO SOB SOLICITAÇÃO MONOTÔNICA DE TRAÇÃO EM JUNTA FSPW DA LIGA AA6181-T4. (2400 RPM / 3 s).....	39
FIGURA 50. MODO DE FALHA DO TIPO ARRANCAMENTO TOTAL OCORRIDO SOB SOLICITAÇÃO MONOTÔNICA DE TRAÇÃO EM JUNTA FSPW DA LIGA AA6181-T4. (2400 RPM / 2,2 s). ....	40
FIGURA 51. MODO DE FALHA DO TIPO ARRANCAMENTO PARCIAL SIMPLES OCORRIDO SOB SOLICITAÇÃO MONOTÔNICA DE TRAÇÃO EM JUNTA FSPW DA LIGA AA6181-T4. (1900 RPM / 3 s). ....	40
FIGURA 52. MODO DE FALHA DO TIPO ARRANCAMENTO PARCIAL COM RASGAMENTO OCORRIDO SOB SOLICITAÇÃO MONOTÔNICA DE TRAÇÃO EM JUNTA FSPW DA LIGA AA6181-T4. (2900 RPM / 2,6 s).....	41
FIGURA 53. MODO DE FALHA DO TIPO ARRANCAMENTO PARCIAL INVERTIDO OCORRIDO SOB SOLICITAÇÃO MONOTÔNICA DE TRAÇÃO EM JUNTA FSPW DA LIGA AA6181-T4. (2400 RPM / 2 s).....	41
FIGURA 54. CURVA DE WÖHLER MOSTRANDO O DESEMPENHO EM FADIGA DE UMA CONDIÇÃO DE SOLDAGEM COMPLEMENTAR EM SOLDAS FSPW DA LIGA AA6181-T4 PARA UMA RAZÃO DE CARREGAMENTO R IGUAL A 0,2. ....	42
FIGURA 55. FRATURA EM FADIGA DE BAIXO CICLO (ALTO NÍVEL DE CARREGAMENTO) OCASIONADA PELA NUCLEAÇÃO E PROPAGAÇÃO DE TRINCA CIRCUNFERENCIAL NO ENTORNO DO BOTÃO DE SOLDA. ....	43

FIGURA 56. FRATURA EM FADIGA COM NÍVEL INTERMEDIÁRIO DE CARREGAMENTO OCASIONADA PELA NUCLEAÇÃO E PROPAGAÇÃO DE TRINCA CIRCUNFERENCIAL NO ENTORNO DO BOTÃO DE SOLDA E POSTERIOR PROPAGAÇÃO NO MATERIAL BASE.....	43
FIGURA 57. FRATURA EM FADIGA DE ALTO CICLO (BAIXO NÍVEL DE CARREGAMENTO) OCASIONADA PELA NUCLEAÇÃO E PROPAGAÇÃO DE TRINCA CIRCUNFERENCIAL NO ENTORNO DO BOTÃO DE SOLDA E POSTERIOR PROPAGAÇÃO NO MATERIAL BASE.....	44
FIGURA 58. EVOLUÇÃO DA FALHA EM JUNTA FSPW SOB FADIGA DE ALTO CICLO ( $>10^6$ ) COM CARREGAMENTO DE CISALHAMENTO INTERMITENTE. ....	44
FIGURA 59. MACROGRAFIA DA SECÇÃO TRANSVERSAL DE UMA SOLDA FSPW DA LIGA AA6181-T4 MOSTRANDO AS ZONAS DA SOLDA.....	46
FIGURA 60. MICROGRAFIAS MOSTRANDO A INTERFACE ENTRE AS ZONAS DE UMA SOLDA FSPW DA LIGA AA6181-T4: (A) LADO ESQUERDO DO BOTÃO - GRANDE AMPLIAÇÃO E (B) LADO DIREITO DO BOTÃO - PEQUENA AMPLIAÇÃO. ....	47
FIGURA 61. MAPA DE DUREZA NA SECÇÃO TRANSVERSAL DE UMA SOLDA FSPW DA LIGA AA6181-T4 SOLDADA UTILIZANDO A CONDIÇÃO DE SOLDAGEM 42 (1900 RPM / 3 s). ....	48
FIGURA 62. SECÇÃO TRANSVERSAL DE SOLDA FSPW DA LIGA AA6181-T4 MOSTRANDO O EFEITO DA VELOCIDADE DE ROTAÇÃO NA GEOMETRIA FINAL DO BOTÃO DE SOLDA: (A) 2900 RPM, (B) 2400 RPM E (C) 1900 RPM. ....	50
FIGURA 63. MACROGRAFIAS MOSTRANDO O PROCESSO DE SOLDAGEM FSPW DE UMA LIGA AA6181-T4 EM DIFERENTES ESTÁGIOS. FONTE: RELATÓRIO DA EMPRESA RIFTEC GMBH PARA DIVULGAÇÃO DO PROCESSO. ...	50
FIGURA 64. DETALHES DA CUNHA ONDE É POSSÍVEL OBSERVAR PONTOS INTERCALADOS DE ADESÃO ENTRE AS CHAPAS SUPERIOR E INFERIOR. SOLDA PRODUZIDA COM A CONDIÇÃO 36 (1900 RPM / 2,2 s). ....	51
FIGURA 65. MICROGRAFIAS MOSTRANDO DETALHES DA UNIÃO PRINCIPAL EM UMA SOLDA FSPW DA LIGA AA6181-T4. ....	52
FIGURA 66. MICROGRAFIAS MOSTRANDO DETALHES DA UNIÃO SECUNDÁRIA EM SOLDAS FSPW DA LIGA AA6181-T4 PRODUZIDAS COM DIFERENTES CONDIÇÕES DE SOLDAGEM: (A) 1900 RPM / 3,4 s E (B) 2900 RPM / 2 s. ....	52
FIGURA 67. RESISTÊNCIA MECÂNICA SOB SOLICITAÇÃO DE CISALHAMENTO DAS SOLDAS FSPW DA LIGA AA6181-T4. ....	53
FIGURA 68. MODOS DE FALHA OBSERVADOS NOS ENSAIOS DE CISALHAMENTO DA LIGA AA6181-T4, MOSTRANDO AS TRINCAS ANULAR E CIRCUNFERENCIAL. ....	55
FIGURA 69. DISTRIBUIÇÃO DE TENSÕES NO ENTORNO DO BOTÃO DE UMA SOLDA FSPW: (A) SECÇÃO TRANSVERSAL E (B) SUPERFÍCIE SUPERIOR. ....	55
FIGURA 70. DISTRIBUIÇÃO DE TENSÕES NO ENTORNO DO BOTÃO DE SOLDA EM JUNTA FSPW DA LIGA AA2024-T3 OBTIDA EM ELEMENTOS FINITOS. RESULTADOS EXTRAÍDOS DE MAZZAFERRO ET. AL. [25].....	56
FIGURA 71. NUCLEAÇÃO DE TRINCA ANULAR DEVIDO AO RASGAMENTO DA UNIÃO SECUNDÁRIA EM SOLDA FSPW DA LIGA AA6181-T4 SOB SOLICITAÇÃO DE CISALHAMENTO. ....	57
FIGURA 72. SÍTIOS DE NUCLEAÇÃO DA TRINCA SUPERFICIAL NA CHAPA SUPERIOR EM SOLDAS FSPW DA LIGA AA6181-T4: (A) EM DEFEITO DE SOLDAGEM E (B) NO CUME DA CUNHA. ....	58
FIGURA 73. SÍTIOS DE NUCLEAÇÃO DA TRINCA CIRCUNFERENCIAL NA CHAPA INFERIOR EM SOLDAS FSPW DA LIGA AA6181-T4: (A) INTERFACE US/UP, (B) PONTA DA TA E (C) INTERFACE CUNHA/US.....	58

FIGURA 74. REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DE UMA SOLDA FSPW MOSTRANDO O EFEITO DA DISTRIBUIÇÃO DE TENSÕES NA NUCLEAÇÃO DE TC NA CHAPA SUPERIOR. NO CASO DE TC NA CHAPA INFERIOR, ELA SE FORMA NO LADO OPOSTO AO DA CHAPA SUPERIOR. ....	59
FIGURA 75. FALHA SOB CISALHAMENTO MOSTRANDO A TC SE FORMANDO EM DEFEITO DE SOLDAGEM E EM SEGUIDA PROPAGANDO AO LONGO DA CUNHA. ....	59
FIGURA 76. FRATURA DO TIPO ARRANCAMENTO TOTAL/BOTÃO NA CHAPA SUPERIOR EM SOLDA FSPW DA LIGA AA6181-T4. SOLDA PRODUZIDA COM 2400 RPM / 3 s. ....	60
FIGURA 77. DETALHES DA SUPERFÍCIE DE FRATURA EM MODO DE FALHA DO TIPO ARRANCAMENTO TOTAL/BOTÃO NA CHAPA SUPERIOR. SOLDA PRODUZIDA COM 2400 RPM / 3 s. ....	61
FIGURA 78. SECÇÃO TRANSVERSAL DE FALHA DO TIPO ARRANCAMENTO TOTAL/BOTÃO NA CHAPA SUPERIOR SOB SOLICITAÇÃO DE CISALHAMENTO MOSTRANDO DETALHES DO DESENVOLVIMENTO DA FRATURA. ....	61
FIGURA 79. SECÇÃO TRANSVERSAL DE FALHA DO TIPO ARRANCAMENTO TOTAL/BOTÃO NA CHAPA SUPERIOR MOSTRANDO O LADO ESQUERDO DA JUNTA, LOCAL DE INÍCIO DO RASGAMENTO DA UNIÃO SECUNDÁRIA E DA NUCLEAÇÃO DA TC NA CHAPA INFERIOR. ....	62
FIGURA 80. DETALHE DO RASGAMENTO DA UNIÃO SECUNDÁRIA NOS MOMENTOS INICIAIS EM FALHA DO TIPO ARRANCAMENTO TOTAL/BOTÃO NA CHAPA SUPERIOR, CARACTERÍSTICO DE SOLDAS DE ALTA QUALIDADE. ....	63
FIGURA 81. FRATURA DO TIPO ARRANCAMENTO TOTAL/BOTÃO NA CHAPA INFERIOR SOB SOLICITAÇÃO DE CISALHAMENTO. SOLDA PRODUZIDA COM 2900 RPM / 2 s. ....	64
FIGURA 82. DETALHES DA SUPERFÍCIE DE FRATURA EM MODO DE FALHA DO TIPO ARRANCAMENTO TOTAL/BOTÃO NA CHAPA INFERIOR EM SOLDA FSPW DA LIGA AA6181-T4. ....	64
FIGURA 83. SECÇÃO TRANSVERSAL DE FALHA DO TIPO ARRANCAMENTO TOTAL/BOTÃO NA CHAPA INFERIOR EM SOLDA FSPW DA LIGA AA6181-T4 SOB SOLICITAÇÃO DE CISALHAMENTO MOSTRANDO DETALHES DO DESENVOLVIMENTO DA FRATURA. ....	65
FIGURA 84. SECÇÃO TRANSVERSAL DE FALHA DO TIPO ARRANCAMENTO TOTAL/BOTÃO NA CHAPA INFERIOR MOSTRANDO O LADO ESQUERDO DA JUNTA, LOCAL DE INÍCIO DA TC NA CHAPA INFERIOR. ....	66
FIGURA 85. CURVAS DE RESISTÊNCIA MECÂNICA X DESLOCAMENTO PARA AS CONDIÇÕES DE SOLDAGEM: (A) 42 (1900 RPM / 3 s) E (B) 31 (2900 RPM / 2 s). ....	67
FIGURA 86. FRATURA DO TIPO INTERFACIAL COM TRINCA CIRCUNFERENCIAL SOB SOLICITAÇÃO DE CISALHAMENTO. SOLDA PRODUZIDA COM 1900 RPM / 2 s. ....	67
FIGURA 87. SECÇÃO TRANSVERSAL DE FALHA DO TIPO INTERFACIAL COM TRINCA CIRCUNFERENCIAL SOB SOLICITAÇÃO DE CISALHAMENTO MOSTRANDO DETALHES DO DESENVOLVIMENTO DA FRATURA. ....	68
FIGURA 88. DETALHE DA SUPERFÍCIE DE FRATURA EM FALHA INTERFACIAL COM TRINCA CIRCUNFERENCIAL COM RESPECTIVO GRÁFICO CARREGAMENTO X ALONGAMENTO MEDIDO NO ENSAIO DE CISALHAMENTO. ....	68
FIGURA 89. DETALHE DO RASGAMENTO DA UNIÃO SECUNDÁRIA EM FRATURA INTERFACIAL COM TRINCA CIRCUNFERENCIAL EM ENSAIO DE CISALHAMENTO. (1900 RPM / 2 s). ....	69
FIGURA 90. DETALHE DA NUCLEAÇÃO DA TA ATRAVÉS DO RASGAMENTO DA UNIÃO SECUNDÁRIA E SUA PROPAGAÇÃO AO LONGO DA UNIÃO PRINCIPAL. ....	69
FIGURA 91. DETALHE DA PROPAGAÇÃO DA TA AO LONGO DA UNIÃO PRINCIPAL EM SOLDA PRODUZIDA COM A CONDIÇÃO DE SOLDAGEM 33 (1900 RPM / 2 s). ....	70

FIGURA 92. FRATURA INTERFACIAL SOB SOLICITAÇÃO DE CISALHAMENTO EM AMOSTRA DE SOLDA PRODUZIDA COM A CONDIÇÃO DE SOLDAGEM 42 (1900 RPM / 3 S).....	71
FIGURA 93. RESISTÊNCIA MECÂNICA SOB SOLICITAÇÃO DE TRAÇÃO DAS SOLDAS FSPW DA LIGA AA6181-T4. ....	72
FIGURA 94. MODOS DE FALHA OBSERVADOS NOS ENSAIOS DE TRAÇÃO DA LIGA AA6181-T4, MOSTRANDO AS TRINCAS ANULAR E CIRCUNFERENCIAL. ....	73
FIGURA 95. SECÇÃO TRANSVERSAL DE FALHA DO TIPO ARRANCAMENTO PARCIAL SIMPLES SOB SOLICITAÇÃO DE TRAÇÃO MOSTRANDO O DESENVOLVIMENTO DA TC A PARTIR DE DEFEITO DE SOLDAGEM. CONDIÇÃO DE SOLDAGEM 33 (1900 RPM / 2 S).....	73
FIGURA 96. GRÁFICOS CARREGAMENTO X ALONGAMENTO OBTIDOS EM ENSAIO DE TRAÇÃO DE SOLDAS PRODUZIDAS COM A CONDIÇÃO DE SOLDAGEM 33 (1900 RPM / 2 S). ....	74
FIGURA 97. TRANSIÇÃO ENTRE UNIÃO SECUNDÁRIA E UNIÃO PRINCIPAL PARA DIFERENTES CONDIÇÕES DE SOLDAGEM: (A) 34 (2900 RPM / 2,2 S) E (B) 42 (1900 RPM / 3 S).....	75
FIGURA 98. SECÇÃO TRANSVERSAL DE FALHAS POR ARRANCAMENTO PARCIAL COM RASGAMENTO (34 - 2900 RPM / 2,2 S) E SIMPLES (42 - 1900 RPM / 3 S) SOB SOLICITAÇÃO DE TRAÇÃO.....	76
FIGURA 99. DETALHES DOS MODOS DE FALHA DO TIPO ARRANCAMENTO PARCIAL: (A) COM RASGAMENTO (34 - 2900 RPM / 2,2 S) E (B) SIMPLES (42 - 1900 RPM / 3 S).....	76
FIGURA 100. COMPARAÇÃO DO DESEMPENHO MECÂNICO DENTRE CONDIÇÕES DE SOLDAGEM QUE APRESENTARAM FALHA DO TIPO ARRANCAMENTO PARCIAL.....	77
FIGURA 101. DISTRIBUIÇÃO DE TENSÕES NO ENTORNO DO BOTÃO DE SOLDA SOB SOLICITAÇÃO DE TRAÇÃO. ....	78
FIGURA 102. MODO DE FALHA DO TIPO INTERFACIAL SIMPLES SOB SOLICITAÇÃO DE TRAÇÃO EM AMOSTRA PRODUZIDA COM A CONDIÇÃO DE SOLDAGEM 33 (1900 RPM / 2 S). ....	79
FIGURA 103. MODO DE FALHA DO TIPO INTERFACIAL COM TRINCA CIRCUNFERENCIAL SOB SOLICITAÇÃO DE TRAÇÃO EM AMOSTRA PRODUZIDA COM A CONDIÇÃO DE SOLDAGEM 41 (2400 RPM / 3S). ....	79
FIGURA 104. SECÇÃO TRANSVERSAL DE FALHA DO TIPO INTERFACIAL SOB SOLICITAÇÃO DE TRAÇÃO DA CONDIÇÃO DE SOLDAGEM 42 (2400 RPM / 3 S). ....	80
FIGURA 105. DETALHES DA FRATURA NO MODO DE FALHA INTERFACIAL COM TRINCA CIRCUNFERENCIAL SOB SOLICITAÇÃO DE CISALHAMENTO EM AMOSTRA DA CONDIÇÃO DE SOLDAGEM 42 (2400 RPM / 3 S).....	80
FIGURA 106. COMPARAÇÃO DO DESEMPENHO MECÂNICO DENTRE FALHAS DO TIPO INTERFACIAL: (A) SIMPLES E (B) COM TRINCA CIRCUNFERENCIAL.....	81
FIGURA 107. FRATURA DO TIPO ARRANCAMENTO PARCIAL INVERTIDO SOB SOLICITAÇÃO DE TRAÇÃO EM AMOSTRA DE SOLDA PRODUZIDA COM A CONDIÇÃO DE SOLDAGEM 32 (2400 RPM / 2 S). ....	82
FIGURA 108. SECÇÃO TRANSVERSAL DAS FALHAS DO TIPO ARRANCAMENTO PARCIAL INVERTIDO (38 - 2400 RPM / 2,6 S) E ARRANCAMENTO TOTAL (35 – 2400 RPM / 2,2 S) SOB SOLICITAÇÃO DE TRAÇÃO. ....	82
FIGURA 109. DETALHE MOSTRADO A NUCLEAÇÃO DA TC NA CHAPA INFERIOR A PARTIR DA INTERFACE ENTRE US E UP: (A) CONDIÇÃO 38 (2400 RPM / 2,6 S) E (B) CONDIÇÃO 35 (2400 RPM / 2,2 S). ....	83
FIGURA 110. COMPARAÇÃO DO DESEMPENHO MECÂNICO PARA AS FALHAS DO TIPO: (A) ARRANCAMENTO PARCIAL INVERTIDO E (B) ARRANCAMENTO TOTAL. ....	83
FIGURA 111. REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DE UMA SOLDA FSPW MOSTRANDO: (A) DETALHES GEOMÉTRICOS DA JUNTA E (B) POSSÍVEIS LOCAIS DE NUCLEAÇÃO DE TA E TC SOB SOLICITAÇÃO DE TRAÇÃO. ....	84

FIGURA 112.	EFEITO DO TEMPO DE SOLDAGEM NA GEOMETRIA DA CUNHA EM SOLDAS PRODUZIDAS COM TEMPO DE SOLDAGEM DE 3 S E 3,4 S.....	86
FIGURA 113.	REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DE UMA SOLDA FSPW MOSTRANDO DETALHES GEOMÉTRICOS DA JUNTA E OS POSSÍVEIS LOCAIS DE NUCLEAÇÃO DE TA E TC SOB SOLICITAÇÃO DE TRAÇÃO.	87
FIGURA 114.	COMPARAÇÃO DA RESISTÊNCIA MECÂNICA SOB CISALHAMENTO DAS SOLDAS FSPW COM O PROCESSO DE SOLDAGEM A PONTO POR RESISTÊNCIA ELÉTRICA, COM BASE NA NORMA MIL-HDBK-5H [71].	88
FIGURA 115	PERFIL DE MICRODUREZA DA CONDIÇÃO DE SOLDAGEM 31 (2900 RPM / 2 S), MEDIDA A MEIA ESPESSURA DA CHAPA SUPERIOR.....	99
FIGURA 116	PERFIL DE MICRODUREZA DA CONDIÇÃO DE SOLDAGEM 32 (2400 RPM / 2 S), MEDIDA A MEIA ESPESSURA DA CHAPA SUPERIOR.....	99
FIGURA 117	PERFIL DE MICRODUREZA DA CONDIÇÃO DE SOLDAGEM 33 (1900 RPM / 2 S), MEDIDA A MEIA ESPESSURA DA CHAPA SUPERIOR.....	100
FIGURA 118	PERFIL DE MICRODUREZA DA CONDIÇÃO DE SOLDAGEM 34 (2900 RPM / 2,2 S), MEDIDA A MEIA ESPESSURA DA CHAPA SUPERIOR.....	100
FIGURA 119	PERFIL DE MICRODUREZA DA CONDIÇÃO DE SOLDAGEM 35 (2400 RPM / 2,2 S), MEDIDA A MEIA ESPESSURA DA CHAPA SUPERIOR.....	100
FIGURA 120	PERFIL DE MICRODUREZA DA CONDIÇÃO DE SOLDAGEM 36 (1900 RPM / 2,2 S), MEDIDA A MEIA ESPESSURA DA CHAPA SUPERIOR.....	101
FIGURA 121	PERFIL DE MICRODUREZA DA CONDIÇÃO DE SOLDAGEM 37 (2900 RPM / 2,6 S), MEDIDA A MEIA ESPESSURA DA CHAPA SUPERIOR.....	101
FIGURA 122	PERFIL DE MICRODUREZA DA CONDIÇÃO DE SOLDAGEM 39 (1900 RPM / 2,6 S), MEDIDA A MEIA ESPESSURA DA CHAPA SUPERIOR.....	101
FIGURA 123	PERFIL DE MICRODUREZA DA CONDIÇÃO DE SOLDAGEM 40 (2900 RPM / 3 S), MEDIDA A MEIA ESPESSURA DA CHAPA SUPERIOR.....	102
FIGURA 124	PERFIL DE MICRODUREZA DA CONDIÇÃO DE SOLDAGEM 45 (2400 RPM / 3,4 S), MEDIDA A MEIA ESPESSURA DA CHAPA SUPERIOR.....	102
FIGURA 125	PERFIL DE MICRODUREZA DA CONDIÇÃO DE SOLDAGEM 46 (1900 RPM / 3,4 S), MEDIDA A MEIA ESPESSURA DA CHAPA SUPERIOR.....	102
FIGURA 126.	RESISTÊNCIA MECÂNICA EM ENSAIO DE CISALHAMENTO INCLUINDO OS RESULTADOS OBTIDOS PARA A CONDIÇÃO 43 (2400 RPM / 2 S / 1,65 MM).....	104
FIGURA 127.	RESISTÊNCIA MECÂNICA EM ENSAIO DE TRAÇÃO INCLUINDO OS RESULTADOS OBTIDOS PARA A CONDIÇÃO 43 (2400 RPM / 2 S / 1,65 MM). ....	105
FIGURA 128.	MACROGRAFIA DA SECÇÃO TRANSVERSAL DE JUNTA PRODUZIDA COM A CONDIÇÃO DE SOLDAGEM 43 (2400 RPM / 2 S / 1,65 MM).....	105
FIGURA 129.	DETALHE DOS DEFEITOS DO TIPO FALTA DE MISTURA E FALTA DE PREENCHIMENTO NAS SOLDAS PRODUZIDAS COM A CONDIÇÃO DE SOLDAGEM 32 E 43.....	106
FIGURA 130.	SECÇÃO TRANSVERSAL DE FRATURA INTERFACIAL SIMPLES E CURVAS CARGA X ALONGAMENTO EM AMOSTRA SOLDADA COM A CONDIÇÃO DE SOLDAGEM 43 (2400 RPM / 2 S / 1,65 MM)....	106
FIGURA 131.	DESENHO TÉCNICO MOSTRANDO AS DIMENSÕES DO ANEL DE FIXAÇÃO DA FERRAMENTA DE SOLDAGEM. ....	108

FIGURA 132.	DESENHO TÉCNICO MOSTRANDO AS DIMENSÕES DA CAMISA DA FERRAMENTA DE SOLDAGEM. .....	109
FIGURA 133.	DESENHO TÉCNICO MOSTRANDO AS DIMENSÕES DO PINO DA FERRAMENTA DE SOLDAGEM. .... .....	110
FIGURA 134.	DIMENSÕES DO CORPO DE PROVA UTILIZADO NOS TESTES DE CISLHAMENTO. ....	111
FIGURA 135.	DIMENSÕES DO CORPO DE PROVA UTILIZADO NOS TESTES DE TRAÇÃO. ....	111
FIGURA 136.	VISTA AÉREA DO CENTRO DE PESQUISAS ALEMÃO GKSS, À MARGEM DO RIO ELBE EM GEESTHACHT NA ALEMANHA. ....	112

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1.	COMPOSIÇÃO MÉDIA DA LIGA DE ALUMÍNIO 6181 [98].....	11
TABELA 2.	MATRIZ DE PARÂMETROS DE SOLDAGEM PARA ENSAIOS DE CISALHAMENTO. ....	14
TABELA 3.	MATRIZ DE PARÂMETROS DE SOLDAGEM PARA ENSAIOS DE TRAÇÃO. ....	15
TABELA 4.	PARÂMETROS DE PROCESSO DAS SOLDAS ESTUDADAS NESTE TRABALHO, INCLUINDO A NOVA CONDIÇÃO 43. ....	103

## LISTA DE EQUAÇÕES

[1] Equação geral do aporte de energia em soldas por fricção:

$$Q = \sum_{n=1}^{n=N} \text{Força (n)} (x_n - x_{n-1}) + \sum_{n=1}^{n=N} \text{Torque (n)} \omega(n) \Delta t \dots\dots\dots 9$$

[2] Equação simplificada do aporte de energia em soldas por fricção:

$$Q = \sum_{n=1}^{n=N} \text{Torque (n)} \omega(n) \Delta t \dots\dots\dots 9$$

[3] e [4] Velocidade de penetração da ferramenta de soldagem:

$$\text{Velocidade de penetração} = \frac{\text{Deslocamento da ferramenta}}{\text{Tempo de soldagem}} \dots\dots\dots 104$$

## LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

AISI	: American Iron and Steel Institute;
CP	: corpo de prova;
DIN	: Deutsches Institut für Normung;
FSW	: friction stir welding;
FSSW	: friction stir spot welding;
FSpW	: friction spot welding;
GITZ	: Geesthachter Inovations- und Technologiezentrum GmbH;
GKSS	: GeseUPschaft für Kernenergie in Schiffbau und Schifffahrt;
ISO	: International Organization for Standardization;
US	: União Secundária;
UP	: União Principal;
MO	: microscopia óptica;
n	: incremento de amostragem na coleta de dados em processo de soldagem;
N	: incremento final da amostragem na coleta de dados em processo de soldagem;
Q	: aporte de energia térmica e mecânica;
ZM	: zona de mistura;
$\Delta t$	: tempo de amostragem na coleta de dados em processo de soldagem;
T4	: tratamento térmico de solubilização e envelhecimento natural;
TA	: trinca anular;
TC	: trinca circunferencial;
$\omega$	: velocidade angular da ferramenta de soldagem;
$x_n$	: profundidade de penetração da ferramenta no incremento n;
ZTMA	: zona termo-mecanicamente afetada;
ZTA	: zona termicamente afetada.

## RESUMO

Uma nova tecnologia de soldagem, denominada Friction Spot Welding (FSpW) utiliza uma ferramenta rotativa especial que transfere energia térmica e mecânica ao material sendo soldado. O processo se destina à soldagem de juntas sobrepostas, primariamente para ligas leves, mas, em teoria, é aplicável a qualquer material que apresente boa plasticidade. A crescente competitividade tem motivado as indústrias à otimização de processos, o que tem levado ao uso cada vez mais expressivo de ligas leves nas indústrias automobilística e aeronáutica. Soma-se a isto a necessidade de redução do consumo de combustível em veículos, dada a crescente preocupação com as questões do meio ambiente. Estes fatores tornam o processo FSpW um grande atrativo seja na substituição ou no uso complementar de tecnologias consagradas como soldagem a ponto por resistência elétrica e a LASER (indústria automobilística) e rebitagem (indústria aeronáutica). Neste trabalho foi feito um estudo da aplicabilidade do processo FSpW para a liga de alumínio 6181-T4 que tem forte apelo na indústria automotiva. O estudo teve como objetivo avaliar os efeitos dos parâmetros de processo, na microestrutura, na geometria da junta e no desempenho mecânico, além de buscar a otimização do processo para a liga em estudo. Tal otimização foi feita por meio do estudo dos mecanismos de fratura das soldas sob solicitação monotônica de cisalhamento e de tração. Juntas sobrepostas foram produzidas utilizando condições de soldagem variadas, por meio de diferentes combinações de velocidade de rotação e tempo de processamento. Os resultados obtidos mostraram que soldas de alta resistência e de reprodutibilidade são possíveis com este novo processo. O botão de solda FSpW da liga 6181-T4 é constituído de três elementos (União Principal, União Secundária e Cunha). As características destes elementos, somada às transformações metalúrgicas decorrentes do processo, afetam fortemente o comportamento em fratura das juntas e, conseqüentemente, o seu desempenho mecânico.

## ABSTRACT

A new welding technique referred to as Friction Spot Welding (FSpW) suitable to produce overlap joints uses a spindle to transfer mechanical and thermal energy to the material being welded. Although initially developed for lightweight alloys this welding technique is suitable to virtually any material presenting some degree of plasticity. The process has shown potential applicability to complementary use together with other well established techniques such as resistance and LASER spot welding and riveting. In this work a study of the application of the FSpW process for the automotive aluminium alloy 6181-T4 was performed. Overlap joints were produced with different welding conditions by using different combinations of tool rotation speed and welding time. The objectives were the assessment of the welding parameters on the strength, microstructure and geometry of the joints, as well as the optimization of the process. The welded joints were assessed mechanically and metallurgically aiming the investigation of the mechanisms of joint formation and the optimization of the welding parameters. The methodology used for the optimization of the welding parameters was the fracture mechanisms of the joints under shear and tension loads. The results revealed that sound welds with high strength and toughness are possible to be produced with the 6181-T4 alloy using this process. Moreover, the metallurgical investigation revealed that the spot joint is comprised by three elements: Primary Union, Secondary Union and Rim. It was found that the characteristics of these three elements in addition to the metallurgical transformations imposed to the material play a fundamental role on the fracture behaviour of the joints and thus, on its mechanical behaviour.

## 1 INTRODUÇÃO

A necessidade de redução de custos operacionais decorrentes da crescente concorrência acompanhada das recentes medidas governamentais de proteção ao meio ambiente tem exigindo o emprego cada vez maior de materiais leves nas indústrias automotiva e aeronáutica. Isso tem se refletido no emprego extensivo de ligas de alumínio e magnésio nestes dois segmentos industriais. Neste contexto, muitos componentes produzidos com estas ligas, seja por estampagem, fundição, extrusão, forjamento, etc. precisam, em algum momento, serem unidos a outros elementos durante o processo de fabricação de componentes [1][2][3].

Na indústria automobilística, solda ponto por resistência elétrica ou a laser são as técnicas mais comumente usadas para esta finalidade em componentes de aço. Contudo a soldagem de ligas leves a base de alumínio e magnésio é mais complexa tendo em vista a baixa soldabilidade destes materiais. Por serem processos que envolvem fusão, existem ainda os inconvenientes resultantes da solidificação o que pode dar origem em juntas de baixo desempenho mecânico [6][10][11]. Ainda existem os problemas associados ao desgaste do eletrodo de soldagem [12].

No campo aeronáutico, solda ponto por laser, rebiteagem convencional e rebiteagem por auto aprisionamento (self clinching riveting) são os processos utilizados. A rebiteagem, embora garanta bom desempenho mecânico traz consigo o problema de aumento significativo de peso à estrutura [13][14].

Deste modo, processos que venham a solucionar os aspectos negativos dos já existentes são bem vindos nestes segmentos de indústrias com níveis cada vez mais exigentes em termos de desempenho e custo. O Friction Spot Welding (FSpW) juntamente com o Friction Stir spot Welding (FSSW) são processos inovadores de soldagem no estado sólido que têm demonstrado grande potencial para aplicações nestes dois segmentos industriais [4][5][6][7][8][9].

### 1.1 Histórico

O processo Friction Spot Welding foi desenvolvido no ano de 1999 pelo grupo de pesquisa em soldagem (solid state joining processes group) do Centro de Pesquisas GKSS na Alemanha (anexo A.5) e patenteado no ano de 2005 [4][5]. Destina-se à união pontual de chapas de ligas leves na forma de juntas sobrepostas com ou sem responsabilidade estrutural. Utiliza uma ferramenta especial composta de três elementos móveis, sendo dois deles rotativos, que geram energia térmica e mecânica necessária à soldagem das chapas no estado sólido. Inicialmente esta ferramenta de soldagem foi desenvolvida com o objetivo de preencher o furo deixado pela ferramenta convencional do processo Friction Stir Welding (FSW) no final do cordão de solda [39]. Posteriormente se tornou evidente que tal ferramenta poderia ser aplicada para a realização de pontos de solda de forma similar ao também inovador Friction Stir Spot Welding (FSSW), desenvolvido pela Mazda Motor Corporation. A partir deste momento o grupo de pesquisa no estado sólido centrou sua atenção no estudo deste processo como alternativa a processos convencionais de soldagem a ponto [22] [23][24][25][26][27][28][30]. Neste trabalho será utilizado o termo Soldagem a Ponto por Fricção, como proposta de tradução para a língua portuguesa do processo FSpW.

### 1.2 Motivação

Por tratar-se de um processo novo, tem-se um caminho longo até a sua inserção em aplicações industriais em larga escala. No ramo automotivo já se tem aplicação de FSSW em elementos não estruturais de automóveis [10]. No ramo aeronáutico ainda é preciso que o processo demonstre confiabilidade e maior amadurecimento antes de sua aplicação em aeronaves. Desta maneira este trabalho vem a incrementar o nível de conhecimento atual deste processo para uma liga de aplicação automotiva.

### 1.3 Objetivos

Este trabalho tem os seguintes objetivos:

- Estudar o desempenho mecânico de juntas sobrepostas da liga de alumínio 6181-T4 soldadas pelo processo FSpW;

- Estudar os efeitos dos parâmetros de processo sobre o comportamento mecânico, microestrutura e geometria da junta;
- Otimizar os parâmetros de processo.

#### 1.4 Metodologia

Para atingir aos objetivos deste trabalho, uma faixa ampla de parâmetros de processo foi utilizada e as juntas produzidas foram submetidas a uma série de caracterizações metalúrgicas e mecânicas. O método utilizado para a avaliação do desempenho mecânico foi o estudo dos mecanismos de fratura das juntas soldadas sob solicitação de cisalhamento e de tração.

Este trabalho foi realizado no Centro de Pesquisas GKSS na cidade de Geesthacht na Alemanha, ver anexo A.5.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Atualmente existem dois processos de soldagem ponto no estado sólido em desenvolvimento: o Friction Stir Spot Welding (FSSW) e o Friction Spot Welding (FSpW). O FSSW é derivado do processo FSW [48] porém a ferramenta não apresenta movimento de translação [9][16][19][34][46][47]. Foi desenvolvido em 2001 no Japão pela Mazda Motor Corporation em parceria com a Kawasaki Motors Corporation [6][10]. O processo FSpW foi desenvolvido em 1999 pelo grupo de soldagem no estado sólido, no Centro de Pesquisas GKSS na Alemanha, dentro do Instituto de Pesquisa em Materiais. Usa uma ferramenta especial e, inicialmente, era empregado apenas para preencher o furo deixado pela ferramenta convencional de FSW no final do cordão de solda [39]. Posteriormente se percebeu o seu potencial de aplicação como processo para união por ponto no estado sólido. Esses dois processos apresentam potencial de aplicação para ligas de baixa soldabilidade fazendo frente aos processos convencionais de soldagem a ponto e rebitagem.

### 2.1 Solda ponto por fricção - generalidades

O FSSW utiliza uma ferramenta idêntica à de FSW (embora algumas variações tenham sido estudadas [7][15][16][45][58]), e o resultado é uma junta soldada na qual existe um furo no centro do botão de solda. O processo é realizado em três estágios, como mostrado esquematicamente na Figura 1 [20].

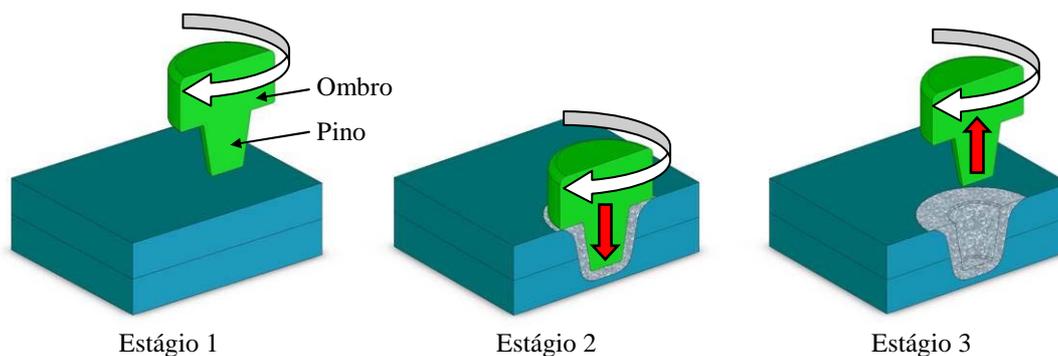


Figura 1. Fases do processo de solda ponto por Friction Stir Spot Welding.

No FSpW a ferramenta é composta de três elementos móveis: pino, camisa e anel de fixação, que são acionados por atuadores independentes. O anel de fixação tem a função de garantir o contato entre as chapas a serem soldadas durante o processo e evitar a “perda” de material na forma de rebarba. O processo permite duas variantes denominadas de *penetração do pino* e *penetração da camisa* em função do elemento da ferramenta que penetra nas chapas ser o pino ou a camisa, respectivamente [22][27][28][30].

O processo é realizado em quatro etapas como mostrado na Figura 2, para o caso de FSpW/Penetração da camisa. Na etapa 1 o anel de fixação pressiona as chapas superior e inferior entre si enquanto o pino e a camisa rotacionam e são deslocados até a superfície da chapa superior. Durante a etapa 2 ocorre a penetração da camisa até uma profundidade pré-determinada enquanto o pino é deslocado para cima. Ao subir o pino cria uma cavidade cilíndrica que tem a finalidade de alojar o material plastificado que é empurrado pela camisa, de maneira análoga a um processo de extrusão. A etapa 3 é caracterizada pelo retorno do pino e da camisa até a superfície da chapa superior. Ao descer, o pino “empurra” de volta, à posição de origem, o material plastificado que foi previamente deslocado pela penetração da camisa. Na etapa 4 a força aplicada ao anel de fixação é aliviada e a ferramenta de soldagem é removida da superfície da chapa. O resultado final é um botão de solda praticamente plano à superfície da chapa superior.

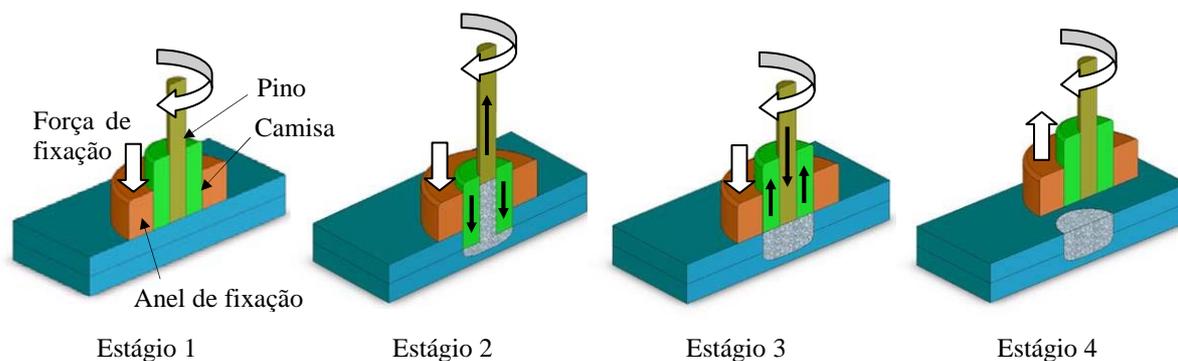


Figura 2. Figura mostrando, esquematicamente, a variante *penetração da camisa* do processo FSpW [22].

Conforme já mencionado anteriormente, outra variante do processo é o FSpW/Penetração do pino, no qual o pino penetra nas chapas enquanto a camisa sobe e cria uma cavidade anular para acomodar o material plastificado que é empurrado (extrudado) pelo pino (ver Figura 3).

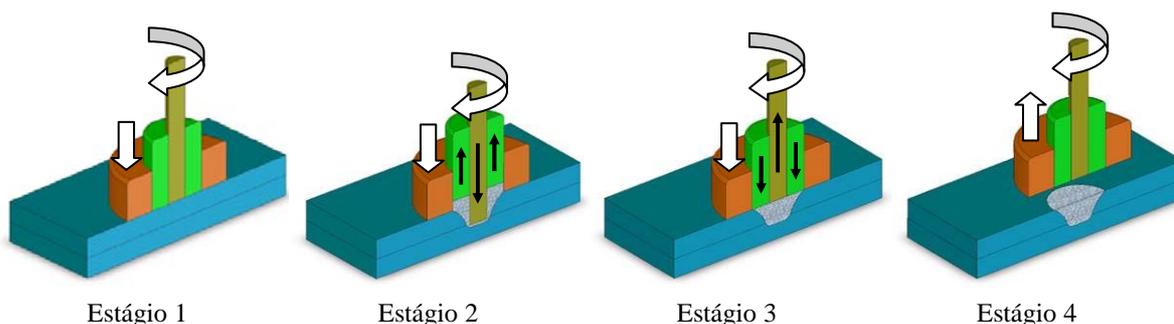


Figura 3. Figura mostrando, esquematicamente, a variante *penetração do pino* do processo FSpW [22].

As duas variantes possuem vantagens e desvantagens. Na FSpW/Penetração do pino as forças sobre a ferramenta são menores exigindo menor potência da máquina e conferindo maior vida à ferramenta. A variante FSpW/Penetração da camisa é mais exigente em termos de esforços e potência da máquina de soldagem, porém, o tamanho do botão de solda é maior e, conseqüentemente, mais resistente será a junta.

### 2.1.1 Microestrutura

Os processos de soldagem por fricção apresentam três regiões de microestrutura distintas: a Zona de Mistura (ZM), a Zona Termo-mecanicamente Afetada (ZTMA) e a Zona Termicamente Afetada (ZTA) [2][8][16][17][19][34][43][46]. É importante destacar que alguns autores ainda consideram uma quarta zona, denominada de Mixed Zone [53][54][55]. A Mixed Zone consiste de uma região dentro da ZM e ambas são consideradas, pela maioria dos autores, como uma zona apenas, a ZM.

Na ZM, ocorre uma intensa deformação plástica acompanhada de alta temperatura (mais baixa que a temperatura de fusão do material) que promovem recristalização dinâmica do material e a mistura mecânica entre as chapas superior e inferior. Este processo é “intenso” e na maioria das vezes resulta numa grande mistura entre as chapas superior e inferior de maneira que não se distingue a interface original entre as chapas [47][49][51][57][60].

A ZTMA é caracterizada por um menor grau de deformação plástica do material e um nível moderado de temperatura. O efeito sobre o material vai depender de suas propriedades, sendo que em geral ocorre recuperação do material e, eventualmente,

“desestabilização” do tratamento térmico da liga, principalmente no caso daquelas endurecíveis por precipitação [64][65][78][80][83].

Na ZTA não se observa deformação plástica, mas a temperatura pode atingir níveis suficientes para ocasionar recuperação da microestrutura laminada das chapas, bem como alterações no tratamento térmico da liga. A Figura 4 mostra a secção transversal de uma junta FSSW indicando as regiões da solda [49][50].

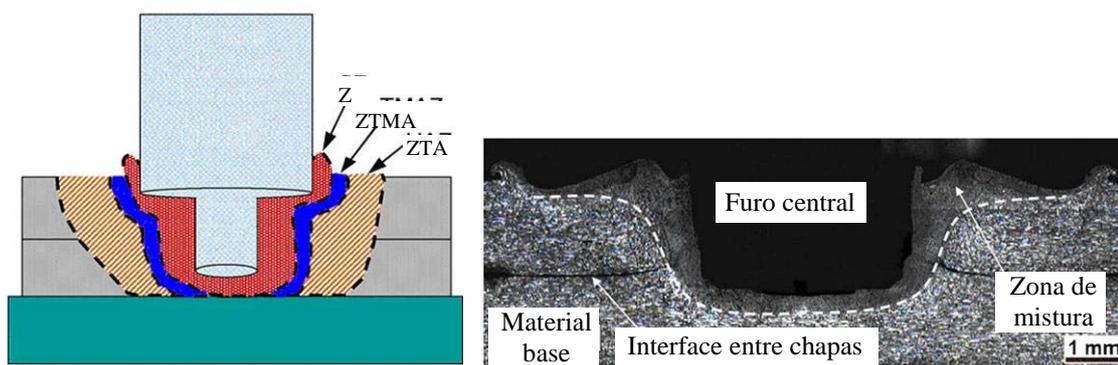


Figura 4. Microestrutura da secção transversal de uma junta sobreposta da liga AA7075-T6 soldada por FSSW mostrando as zonas da solda [49][50].

As mesmas regiões são encontradas nas soldas FSpW, como está mostrado na Figura 5 para uma junta soldada da liga AA2024-T3 produzida utilizando a variante FSpW/Penetração da camisa [22][30].

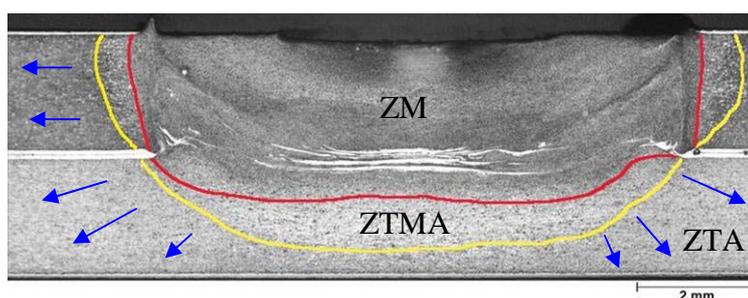


Figura 5. Microestrutura da secção transversal de uma junta sobreposta da liga de alumínio 2024-T3 soldada por FSpW mostrando as zonas da solda [22].

### 2.1.2 Propriedades mecânicas e aporte de energia

As propriedades mecânicas finais de uma junta soldada estão diretamente relacionadas com as propriedades das zonas da solda individualmente [50][54][55][56][61][68][81]. Por sua vez, muitos fatores exercem influência sobre as propriedades das

zonas da solda. Em solda ponto por fricção esses fatores estão compreendidos em quatro grandes grupos de variáveis: a) materiais sendo soldados, b) geometria da ferramenta, c) parâmetros de processo e d) condições do meio.

A Figura 6 ilustra, esquematicamente, a inter-relação entre esses grupos de variáveis e as propriedades finais da junta soldada.

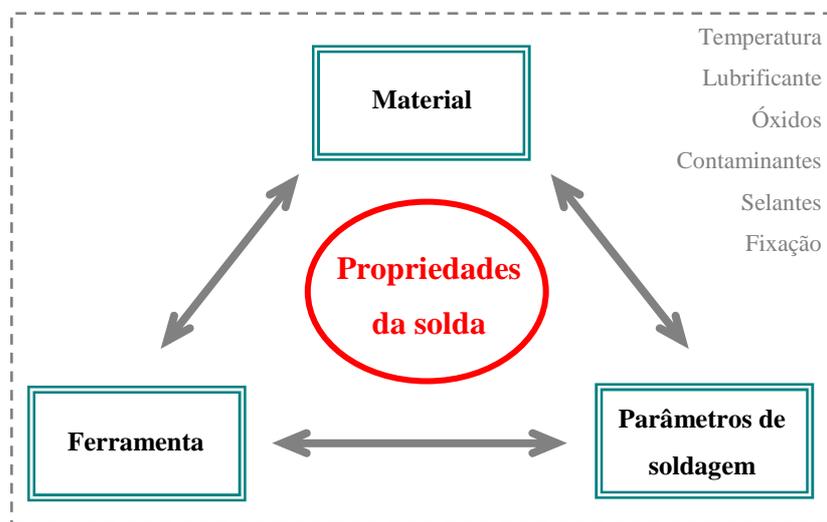


Figura 6. Esquema mostrando a relação entre as variáveis do processo e as propriedades finais da solda em processos a fricção.

As propriedades mecânicas da junta soldada serão, então, definidas por parâmetros como o tamanho do botão de solda, tamanho e distribuição das zonas da solda, presença de defeitos, microestrutura, dureza, geometria da interface entre as chapas, falta de adesão (devido a óxidos ou lubrificantes), dentre outros. A relação existente entre todos estes fatores e os parâmetros de processo ainda não é bem conhecida, sendo que a maioria dos trabalhos publicados até o momento se baseia em observações do tipo causa/efeito [40][82][83][94][95].

Sabe-se que, ao contrário de técnicas de soldagem por fusão, nas soldas ponto por fricção as propriedades mecânicas e metalúrgicas da junta soldada não dependem somente do aporte de energia, mas também da mistura mecânica entre os materiais. No entanto, uma vez que ambos estes agentes (energia térmica e mecânica) atuam conjuntamente durante o processo de soldagem, é difícil separar os efeitos individuais de cada um nas propriedades finais da junta. Estudos mostram que a resistência mecânica deste tipo de solda tende a se elevar com o aumento do aporte térmico e o aumento da área soldada [51][52], ver Figura 7.

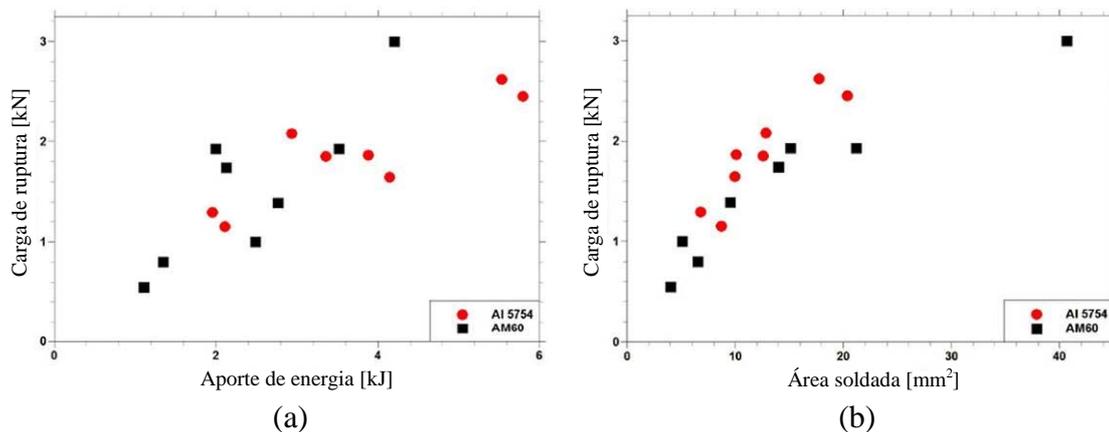


Figura 7. Resistência mecânica de solda FSSW em função: (a) do aporte de energia e (b) da área da solda [51][52].

É importante destacar que o aporte de energia apresentado na Figura 7a foi determinado analiticamente, com base em teorias estabelecidas para o aporte de energia. O aporte de energia em soldas por fricção costuma ser expresso pela equação 1, conforme abordado nos trabalhos de North et. al. [34][35][47][52]:

$$Q = \sum_{n=1}^{n=N} \text{Força}(n) (x_n - x_{n-1}) + \sum_{n=1}^{n=N} \text{Torque}(n) \omega(n) \Delta t \quad [1]$$

onde  $x_n$  é a profundidade de penetração da ferramenta num dado incremento de amostragem ( $n$ ),  $\omega$  é a velocidade angular da ferramenta (rad/s),  $n$  é o incremento de amostragem,  $N$  é o incremento final da amostragem e  $\Delta t$  é o tempo de amostragem (tempo total).

A experiência tem comprovado que o primeiro termo da equação 1 tem efeito desprezível sobre o aporte total de energia em comparação com o segundo membro [34][35][47][52]. Desta maneira é comum expressar o aporte de energia com a equação 2:

$$Q = \sum_{n=1}^{n=N} \text{Torque}(n) \omega(n) \Delta t \quad [2]$$

A equação 2 prevê que a velocidade de rotação da ferramenta e o tempo de soldagem são variáveis de peso sobre o aporte de energia. É importante destacar também a importância do torque e que este depende da condição de contato entre a ferramenta e o material sendo soldado. O torque é consequência da adesão entre a superfície da

ferramenta e as chapas sendo soldadas. Se houver escorregamento entre a ferramenta e o material (como pode ocorrer em altas rotações, por exemplo), o torque e, conseqüentemente, o aporte de energia caem [36][37][38][40][59].

Além da resistência mecânica da junta, o modo de falha também é afetado pelo tamanho da área da solda como foi mostrado por Chang et. al. [56] em solda FSSW de ligas automotivas. Foi observado que juntas com maior área de solda apresentaram modos de falha associados com alta absorção de energia enquanto que juntas com menor área soldada romperam de maneira mais frágil como está mostrado na Figura 8.

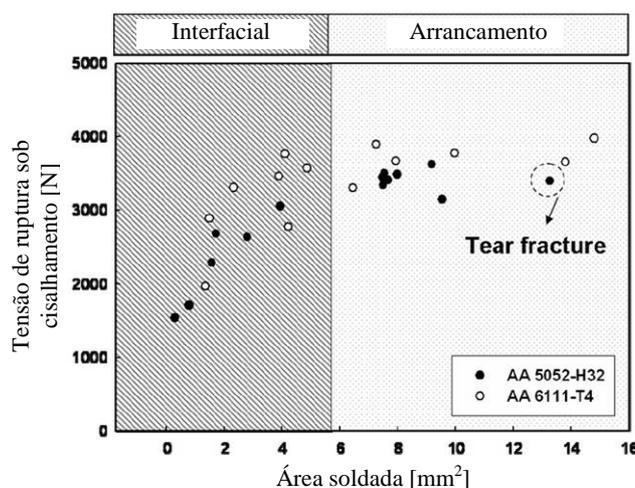


Figura 8. Efeito da área soldada no modo de fratura em solda FSSW [56].

## 2.2 Liga de alumínio 6181

As ligas de alumínio mais comumente empregadas no segmento automotivo são as da série 5xxx e 6xxx. Essas ligas, tratáveis termicamente, são geralmente usadas no corpo exterior de automóveis, em diferentes partes. Além de excelentes propriedades pós-tratamento, estas ligas ainda apresentam alta qualidade superficial após conformação mecânica, o que aumenta sua atratividade.

A liga 6181, especificamente, tem um grande atrativo para aplicação na indústria automotiva devido as facilidades de tratamento que ela apresenta e facilidade de reciclagem [33][76]. Essas duas características levaram a tendência do uso quase que exclusivo de ligas da série 6xxx nas aplicações automotivas (conceito “unialloy”) [33]. Na condição T4 esta liga apresenta alta trabalhabilidade e resistência à corrosão [75][77].

O tratamento térmico T4 consiste na solução dos precipitados na liga, em alta temperatura, seguido de envelhecimento natural (resfriamento em temperatura ambiente e armazenamento) logo após a laminação. Os principais elementos de liga, magnésio e silício, combinam-se para formar o composto metálico  $Mg_2Si$ , responsável pelo endurecimento da liga, que ocorre antes de se atingir o equilíbrio do superenvelhecimento. A solubilidade da fase  $Mg_2Si$  ( $\beta$ ) na matriz rica em alumínio ( $\alpha$ ) aumenta com a elevação da temperatura. No caso de tratamento de solubilização e envelhecimento artificial controlado é possível a precipitação da segunda fase ( $\beta$ ) a partir de uma solução sólida supersaturada. Isso favorece a formação de precipitados finos e uniformemente distribuídos, que acarretam num substancial aumento na dureza [75][77][96]. Por esses motivos o maior emprego da liga 6181 na indústria automotiva é na condição T4.

Por ser uma liga endurecida por precipitação, alterações nos precipitados podem comprometer as propriedades mecânicas da solda. Portanto o ciclo térmico durante o processo de soldagem será fator determinante nas propriedades finais da solda [64][65]. A Tabela 1 apresenta a composição média para a liga 6181-T4 [98].

Tabela 1. Composição média da liga de alumínio 6181 [98].

Composição da liga 6181-T4 [% em peso]									
Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti	Al
0,85	0,25	0,06	0,09	0,74	0,013	0,0026	0,012	0,023	balanço

Na Figura 9 estão mostradas micrografias das direções longitudinal e transversal à direção de laminação de uma liga 6181-T4 [98]. Note que na direção longitudinal os grãos são ligeiramente mais alongados em comparação com a direção transversal.

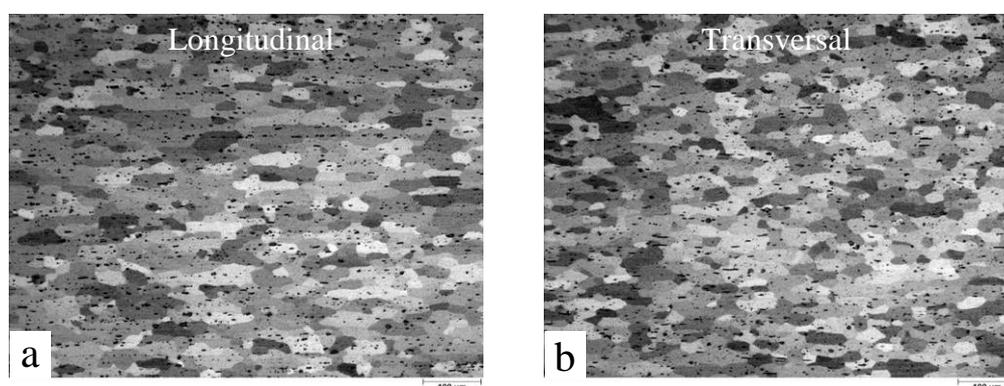


Figura 9. Micrografias da liga AA6181-T4 na condição laminada: (a) direção longitudinal à de laminação e (b) direção transversal à de laminação.

Como já mencionado anteriormente, chapas laminadas da liga 6181 na condição T4 apresentam excelente ductilidade, conferindo boa conformabilidade à liga. A pequena variação da microestrutura nas direções longitudinal e transversal se traduz também em desprezível anisotropia da resistência mecânica. A Figura 10 mostra curvas tensão x deformação medidas para a liga 6181-T4 nas direções longitudinal e transversal à direção de laminação [98].

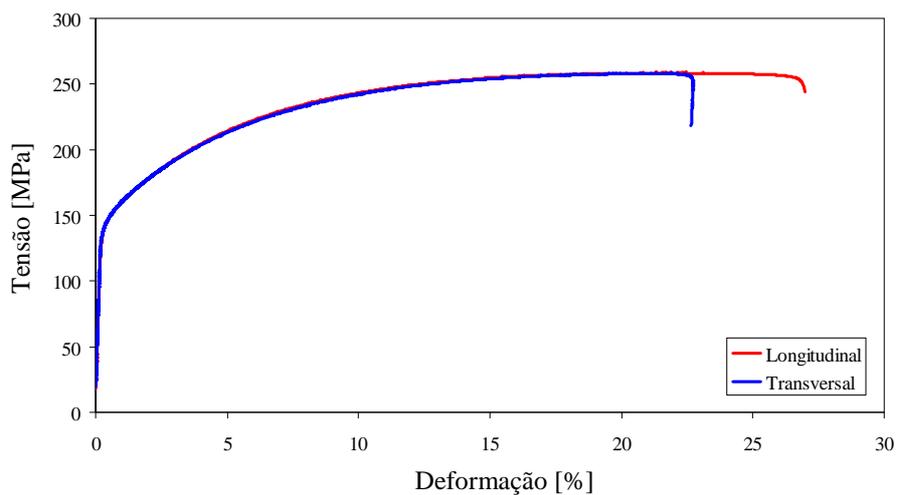


Figura 10. Curva de ensaio mecânico de tração medida nas direções longitudinal e transversal em relação à direção de laminação.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste trabalho, chapas laminadas da liga de alumínio 6181 na condição T4 com 1,7 mm de espessura foram soldadas na forma de juntas sobrepostas com o processo de Soldagem a Ponto por Fricção (FSpW). Este trabalho consiste na continuidade de um trabalho anterior realizado no grupo de soldagem no estado sólido que evidenciou o efeito benéfico de profundidades rasas de penetração na resistência mecânica das soldas FSpW da liga AA6181-T4 [76]. Deste modo, neste trabalho aqui apresentado, foi estudada uma matriz de parâmetros mais ampla em termos de tempo de soldagem e velocidade de rotação para a profundidade de penetração otimizada naquele trabalho inicial. Para atingir o objetivo principal deste trabalho que é a otimização do processo FSpW para a liga AA6181-T4, adotou-se o fluxograma de atividades mostrado na Figura 11.

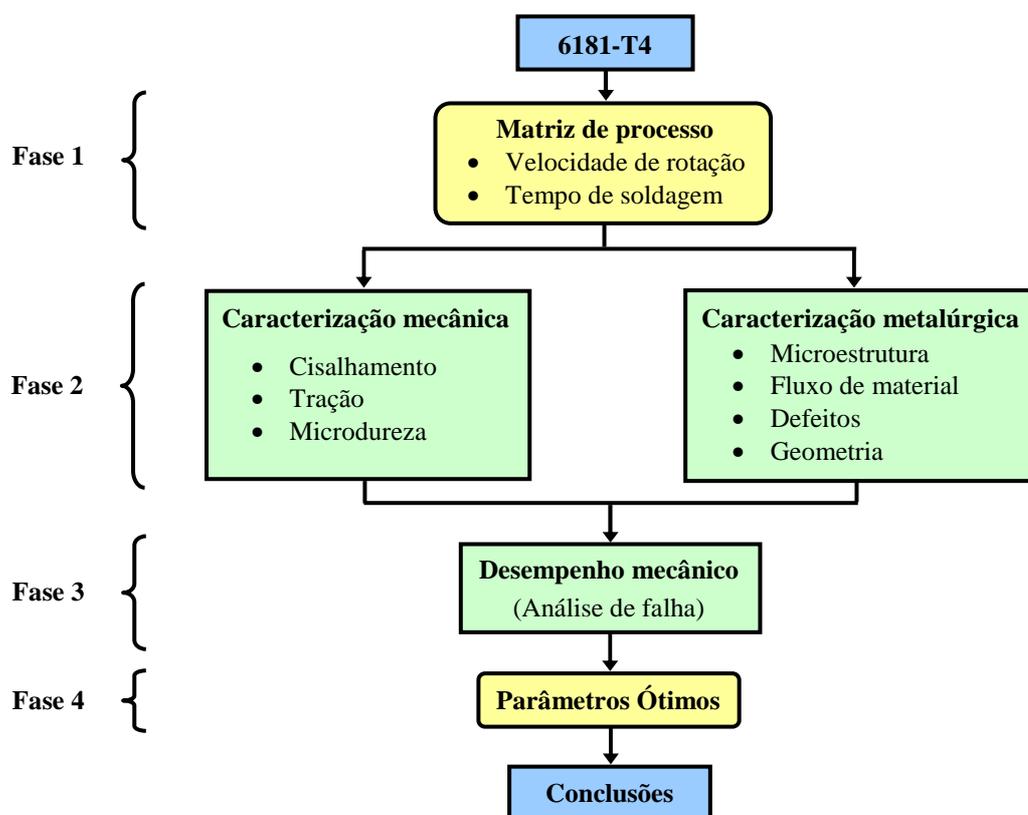


Figura 11. Fluxograma mostrando as atividades desenvolvidas nas quatro fases deste trabalho.

Na fase 1 foi desenvolvida uma matriz de parâmetros de soldagem tendo como variáveis de processo a velocidade de rotação da ferramenta e o tempo de soldagem. Estas duas variáveis foram investigadas numa faixa relativamente ampla através de três valores que foram determinados a partir de experiência prévia do grupo de soldagem no estado sólido.

Como já mencionado anteriormente, este trabalho é uma continuação de uma pesquisa já iniciada pelo grupo de soldagem no estado sólido no Centro de Pesquisas GKSS na Alemanha. O primeiro trabalho mostrou que a resistência mecânica de soldas FSpW da liga AA6181-T4 sob solicitação estática aumentava para profundidades de penetração mais rasas [76]. Tal estudo realizado com profundidades de 1,9 mm, 2,2 mm e 2,5 mm mostrou que a resistência mecânica tanto sob solicitação de cisalhamento como de tração era otimizada para a penetração de 1,9 mm.

Deste modo neste trabalho aqui apresentado foi feito o estudo do efeito de uma profundidade ainda menor, de 1,75 mm. Foi construída uma matriz de parâmetros de processo composta de 15 condições de soldagem diferentes para avaliação da resistência mecânica sob condição de cisalhamento, como mostrado na Tabela 2. Note que as 15 condições de soldagem são numeradas a partir do número 31, que é a numeração utilizada dentro do grupo de soldagem no estado sólido. Esta mesma nomenclatura será adotada neste trabalho.

Tabela 2. Matriz de parâmetros de soldagem para ensaios de cisalhamento.

Tempo de soldagem [s]		2			2.2			2.6			3			3.4		
Velocidade de rotação [x1000 rpm]		2.9	2.4	1.9	2.9	2.4	1.9	2.9	2.4	1.9	2.9	2.4	1.9	2.9	2.4	1.9
Penetração* [mm]	1.75	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	44	45	46

\* Nota: tomando a superfície da chapa superior como referência.

Para a avaliação da resistência mecânica sob solicitação de tração foram excluídas as três últimas condições de soldagem (tempo de 3,4 s) da matriz construída para a solicitação de cisalhamento. A Tabela 3 mostra as 12 condições de soldagem investigadas sob solicitação de tração.

Tabela 3. Matriz de parâmetros de soldagem para ensaios de tração.

Tempo de soldagem [s]		2			2.2			2.6			3		
Velocidade de rotação [x1000 rpm]		2.9	2.4	1.9	2.9	2.4	1.9	2.9	2.4	1.9	2.9	2.4	1.9
Penetração* [mm]	1.75	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42

\* Nota: tomando a superfície da chapa superior como referência.

As soldas foram produzidas com uma máquina especialmente desenvolvida para este processo numa parceria entre o Centro de Pesquisas GKSS GmbH e a empresa Riftec GmbH, na Alemanha. A máquina consiste de um protótipo inicialmente desenvolvido para estudos de juntas produzidas por este processo de soldagem. Após os estudos iniciais que mostraram a viabilidade do processo, foi desenvolvida uma versão comercial da máquina. A Figura 12 mostra uma foto da versão protótipo utilizada na produção das soldas estudadas neste trabalho. Também está mostrado um desenho esquemático da ferramenta de soldagem onde é possível ver detalhes de sua geometria. Note que a camisa é constituída de rosca invertida, que tem a finalidade de intensificar o fluxo de material, melhorando as propriedades da solda. Destaca-se, também, que o pino contém sulcos radiais cuja finalidade é facilitar o deslizamento entre o pino e a camisa.

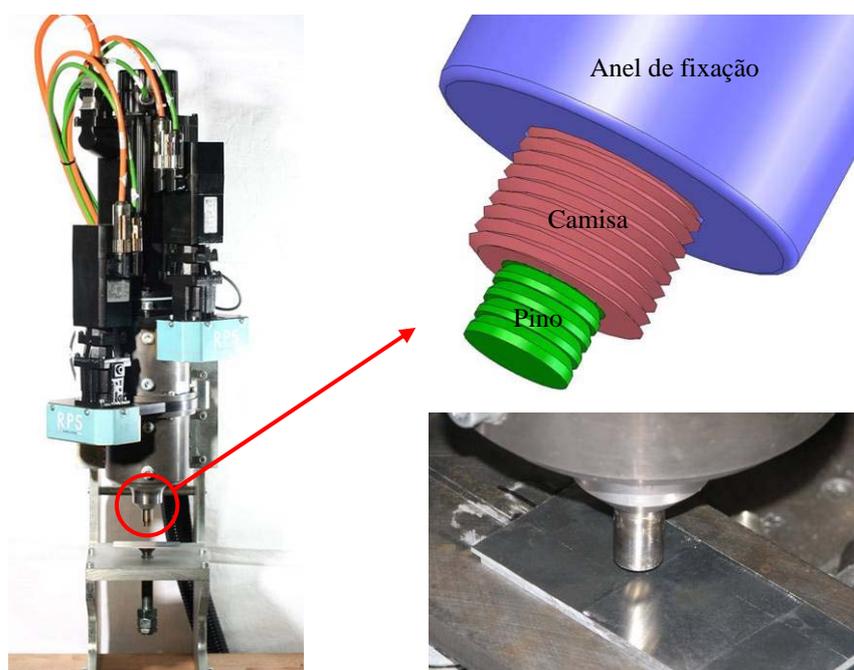


Figura 12. Protótipo de máquina de soldagem FSpW e ferramenta utilizada na produção das soldas estudadas neste trabalho.

Detalhes das partes constituintes da ferramenta de soldagem, bem como as dimensões são mostradas no anexo A.3.

Ainda na primeira fase deste trabalho, com cada uma das condições de soldagem, foram produzidas juntas sobrepostas na forma de corpos de prova para ensaios de cisalhamento (shear tensile ou lap shear na língua inglesa) e de tração (cross tensile ou cross tension na língua inglesa) especificados pelas normas DIN EN ISO 14273 [72] e DIN EN ISO 14272 [73], respectivamente. Na Figura 13 estão mostrados, esquematicamente, os corpos de prova para estes dois tipos de ensaios mecânicos, juntamente com as direções de carregamento.

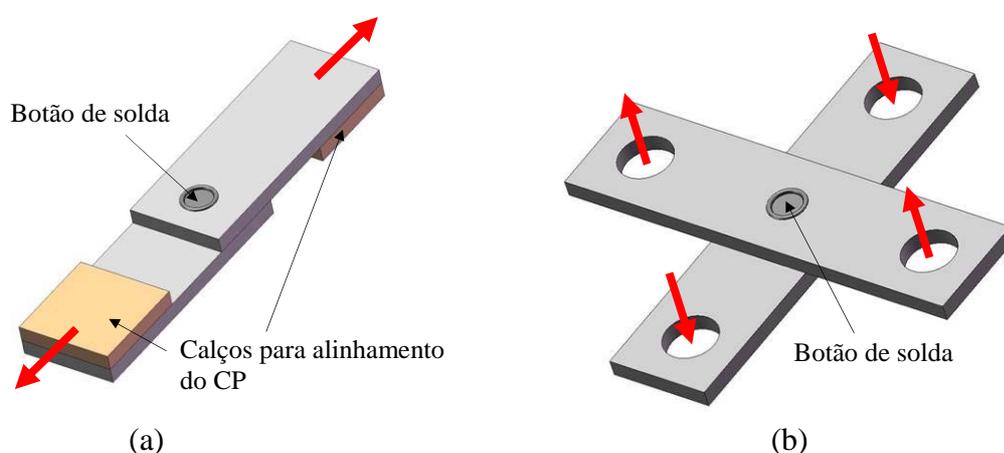


Figura 13. Exemplo esquemático de corpos de prova para ensaios de: (a) cisalhamento e (b) tração.

Quatro juntas sobrepostas foram produzidas com cada uma das condições de soldagem mostradas na Tabela 2, na forma de corpos de prova (CP) para cisalhamento. Destes CPs, um foi separado para caracterização metalográfica enquanto os três restantes foram destinados ao ensaio mecânico de cisalhamento. Com as condições de soldagem mostradas na Tabela 3 foram produzidos três CPs para ensaio de tração. A Figura 14 mostra o esquema das soldas produzidas para estudo neste trabalho.

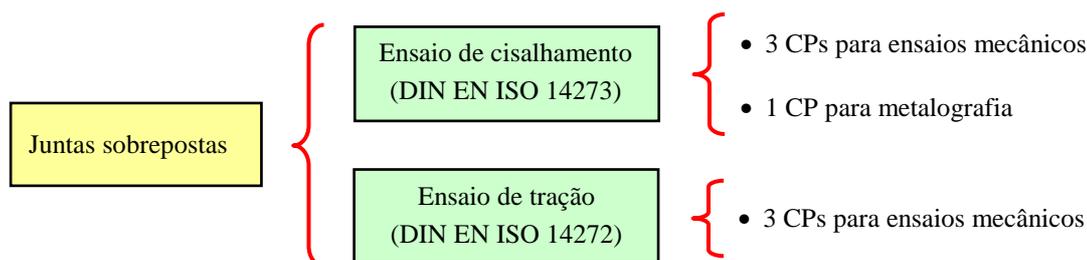


Figura 14. Esquema das soldas produzidas para estudo neste trabalho.

No anexo A.4 estão mostrados desenhos técnicos dos corpos de prova de cisalhamento e tração com suas respectivas dimensões.

Na fase 2 deste trabalho procedeu-se com a caracterização mecânica e metalúrgica das juntas soldadas. Para a realização dos ensaios mecânicos foi utilizada uma máquina Schenck-Trebel RM100 com capacidade de 100 kN e acionamento mecânico por fuso. A Figura 15 mostra a máquina de ensaio utilizada, juntamente com detalhes dos corpos de prova devidamente fixados para os ensaios de cisalhamento e tração. Ambos os testes foram realizados com uma velocidade de ensaio de 2 mm/min.



Figura 15. Máquina de tração Schenck-Trebel RM100 utilizada para a avaliação da resistência mecânica das juntas soldadas sob solicitação de cisalhamento e de tração.

As amostras separadas para análise metalográfica foram seccionadas ao centro do botão de solda e preparadas segundo procedimento padrão de embutimento, lixamento e polimento. Posteriormente as amostras foram atacadas com processo eletrolítico utilizando solução Kroll (96ml H<sub>2</sub>O, 6ml HNO<sub>3</sub> e 2ml HF) e Barker (1,8% de Ácido Fluobórico em H<sub>2</sub>O) e também com ataque simples por imersão utilizando o reagente Flick (10ml HF, 15ml HCl e 90ml H<sub>2</sub>O). Os ataques com os reagentes Kroll e Flick foram utilizados para análise dos aspectos geométricos da solda enquanto o ataque com o reagente Barker foi utilizado para a revelação de grãos. Os seccionamentos foram feitos utilizando discos diamantados com as máquinas Buehler Isomet Plus e Struers Sectom-10. Os processos de

lixamento e polimento foram feitos com uma máquina automática modelo Buehler Phoenix 4000, mostrada na Figura 16.



Figura 16. Máquina de lixamento e polimento automático modelo Buehler Phoenix 4000 utilizada na preparação metalográfica.

Microscopia óptica foi empregada para avaliação das zonas da solda, presença de defeitos e detalhes geométricos das juntas FSpW. Também foi feita avaliação do tamanho de grão de acordo com a Norma ASTM E 112-96:2000 [62] utilizando o software Olympus a4i MatIA. Para estas análises foi utilizado um microscópio óptico modelo Leica DM IRM, mostrado na Figura 17.



Figura 17. Microscópio óptico Leica DM IRM utilizado nas análises metalográficas.

Para avaliar as modificações na resistência do material decorrente do processo de soldagem, foi feita a medição do perfil de microdureza ao longo das zonas da solda. O perfil foi medido ao longo de uma linha à meia espessura da chapa superior até uma

distância de, aproximadamente, 18 mm para cada lado do centro da solda, com distância entre pontos de 0,5 mm, como mostra a Figura 18a. Para estas medições do perfil foi utilizado um microdurômetro modelo Zwick 3212, com uma carga de 0,5 kg, como mostrado na Figura 18b. Em algumas amostras também foi feito um mapeamento da dureza numa área de 3 x 30 mm centrada no botão de solda, com distância entre pontos de 0,3 mm. O mapeamento foi realizado com um indentador ultrasônico automático modelo BAQ UT 100 mostrado na Figura 18c.

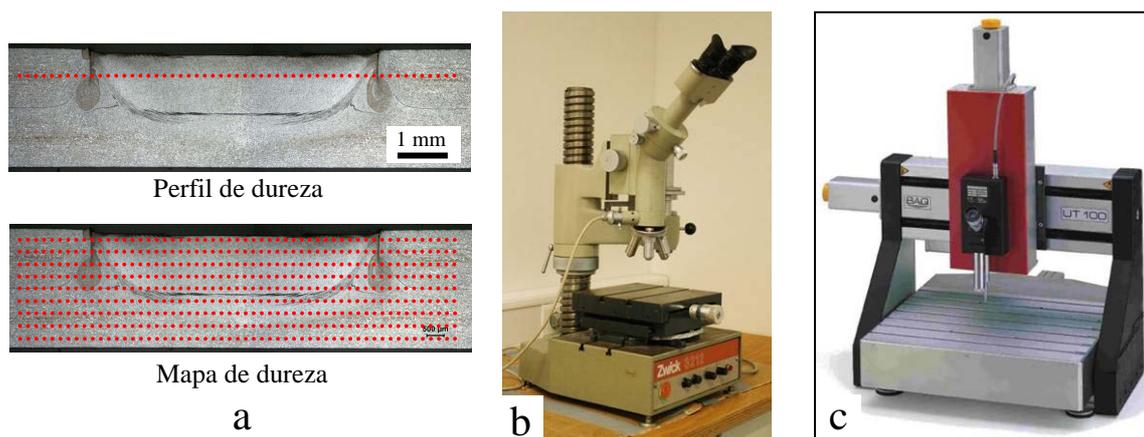


Figura 18. Medição de microdureza: (a) pontos de medição do perfil e do mapeamento, (b) microdurômetro modelo Zwick 3212 (c) indentador ultrasônico automático modelo BAQ UT 100.

Na fase 3 foi feito um estudo do desempenho mecânico das soldas em termos do desenvolvimento da falha nas solicitações de cisalhamento e de tração. Para estas análises foi utilizado o estereoscópio modelo Wild M8 equipado com uma câmera CCD. Após a caracterização das falhas com o estereoscópio, algumas amostras fraturadas foram seccionadas ao longo do centro do botão de solda. Estas amostras foram posteriormente preparadas metalograficamente e atacadas com o reagente Flick para investigação, em microscopia óptica, das trincas oriundas dos mecanismos de fratura.

Nesta fase também foram realizados ensaios de fadiga com a finalidade de avaliar o desempenho mecânico da junta sob solicitação cíclica. Esta análise foi realizada em amostras de uma condição de soldagem complementar, que utiliza parâmetros de processo ligeiramente diferentes dos demais estudados neste trabalho. Tal condição de soldagem faz parte de um estudo inicial desenvolvido pelo grupo de soldagem no estado sólido do Centro de pesquisas GKSS na Alemanha em solda ponto FSpW da liga AA6181-T4 [76]. Os resultados obtidos nestas análises vêm a complementar a caracterização do processo

FSpW desta liga, principalmente quando à nucleação de propagação de trincas. Os ensaios foram realizados de acordo com as especificações da Norma DIN EN ISO 14324:2003 [74] e foi utilizada uma máquina servo-hidráulica modelo Schenck Trebel RM 50 como mostrado na Figura 19. Os ensaios foram realizados com uma relação de carregamento R constante de 0,2 com o objetivo de preservar a superfície de fratura das amostras.



Figura 19. Máquina servo-hidráulica Schenck Trebel RM 50 utilizada nos testes de fadiga.

A fase 4 constituiu o encerramento deste trabalho, onde se buscou definir os parâmetros de processo que apresentaram melhor desempenho mecânico para soldas FSpW da liga AA6181-T4. Os resultados obtidos foram confrontados entre si com o objetivo de determinar a relação existente entre os parâmetros de processo e o desenvolvimento da fratura sob solitação de cisalhamento e tração.

## 4 RESULTADOS

A Figura 20 mostra uma junta sobreposta soldada pelo processo FSpW onde é possível visualizar o botão de solda e é destacado o bom acabamento superficial da junta.

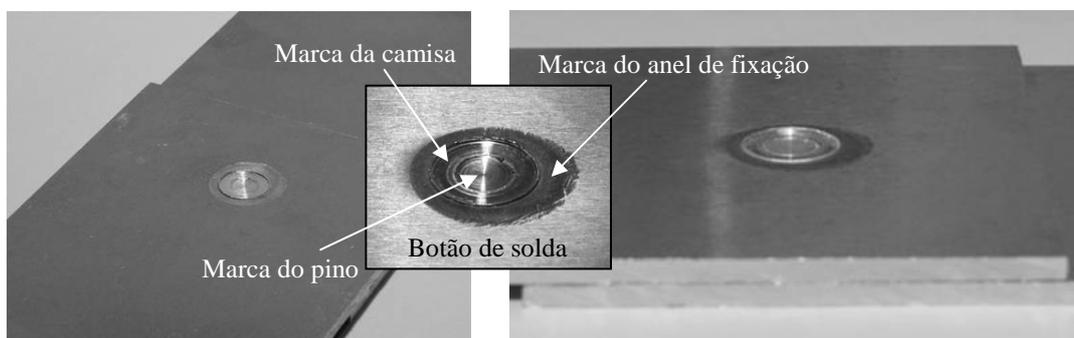


Figura 20. Junta sobreposta de solda ponto FSpW após a soldagem mostrando detalhes do botão de solda e o bom acabamento superficial da junta.

A caracterização das juntas foi efetuada por meio de análises metalográficas da secção transversal do botão de solda, ensaios de dureza, resistência mecânica sob sollicitação de cisalhamento e tração, e análise dos mecanismos de falha sob sollicitações monotônicas. O desempenho em fadiga também foi investigado para uma condição de soldagem complementar.

### 4.1 Análise metalográfica

Com microscopia óptica foram feitas análises da microestrutura das juntas soldadas com cada uma das condições de soldagem, com o objetivo de caracterizar as zonas da solda e o tamanho de grão em cada zona. Através de macrografias foram investigadas a presença de defeitos de soldagem e as características geométricas decorrentes do fluxo de material durante o processo.

#### 4.1.1 Microestrutura

A Figura 21a mostra a macrografia da secção transversal de uma junta FSpW da liga AA6181-T4 soldada com os parâmetros da condição de soldagem 42 (1900 rpm com 3 s de processamento), ver Tabela 2 e Tabela 3. Na macrografia é possível fazer a distinção de duas zonas: uma ao centro de granulometria mais refinada denominada de Zona de Mistura (ZM) e outra mais delgada circundando a primeira, com grãos maiores e alongados denominada de Zona Termo-mecanicamente Afetada (ZTMA). Destacados na macrografia da Figura 21 estão as representações aproximadas dos locais de onde foram obtidas imagens mostrando detalhes da microestrutura. As micrografias em detalhe na Figura 21 foram atacadas com reagente Barker e visualizadas com luz polarizada.

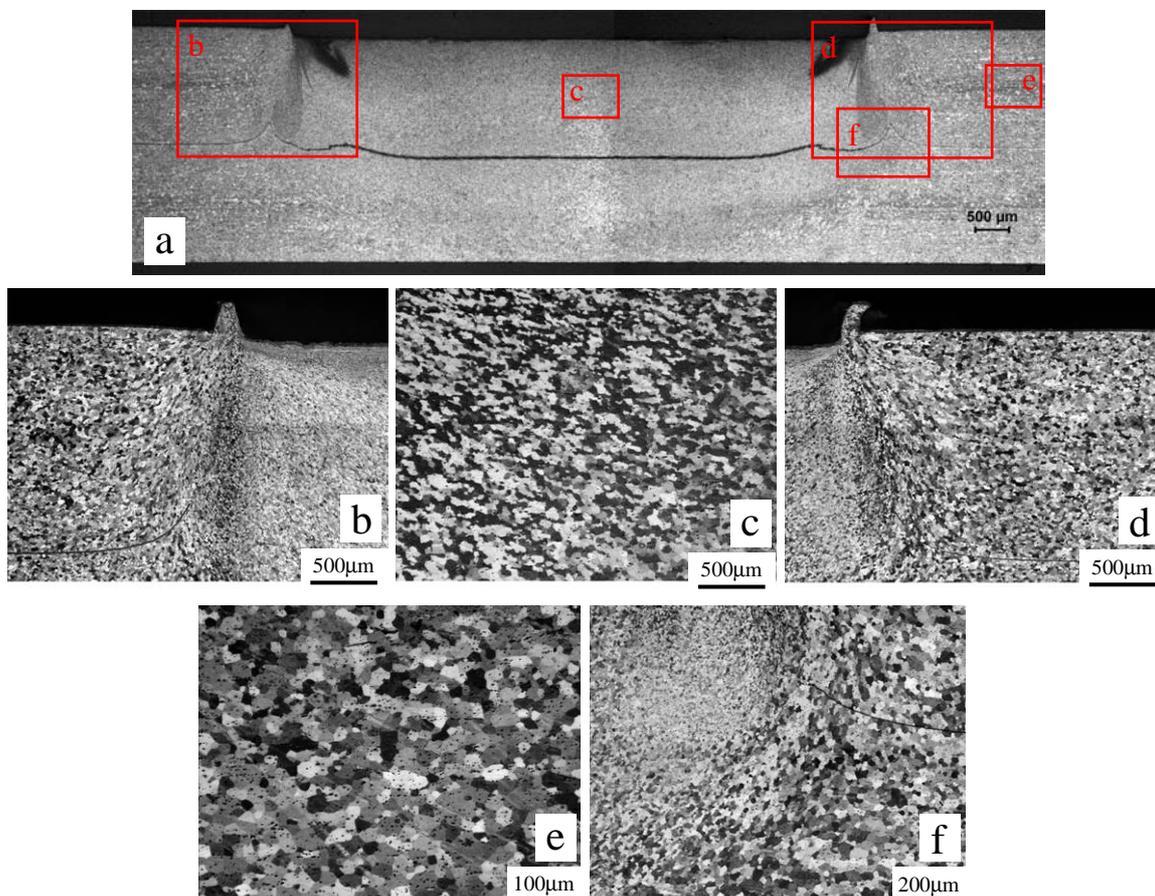


Figura 21. Microestrutura de solda ponto FSpW da liga AA6181-T4 mostrando detalhes da microestrutura em diferentes pontos da junta soldada. Solda produzida com a condição de soldagem 42 (1900 rpm com 3 s de processamento).

Nas Figura 21b e Figura 21d estão mostradas imagens dos extremos esquerdo e direito do botão de solda respectivamente, onde se vê a interface entre a ZM e a ZTMA. A

Figura 21c mostra a microestrutura no centro da ZM onde pode-se ver que os grãos se encontram bastante refinados. Na Figura 21e está mostrada a microestrutura numa região mais afastada do botão de solda, que se assemelha bastante aquela do material base, com grãos ligeiramente alongados horizontalmente como resultado do processo de laminação. O detalhe da Figura 21f mostra a região de interface entre as chapas superior e inferior num ponto extremo do botão de solda.

#### 4.1.2 Tamanho de grão:

Como foi mostrado na Figura 21 a microestrutura do material é modificada por este processo de soldagem o que resulta em granulometria variável nas diferentes zonas da solda. No intuito de se obter uma informação quantitativa da diferença de tamanho de grão (TG) entre as zonas da solda foi feita a medição do TG nos pontos destacados na macrografia da Figura 22. Para a medição do TG foram utilizadas as especificações da norma ASTM E 112-96:2000 [62].

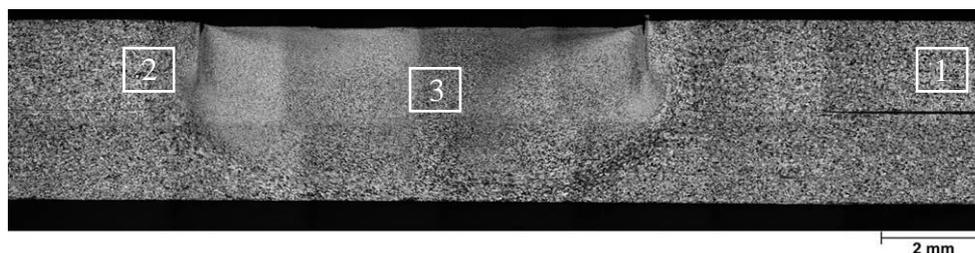


Figura 22. Macrografia da secção transversal de solda ponto FSpW da liga AA6181-T4 mostrando as regiões onde foi feita medição de TG. Solda produzida com a condição de soldagem 39 (1900 rpm / 2,6 s).

A medição do TG foi realizada com auxílio do software Olympus a4i MatIA o qual traça linhas horizontais e, se necessário (dependendo da anisotropia de forma dos grãos) também verticais, em uma fotomicrografia da região a ser avaliada. Por meio da contagem da quantidade de contornos de grão em cada uma das linhas traçadas pelo software é feito um levantamento estatístico de indicadores como: o comprimento médio dos grãos, diâmetro médio, área superficial média estimada de cada grão, densidade de grãos, nível de anisotropia e tamanho ASTM. O software fornece um gráfico de barras contendo a faixa de TG na área avaliada juntamente com a quantidade relativa dos grãos compreendidos em frações desta faixa.

A Figura 23 mostra os resultados medidos em um ponto afastado do botão de solda, região 1 da macrografia mostrada na Figura 22.

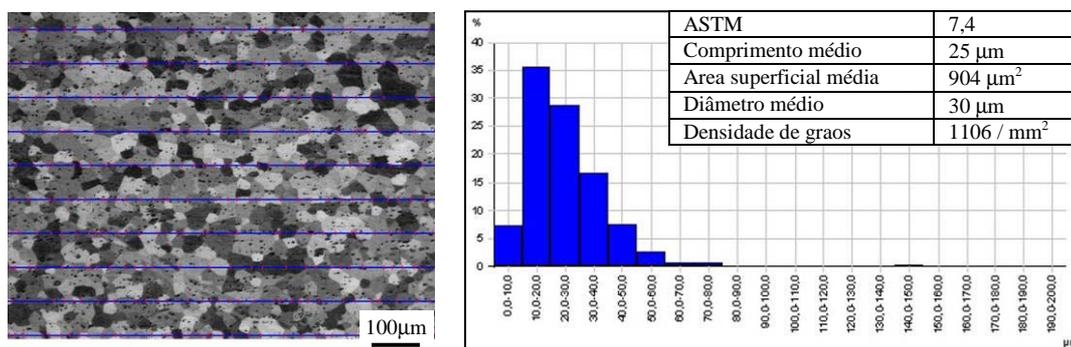


Figura 23. Tamanho de grão medido em região afastada do botão de solda, com microestrutura equivalente a do material base. Solda produzida com a condição de soldagem 39 (1900 rpm / 2,6 s).

No gráfico de barras da Figura 23 pode-se ver que a maior parte dos grãos presentes na micrografia analisada apresenta comprimento numa faixa de 10 µm a 40 µm, sendo 36% dos grãos medindo 10-20 µm, 28% medindo 20-30 µm e 17% medindo 30-40 µm. Os 19% restantes dos grãos estão distribuídos entre grãos maiores e menores que esta faixa de 10 µm a 40 µm. Em média esta região apresenta um TG de 25 µm.

A Figura 24 mostra os resultados da medição de TG na ZTMA, região 2 da macrografia mostrada na Figura 22.

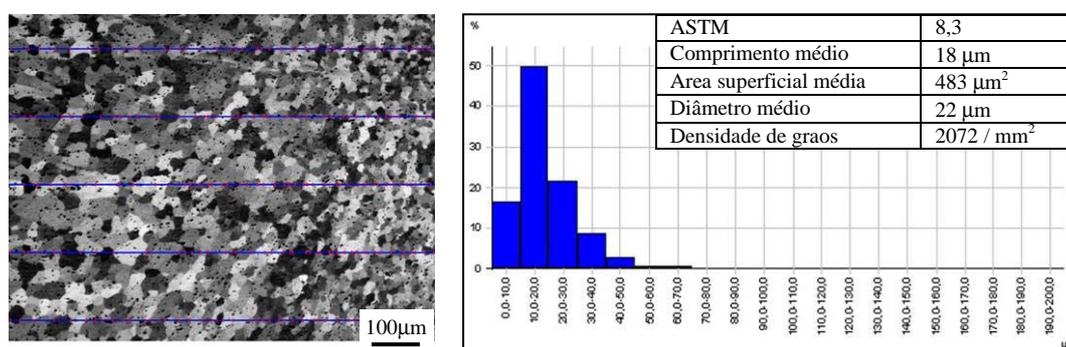


Figura 24. Tamanho de grão na Zona Termo-Mecanicamente Afetada. Solda produzida com a condição de soldagem 39 (1900 rpm / 2,6 s).

Nesta região a maior parte dos grãos apresenta comprimento na faixa de 0 a 30  $\mu\text{m}$ , sendo 17% medindo 0-10  $\mu\text{m}$ , 50% medindo 10-20  $\mu\text{m}$  e 21% medindo 20-30  $\mu\text{m}$ . O TG médio nesta região é 18  $\mu\text{m}$ .

Na Figura 25 estão mostrados os resultados da medição de TG na ZM, região 3 da macrografia mostrada na Figura 22.

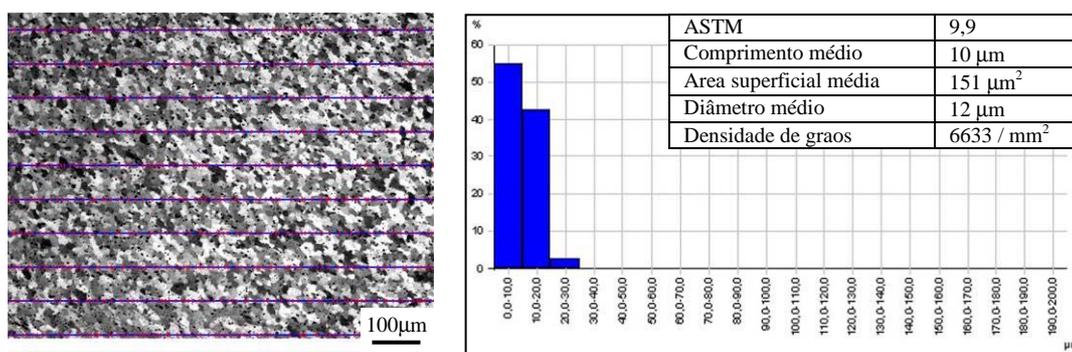


Figura 25. Tamanho de grão medido na Zona de Mistura. Solda produzida com a condição de soldagem 39 (1900 rpm / 2,6 s).

Na ZM a microestrutura é bastante refinada, os grãos praticamente em sua totalidade situam-se na faixa de 0 a 20  $\mu\text{m}$ , sendo 55% medindo 0-10  $\mu\text{m}$  e 42% medindo 10-20  $\mu\text{m}$ . Os 3% restantes dos grãos medem 20-30  $\mu\text{m}$ . Nesta região o TG médio mede 10  $\mu\text{m}$ .

As medições de TG nas soldas FSpW da liga AA6181-T4 mostraram que algumas soldas apresentaram variações significativas de TG dentro da ZM. A Figura 26 mostra a macrografia da secção transversal de uma solda FSpW desta liga produzida com a condição de soldagem 44 (2900 rpm / 3,4 s) em que foi observada variações de TG dentro da ZM. Na macrografia estão destacados os pontos onde foi feita medição do TG.

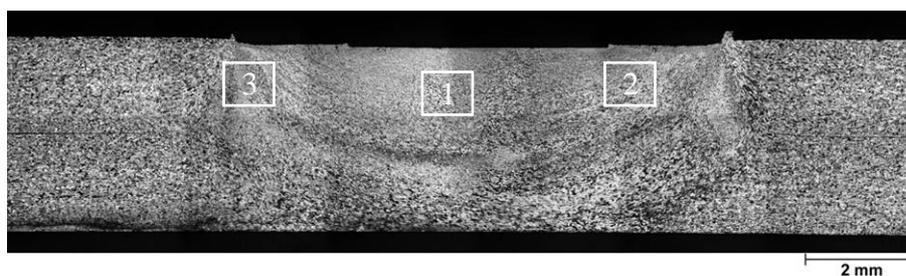


Figura 26. Macrografia da secção transversal de solda ponto FSpW da liga AA6181-T4 mostrando os locais onde foram feitas medições de TG. Solda produzida com a condição de soldagem 44 (2900 rpm / 3,4 s).

A Figura 27 mostra os resultados da medição de TG no centro da ZM, região 1 da macrografia mostrada na Figura 26.

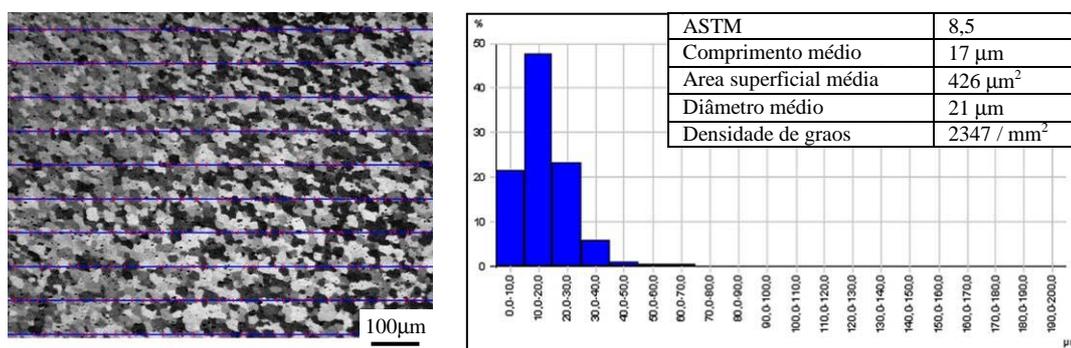


Figura 27. Tamanho de grão medido no centro da Zona de Mistura. Solda produzida com a condição de soldagem 44 (2900 rpm / 3,4 s).

Os resultados mostram que na região central da ZM a maior parte dos grãos situa-se na faixa de 0 a 30 µm, sendo 21% medindo 0-10 µm, 48% medindo 10-20 µm e 23% medindo 20-30 µm. O TG médio é 17 µm.

A Figura 28 mostra os resultados de TG medido na parte direita da ZM, região 2 da macrografia mostrada na Figura 26.

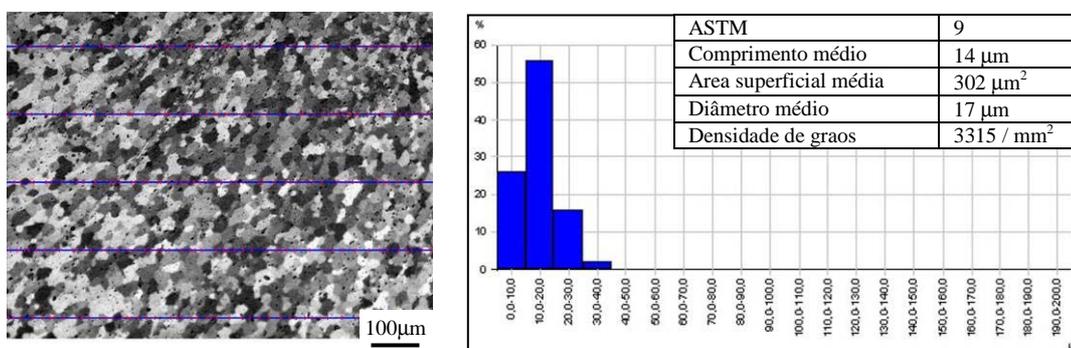


Figura 28. Tamanho de grão medido na parte direita da Zona de Mistura. Solda produzida com a condição de soldagem 44 (2900 rpm / 3,4 s).

Os resultados mostram que na parte direita da ZM a maior parte dos grãos apresenta tamanho na faixa de 0 a 30 µm, semelhantemente a região central da ZM. Porém com grãos menores em maior proporção sendo 26% medindo 0-10 µm, 56% medindo 10-20 µm e apenas 16% medindo 20-30 µm. O TG médio é 14 µm.

A Figura 29 mostra os resultados da medição de TG na parte esquerda da ZM, região 3 da macrografia mostrada na Figura 26.

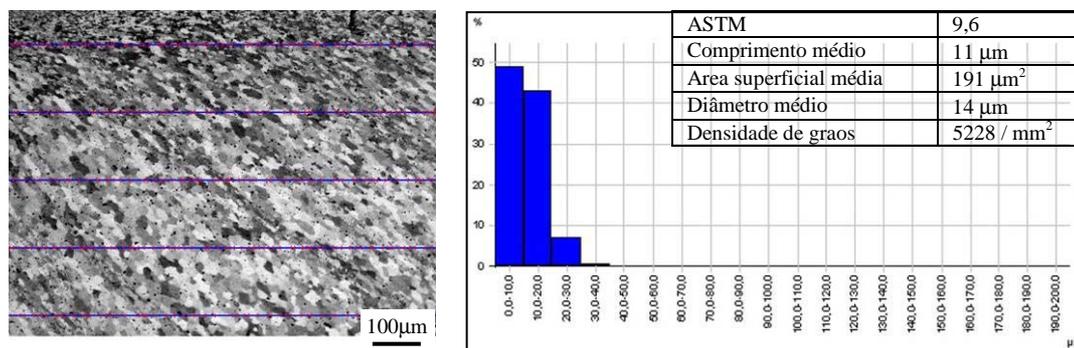


Figura 29. Tamanho de grão medido na parte esquerda da Zona de Mistura. Solda produzida com a condição de soldagem 44 (2900 rpm / 3,4 s).

É visível na micrografia mostrada na Figura 29 variações de TG inclusive dentro da área analisada nesta medição. A maior parte dos grãos está compreendida na faixa de 0 a 20 µm, sendo 48% medindo 0-10 µm e 43% medindo 10-20 µm. O TG médio é 11 µm.

Um resultado importante com respeito à metalurgia do botão de solda foi obtido nas análises metalográficas com o reagente Barker. Este reagente, usado para a revelação de grãos, contribuiu para o esclarecimento das manchas escuras observadas nas micrografias feitas com os reagentes Kroll e Flick. A Figura 30 mostra uma macrografia da secção transversal de solda atacada com o reagente Kroll. Inicialmente acreditava-se que estas manchas estavam associadas com a camada de óxido, presente nas superfícies das chapas, que foram misturadas junto ao material dentro da ZM durante a soldagem. Por meio do ataque com o reagente Barker ficou evidente que estas manchas se devem, na verdade, ao refino da microestrutura em regiões na forma de “bandas” dentro da ZM. Estas bandas de granulometria mais refinada são responsáveis pelas variações de tamanho de grão dentro da ZM como foi apresentado nos resultados da caracterização metalúrgica no capítulo 4.1.2.

Este fenômeno está associado com a velocidade de rotação, sendo que é praticamente inexistente nas soldas produzidas com 1900 rpm e torna-se bastante intenso para rotações de 2900 rpm. Não há uma explicação definitiva para sua ocorrência mas acredita-se que esteja relacionada à condição de aderência entre o material e a camisa da ferramenta durante a fase final do processo de soldagem. Como a camisa desloca-se para

cima (retornando à superfície da chapa superior) na fase final do processo, a força de contato entre a camisa da ferramenta e o material se torna pequena e pode ocorrer o que se chama de escorregamento, como também apresentado nos trabalhos de North et. al. [34][35][36][37][38][40]. Deste modo o material não acompanha o movimento rotatório da ferramenta que gira muito rapidamente. Acredita-se que este efeito ocorra de maneira alternada com um momento de adesão completa entre camisa e material, como no modelo proposto por North [34], resultando na aparência em forma de bandas. Em consequência disso haveriam regiões (ou bandas) com maior grau de deformação plástica e, conseqüentemente, de recristalização mais intensa resultando em TG menor.

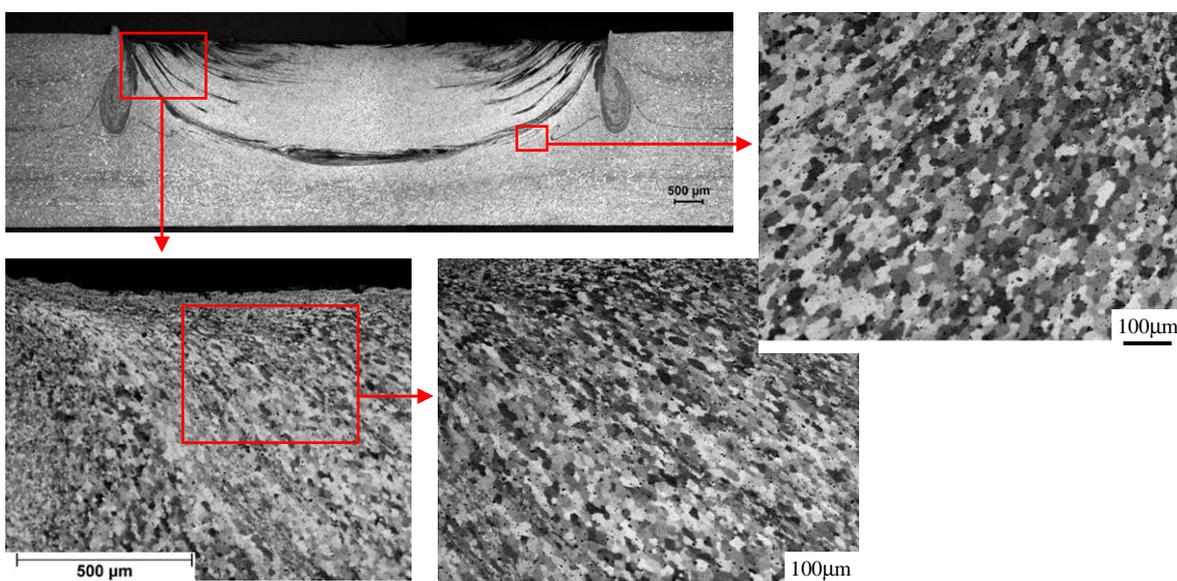


Figura 30. Manchas escuras na macrografia da amostra são decorrentes do refino de grão dentro da Zona de Mistura.

#### 4.1.3 Defeitos de soldagem

Defeitos de soldagem foram observados em algumas soldas produzidas com a liga AA6181-T4. Foram considerados como defeitos aqueles aspectos geométricos que não são inerentes ao processo, ou seja, que se mostraram inexistentes para certas combinações de parâmetros de soldagem. A Figura 31 mostra os dois tipos de defeitos encontrados para esta liga que foram denominados de falta de preenchimento e falta de mistura. A falta de preenchimento é caracterizada pelo preenchimento incompleto da cavidade criada pela penetração da camisa (estágio 2 do processo) quando o pino retorna à superfície da junta durante o estágio 3 do processo de soldagem. A falta de mistura está associada a uma interface bem definida ao longo do caminho percorrido pela camisa durante a penetração.

Uma mistura adequada de material no estágio 3 do processo elimina esta interface deixando a solda com um aspecto homogêneo.



Figura 31. Defeitos encontrados em algumas soldas: (a) condição 32 (2400 rpm / 2 s), (b) condição 38 (2400 rpm / 2,6 s) e (c) condição 35 (2900 rpm / 2,2 s).

Os defeitos mostraram boa correlação com os parâmetros de soldagem, ocorrendo apenas em soldas produzidas com tempos curtos de soldagem, tornando-se mais notórios ainda em soldas acompanhadas de alta velocidade de rotação.

#### 4.1.4 Detalhes geométricos da junta

Alguns elementos geométricos observados nas soldas FSpW da liga AA6181-T4 se mostraram inerentes ao processo de soldagem uma vez que estiveram presentes em todas as juntas produzidas. A Figura 32 mostra uma macrografia da secção transversal de uma junta produzida com a condição de soldagem 38 (2400 rpm / 2,6 s) onde são mostrados os três elementos geométricos típicos das soldas desta liga. Os termos utilizados para a identificação de tais elementos foram baseados do efeito de cada um sobre a resistência da junta e no seu aspecto geométrico.

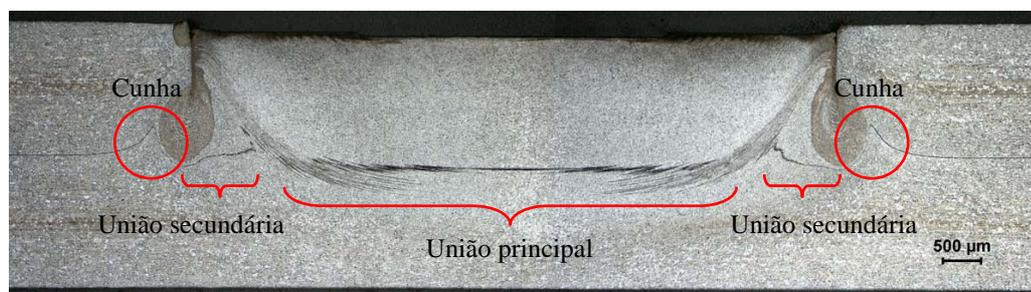


Figura 32. Macrografia da secção transversal de uma solda FSpW da liga AA6181-T4 mostrando detalhes geométricos característicos do processo. Solda produzida com a condição de soldagem 38 (2400 rpm / 2,6 s).

A Cunha é decorrente da plastificação da chapa inferior e é caracterizada por uma geometria pontiaguda (em forma de cunha) sempre com o cume apontando para cima. A União Secundária (US) caracteriza o início da formação da união entre as chapas superior e inferior; é uma região de transição entre a ausência de união e a junta propriamente dita. A União Principal (UP) caracteriza a união entre as chapas superior e inferior. A Figura 33 mostra essas três formações geométricas em detalhe.

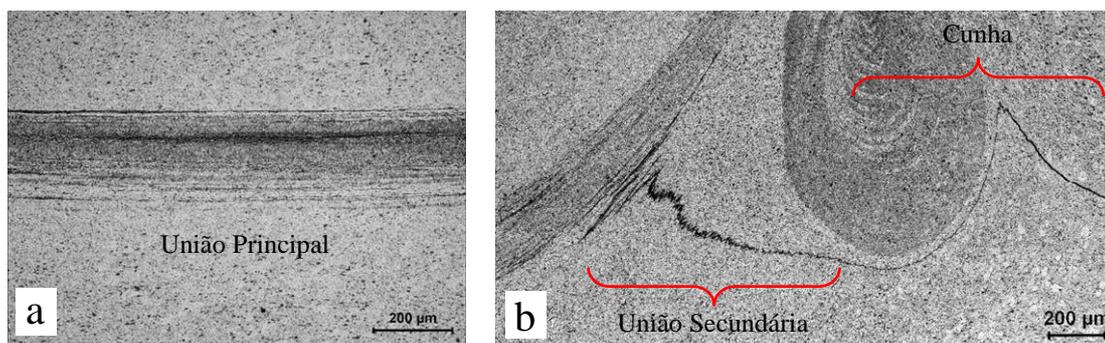


Figura 33. Micrografias mostrando detalhes das formações geométricas da solda FSpW na liga AA6181-T4: (a) União Principal e (b) Cunha e União Secundária. Solda produzida com a condição de soldagem 38 (2400 rpm / 2,6 s).

#### 4.2 Microdureza

Medições de microdureza foram realizadas à meia altura da chapa superior com o objetivo obter o perfil de dureza ao longo do botão de solda. Desta forma foi feita a avaliação das modificações da resistência do material decorrentes do processo de soldagem. Foi utilizado um indentador Vickers com espaçamento entre indentações de 0,5 mm e uma carga de 0,5 kg.

O material base da liga 6181 estudada neste trabalho possui uma dureza em torno de 80 HV<sub>0,5</sub> que é conferida pela condição de tratamento T4 que consiste de solubilização da microestrutura e posterior envelhecimento natural.

Na Figura 34 está mostrado o perfil de dureza de uma junta soldada com a condição de soldagem 40 (2900 rpm / 3 s). Uma macrografia da secção transversal do botão de solda também é mostrada no intuito de facilitar a visualização da localização relativa do perfil de dureza.

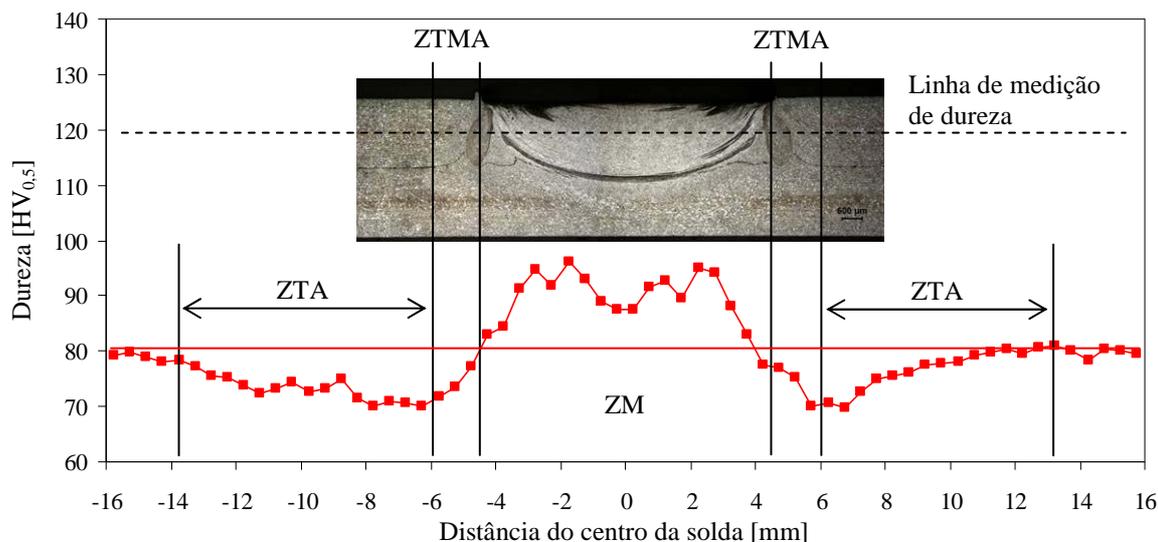


Figura 34. Perfil de dureza de uma junta FSpW da liga AA6181-T4 soldada com a condição de soldagem 40 (2900 rpm / 3 s).

O perfil de dureza deixou evidente a existência de uma Zona Termicamente Afetada (ZTA) caracterizando uma terceira zona de solda. Essa análise mostrou também que o processo de soldagem exerce influência sobre a microestrutura até uma distância de aproximadamente 14 mm em relação ao centro do botão de solda. O perfil de dureza de todas as soldas produzidas com esta liga se mostrou semelhante ao apresentado na Figura 34 (ver anexo A.1). Apenas pequenas variações foram observadas na dureza máxima atingida e na largura entre os pontos mínimos de dureza. A Figura 35 mostra o efeito da velocidade de rotação da ferramenta na dureza máxima atingida na ZM para soldas realizadas empregando o mesmo tempo de soldagem de 2 s. É importante destacar que este efeito só se tornou evidente para soldas realizadas com tempos curtos de soldagem como 2 e 2,2 s.

A Figura 36 mostra o efeito do tempo de soldagem na distância entre os pontos onde a dureza é mínima, ou seja, no tamanho da área endurecida para soldas produzidas com velocidade de rotação de 2400 rpm. Esta tendência de comportamento foi observada pra as três velocidades de rotação utilizadas. É possível observar que o tempo de soldagem também exerce um certo efeito sobre a média de dureza dentro da ZM.

Os perfis de dureza de todas as soldas produzidas estão no anexo A.1.

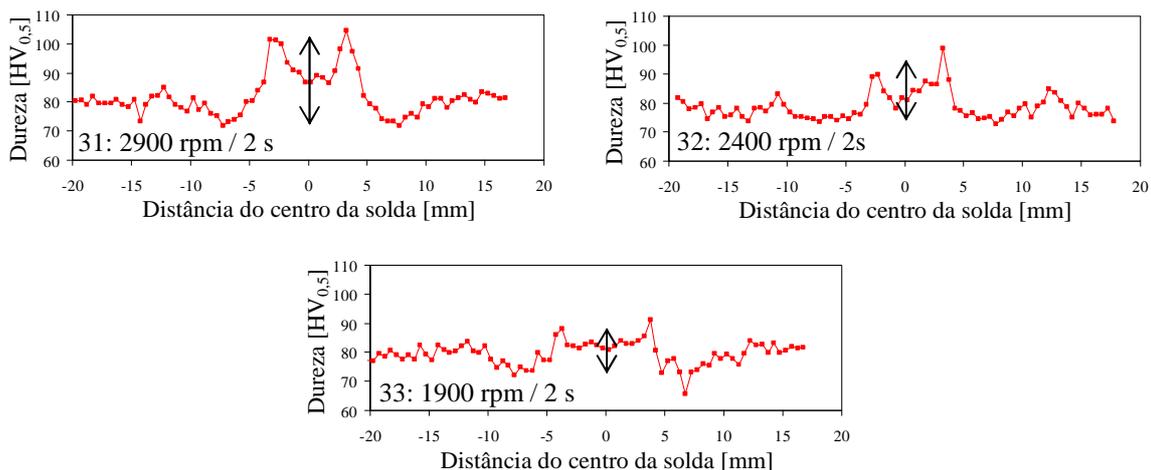


Figura 35. Efeito da velocidade de rotação na dureza máxima atingida no botão de solda.

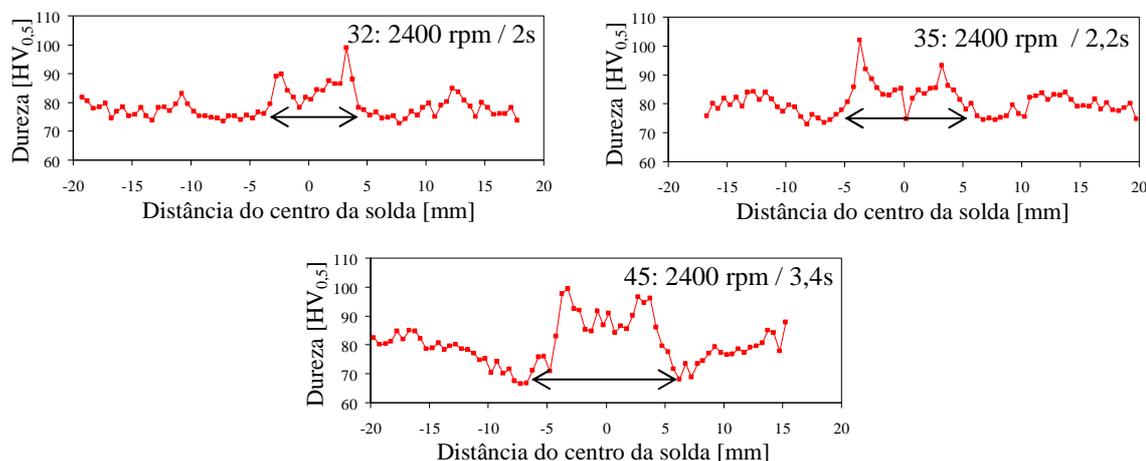


Figura 36. Efeito do tempo de soldagem no tamanho da região endurecida.

#### 4.3 Resistência mecânica

A resistência mecânica das juntas soldadas foi avaliada sob solicitação de cisalhamento e de tração conforme as recomendações das normas DIN EN ISO 14273 [72] e DIN EN ISO 14272 [73], respectivamente. Foram testados três corpos de prova para cada condição de soldagem com o objetivo de avaliar também a reprodutibilidade de cada uma. É importante destacar que o ensaio de tração não traz informações práticas em termos de projeto já que soldas ponto não são usualmente projetadas com a finalidade de suportar solicitações deste tipo, mas sim, de cisalhamento. Este ensaio, contudo, é comumente empregado por permitir avaliar o desempenho de uma junta soldada sob uma condição mais severa de carregamento.

A Figura 37 mostra os resultados da resistência mecânica sob solicitação de cisalhamento para as 15 condições de soldagem em estudo. Os pontos no gráfico correspondem ao ensaio de resultado intermediário e as barras correspondem aos valores máximo e mínimo medidos no ensaio para a respectiva condição de soldagem. Pode-se ver que algumas condições mostraram alta resistência mecânica juntamente com boa reprodutibilidade, ou seja, pouca dispersão. Por outro lado algumas condições mostraram alta resistência com alta dispersão e outras mostraram ainda baixa resistência e alta dispersão. Considerando todos os resultados, a resistência mecânica média sob cisalhamento foi de 5,85 kN e com desvio padrão médio de 0,53 kN.

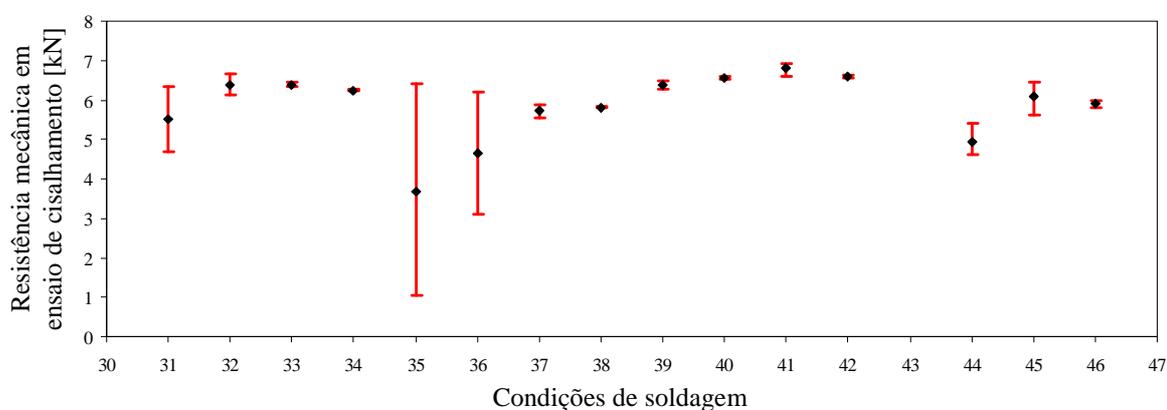


Figura 37. Resistência mecânica das soldas FSpW da liga AA6181-T4 sob solicitação de cisalhamento.

Complementando os resultados anteriormente mostrados, a Figura 38 apresenta a resistência mecânica sob cisalhamento em função da velocidade de rotação e do tempo de soldagem.

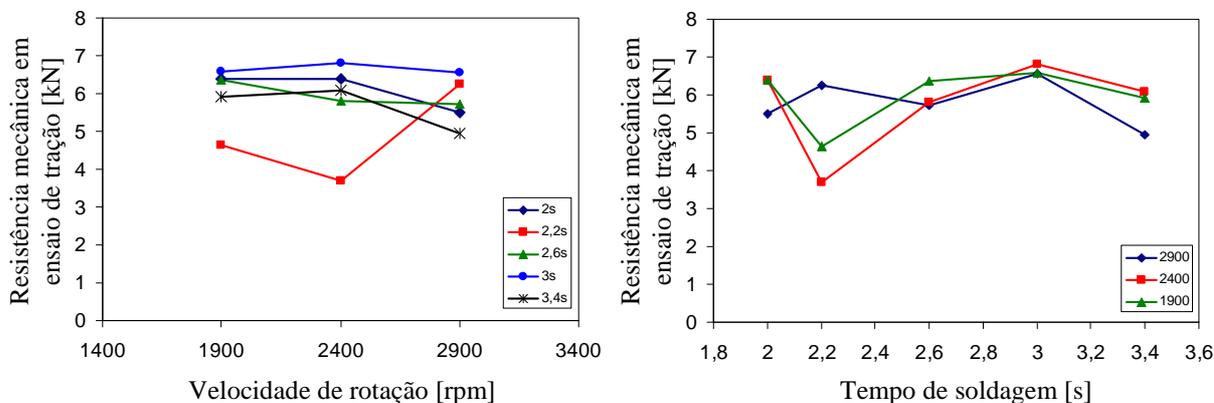


Figura 38. Resistência mecânica das soldas FSpW da liga AA6181-T4 sob solicitação de cisalhamento em função dos parâmetros de processo.

A Figura 39 mostra os resultados de resistência mecânica sob solicitação de tração para as 12 condições de soldagem em estudo. Dada a maior severidade deste tipo de solicitação, a resistência mecânica foi menor em comparação com a solicitação de cisalhamento. A resistência mecânica média sob tração foi de 2,26 kN e o desvio padrão médio igual a 0,2 kN.

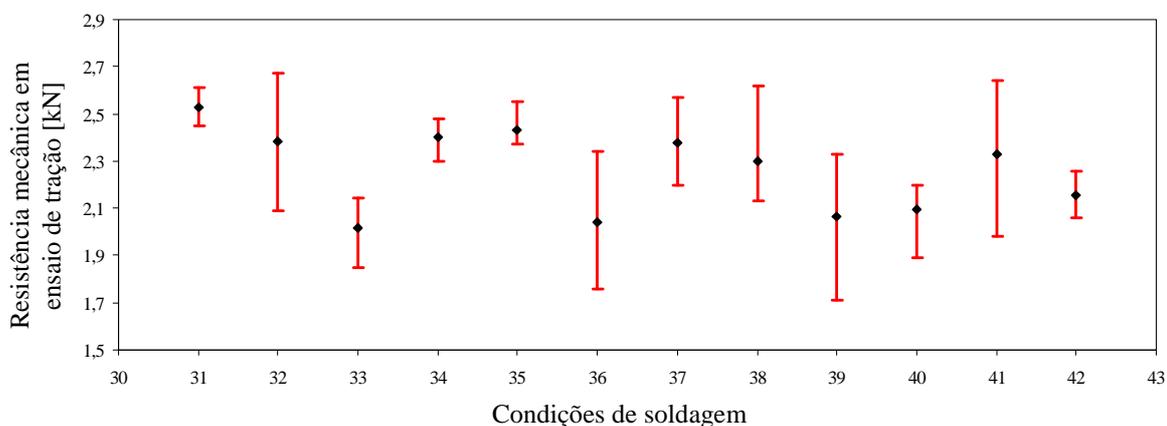


Figura 39. Resistência mecânica das soldas FSpW da liga AA6181-T4 sob solicitação de tração.

Na Figura 42 está mostrada a resistência mecânica sob solicitação de tração em função da velocidade de rotação e do tempo de soldagem.

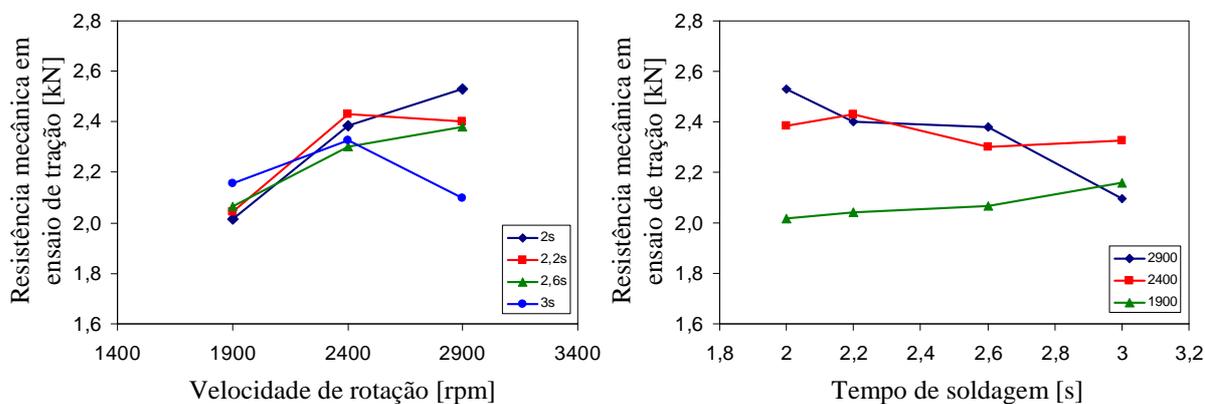


Figura 40. Resistência mecânica das soldas FSpW da liga AA6181-T4 sob solicitação de tração em função dos parâmetros de processo.

#### 4.4 Análise das fraturas em solicitação monotônica

Análises de falha foram conduzidas nas fraturas das amostras provenientes dos ensaios de cisalhamento e de tração. As superfícies de fratura foram analisadas com pequena ampliação em estereoscópio com a finalidade de caracterizar os modos e

mecanismos de falha. Microscopia eletrônica de varredura foi utilizada para avaliação de alguns micromecanismos associados. Adicionalmente, algumas amostras foram seccionadas ao centro do botão fraturado e preparadas metalograficamente para analisar a fratura também em microscópio óptico. Resultados provenientes desta última análise serão apresentados apenas no capítulo 5 (Discussão dos resultados) com a finalidade de auxiliar a explicação de alguns mecanismos. É importante destacar que devido às particularidades do processo FSpW, optou-se neste trabalho por não utilizar exatamente a mesma terminologia empregada para fraturas em solda ponto por resistência elétrica na língua portuguesa. Neste caso, quando necessário, foi feita uma adaptação para o português dos termos mais comumente empregados na língua inglesa [61][68][78] de maneira a melhor caracterizar os modos de falha que foram observados.

#### 4.4.1 Fratura sob solicitação de cisalhamento

Três modos de falha diferentes foram observados nos ensaios de cisalhamento como mostra a Figura 41, classificados como: a) interfacial com trinca circunferencial, b) arrancamento parcial com rasgamento e c) arrancamento total.

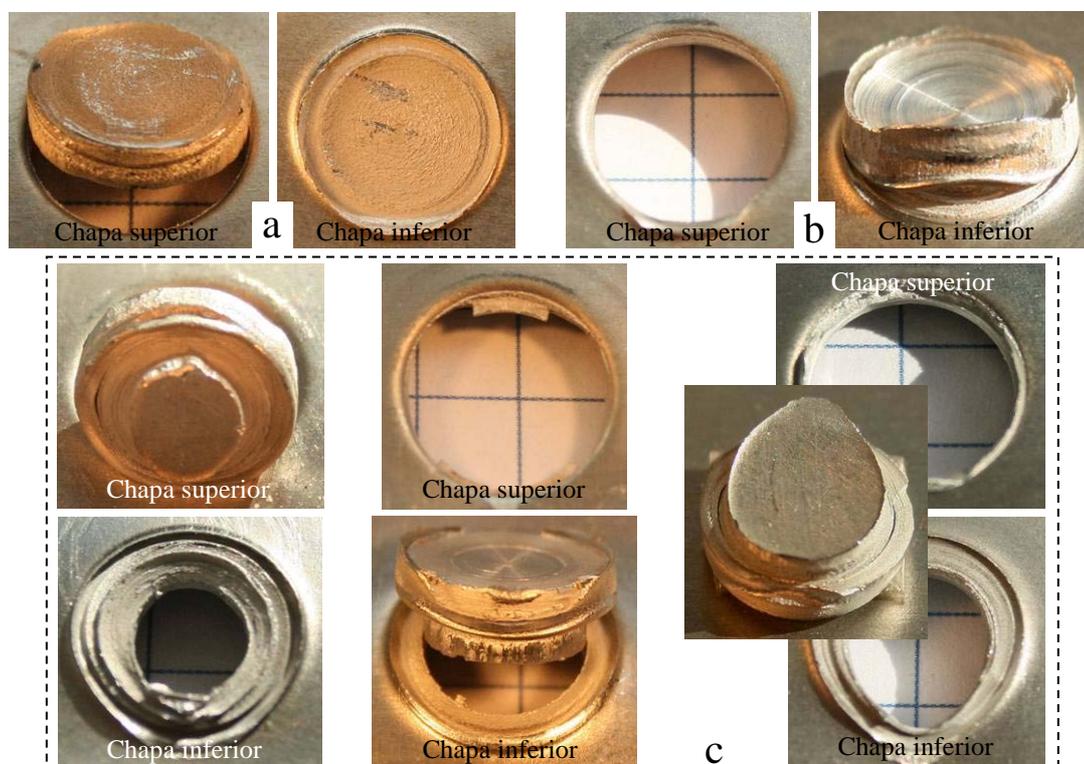


Figura 41. Modos de falha observados nos ensaios de cisalhamento das juntas FSpW da liga AA6181-T4: (a) interfacial com trinca circunferencial, (b) arrancamento parcial com rasgamento e (c) arrancamento total.

O modo de falha do tipo interfacial é caracterizado pela fratura através do botão de solda longitudinalmente, o que, neste caso, esteve sempre acompanhado de uma trinca circunferencial (TC) circundando parcialmente o botão, ver Figura 42. Em outras ligas ou outro tipo de sollicitação, nem sempre este modo de falha está acompanhado pela trinca circunferencial. Portanto, neste trabalho é utilizado o termo interfacial com trinca circunferencial para diferenciação e melhor caracterização deste modo de falha.

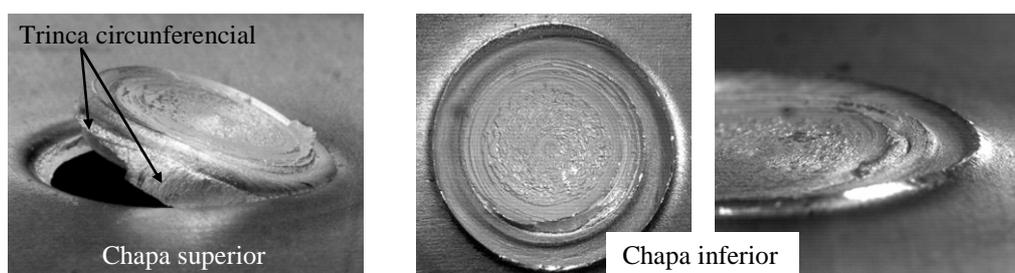


Figura 42. Modo de falha do tipo interfacial com trinca circunferencial ocorrido sob sollicitação monotônica de cisalhamento. (2400 rpm / 2,2 s).

A falha do tipo arrancamento parcial está associada com a fratura no entorno do botão de solda na chapa superior de tal maneira que o botão fica aderido à chapa inferior ao final da fratura, ver Figura 43. Este modo de falha esteve sempre acompanhado de algo que foi denominado de “rasgamento”, que consiste na separação parcial do botão de solda em uma de suas extremidades, paralelamente à direção de aplicação da carga. O rasgamento, embora presente em todas as falhas por arrancamento da liga AA6181-T4, nem sempre ocorre neste modo de falha para outras ligas soldadas pelo processo FSpW. Deste modo neste trabalho será utilizado o termo arrancamento parcial com rasgamento para melhor caracterizar este modo de falha.

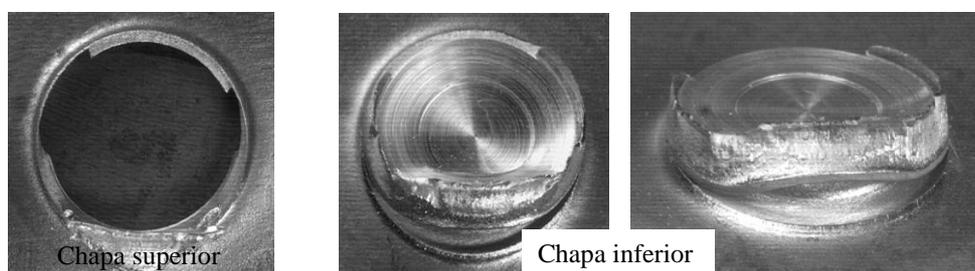


Figura 43. Modo de falha do tipo arrancamento parcial com trinca circunferencial ocorrido sob sollicitação monotônica de cisalhamento. (2900 rpm / 2,2 s).

O modo de falha denominado de arrancamento total consiste na fratura em torno do botão de solda em ambas as chapas de tal maneira que o botão é removido por completo da

junta ou fica aderido a uma das chapas por uma porção desprezível de material. Este modo de falha apresentou três variações: i) botão na chapa superior, ii) botão na chapa inferior e iii) falha completa.

i) Botão na chapa superior

Nesta variante a trinca circunferencial na chapa inferior varre totalmente a chapa causando o desprendimento do botão de solda que fica aderido à chapa superior como mostra a Figura 44. A trinca circunferencial que se desenvolve na chapa superior também é bastante pronunciada mas não varre completamente o contorno do botão. Este fica aderido na chapa superior por uma porção muito pequena de material, o que leva a classificação deste modo de falha como do tipo arrancamento total.

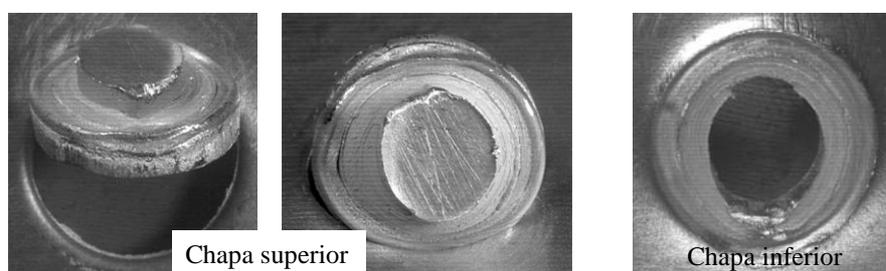


Figura 44. Modo de falha do tipo arrancamento total/botão na chapa superior, ocorrido sob solicitação monotônica de cisalhamento. (2900 rpm / 3 s)

ii) Botão na chapa inferior

Esta variação é semelhante a descrita anteriormente porém a trinca circunferencial se desenvolve completamente na chapa superior causando o desprendimento do botão de solda que fica aderido à chapa inferior, ver Figura 45. O botão de solda fica aderido à chapa inferior por uma porção muito pequena de material o que leva a classificação do modo de falha como sendo do tipo falha total.

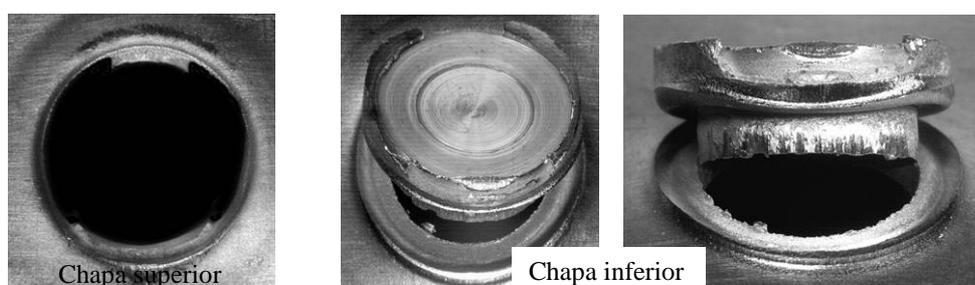


Figura 45. Modo de falha do tipo arrancamento total/botão na chapa inferior, ocorrido sob solicitação monotônica de cisalhamento. (2900 rpm / 2 s).

### iii) Falha completa

No caso desta variante houve o desprendimento completo do botão de solda devido o desenvolvimento completo da trinca circunferencial nas chapas superior e inferior, como mostrado na Figura 46.

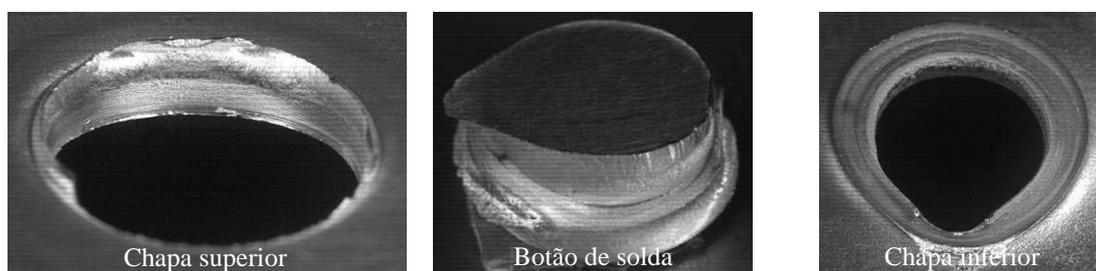


Figura 46. Modo de falha do tipo arrancamento total/falha completa, ocorrido sob sollicitação monotônica de cisalhamento em junta FSpW da liga AA6181-T4. (1900 rpm / 2 s).

#### 4.4.2 Fratura sob sollicitação de tração

Os ensaios de tração resultaram em três modos de falha distintos, como mostrado na Figura 47, classificados como: a) interfacial, b) arrancamento total e c) arrancamento parcial.

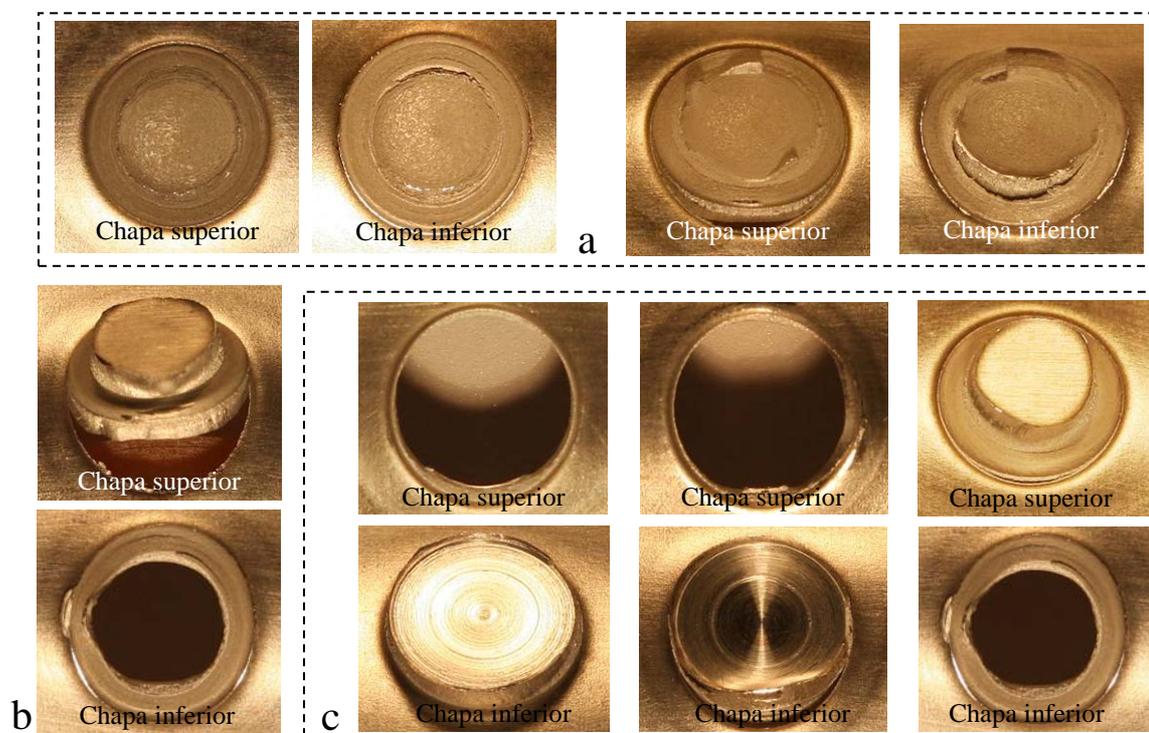


Figura 47. Modos de falha observados nos ensaios de tração das juntas FSpW da liga AA6181-T4: (a) interfacial, (b) arrancamento total e c) arrancamento parcial.

O modo de falha interfacial apresentou duas variantes: i) interfacial simples e ii) interfacial com trinca circunferencial.

i) Fratura interfacial simples

Este modo de falha é caracterizado pela fratura através do botão de solda paralelamente à interface entre as chapas superior e inferior, separando o botão de solda em duas partes, como mostrado na Figura 48 para uma junta produzida com a condição de soldagem 33 (1900 rpm / 2 s).

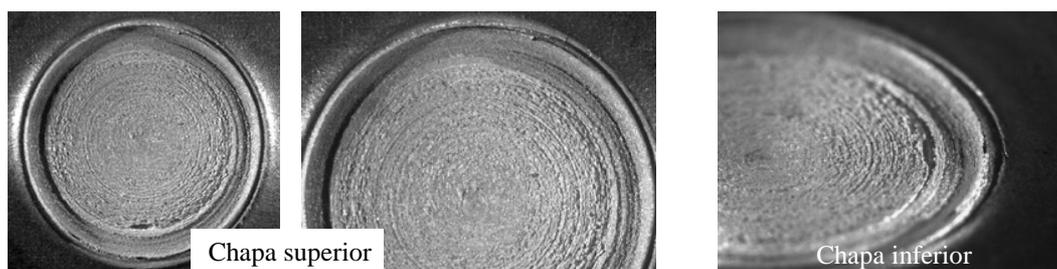


Figura 48. Modo de falha do tipo interfacial simples ocorrido sob solicitação monotônica de tração em junta FSpW da liga AA6181-T4. (1900 rpm / 2 s).

ii) Fratura interfacial com trinca circunferencial

Este modo de falha é semelhante ao da fratura interfacial simples com a diferença de que apresenta trinca circunferencial na chapa superior ou inferior (ou ambas), como mostrado na Figura 49 para uma junta soldada com a condição de soldagem 41 (2400 rpm / 3 s).

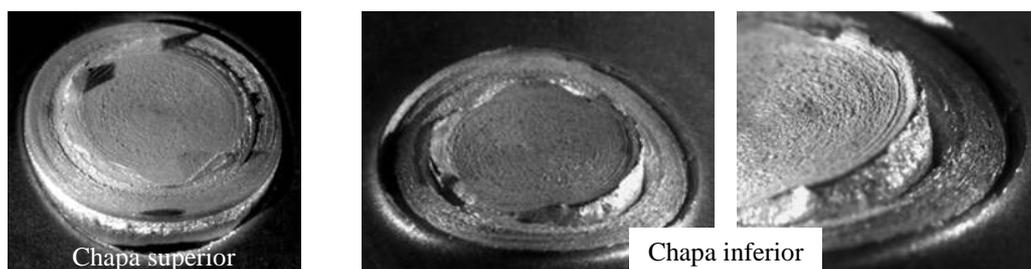


Figura 49. Modo de falha do tipo interfacial com trinca circunferencial ocorrido sob solicitação monotônica de tração em junta FSpW da liga AA6181-T4. (2400 rpm / 3 s).

O modo de falha do tipo arrancamento total se caracteriza pela formação de trincas circunferenciais em ambas as chapas (superior e inferior). Esse modo de falha foi

observado em poucas amostras e sempre com o botão de solda aderido à chapa superior ao final do desenvolvimento da falha. A Figura 50 mostra este tipo de falha em uma junta produzida com a condição de soldagem 35 (2400 rpm / 2,2 s).

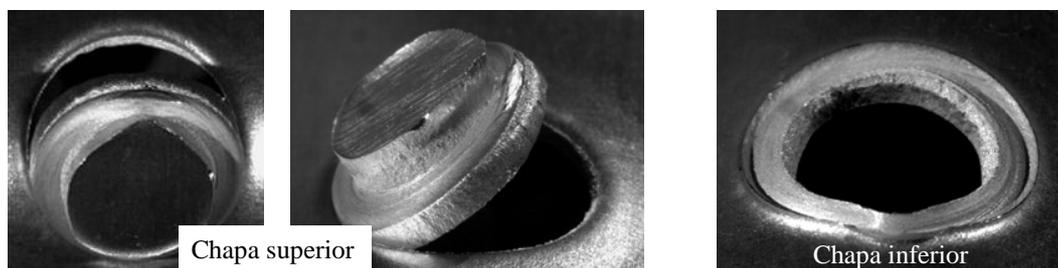


Figura 50. Modo de falha do tipo arrancamento total ocorrido sob solicitação monotônica de tração em junta FSpW da liga AA6181-T4. (2400 rpm / 2,2 s).

A falha do tipo fratura parcial é caracterizada pela permanência do botão de solda praticamente intacto em uma das chapas. Nos ensaios de tração foram observadas três variantes: i) arrancamento parcial simples, ii) arrancamento parcial com rasgamento e iii) arrancamento parcial invertido.

#### i) Arrancamento parcial simples

A falha neste caso é caracterizada pelo desenvolvimento completo de uma trinca circunferencial na chapa superior de tal maneira que o botão de solda fica aderido à chapa inferior ao final da falha. A Figura 51 mostra este modo de falha em uma junta produzida com a condição de soldagem 42 (1900 rpm / 3 s).



Figura 51. Modo de falha do tipo arrancamento parcial simples ocorrido sob solicitação monotônica de tração em junta FSpW da liga AA6181-T4. (1900 rpm / 3 s).

#### ii) Arrancamento parcial com rasgamento

Este modo de falha é semelhante ao anterior, porém, antes da falha final da junta soldada, ocorre o rasgamento do botão de solda. Como no caso das fraturas sob solicitação

de cisalhamento, o rasgamento consiste no descolamento parcial do botão de solda em suas extremidades. A Figura 52 mostra este modo de falha em uma amostra soldada com a condição de soldagem 37 (2900 rpm / 2,6 s).

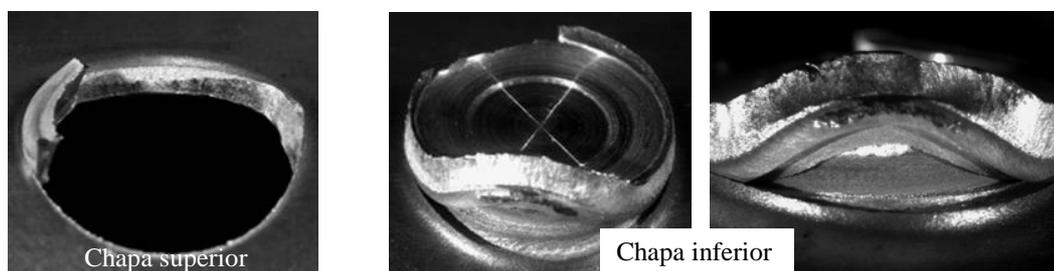


Figura 52. Modo de falha do tipo arrancamento parcial com rasgamento ocorrido sob solicitação monotônica de tração em junta FSpW da liga AA6181-T4. (2900 rpm / 2,6 s).

### iii) Arrancamento parcial invertido

A diferença dentre esta variante e as outras do tipo arrancamento parcial reside no desenvolvimento completo de uma trinca circunferencial na chapa inferior (ao invés da chapa superior). Deste modo o botão de solda fica aderido à chapa superior ao final da falha, como está ilustrado na Figura 53.

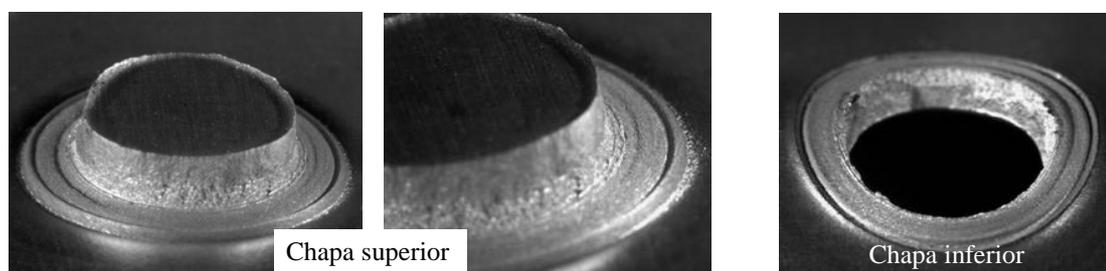


Figura 53. Modo de falha do tipo arrancamento parcial invertido ocorrido sob solicitação monotônica de tração em junta FSpW da liga AA6181-T4. (2400 rpm / 2 s).

## 4.5 Análise das fraturas sob solicitação de fadiga

Como explicado no item 3 (Materiais e métodos), neste trabalho foi feito um estudo complementar para a liga AA 6181-T4, no intuito de avaliar o efeito de uma profundidade de penetração da ferramenta de 1,65 mm na qualidade de soldas FSpW. Um estudo preliminar realizados pelo grupo de soldagem no estado sólido indicou a profundidade de 1,9 mm como sendo otimizada para soldas FSpW da liga AA6181-T4 [76]. Aqui são

apresentados os resultados do desempenho em fadiga de uma junta produzida com base nas especificações de tal trabalho inicialmente desenvolvido. Os resultados obtidos contribuíram para o entendimento do desenvolvimento de trincas responsáveis pela fratura e, conseqüentemente, pelo desempenho mecânico de soldas FSpW.

Juntas sobrepostas foram soldadas com a seguinte combinação de parâmetros: 2400 rpm / 1,9 mm / 2,24 s, na forma de corpos de prova para ensaio de fadiga, conforme especificações da norma DIN EN ISO 14324:2003 [74].

Os ensaios de fadiga foram realizados utilizando uma relação de carregamento R constante igual a 0,2, assim definida no intuito de preservar as superfícies de fratura. Para os testes foi utilizada uma máquina servo-hidráulica Schenck Trebel RM 50 de acordo com as recomendações da norma DIN EN ISO 14324:2003 [74]. Os critérios adotados para determinação do final do ensaio foram a fratura da amostra ou um deslocamento superior a 30 mm. A Figura 54 mostra a curva de Wöhler construída para a carga média aplicada por nível de carregamento.

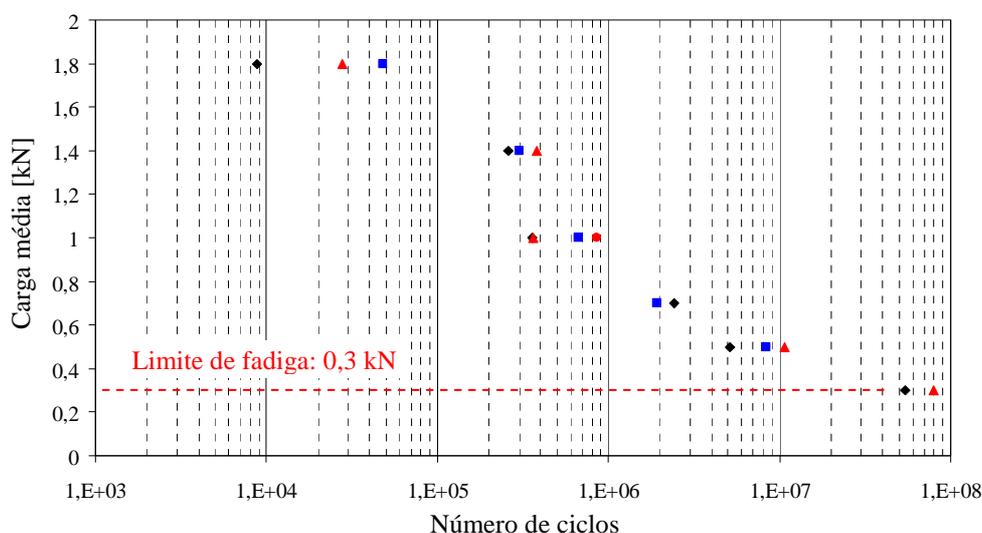


Figura 54. Curva de Wöhler mostrando o desempenho em fadiga de uma condição de soldagem complementar em soldas FSpW da liga AA6181-T4 para uma razão de carregamento R igual a 0,2.

Como mostrado na Figura 54 os testes foram realizados em seis níveis de carregamento. Recomenda-se utilizar  $10^8$  ciclos para uma determinação confiável do limite de fadiga [74]. Contudo, por não se ter como objetivo a determinação exata do limite de fadiga neste trabalho, os testes realizados na carga média de 0,3 kN foram interrompidos

nas proximidades deste patamar sem a ocorrência de fratura das amostras. Tomou-se este carregamento como correspondente à resistência da junta sob fadiga.

Como já era esperado, diferentes níveis de carregamento levaram a comportamento diferente no desenvolvimento da fratura, dando origem a modos de falha variados. Em linhas gerais três modos de falha foram observados. Para regime de fadiga de baixo ciclo, ou seja, altos níveis de carregamento foram observadas fraturas semelhantes à do tipo arrancamento total para o caso de solitação monotônica. A Figura 55 mostra a fratura de duas amostras testadas com uma carga média de 1,8 kN onde é notório o avanço de uma trinca circunferencial nas chapas superior e inferior no entorno do botão de solda.



Figura 55. Fratura em fadiga de baixo ciclo (alto nível de carregamento) ocasionada pela nucleação e propagação de trinca circunferencial no entorno do botão de solda.

Para níveis intermediários de solitação também foi observada a formação de trinca circunferencial no entorno do botão de solda, porém apenas na chapa superior com posterior propagação ao longo da chapa, perpendicularmente à direção de aplicação da carga. Também é notória a deformação plástica imposta pela solitação sobre a junta. A Figura 56 mostra a fratura de duas amostras testadas em fadiga com carregamento médio de 1 kN.

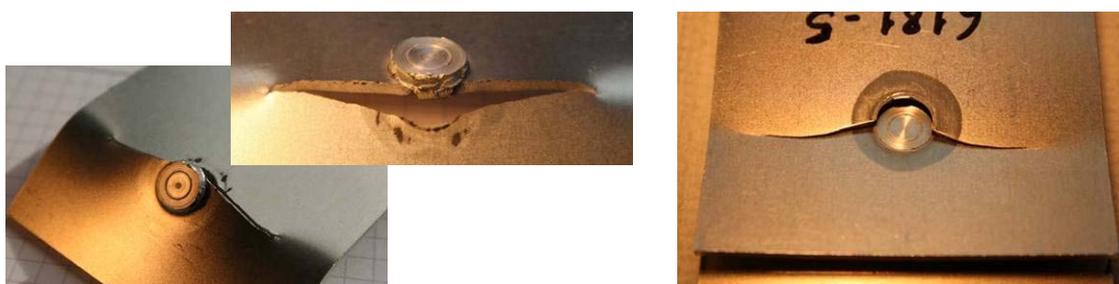


Figura 56. Fratura em fadiga com nível intermediário de carregamento ocasionada pela nucleação e propagação de trinca circunferencial no entorno do botão de solda e posterior propagação no material base.

No caso de regime de fadiga de alto ciclo (baixo nível de carregamento) foi observada mínima deformação plástica sobre a junta, com a falha originando-se através de trinca circunferencial na chapa superior. A trinca circunferencial avança pouco no entorno do botão de solda e então passa a se propagar ao longo da chapa, perpendicularmente à direção de aplicação da carga até a falha completa da junta. A Figura 57 mostra a fratura de uma junta testada com um carregamento médio de 0,5 kN.

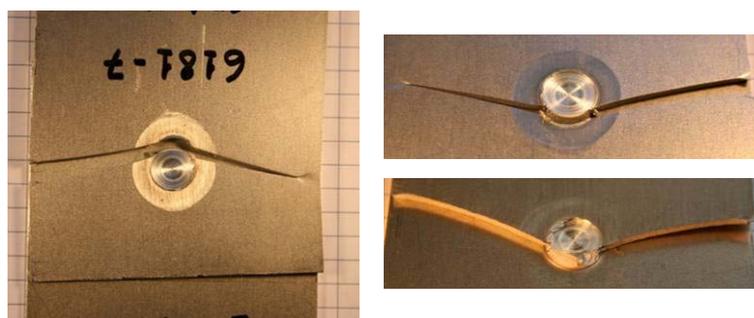


Figura 57. Fratura em fadiga de alto ciclo (baixo nível de carregamento) ocasionada pela nucleação e propagação de trinca circunferencial no entorno do botão de solda e posterior propagação no material base.

Estes resultados se mostraram positivos uma vez que não foi observada falha do tipo interfacial em nenhuma amostra, indicando que não houve propagação da TA ao longo do botão sob carregamento de fadiga. No entanto ficou evidente que sob fadiga de baixo ciclo (altos níveis de carregamento) a fratura ocorre por falha na junta FSpW, por meio da nucleação e propagação de TC no entorno do botão de solda.

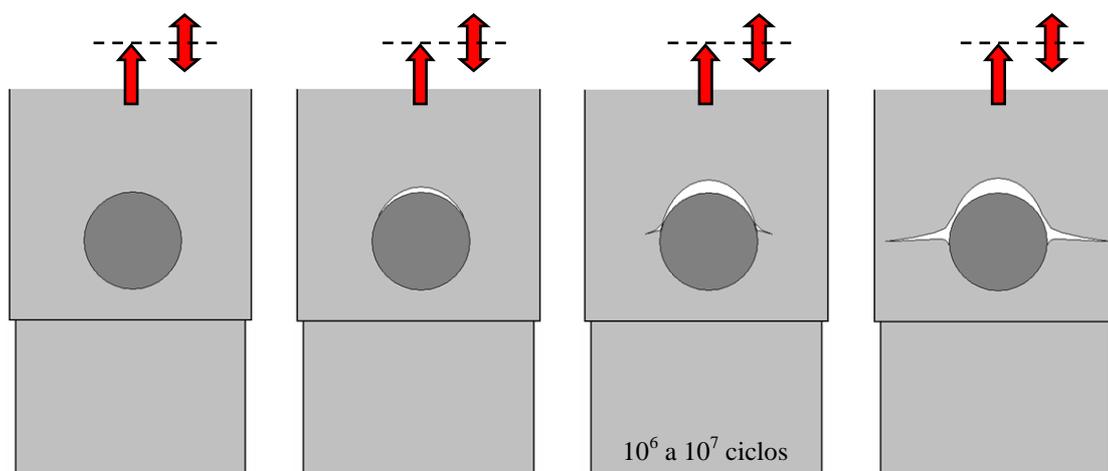


Figura 58. Evolução da falha em junta FSpW sob fadiga de alto ciclo ( $>10^6$ ) com carregamento de cisalhamento intermitente.

Ademais, observou-se que, a partir de patamares intermediários de ciclagem (carregamento moderado) a falha passa a ser governada pelas propriedades do material base da liga AA6181-T4. Sob fadiga de alto ciclo (baixos níveis de carregamento), a falha é predominantemente governada pela propagação de trincas transversais à direção de aplicação da carga no material de base, como ilustrado na Figura 58. Uma TC é nucleada e se propaga no entorno do botão de solda e entre  $10^6$  e  $10^7$  ciclos a trinca “migra” para o material base onde se propaga até o final da falha.

## 5 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Um novo processo de solda ponto denominado Friction Spot Welding (FSpW) destinado à produção de juntas sobrepostas foi concebido e patenteado pelo grupo de soldagem no estado sólido no Centro de Pesquisas GKSS na Alemanha. O processo consiste no uso de uma ferramenta rotativa que produz a solda através de energia térmica e mecânica sendo aplicável para qualquer material que apresente boa plasticidade. Neste trabalho foi feito o estudo deste processo para a liga de alumínio AA6181-T4 onde soldas foram produzidas com diferentes combinações de parâmetros de processo. As soldas foram caracterizadas mecânica e metalurgicamente com o objetivo de entender os mecanismos de formação da união bem como buscar a otimização do desempenho mecânico sob solicitação de cisalhamento e de tração por meio de análise de falha.

### 5.1 Características metalúrgicas da solda FSpW

A análise metalográfica revelou duas zonas de solda em ambas as ligas: a Zona de Mistura (ZM) e a Zona Termo-mecanicamente Afetada (ZTMA) como foi mostrado na macrografia da Figura 21. Contudo, embora não revelada nas análises metalográficas, uma terceira zona se mostrou existente por meio dos perfis de microdureza, a Zona Termicamente Afetada (ZTA). A Figura 59 mostra a macrografia da secção transversal de uma solda FSpW destacando as zonas da solda. É importante destacar que a delimitação mostrada tanto para a ZM como para a ZTMA é apenas aproximada. As setas representam a ZTA, que se estende além dos limites mostrados na macrografia.

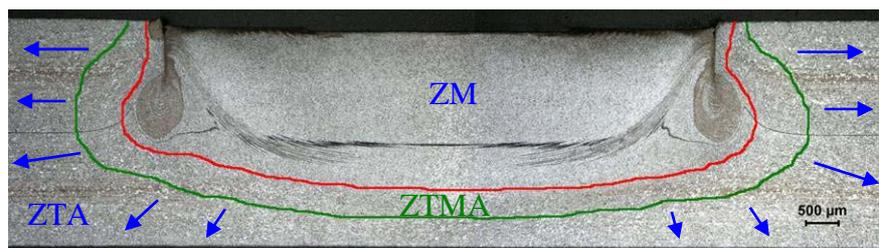


Figura 59. Macrografia da secção transversal de uma solda FSpW da liga AA6181-T4 mostrando as zonas da solda.

A ZM é caracterizada por uma microestrutura bastante refinada em comparação com as outras zonas, com grãos da ordem de  $12\ \mu\text{m}$  (ASTM 9,9), ver Figura 25. Nesta zona o material sofre recristalização dinâmica devido à alta temperatura e deformação plástica imposta durante o processo [34][37][47][49][65]. A microestrutura nesta zona se mostrou um tanto heterogênea para algumas condições de soldagem, o que ficou evidenciado pela variação de TG, como foi mostrado nas Figura 27, Figura 28 e Figura 29.

A ZTMA se caracteriza por grãos alongados em comparação com os do material base, em decorrência do trabalho mecânico imposto pelo movimento rotacional da camisa da ferramenta e da sua geometria em forma de rosca [64][78][80][83]. Na Figura 60 está mostrada a interface entre a ZM e a ZTMA em uma solda da liga AA6181-T4. Não ocorre, para esta liga, uma fronteira definida entre a ZM e a ZTMA; com efeito, observa-se uma transição rápida entre estas duas zonas. Tal fronteira não é clara uma vez que são visíveis na ZTMA, ainda que em proporção muito reduzida, grãos recristalizados por entre os grãos alongados que caracterizam esta zona, ver Figura 60a.

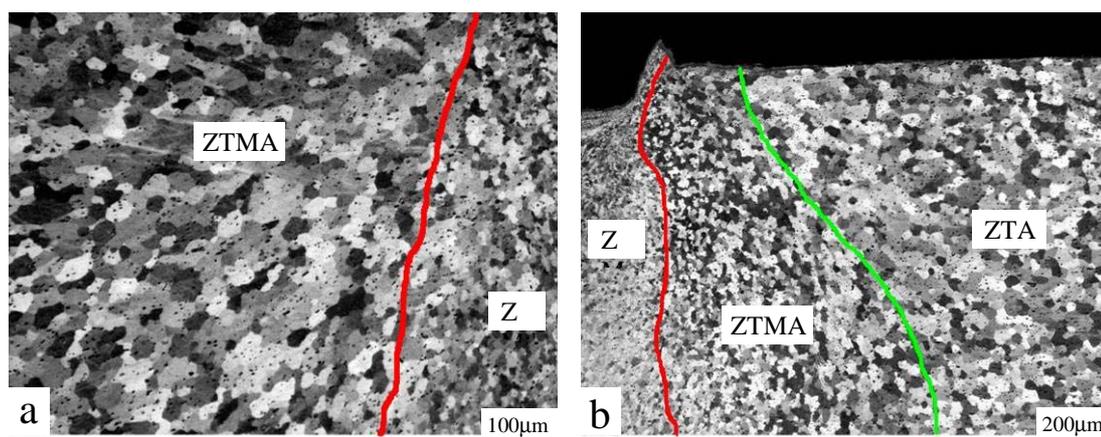


Figura 60. Micrografias mostrando a interface entre as zonas de uma solda FSpW da liga AA6181-T4: (a) lado esquerdo do botão - grande ampliação e (b) lado direito do botão - pequena ampliação.

A ZTA se mostrou bastante extensa como ficou evidenciado nas medições de dureza, se estendendo até uma distância da ordem de 14 mm para cada lado do centro do botão da solda, ver Figura 34. Na Figura 61 está mostrado um mapa de dureza obtido com um indentador ultrasônico automático modelo BAQ UT 100 em uma junta soldada com a condição de soldagem 42 (1900 rpm / 3 s). Também é mostrada a macrografia do respectivo botão de solda. Ao término da medição, o equipamento fornece um mapa de cores cujas tonalidades são proporcionais à dureza medida. É importante destacar que este

instrumento não é de boa exatidão, não sendo de grande valia em termos quantitativos, porém permite uma fácil visualização da relação de dureza entre as zonas. Um perfil de dureza medido com um indentador Vickers modelo Zwick 3212 com carga de 0,5 kg também é mostrado na Figura 61 para fornecer uma visualização quantitativa da dureza. Note que este perfil foi medido em uma linha à meia espessura da chapa superior, como indicado na figura.

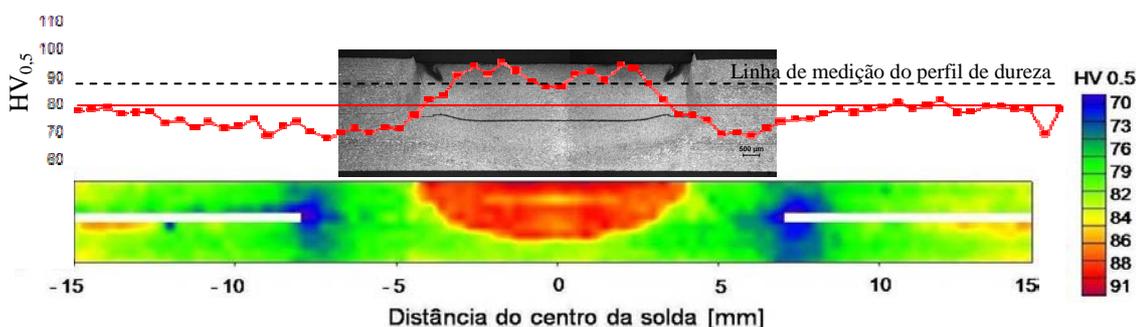


Figura 61. Mapa de dureza na secção transversal de uma solda FSpW da liga AA6181-T4 soldada utilizando a condição de soldagem 42 (1900 rpm / 3 s).

Este comportamento da dureza se mostrou inalterado para todas as condições de soldagem. Isto significa que as transformações metalúrgicas as quais o material é submetido pelo processo de soldagem não variam intensamente em função das diferentes combinações de variáveis de processo estudadas neste trabalho. O perfil mostra uma queda da dureza ao longo da ZTA com relação ao material base ( $\sim 80 \text{ HV}_{0,5}$ ) até um mínimo de aproximadamente  $70 \text{ HV}_{0,5}$  nas proximidades da ZTMA. A partir deste ponto a dureza aumenta até atingir um máximo em torno de  $95 \text{ HV}_{0,5}$  dentro da ZM.

Estes resultados mostram que a dureza e, conseqüentemente, a resistência do material, variam ao longo do botão de solda. A variação máxima de dureza se situa na faixa de  $25 \text{ HV}_{0,5}$  entre o mínimo na ZTMA e o máximo dentro da ZM. Por ser uma liga endurecível por precipitação é possível inferir que o processo de soldagem afeta, de alguma maneira, os agentes endurecedores desta liga que são: zonas de Guinier Preston (GP zones), precipitados  $\beta''$ , precipitados  $\beta'$  e precipitados  $Q'$  dentre outros, como observados nos trabalhos de Olea et. al. [64][65]. Os mecanismos envolvidos nas transformações metalúrgicas que levam a formação destes precipitados são bastante complexos e necessitam de observações com grande aumento em microscopia de

transmissão para sua identificação. Detalhes sobre estes mecanismos na soldagem por FSW de ligas da série 6xxx podem ser encontrados nos trabalhos de Olea et. al. [64][65].

Acredita-se que a razão para uma dureza na ZM ser maior em relação ao material base (que se encontra na condição T4) esteja relacionada com re-precipitação durante o resfriamento após a soldagem, assumindo que ocorreu solubilização durante o processo [64]. É sabido que na ZM tem-se basicamente dois mecanismos endurecedores: a re-precipitação seguida de envelhecimento pós soldagem e também, embora de menor efeito sobre a liga 6181, o refino dos grãos devido a recristalização dinâmica [64][78][80][83]. É importante destacar que mecanismos causadores de perda de dureza também podem estar ocorrendo como o coalescimento de partículas endurecedoras presentes na matriz. O efeito global de todos estes mecanismos resulta numa dureza na ZM maior que a oferecida pelo tratamento T4 (evidenciada pelos perfis de dureza) que, como já mencionado, consiste de solubilização e envelhecimento natural após a laminação, resultando em dureza moderada.

Na ZTA há um decréscimo da dureza o que é explicado pelo coalescimento das partículas endurecedoras distribuídas na matriz (provenientes do tratamento T4), o que se torna mais intenso no sentido do centro do botão de solda onde a temperatura é maior [34][50][64][78]. Na ZTMA os mecanismos envolvidos são basicamente o coalescimento de partículas e o endurecimento promovido pelo trabalho mecânico (encruamento) causado pela ferramenta de soldagem conforme apresentado em outros trabalhos [64][78][80][83]. Por fim tem-se também, ainda que em pequena quantidade, uma parcela de recristalização dinâmica na ZTMA na zona de transição com a ZM. O resultado global é um leve aumento de dureza em comparação com a ZTA.

## 5.2 Características geométricas da solda FSpW

Como foi mostrado na Figura 32, a junta em uma solda FSpW da liga AA6181-T4 é formada por três elementos: a Cunha, a União Secundária (US) e a União Principal (UP). A Figura 62 mostra a metade direita da secção transversal de três soldas FSpW produzidas com tempo de soldagem de 3 s e com rotações diferentes. Estão destacados na figura os caracteres geométricos formadores da junta, onde é notório o efeito da velocidade de rotação na geometria final do botão de solda.

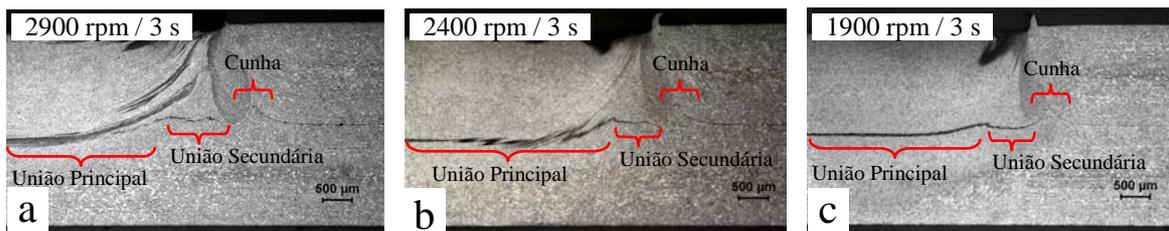


Figura 62. Secção transversal de solda FSpW da liga AA6181-T4 mostrando o efeito da velocidade de rotação na geometria final do botão de solda: (a) 2900 rpm, (b) 2400 rpm e (c) 1900 rpm.

Por meio da observação da secção transversal de uma junta FSpW em vários estágios do processo de soldagem é possível obter informações quanto a formação das três características geométricas da junta. A Figura 63 mostra macrografias de uma solda FSpW da liga AA6181-T4 em seis instantes diferentes, o que foi obtido por meio da interrupção do processo em várias etapas do mesmo. As Figura 63a-d fazem parte do estágio de penetração da camisa até sua profundidade máxima. As Figura 63e-f mostram a fase final do processo caracterizada pelo preenchimento, realizado pelo do pino, da cavidade deixada pela camisa durante a penetração.

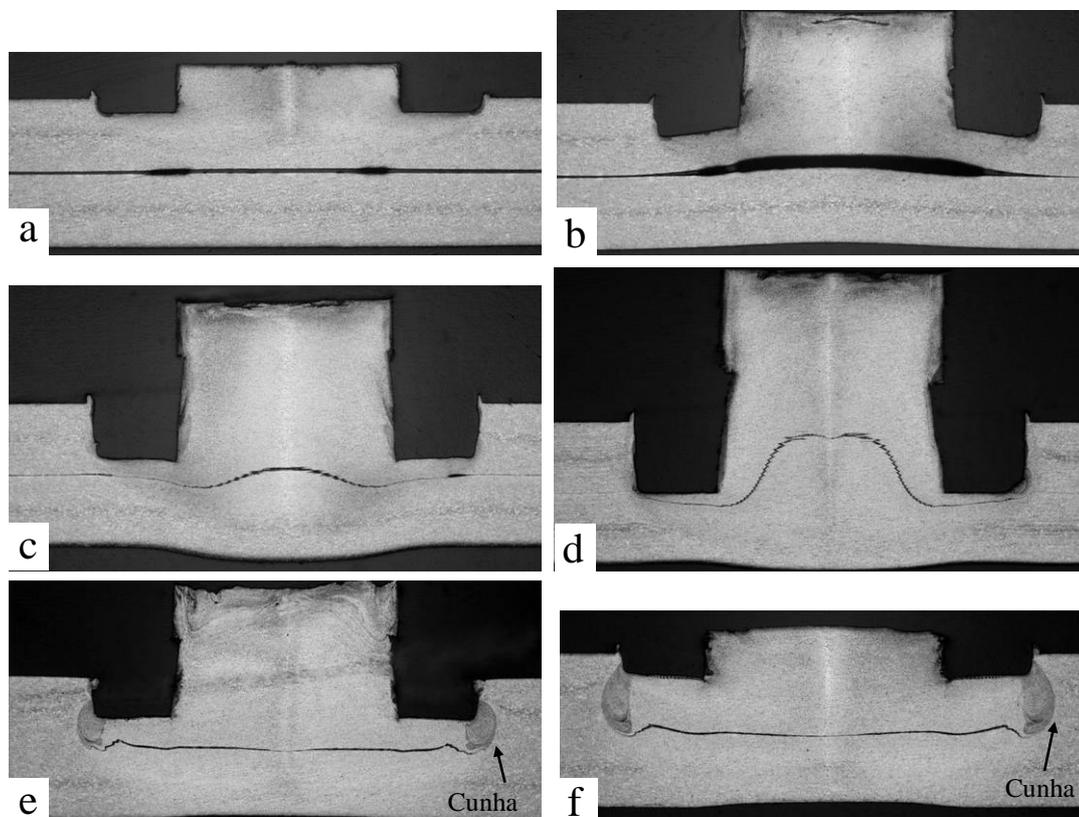


Figura 63. Macrografias mostrando o processo de soldagem FSpW de uma liga AA6181-T4 em diferentes estágios. Fonte: relatório da empresa Riftec GmbH para divulgação do processo.

Nesta seqüência de imagens é possível ver que a Cunha se forma na parte final do processo, quando o pino desce empurrando o material plastificado de volta à sua posição inicial. Esta parte final do processo também é a responsável pela formação da União Secundária, ver Figura 63e e Figura 63f.

Como já explicado anteriormente (capítulo 4.1.4) a Cunha é uma formação geométrica pontiaguda com o vértice apontando sempre para a parte superior da solda. Ela é formada nos estágios finais do processo como pode ser visto na Figura 63e e Figura 63f, resultante da plastificação da chapa inferior. A Figura 64 mostra imagens ampliadas da Cunha onde é possível ver que nela existem pontos intercalados de adesão entre as chapas superior e inferior. Esta observação mostra que nesta região já se tem uma pequena união entre as duas chapas da junta sobreposta.

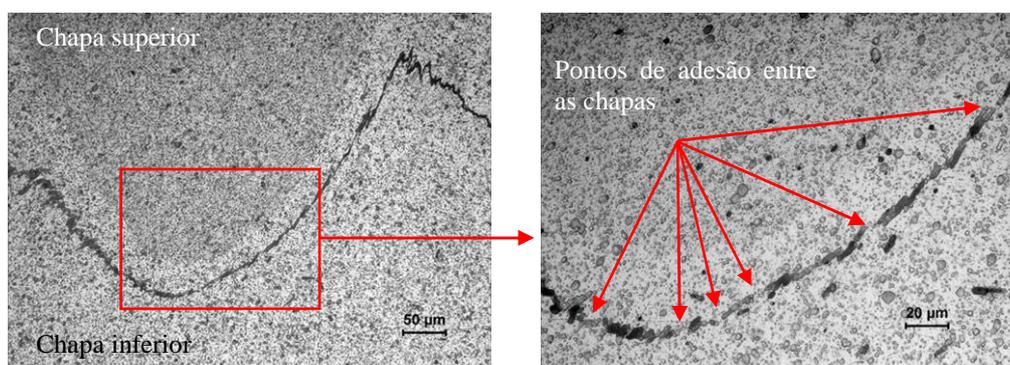


Figura 64. Detalhes da Cunha onde é possível observar pontos intercalados de adesão entre as chapas superior e inferior. Solda produzida com a condição 36 (1900 rpm / 2,2 s).

Na Figura 65 estão mostrados detalhes da União Principal, onde pode-se observar que esta formação geométrica apresenta-se na forma de uma “sanfona”, como também observado por outros pesquisadores [20][21][41][42][87]. Com grande ampliação é possível notar que existe união metalúrgica entre as chapas superior e inferior com alguns vazios distribuídos em sua extensão. A tonalidade escurecida vista nessas micrografias está associada ao refino da microestrutura (ver Figura 30).

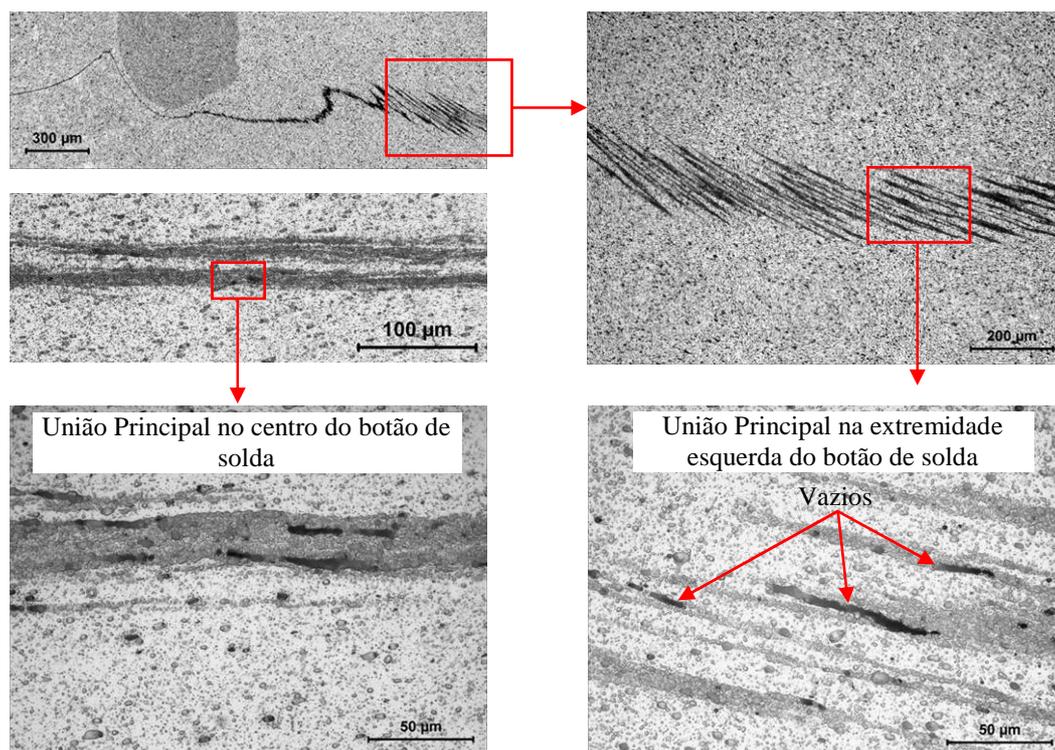


Figura 65. Micrografias mostrando detalhes da União Principal em uma solda FSpW da liga AA6181-T4.

A União Secundária caracteriza a região de transição entre as chapas fracamente unidas na Cunha e a união propriamente dita na União Principal, de maneira semelhante ao apresentado em outros trabalhos na literatura [41][42][50]. Esta região apresenta-se algumas vezes como uma linha delgada mas assume uma forma mais espessa e rugosa para velocidades de rotação mais lenta e longos tempos de soldagem. A Figura 66 mostra o aspecto da União Secundária para as condições de soldagem 46 (1900 rpm / 3,4 s) e 31 (2900 rpm / 2 s). Note o aspecto mais espesso desta região no caso da condição 46 que utiliza rotação mais baixa e tempo de soldagem mais longo em comparação com a condição 31.

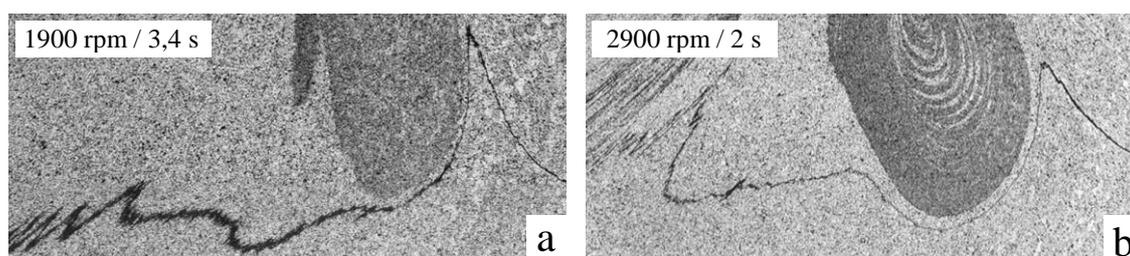


Figura 66. Micrografias mostrando detalhes da União Secundária em soldas FSpW da liga AA6181-T4 produzidas com diferentes condições de soldagem: (a) 1900 rpm / 3,4 s e (b) 2900 rpm / 2 s.

### 5.3 Resistência mecânica sob solicitação monotônica de cisalhamento

A resistência mecânica das soldas produzidas neste trabalho foi avaliada monotonicamente através de ensaios de cisalhamento e de tração, como foi mostrado no item 4.3. Três amostras foram testadas para cada condição de soldagem tomando-se nota da carga máxima atingida em cada ensaio e da dispersão entre os valores máximo e mínimo. É importante destacar que os resultados do ensaio de tração não mostraram uma grande disparidade de comportamento entre as várias condições de soldagem.

Na Figura 67 estão mostrados novamente os resultados obtidos nos ensaios de cisalhamento. Fica mais simples a comparação entre as várias condições de soldagem fazendo a separação dos tempos de processo, como mostrado na figura. Pode-se ver que algumas condições de soldagem apresentaram bom comportamento mecânico (alta resistência e repetibilidade) enquanto outras levaram a resultados ruins (baixa resistência, falta de repetibilidade ou ambos).

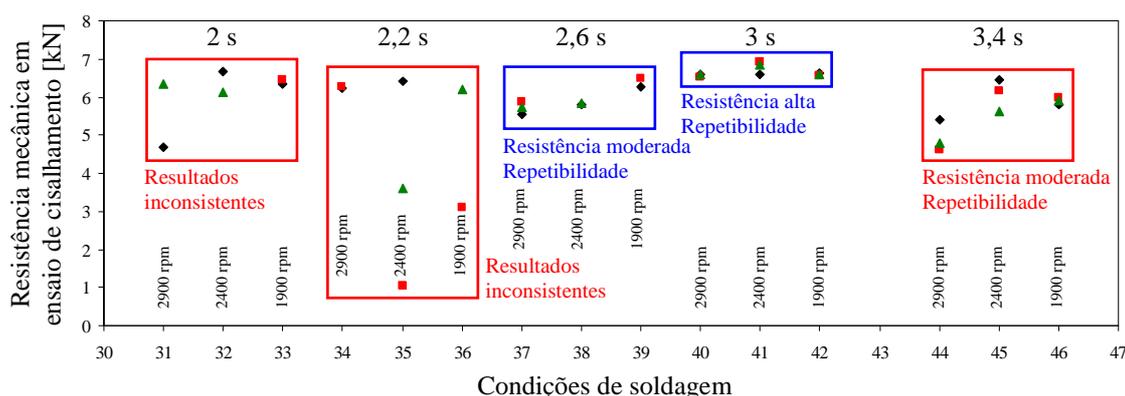


Figura 67. Resistência mecânica sob solicitação de cisalhamento das soldas FSpW da liga AA6181-T4.

Os melhores resultados ficaram para as soldas realizadas com 3 s, tempo no qual as três velocidades de rotação forneceram excelentes resultados. As soldas realizadas com 2,6 s também mostraram resultados muito bons para as três rotações, porém aquém daqueles a 3 s. Soldas com tempos de soldagem muito rápido (2 e 2,2 s) mostraram resultados insatisfatórios.

De maneira geral os resultados se mostraram coerentes com a teoria do aporte de energia que tem o tempo de soldagem como uma variável de peso [34][35][47][52]. Segundo esta teoria soldas com tempos mais longos terão maior aporte de energia e,

conseqüentemente, botão de solda maior, resultando numa junta mais resistente. Contudo, segundo esta teoria as soldas produzidas com 3,4 s deveriam apresentar resistência ainda maior, ao contrário dos resultados obtidos, como mostrado na Figura 67. A razão para este comportamento é a geometria da Cunha, como será abordado mais à frente.

Uma observação importante foi a queda da resistência com o aumento da rotação em algumas soldas. Estes resultados levam a entender que existem mais mecanismos com influência sobre a resistência final das juntas soldadas além do aporte de energia. Com a finalidade de buscar o entendimento de tais mecanismos e como eles afetam o desenvolvimento da falha nas juntas soldadas sob solicitação de cisalhamento, foi feito o estudo das fraturas após os ensaios mecânicos.

Como foi mostrado na Figura 41, três modos de falha foram observados sob solicitação de cisalhamento: a) interfacial com trinca circunferencial, b) arrancamento parcial com rasgamento e c) arrancamento total; este último com três variantes (botão na chapa superior, botão na chapa inferior e falha completa). Observando estes modos de falha em pequeno aumento com auxílio de estereoscópio ficou notório que para todos eles existem dois aspectos em comum. Um deles é o que neste trabalho será denominado de Trinca Anular (TA), e o outro é a já mencionada anteriormente (itens 4.4.1 e 4.4.2) Trinca Circunferencial (TC). A Figura 68 mostra novamente os modos de falha onde estão indicadas as trincas anular e circunferencial.

A TA é ocasionada pelo “rasgamento” da União Secundária quando uma carga é aplicada sobre a junta soldada. A União Secundária, por ser uma região onde a união entre as chapas superior e inferior é moderada, tende a não oferecer muita resistência quando da aplicação de um esforço sobre a solda. Desta maneira ocorre o rasgamento (ou descolamento) que é a falha da União Secundária que por sua vez dará origem à TA cujo plano é paralelo às superfícies das chapas constituintes da junta, ver Figura 68. A TC se forma no entorno do botão de solda e tem seu plano perpendicular às superfícies das chapas. Esta trinca se propaga contornando o botão de solda e pode se formar na chapa superior, na inferior ou em ambas, ver Figura 68. O desenvolvimento destas duas trincas vai definir o modo de falha da junta soldada.

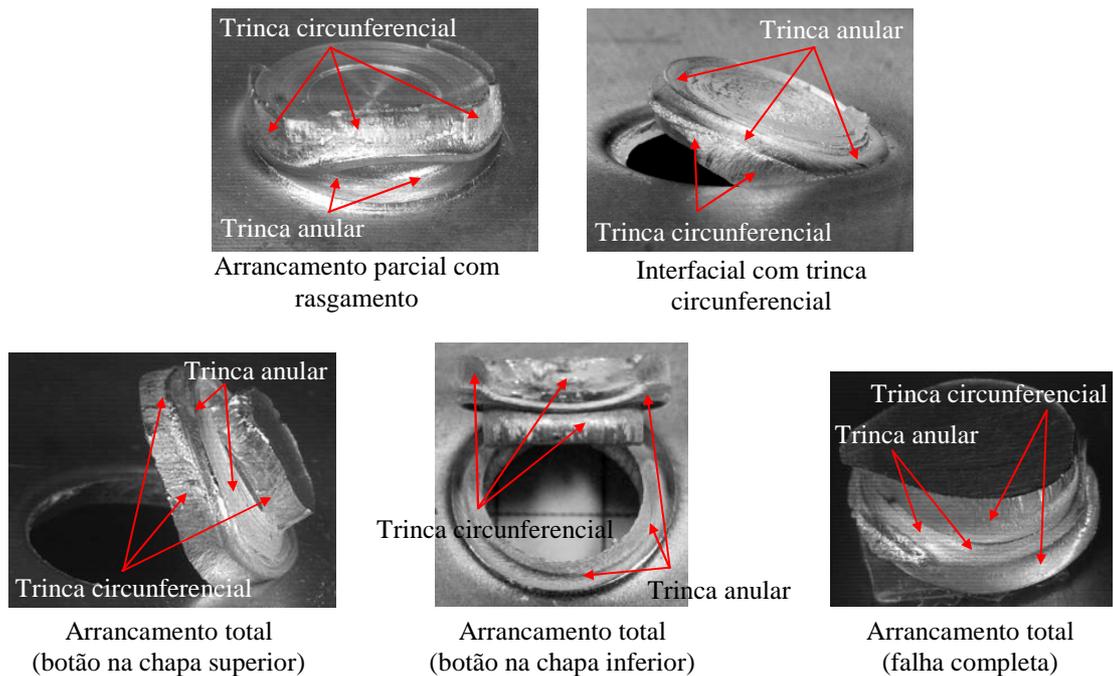


Figura 68. Modos de falha observados nos ensaios de cisalhamento da liga AA6181-T4, mostrando as trincas anular e circumferencial.

Estes dois tipos de trincas são previsíveis ao se fazer a análise da distribuição de tensões no entorno do botão de solda decorrente de uma carga de cisalhamento. A Figura 69 mostra, esquematicamente, como é esta distribuição de tensões na secção transversal (Figura 69a) e na superfície superior (Figura 69b) da junta soldada.

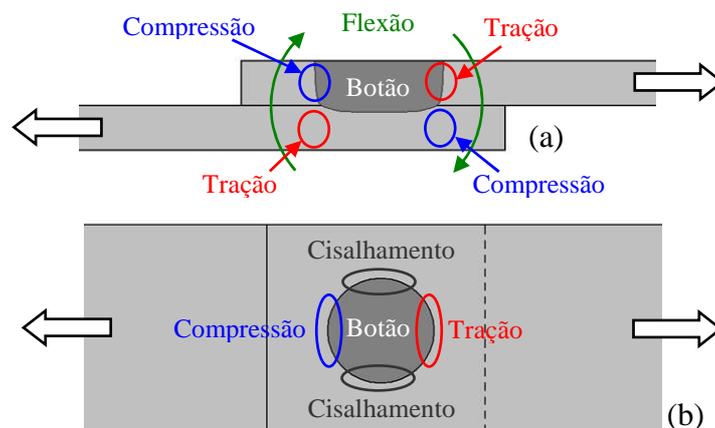


Figura 69. Distribuição de tensões no entorno do botão de uma solda FSpW: (a) secção transversal e (b) superfície superior.

No plano longitudinal e paralelo à direção de aplicação da carga (Figura 69a) sobre a junta, o botão de solda sofre uma sollicitação de flexão decorrente da resistência que o botão impõe frente a tendência de deslizamento entre as chapas. É importante destacar que este tipo de tensão é decorrente apenas da geometria da junta.

Já a distribuição de tensões no entorno do botão de solda na superfície da junta (ver Figura 69b) depende não apenas da geometria da junta mas também das propriedades da junta soldada. É fácil perceber que a intensidade desta distribuição de tensões é dependente da diferença de propriedades entre o botão de solda e o material em seu entorno. Um botão de solda mais rígido em comparação com o material base intensificará esta distribuição de tensões. Com efeito, como foi visto nos resultados de microdureza existe uma variação significativa de resistência entre as zonas da solda (ver capítulo 4.2).

Estas distribuições de tensões em soldas FSpW podem ser mais facilmente visualizadas nos trabalhos de Mazzaferro et. al. [25][26], onde foi feita a simulação em elementos finitos de soldas FSpW da liga AA2024-T3, como mostrado na Figura 70.

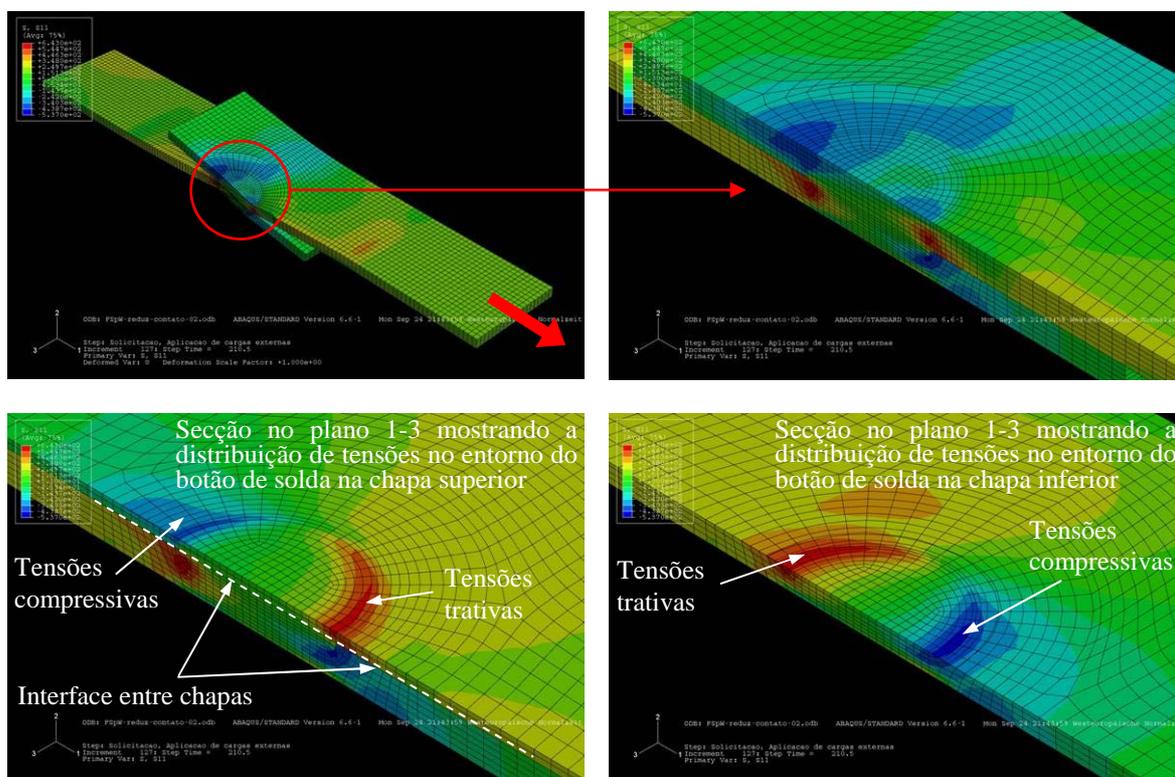


Figura 70. Distribuição de tensões no entorno do botão de solda em junta FSpW da liga AA2024-T3 obtida em elementos finitos. Resultados extraídos de Mazzaferro et. al. [25].

As trincas anular e circunferencial são nucleadas por estes estados tensionais no entorno do botão de solda. A TA é decorrente da flexão imposta sobre a junta e tende a se formar antes da Trinca Circunferencial. Como já explicado ela resulta do rasgamento da União Secundária (US) que, por sua natureza, funciona como uma pré-trinca presente na junta. O rasgamento da US, portanto, tende a ocorrer sob níveis relativamente baixos de sollicitação. Após o rasgamento da US (nucleação da TA), o aumento da sollicitação externa tende a causar a propagação da TA para o interior do botão de solda. O caminho mais provável para o crescimento da TA é ao longo da União Principal (UP). Embora esta seja uma região de forte união entre as chapas, é menos resistente que o material recristalizado (possivelmente solubilizado, precipitado e envelhecido) dentro da ZM, como foi visto nas medições de dureza (ver Figura 61 como exemplo). Na Figura 71 está mostrado um estágio inicial da formação da TA através do rasgamento da União Secundária em uma solda FSpW da liga AA6181-T4 submetida à sollicitação de cisalhamento.

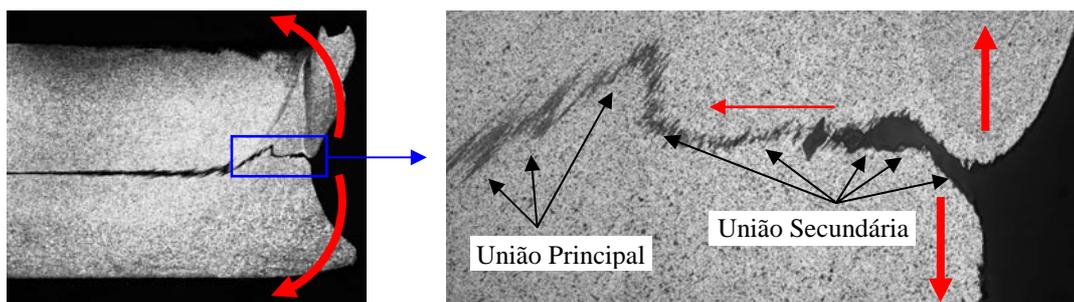


Figura 71. Nucleação de Trinca Anular devido ao rasgamento da União Secundária em solda FSpW da liga AA6181-T4 sob sollicitação de cisalhamento.

Com relação a trinca circunferencial (TC), esta também se origina em locais definidos e previsíveis em ambas as chapas, nos pontos de tensão trativa mostrados na Figura 69b. No caso da chapa superior ela pode nuclear a partir dos defeitos de soldagem (falta de mistura e falta de preenchimento), ou seja, dentro da ZM, ou nuclear na ZTMA a partir do cume da Cunha, como está mostrado na Figura 72. Devido a sua geometria pontiaguda, a Cunha atua como um concentrador de tensão que tende a nuclear a trinca na ZTMA, região de baixa resistência (como foi visto nas medições de dureza), porém de boa tenacidade, característica da liga 6181. É importante notar que a presença de defeitos de soldagem se caracteriza, portanto, como uma pré TC já existente na solda caracterizando deste modo uma situação um tanto severa sob cisalhamento.

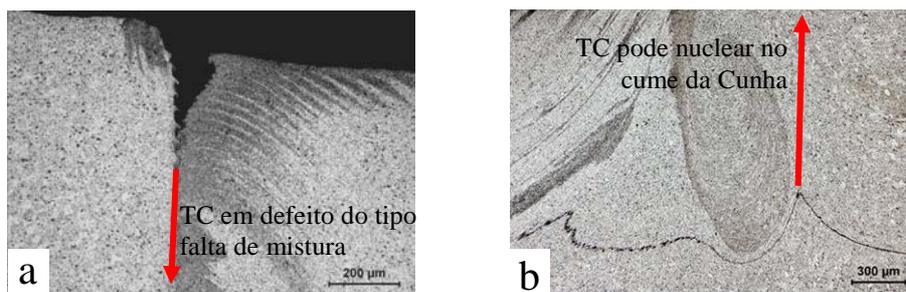


Figura 72. Sítios de nucleação da trinca superficial na chapa superior em soldas FSpW da liga AA6181-T4: (a) em defeito de soldagem e (b) no cume da Cunha.

Na chapa inferior as observações mostraram que a TC pode se formar em três locais: a) na interface entre US e UP, b) na ponta da TA quando esta se propaga ao longo da UP, ou c) na interface entre Cunha e US. É importante destacar que estes locais de nucleação da TC se caracterizam por regiões onde há variação significativa na união (adesão) entre as chapas superior e inferior. A Figura 73 apresenta micrografias mostrando a nucleação da TC na chapa inferior em soldas FSpW da liga AA6181-T4 sob solicitação de cisalhamento.

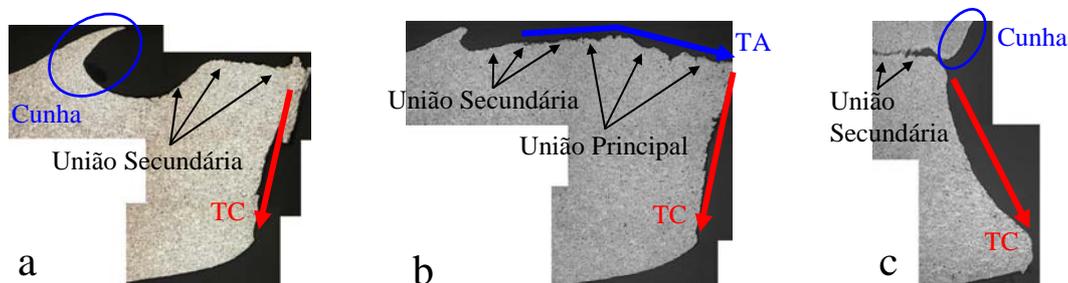


Figura 73. Sítios de nucleação da trinca circunferencial na chapa inferior em soldas FSpW da liga AA6181-T4: (a) interface US/UP, (b) ponta da TA e (c) interface Cunha/US.

A partir dessas observações é possível construir um modelo esquemático da nucleação da TC em solicitações de cisalhamento, como está mostrado na Figura 74. As observações das superfícies de fratura mostraram que a TC sempre inicia no ponto com tensão trativa, independente de nuclear a partir do cume da Cunha ou de defeito de soldagem. Depois de nucleada a TC propaga contornando o botão de solda, como mostrado esquematicamente na Figura 74.

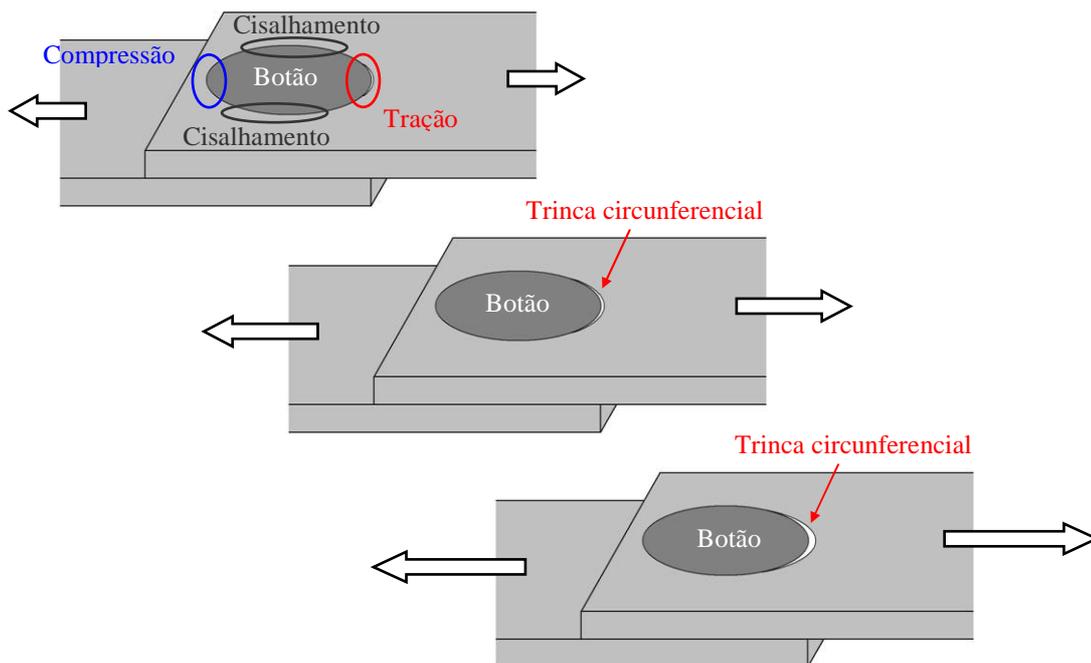


Figura 74. Representação esquemática de uma solda FSpW mostrando o efeito da distribuição de tensões na nucleação de TC na chapa superior. No caso de TC na chapa inferior, ela se forma no lado oposto ao da chapa superior.

A TC quando originada a partir de defeito de soldagem, propaga ao longo do defeito (ou seja, da marca deixada pela camisa da ferramenta durante a soldagem) por uma pequena extensão. A partir de um determinado momento ela “migra”, passando a propagar ao longo da linha da Cunha, no entorno do botão de solda. É importante destacar que isso foi observado para todas as TCs que se formaram a partir de defeitos. Na Figura 75 é mostrada uma amostra que fraturou pelo modo de falha do tipo arrancamento total/botão na chapa inferior, onde é possível observar isso. Este é um modo de falha que se mostrou presente apenas dentre as soldas de baixa qualidade (ver Figura 67) com TC iniciando a partir de defeito, no ponto destacado na figura.

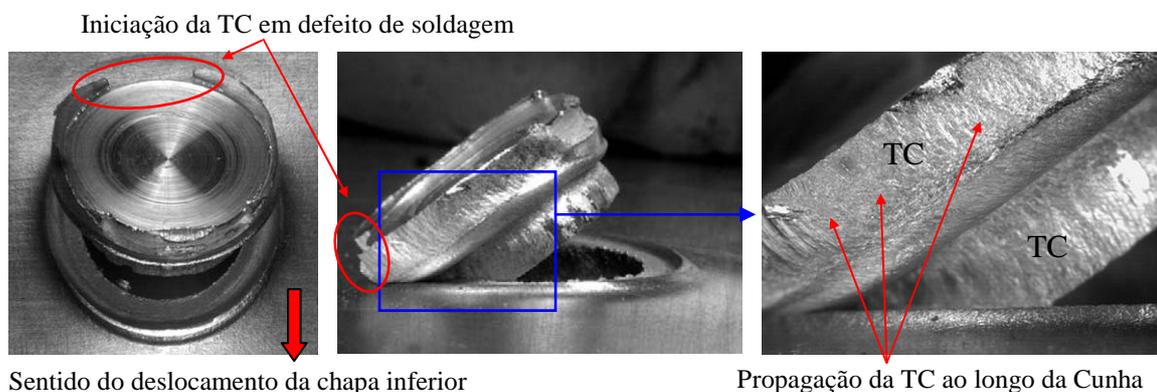


Figura 75. Falha sob cisalhamento mostrando a TC se formando em defeito de soldagem e em seguida propagando ao longo da Cunha.

É importante destacar que para a chapa inferior a distribuição de tensões é inversa à mostrada na Figura 69 (ver simulações de Mazzaferro et. al. na Figura 70). Portanto, nos modos de falha onde ocorrem TC em ambas as chapas, elas iniciam em lados opostos da junta soldada.

Dentre os cinco modos de falha observados nos testes de cisalhamento (ver Figura 68), dois se mostraram diretamente relacionados com a qualidade da solda. O modo de falha do tipo arrancamento total/botão na chapa superior foi observado somente em soldas de bom desempenho mecânico (alta resistência e pouca dispersão). Por outro lado, o modo de falha do tipo arrancamento total/botão na chapa inferior esteve presente apenas dentre as soldas de desempenho mecânico ruim (baixa resistência e muita dispersão). Portanto é importante a análise detalhada destes modos de falha para compreender como se desenvolvem os mecanismos de fratura em soldas de alto e de baixo desempenho mecânico.

- Modo de falha do tipo arrancamento total/botão na chapa superior

Na Figura 76 está mostrada uma fratura do tipo arrancamento total/botão na chapa superior vista em estereoscópio, juntamente com a macrografia da secção transversal de uma solda correspondente, produzida com a condição de soldagem 42 (2400 rpm / 3 s). As linhas tracejadas mostram o local onde foi feito o seccionamento da amostra fraturada para posterior preparação metalográfica. Como já mencionado anteriormente este é um modo de falha encontrado apenas dentre soldas de boa qualidade (alta resistência e pouca dispersão).



Figura 76. Fratura do tipo arrancamento total/botão na chapa superior em solda FSpW da liga AA6181-T4. Solda produzida com 2400 rpm / 3 s.

A Figura 77 mostra detalhes da superfície de fratura vistos com pequeno aumento com auxílio de estereoscópio. Examinando a Figura 77a percebe-se que a TC se originou a partir da Cunha, pois não há marcas de defeitos como roscas da camisa da ferramenta. É possível notar também o aspecto rugoso da superfície da US (Figura 77b), o que indica que esta região impôs uma certa resistência ao rasgamento. O avanço da TA para o interior da solda ao longo da UP também é visível na Figura 77b e Figura 77c. A TC na chapa inferior dá uma idéia de quão pequena estava a secção resistente da junta soldada nos momentos finais da falha.

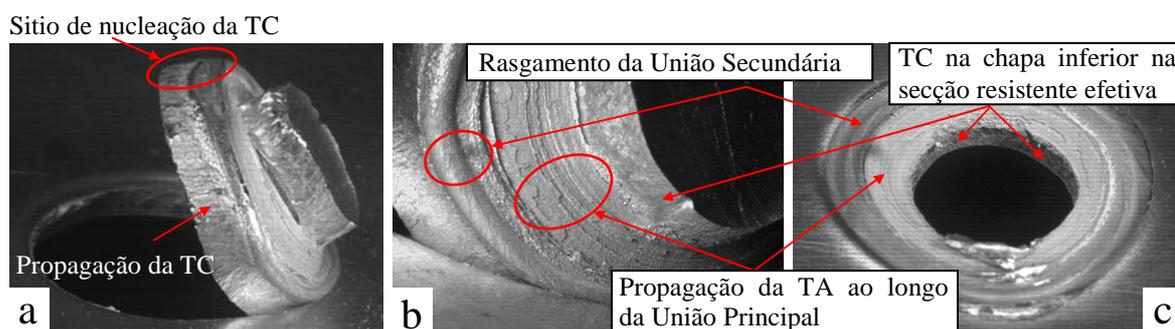


Figura 77. Detalhes da superfície de fratura em modo de falha do tipo arrancamento total/botão na chapa superior. Solda produzida com 2400 rpm / 3 s.

Analisando a secção da amostra fraturada é possível observar alguns detalhes dos micromecanismos envolvidos na falha. A Figura 78 mostra a secção transversal da falha vista em microscópio óptico onde a amostra foi preparada utilizando procedimento metalográfico padrão de lixamento e polimento e atacada com o reagente Flick. As setas indicam o sentido de aplicação do carregamento durante o ensaio de cisalhamento.

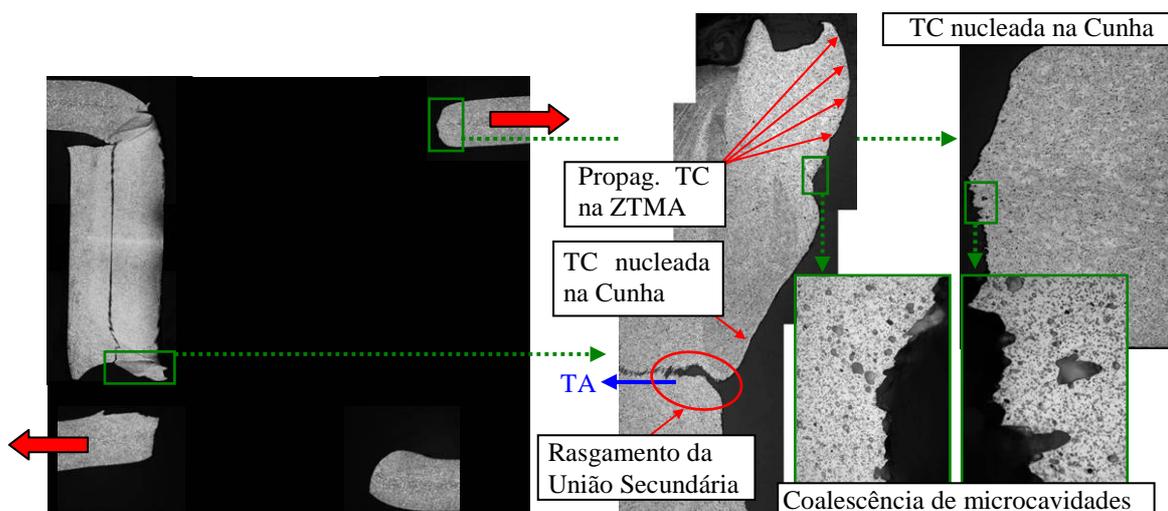


Figura 78. Secção transversal de falha do tipo arrancamento total/botão na chapa superior sob solicitação de cisalhamento mostrando detalhes do desenvolvimento da fratura.

Note que esta amostra foi produzida com tempo de soldagem de 3 s, dentro da faixa otimizada, mostrada na Figura 67. Por não apresentar defeito de soldagem, a TC foi nucleada no cume da Cunha, e propagou ao longo ZTMA até se abrir na superfície superior, como está indicado na Figura 78. A trinca propaga, então, no entorno do botão de solda até removê-lo quase que completamente deixando-o aderido por uma porção pequena de material à chapa superior, ver Figura 77. Nos detalhes de maior aumento da Figura 78 pode-se ver a coalescência de microcavidades (característica de falha ocasionada por sobrecarga de tensão trativa) na parte superior do botão de solda e na chapa superior onde avançou a TC.

Analisando em maior aumento a parte esquerda da amostra é possível ver o aspecto rugoso da superfície de fratura no local onde ocorreu o rasgamento da US (nucleando a TA) na chapa inferior, como mostra a Figura 79. Na chapa superior isto não está visível devido a plastificação do botão de solda neste lado da fratura. Também é notória a TC na chapa inferior que se formou na ponta da TA após esta ter propagado ao longo da UP.

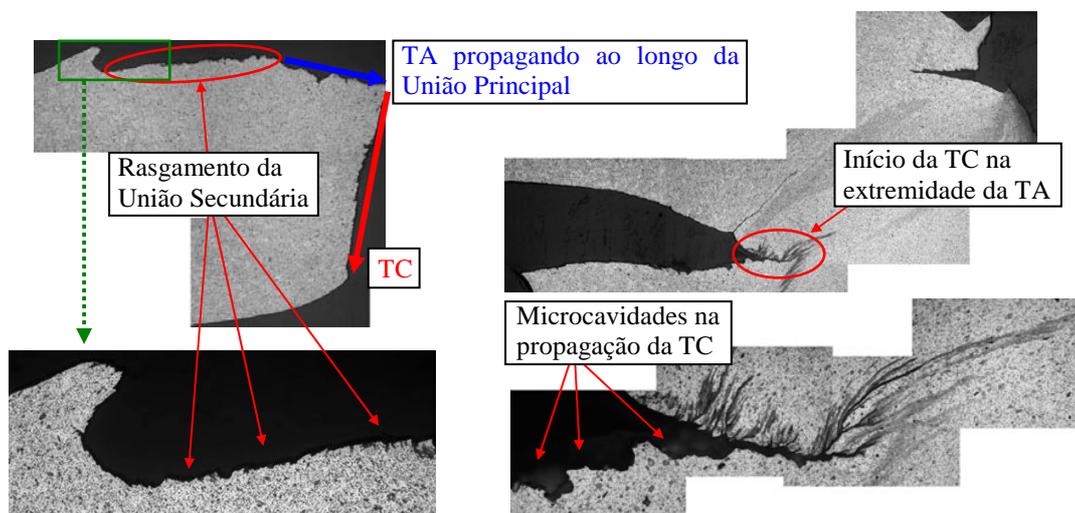


Figura 79. Secção transversal de falha do tipo arrancamento total/botão na chapa superior mostrando o lado esquerdo da junta, local de início do rasgamento da União Secundária e da nucleação da TC na chapa inferior.

É importante destacar o quão resistente se mostrou esta condição de soldagem (2400 rpm / 3 s), com a solda apresentando excelentes propriedades mecânicas e ausência de defeitos de soldagem. Mesmo a US, que é uma região de resistência relativamente baixa

(por ser onde se inicia a união entre as chapas) apresentou uma certa resistência ao rasgamento, dando um aspecto rugoso à superfície de fratura.

A nucleação e propagação da TC na chapa superior demandou um elevado nível de sollicitação o que é evidenciado pela propagação da TA ao longo da UP. Adicionalmente, a UP apresentou alta resistência a ponto de fazer a falha prosseguir através de nucleação e propagação de TC na chapa inferior, a partir da ponta da TA. Isto mostra que a carga aplicada não foi suficiente para fazer a TA varrer completamente a UP. Na Figura 80 está mostrada uma imagem ampliada da parte direita do botão de solda após a fratura. Pode-se ver o rasgamento da US dando origem a TA, nos momentos iniciais da fratura. Ao nuclear a TC e iniciar a sua propagação a carga sobre a União Secundária neste lado diminui de tal modo que não ocorre o rasgamento completo da US neste lado, como mostrado na Figura 80. Note que no lado oposto ao mostrado na Figura 80 a tensão decorrente da flexão sobre o botão (ver Figura 69a) é alta e a TA avança para dentro da solda ao longo da UP.

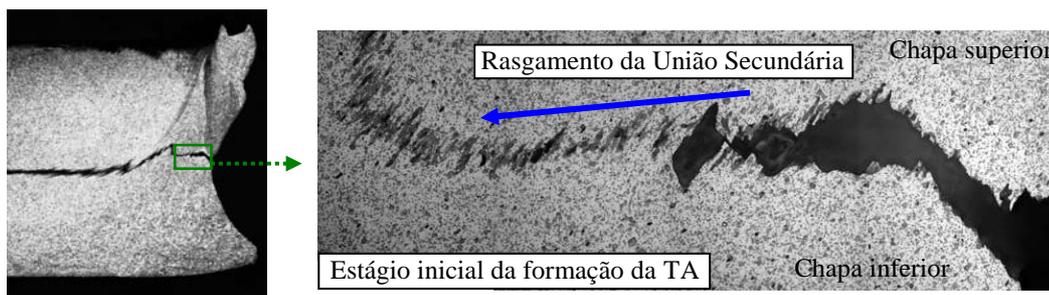


Figura 80. Detalhe do rasgamento da União Secundária nos momentos iniciais em falha do tipo arrancamento total/botão na chapa superior, característico de soldas de alta qualidade.

- Modo de falha do tipo arrancamento total/botão na chapa inferior

O modo de falha do tipo arrancamento total/botão na chapa inferior foi observado apenas dentre as amostras de desempenho ruim, ou seja, baixa resistência mecânica e/ou muita dispersão. A Figura 81 mostra uma amostra fraturada sob cisalhamento produzida com a condição de soldagem 31 (2900 rpm / 2 s), juntamente com a macrografia correspondente desta junta soldada. Note que esta condição de soldagem, devido ao curto tempo de processo, apresenta defeitos de soldagem. Destaca-se que tempos curtos de soldagem significam uma alta velocidade de penetração da camisa da ferramenta sobre a chapa superior. Por conta disso alguns autores apresentaram discussões fazendo um

paralelo dos processos de soldagem por fricção com processos de usinagem e extrusão[63][66][68][79]. Segundo estes autores, alta velocidade de penetração, alta velocidade de rotação e, principalmente, a combinação destas duas, leva a uma taxa de deformação que o material pode não conseguir acompanhar ocorrendo um processo de cisalhamento na fronteira com a ferramenta. Este fenômeno pode ser o responsável pela presença de defeitos nas soldas produzidas com tempos curtos de soldagem (2 a 2,6 s). As linhas tracejadas na Figura 81 indicam o local onde foi feito seccionamento para a posterior preparação metalográfica e análise da fratura em microscópio óptico.



Figura 81. Fratura do tipo arrancamento total/botão na chapa inferior sob solicitação de cisalhamento. Solda produzida com 2900 rpm / 2 s.

Observando a amostra fraturada com auxílio de estereoscópio, detalhes importantes a respeito dos mecanismos de fratura são visíveis. A TC na chapa superior é nucleada a partir de defeito de soldagem no lado de tensão trativa da junta, ver Figura 82a. Marcas da ferramenta são visíveis em ambos os lados do botão de solda, como mostra a Figura 82c (lado inicialmente compressivo mas que muda para trativo na medida em que o botão de solda vai se deformando durante o desenvolvimento da falha, ver Figura 69a). Também é notório o aspecto liso da superfície de fratura no local onde ocorreu o rasgamento da US (Figura 82b) indicando que a adesão entre as chapas superior e inferior era fraca nesta região.

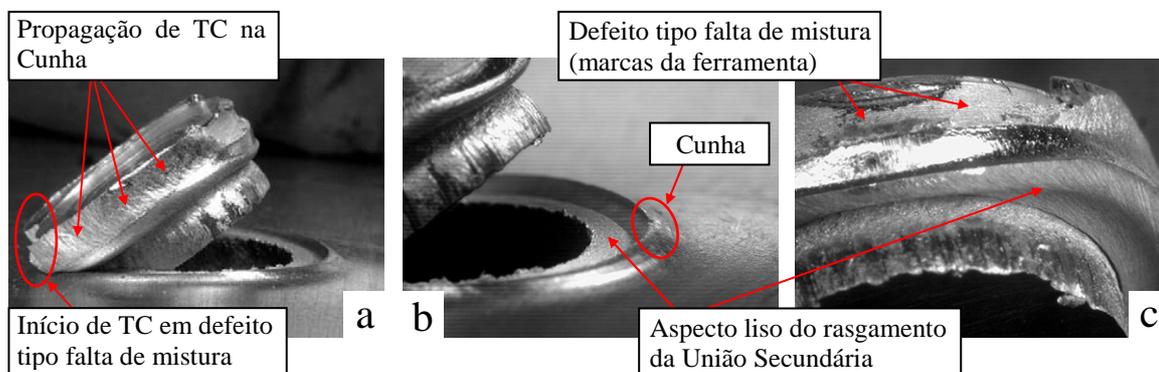


Figura 82. Detalhes da superfície de fratura em modo de falha do tipo arrancamento total/botão na chapa inferior em solda FSpW da liga AA6181-T4.

Na Figura 83 está mostrada a secção transversal da fratura, nos locais demarcados na Figura 81. As setas indicam a direção de deslocamento das chapas superior e inferior durante o ensaio de cisalhamento. Detalhes dos micromecanismos de fratura são visíveis, como o local do início da TC na chapa superior a partir de defeito de soldagem. Note que a presença de defeito reduz a secção resistente à tensão trativa na chapa superior, fazendo com que a TC se inicie por sobrecarga de tração o que é evidenciado pela presença de coalescência de microcavidades na superfície, ver Figura 83. A Cunha, por se apresentar mais “doce” não é um forte concentrador tensão e não tem efeito sobre a nucleação da TC. Após iniciar, a TC propaga pouco pelo defeito de soldagem e em seguida passa a propagar pela linha da Cunha como pode ser visto na Figura 82a.

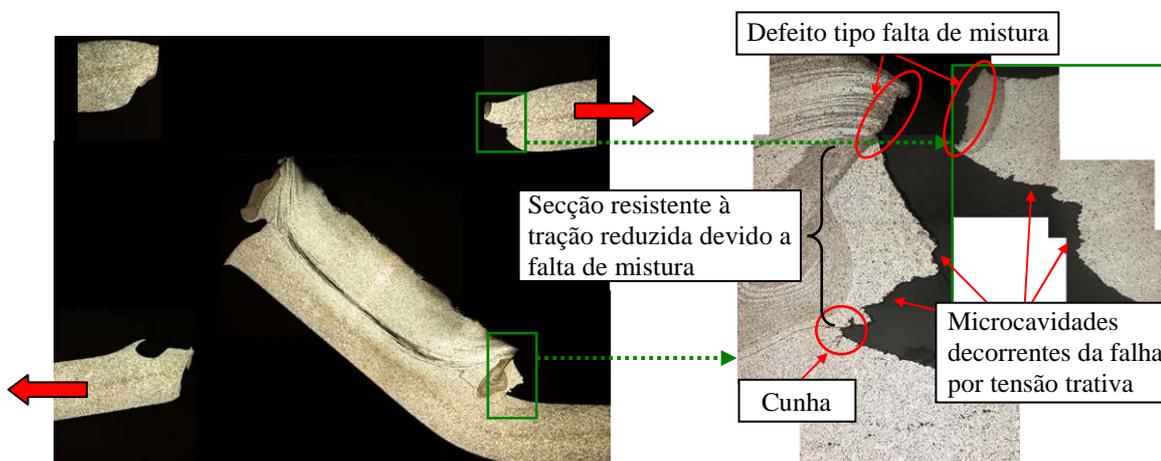


Figura 83. Secção transversal de falha do tipo arrancamento total/botão na chapa inferior em solda FSpW da liga AA6181-T4 sob solicitação de cisalhamento mostrando detalhes do desenvolvimento da fratura.

Notório neste tipo de falha (e também em outras falhas de soldas de baixo desempenho mecânico) é o aspecto liso da superfície no local onde ocorreu o rasgamento da US, como foi mostrado na Figura 82b e Figura 82c. A Figura 84 mostra, em maior aumento, o rasgamento da US, que caracteriza a TA. A superfície tem um aspecto tão liso que parece que não houve rasgamento mas sim uma simples separação das chapas, sem impor resistência à carga aplicada.

Também está visível na Figura 84 o local de início da TC na chapa inferior, na interface entre US e UP. É importante notar que falhas do tipo arrancamento total sugerem uma UP bastante resistente (como no caso discutido anteriormente), o que, numa primeira análise, não seria esperado em soldas produzidas com tempos curtos de soldagem, como

neste caso (2 s). Porém os resultados mostraram que o nível de tensões sobre a UP foi baixo. A presença de defeito de soldagem levou à fácil nucleação da TC na chapa superior e a US de fraca adesão (aspecto liso) levou à fácil nucleação da TA. Deste modo a falha progrediu facilmente por estas regiões sem necessidade de níveis elevados de tensão sobre a UP. Adicionalmente, a transição abrupta entre a US e a UP (ver Figura 81) e a diferença de propriedades (adesão) entre elas, explicam a formação da TC na chapa inferior exatamente na interface entre as duas regiões, como mostra a Figura 84.

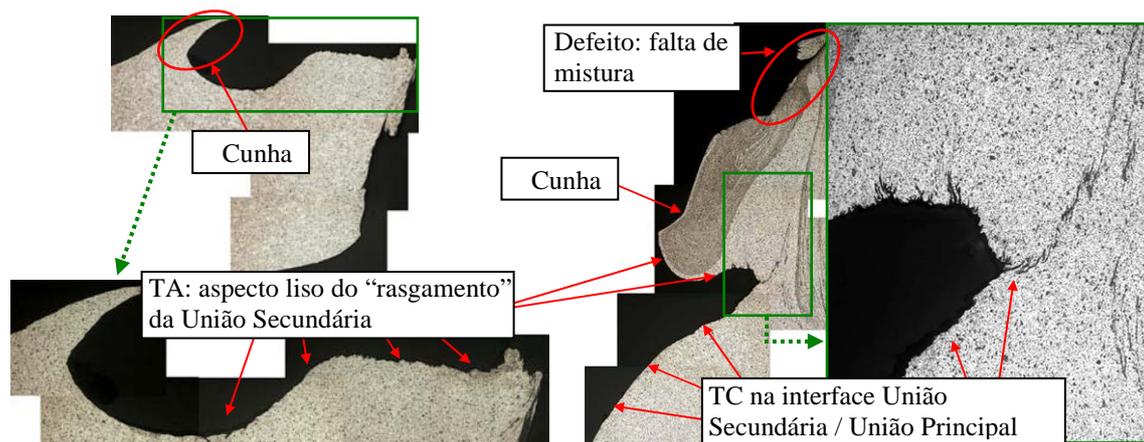


Figura 84. Seção transversal de falha do tipo arrancamento total/botão na chapa inferior mostrando o lado esquerdo da junta, local de início da TC na chapa inferior.

As análises desses dois modos de falha mostram que modos de falha semelhantes, têm em sua origem mecanismos de fratura distintos, que explicam a diferença no comportamento mecânico dentre as condições de soldagem investigadas. Na Figura 85 estão mostradas as curvas carregamento x deslocamento medidas nos ensaios de cisalhamento das soldas produzidas com as condições de soldagem 42 e 31, acima detalhadas. É importante destacar quão dúctil é o comportamento das soldas produzidas com a condição 42 em comparação com a condição 31.

É importante destacar também os resultados obtidos na análise do modo de falha do tipo interfacial. Este modo de falha é normalmente rejeitado pelo controle de qualidade em soldas ponto por resistência elétrica por estar associado com fratura frágil [68][71]. Contudo, neste trabalho verificou-se que isto não é de todo válido para o processo de soldagem FSpW onde este modo de falha pode vir acompanhado de alta resistência e alta ductilidade. A alta ductilidade é decorrente do desenvolvimento da TC e da propagação da TA ao longo da UP antes da falha final da junta soldada.

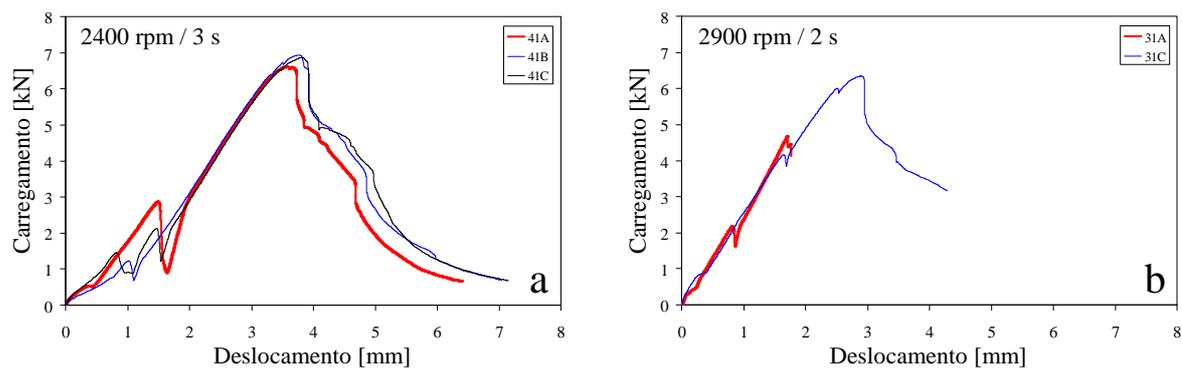


Figura 85. Curvas de resistência mecânica x deslocamento para as condições de soldagem: (a) 42 (1900 rpm / 3 s) e (b) 31 (2900 rpm / 2 s).

A Figura 86 mostra as superfícies de fratura da chapa superior e inferior, juntamente com a secção transversal de uma solda produzida com a condição de soldagem 33 (1900 rpm / 2 s), que apresentou este modo de falha.

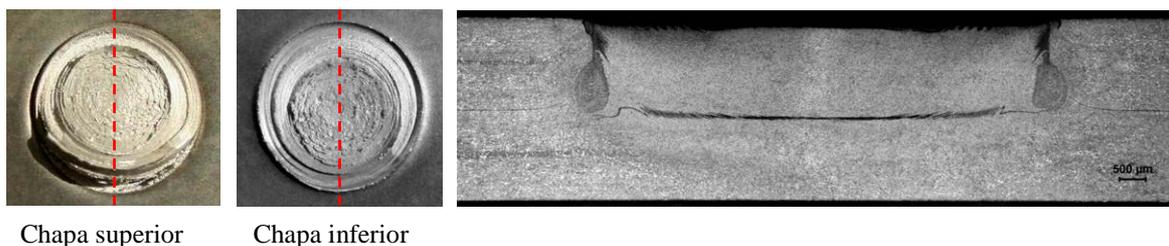


Figura 86. Fratura do tipo interfacial com trinca circunferencial sob solicitação de cisalhamento. Solda produzida com 1900 rpm / 2 s.

Na Figura 87 está mostrada a macrografia da secção transversal da junta fraturada, juntamente com as indicações do carregamento imposto sobre o botão de solda. É visível que a falha interfacial ocorreu ao longo da UP e também é visível a TC na chapa superior, nucleada em defeito de soldagem.

Apesar da existência de defeito nesta condição de soldagem (característico de tempos curtos de soldagem) a falha não foi governada pela propagação de TC, como seria o esperado nestas circunstâncias. Isto é explicado pela baixa rotação desta condição de soldagem o que tende a ser menos agressivo ao material, melhorando as propriedades junto ao defeito. Adiciona-se a isto a Cunha de baixa agudidade (favorecida pela baixa rotação e

tempo curto de soldagem, ver Figura 66) o que dificulta a propagação da TC ao longo da linha da Cunha.

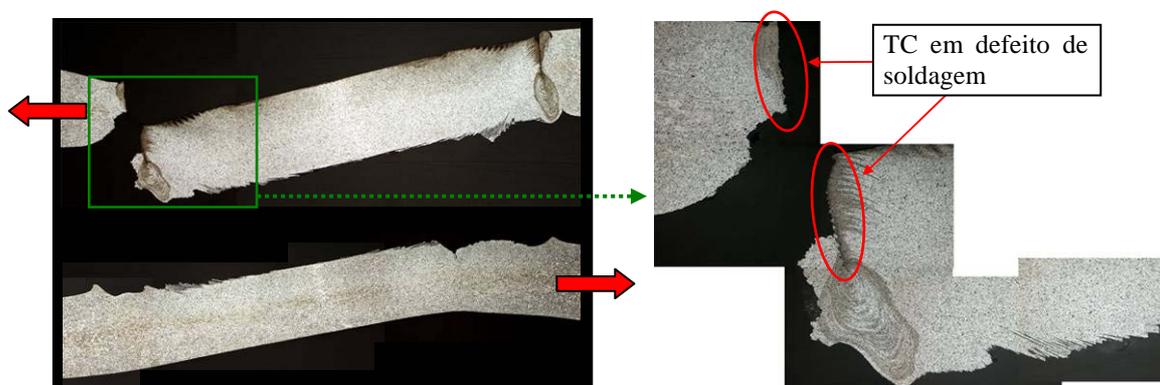


Figura 87. Secção transversal de falha do tipo interfacial com trinca circumferencial sob solicitação de cisalhamento mostrando detalhes do desenvolvimento da fratura.

A Figura 88 mostra a superfície de fratura em detalhe onde é notória a propagação da TC apenas até a porção lateral do botão de solda, onde predominam tensões de cisalhamento (ver Figura 69). A linha tracejada na Figura 88 indica os limites da secção resistente ao final da falha. Juntamente é mostrado o gráfico carregamento x deslocamento medido no ensaio.

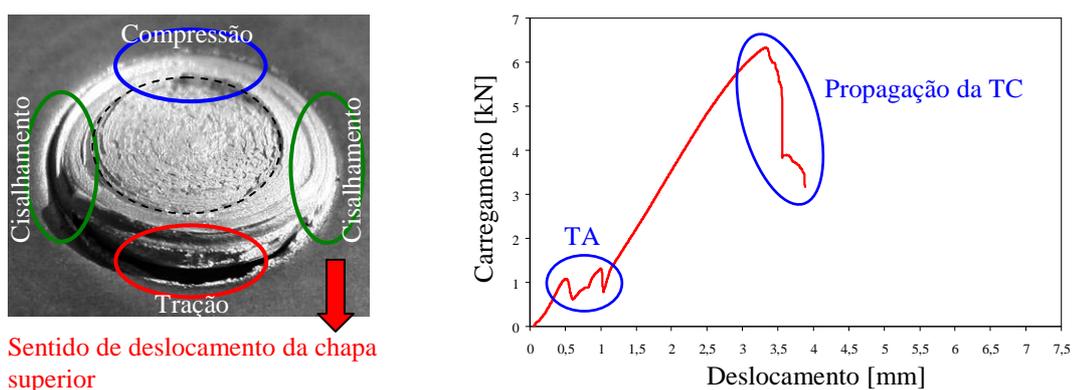


Figura 88. Detalhe da superfície de fratura em falha interfacial com trinca circumferencial com respectivo gráfico carregamento x alongamento medido no ensaio de cisalhamento.

A baixa rotação da ferramenta utilizada nesta condição de soldagem também favoreceu a boa formação da US e da UP, conferindo uma boa adesão entre as chapas

superior e inferior nestas regiões. Na Figura 89 está mostrado o rasgamento da US em detalhe, caracterizando o início da TA. Note o aspecto rugoso e ondulado da superfície indicando que a US impôs resistência à separação das chapas. Destaca-se que esta aparência rugosa da superfície do rasgamento da US é característica de soldas produzidas com baixas rotações.



Figura 89. Detalhe do rasgamento da União Secundária em fratura interfacial com trinca circunferencial em ensaio de cisalhamento. (1900 rpm / 2 s).

A Figura 90 mostra detalhes da TA que se origina com o rasgamento da US e, posteriormente, se propaga ao longo da UP. Note que em alguns pontos (setas brancas) a TA se propaga pelo material da ZM, o que indica uma boa resistência imposta tanto pela UP como pela US nesta condição de soldagem.

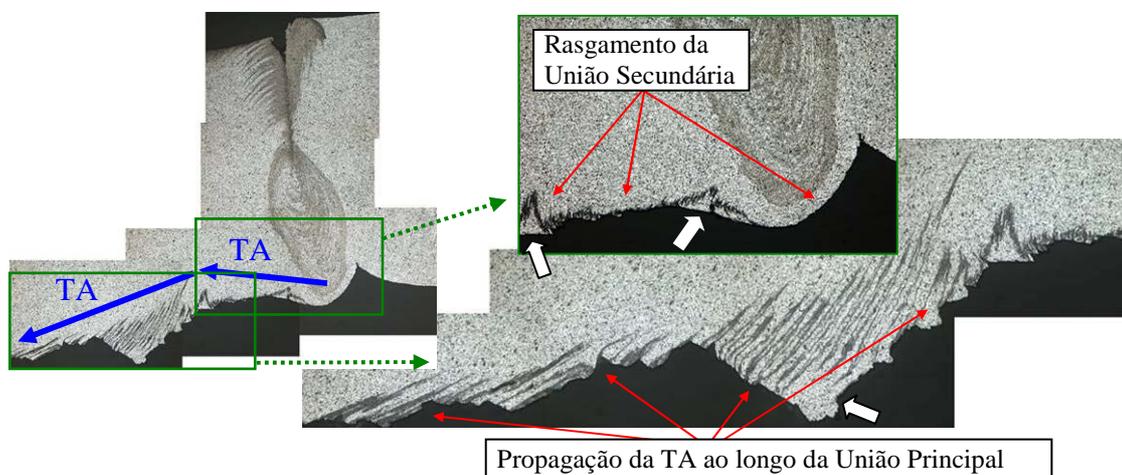


Figura 90. Detalhe da nucleação da TA através do rasgamento da União Secundária e sua propagação ao longo da União Principal.

Ainda é importante destacar a inexistência de TC na chapa inferior, o que se atribui à boa adesão entre as chapas na US. Como foi mostrado anteriormente, a transição e a diferença de propriedades entre US e UP é fator favorável à nucleação de TC na chapa inferior. Observe na Figura 86 a transição uniforme entre US e UP.

Estes resultados indicam ainda que a propagação da TA ao longo da UP demanda maiores níveis de carregamento e energia nas porções mais externas do botão de solda devido a sua geometria em forma de sanfona (acentuada em baixas rotações). Acredita-se que esta morfologia tende a conferir um certo ancoramento mecânico entre as chapas superior e inferior além do metalúrgico, exatamente num ponto crítico que é a ponta da TA (após o rasgamento da US). Daí a boa resistência mecânica apresentada por esta amostra da condição 33 (1900 rpm / 2 s). Quando a TA varre completamente a região em forma de sanfona, a UP remanescente é insuficiente para suportar o carregamento e tem-se a falha final da junta soldada. A Figura 91 mostra esta região em forma de sanfona em uma macrografia correspondente a esta amostra fraturada, juntamente com um detalhe da propagação da TA nesta porção da UP. Note o aspecto ondulado da TA ao longo da porção em forma de sanfona da UP que acredita-se fornecer um ancoramento mecânico à junta.

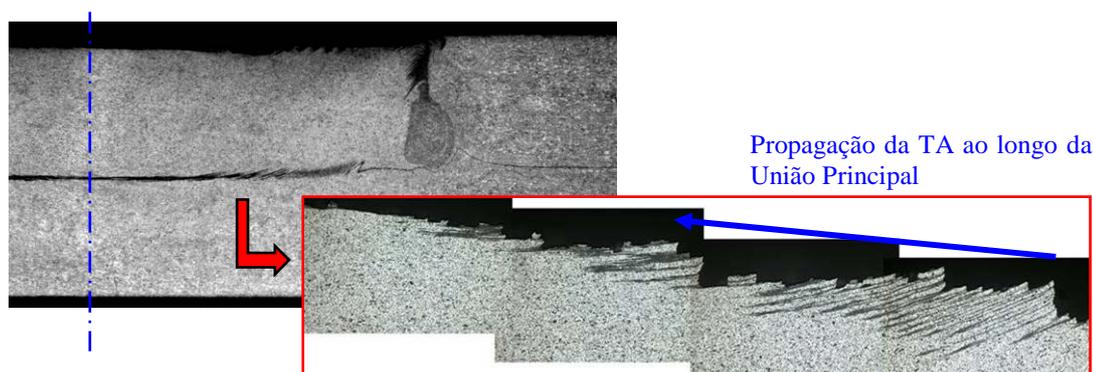


Figura 91. Detalhe da propagação da TA ao longo da União Principal em solda produzida com a condição de soldagem 33 (1900 rpm / 2 s).

Uma significativa parcela da absorção de energia durante a falha também é atribuída à propagação da TC no entorno do botão de solda (ver Figura 88) e também à propagação da TA ao longo da UP. Os benefícios do desenvolvimento (nucleação e propagação) destas duas trincas se tornam ainda mais evidentes através da comparação com outras condições de soldagem que levaram a modo de falha semelhante. No anexo A.2 estão mostrados detalhes da fratura interfacial em uma condição de soldagem produzida com parâmetros diferentes daqueles estudados neste trabalho. Lá, a UP, por ser de elevada resistência, não permitiu a propagação da TA, ao passo que as condições no entorno do botão de solda também não favoreceram a formação de TC. O resultado é uma solda de alta resistência, porém de comportamento extremamente frágil.

Um comportamento ainda melhor que este mostrado pela condição de soldagem 33 (1900 rpm / 2 s) foi observado pela amostra da condição 42 (1900 rpm / 3 s) que também falhou por fratura interfacial, como está mostrado na Figura 92. A ausência de defeitos de soldagem proporcionada pelo tempo moderado de processo (3 s) e a baixa rotação (1900 rpm) forçou a nucleação da TC a partir da Cunha o que demandou elevado nível de sollicitação. Somaram-se a isto as excelentes propriedades mecânicas da US e UP (também proporcionadas pelos parâmetros de processo) que promoveram a propagação da TA para dentro do botão de solda até a secção resistente se tornar muito pequena. Note que não é visível a secção onde ocorreu a falha final na Figura 92.

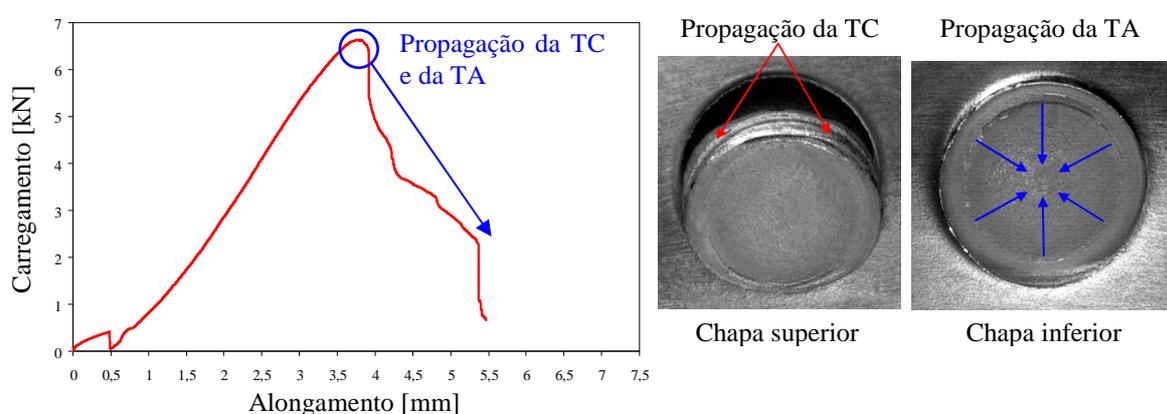


Figura 92. Fratura interfacial sob sollicitação de cisalhamento em amostra de solda produzida com a condição de soldagem 42 (1900 rpm / 3 s).

#### 5.4 Resistência mecânica sob sollicitação monotônica de tração

A resistência mecânica medida com o ensaio de tração não mostrou uma disparidade grande de resultados como no caso do ensaio de cisalhamento. Desta forma, não houveram condições de soldagem que se destacassem notoriamente sobre as outras em termos de resistência mecânica e dispersão dos resultados. A Figura 93 mostra novamente os resultados obtidos no ensaio de tração juntamente com as condições de soldagem, indicando os parâmetros de processo para uma melhor visualização dos resultados.

A resistência sob tração é consideravelmente mais baixa em comparação com a resistência medida nos ensaios de cisalhamento, o que é esperado dada a severidade deste tipo de sollicitação. Percebe-se um certo benefício da velocidade de rotação intermediária (2400 rpm) em todos os tempos de soldagem, ainda mais notório no tempo de 3 s. Note ainda que no ensaio de tração não foram testadas amostras com 3,4 s.

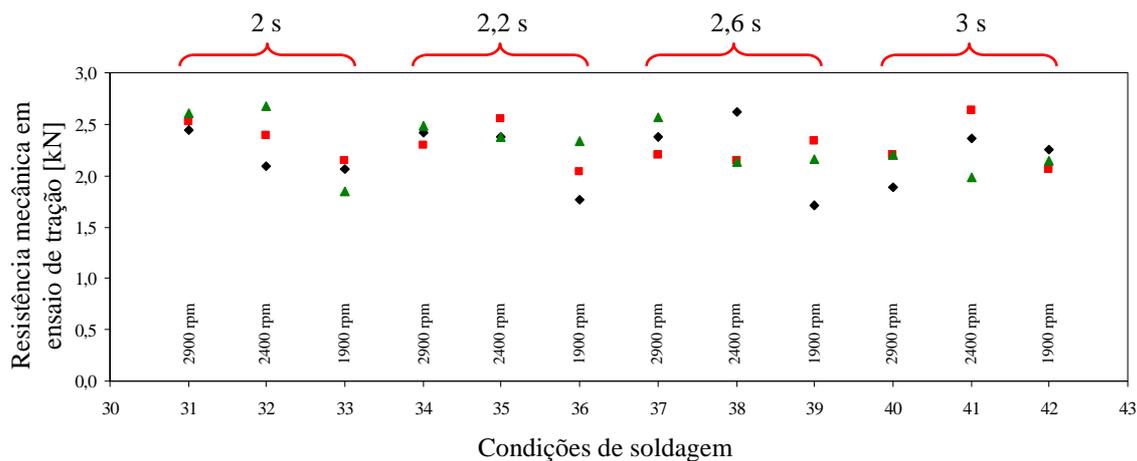


Figura 93. Resistência mecânica sob sollicitação de tração das soldas FSpW da liga AA6181-T4.

Como mostrado anteriormente na Figura 47, seis modos de falha foram observados sob sollicitação de tração. A Figura 94 mostrada esses modos de falha novamente, identificando também as trincas circunferencial (TC) e anular (TA) em cada um. Note que neste caso de sollicitação trativa foram observados três modos de falha inexistentes no caso de sollicitação por cisalhamento. Um deles é o modo de falha do tipo interfacial simples, ou seja, sem a ocorrência de TC. Tem-se, também, o modo de falha denominado arrancamento parcial simples em que não ocorre TA. E ainda há o arrancamento parcial invertido onde a falha se desenvolve totalmente na chapa inferior. Por fim, também diferentemente da condição de cisalhamento, o modo de falha do tipo arrancamento total apresentou uma única variante, com o botão de solda sempre aderido à chapa superior ao final da falha.

Como já mencionado anteriormente, em soldas ponto produzidas por resistência elétrica rejeitam-se condições de soldagem que apresentam fratura do tipo interfacial [71]. Já para soldas FSpW, esta premissa não foi válida para sollicitação de tração assim como no caso de sollicitação por cisalhamento, como será abordado mais adiante. Por outro lado, falhas do tipo arrancamento parcial que, em primeira mão, poderiam sugerir uma solda de alta qualidade, podem ser facilmente induzidas por defeitos de soldagem. Como já visto anteriormente, defeitos de soldagem caracterizam uma TC pré-existente no entorno do botão de solda que pode facilmente se propagar quando da aplicação de uma carga externa sobre a junta.

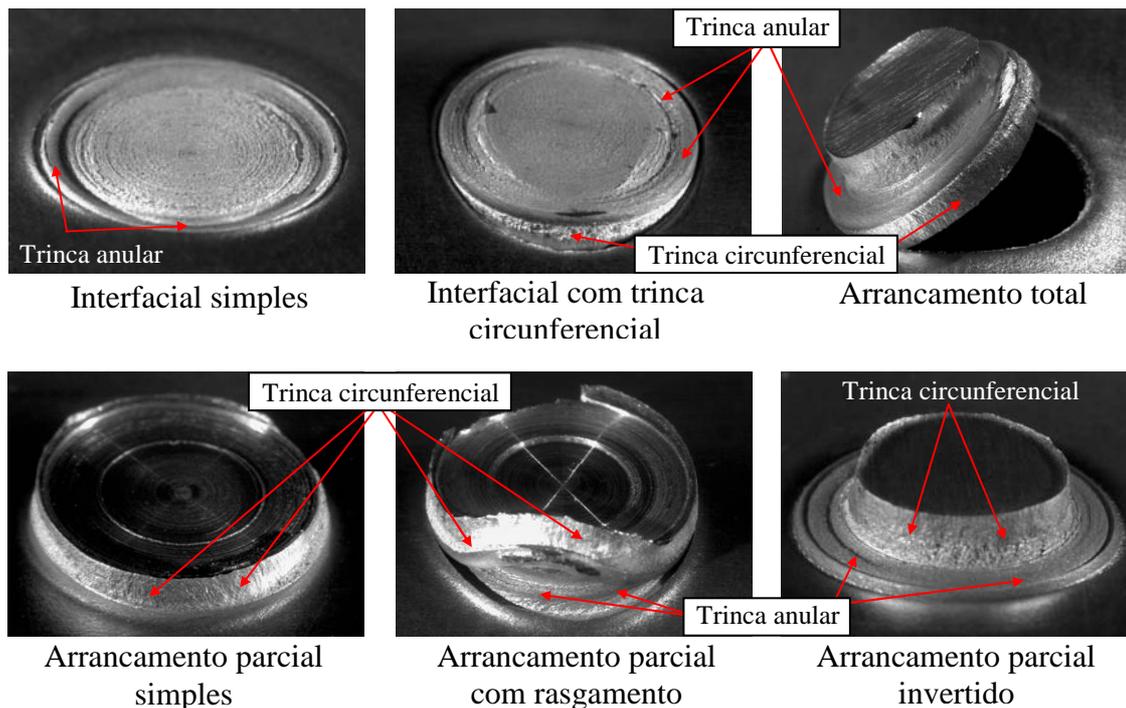


Figura 94. Modos de falha observados nos ensaios de tração da liga AA6181-T4, mostrando as trincas anular e circunferencial.

A Figura 95 mostra uma fratura desse tipo (arrancamento parcial) em uma amostra soldada com a condição de soldagem 33 (1900 rpm / 2 s). As setas indicam a direção e o sentido de aplicação da carga nas chapas superior e inferior.

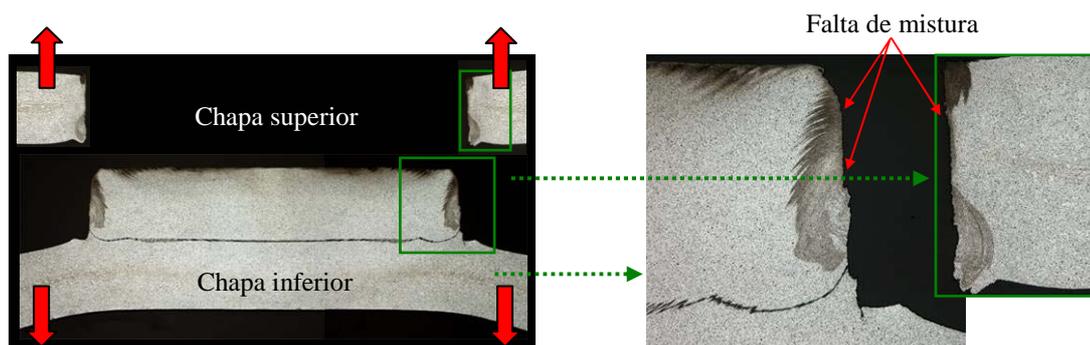


Figura 95. Secção transversal de falha do tipo arrancamento parcial simples sob sollicitação de tração mostrando o desenvolvimento da TC a partir de defeito de soldagem. Condição de soldagem 33 (1900 rpm / 2 s).

Destaca-se que não ocorreu rasgamento da União Secundária (US) caracterizando, desta maneira, uma falha que foi denominada de arrancamento parcial simples. Isto está

associado à baixa rotação utilizada nesta condição de soldagem que favorece uma US com boa adesão e uma transição suave entre a US e a União Principal (UP). Desta maneira, se fosse atingido um nível de carregamento suficiente para promover o rasgamento da US, o que se verificaria seria a falha abrupta da junta por falha interfacial. Esta idéia é reforçada com o fato das outras duas amostras soldadas com esta combinação de parâmetros (1900 rpm / 2 s) terem falhado por fratura interfacial.

A Figura 96 mostra as curvas carregamento x alongamento para as três amostras produzidas com a condição de soldagem 33 (1900 rpm / 2 s). Pode-se ver que a resistência mecânica e a absorção de energia são praticamente idênticas para as três amostras sendo que uma falhou por arrancamento parcial simples e duas por fratura interfacial simples.

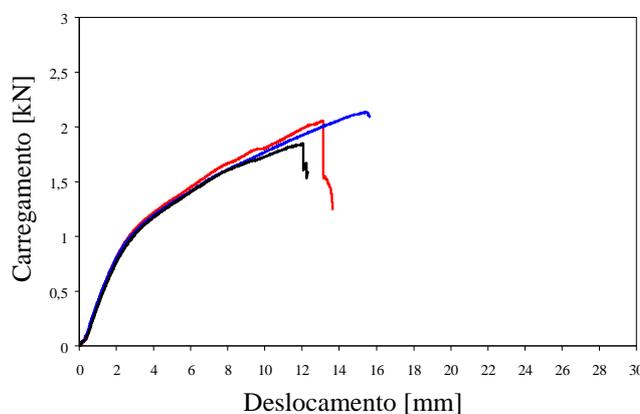


Figura 96. Gráficos carregamento x alongamento obtidos em ensaio de tração de soldas produzidas com a condição de soldagem 33 (1900 rpm / 2 s).

Este resultado mostra que modos de falha diferentes podem levar a desempenho mecânico semelhante. Isto vem a fortalecer o já evidenciado no caso de solicitação de cisalhamento, que são os mecanismos de fratura, e não os modos de falha, que vão definir o desempenho final da junta soldada.

É importante destacar que com tempo de soldagem mais longo e velocidade de rotação mais lenta, como no caso da condição 36 (1900 rpm / 2,2 s), as propriedades (adesão entre chapas) na US e na UP se tornam melhores e os defeitos de soldagem diminuem. Também ocorre um aumento da diferença da resistência entre US e UP, sendo a UP mais resistente. É importante lembrar que para velocidade de rotação menor, a US adquire melhores propriedades e a diferença de resistência entre US e UP se torna menor, mas ainda assim, de relevância. Neste contexto, tomando como exemplo a condição de

soldagem 34 (2900 rpm / 2,2 s), o tempo de soldagem mais lento (2,2 s) contribuiu para a diminuição dos defeitos de soldagem que, embora existentes, são menos evidentes que na condição 33 (1900 rpm / 2 s). Desta-se que defeitos de soldagem estão associados com tempos curtos de soldagem, sendo minimamente afetados pela velocidade de rotação. Desta maneira os defeitos não mais favorecem ao desenvolvimento da TC na chapa superior. Por outro lado, a alta velocidade de rotação (2900 rpm) contribuiu para uma transição brusca entre US e UP, o que é notório na macrografia desta região, como mostra a Figura 97a. A diferença de propriedades entre US e UP se torna maior na condição de soldagem 34 (2900 rpm / 2,2 s). O maior tempo de soldagem (em comparação com a condição 33) confere maior resistência à US na condição 34, que consegue suportar maiores níveis de carregamento. Isto promove o rasgamento da US e o carregamento continua a se intensificar até o momento em que uma TC se forma na chapa superior a partir do cume da Cunha. Desta maneira verifica-se um modo de falha do tipo arrancamento parcial com rasgamento.

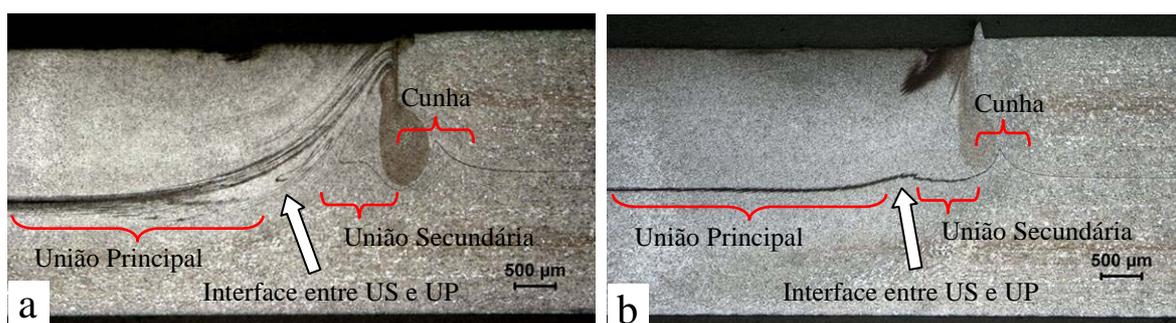


Figura 97. Transição entre União Secundária e União Principal para diferentes condições de soldagem: (a) 34 (2900 rpm / 2,2 s) e (b) 42 (1900 rpm / 3 s).

É importante notar que a deformação da junta em decorrência do rasgamento da União Secundária tende a intensificar ainda mais o nível de tensão no entorno da Cunha favorecendo, assim, a nucleação da TC neste ponto.

Em soldas produzidas com tempos de soldagem ainda mais longos como na condição 42 (1900 rpm / 3 s), por exemplo, as propriedades da US e da UP são significativamente melhores de tal modo que o rasgamento da US, quando presente, é bem menos expressivo. Adicionalmente, a baixa velocidade de rotação (1900 rpm) utilizada na condição de soldagem 42 torna mais suave a transição entre US e UP, como mostra a Figura 97b. Desta maneira a diferença de propriedades entre estas duas regiões se torna

menos abrupta o que, adicionalmente às boas propriedades da US (baixa rotação), dificulta o seu rasgamento. O resultado é uma falha do tipo arrancamento parcial simples (sem TA), como está mostrado na Figura 98. A Figura 98 mostra a secção transversal das fraturas de amostras produzidas com as condições de soldagem 34 (2900 rpm / 2,2 s) e 42 (1900 rpm / 3 s). Note a diferença da transição entre US e UP nas duas amostras.

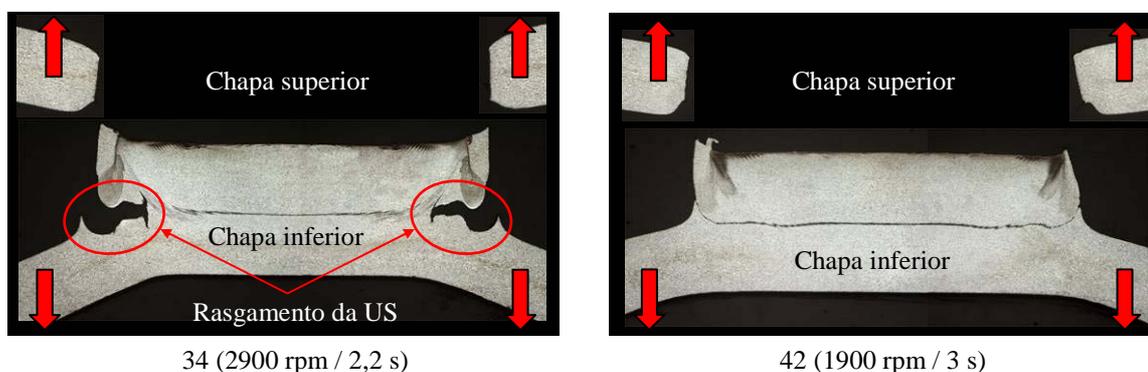


Figura 98. Secção transversal de falhas por arrancamento parcial com rasgamento (34 - 2900 rpm / 2,2 s) e simples (42 - 1900 rpm / 3 s) sob solicitação de tração.

A Figura 99 mostra detalhes destes dois modos de falha. Em ambos os casos é notória a nucleação da TC a partir do cume da Cunha. Note o rasgamento da US na amostra 34 (Figura 99a), cuja superfície apresenta um aspecto liso, indicando que não houve muita resistência ao rasgamento (típico de soldas produzidas com alta rotação). Na condição 42 (Figura 99b) não há rasgamento da União Secundária, apenas um pequeno início de rasgamento no entorno do cume da Cunha. Em ambos os casos a falha foi ditada pela formação da TC na chapa superior.

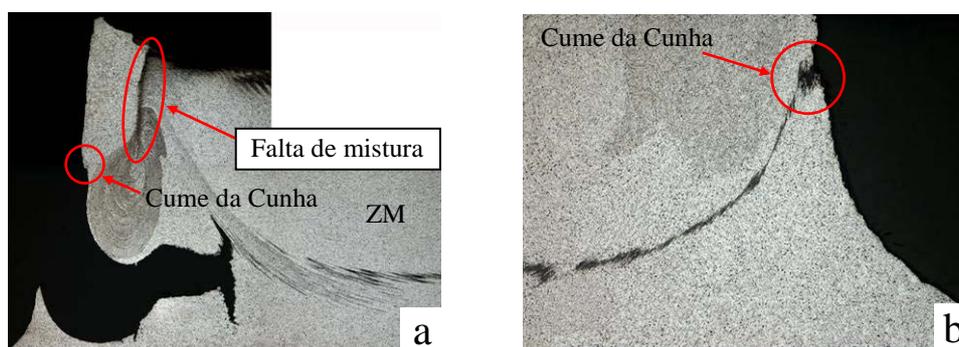


Figura 99. Detalhes dos modos de falha do tipo arrancamento parcial: (a) com rasgamento (34 - 2900 rpm / 2,2 s) e (b) simples (42 - 1900 rpm / 3 s).

Na Figura 100 estão mostradas as curvas carregamento x alongamento das condições 33 (1900 rpm / 2 s), 34 (2900 rpm / 2,2 s) e 42 (1900 rpm / 3 s). Note que na

condição 33 a falha é ditada pelo desenvolvimento da TC a partir de defeito de soldagem. Como resultado a resistência mecânica e a tenacidade são mais baixas para esta condição de soldagem. Nas condições 34 e 42, a TC se desenvolveu a partir da Cunha, ou seja, se propagou através da ZTMA onde a dureza é baixa (e a tenacidade é maior) o que resulta em maior resistência mecânica e num comportamento mais tenaz da junta soldada. Note que, apesar das diferenças nos parâmetros de processo entre as condições 34 e 42, o desempenho mecânico em tração foi muito semelhante. Com efeito, o rasgamento da US concedeu uma certa vantagem em termos de tenacidade à condição 34.

Estas observações mostram que a solicitação de tração é mais tolerante à presença de defeitos de soldagem do que a solicitação de cisalhamento. Como discutido anteriormente, em cisalhamento a natureza da distribuição de tensões promove a fácil nucleação e crescimento da TC a partir dos defeitos de soldagem, resultando em baixo desempenho mecânico. Já no caso de solicitação trativa a distribuição de tensões no entorno do botão de solda é diferente, ver Figura 101.

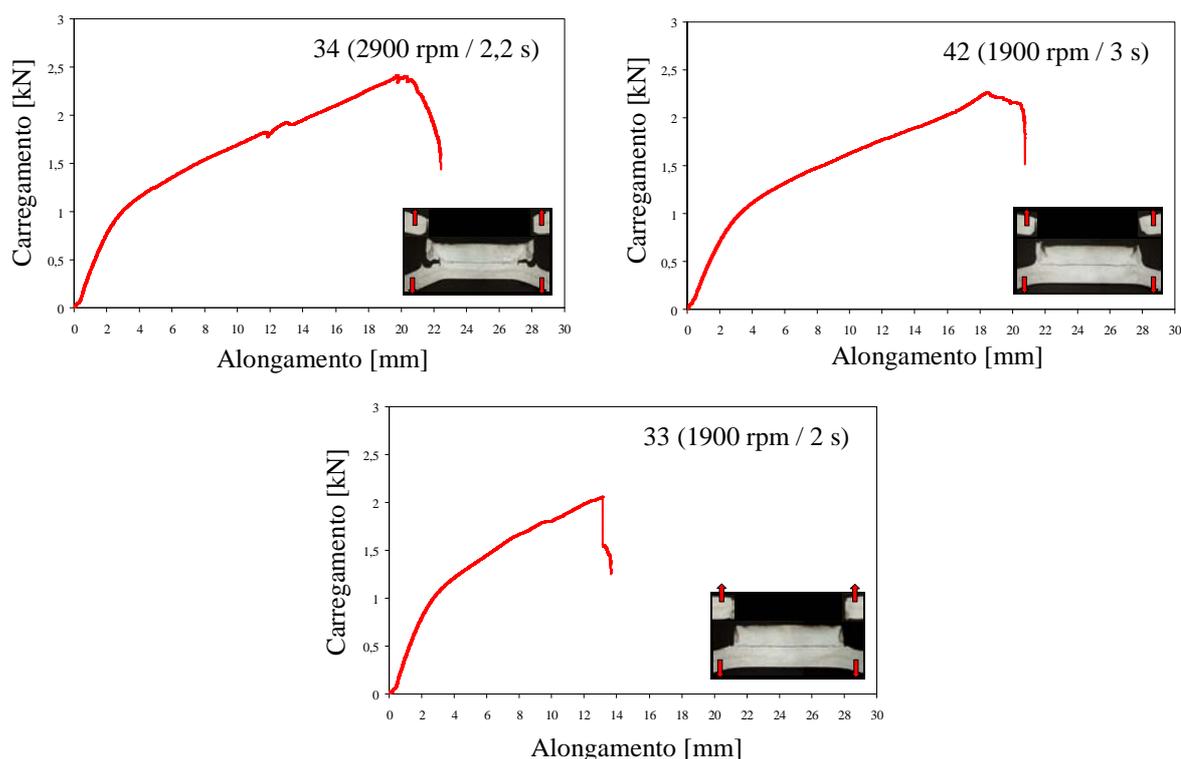


Figura 100. Comparação do desempenho mecânico dentre condições de soldagem que apresentaram falha do tipo arrancamento parcial.

A Figura 101 mostra a distribuição de tensões no entorno do botão de solda para o caso de solicitação de tração. Note as tensões compressivas na superfície superior da junta, enquanto na interface entre as chapas há um estado trativo de tensões.

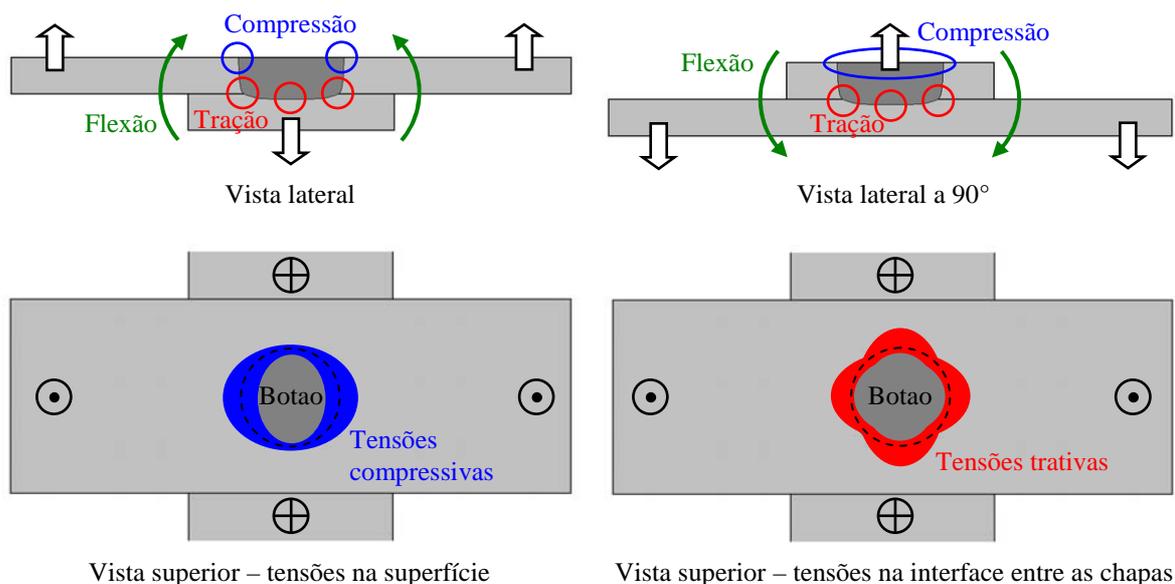


Figura 101. Distribuição de tensões no entorno do botão de solda sob solicitação de tração.

Nas regiões adjacentes ao botão de solda, na chapa superior, tem-se tensões compressivas o que explica a “tolerância” da solicitação por tração quanto à presença de defeitos de soldagem. O padrão da distribuição de tensões trativas na interface entre as chapas, ver Figura 101, é responsável por não uniformidades na superfície de fratura em algumas amostras, o que é especialmente notório em falhas do tipo interfacial como será discutido em seguida.

As fraturas do tipo interfacial se mostraram presentes em maior proporção dentre as soldas de baixa rotação, para tempos curtos de soldagem (2 a 2,6 s). Para tempos mais longos (3 s) também apareceu em amostras de rotação intermediária (2400 rpm). Estas observações são claramente explicadas pelas propriedades da US e da UP. Como mostrado anteriormente na Figura 97, a transição entre estas duas regiões é mais suave em soldas de baixa rotação. Isto implica uma transição mais uniforme da adesão entre as chapas superior e inferior nesta interface. Desta maneira é razoável prever que haverá uma distribuição também suave das tensões trativas na interface US/UP. De fato, nas soldas produzidas com tempos curtos de soldagem, que romperam por fratura interfacial, não há indícios de rasgamento da US, como pode ser visto na Figura 102 para uma amostra da condição 33 (1900 rpm / 2 s). Note o aspecto uniforme ao longo de toda a superfície de fratura. O

“anel” correspondente à US é visível, o que é esperado dadas as diferenças de propriedades entre US e UP.

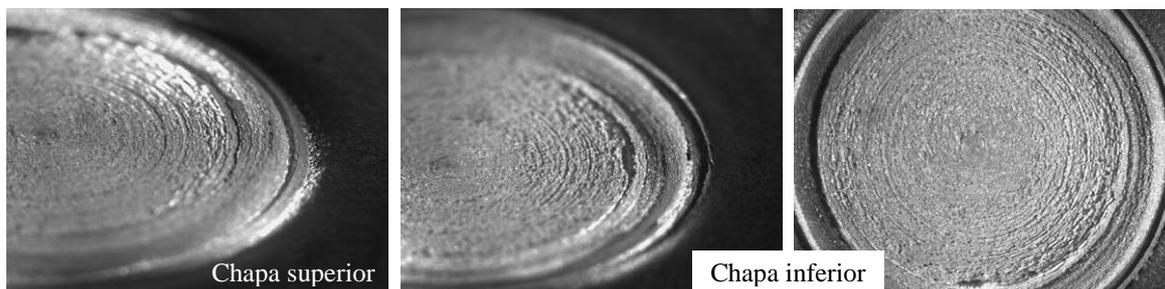


Figura 102. Modo de falha do tipo interfacial simples sob solicitação de tração em amostra produzida com a condição de soldagem 33 (1900 rpm / 2 s).

Em soldas produzidas com tempos mais longos, a resistência da solda na US e na UP se torna maior, possivelmente devido ao maior aporte térmico sobre o material (como já mencionado anteriormente nos casos de solicitação por cisalhamento) e devido à, conseqüentemente, maior mistura mecânica. Nestas situações se torna mais expressiva a diferença de resistência entre US e UP. Adicionalmente, em baixas rotações a transição entre US e UP se torna mais suave. O resultado é a falha interfacial, desta vez com visível rasgamento da US, como mostrado na Figura 103 para uma solda produzida com a condição de soldagem 41 (2400 rpm / 3s). Como mostra a Figura 103, em tempos longos de soldagem esta falha pode vir acompanhada de trinca circunferencial na chapa superior o que caracteriza o modo de falha denominado interfacial com trinca circunferencial. Uma pequena trinca circunferencial na chapa inferior, na interface entre US e UP, também pode ocorrer, como é visível na fratura da Figura 103. É visível também o aspecto irregular da superfície de fratura (especialmente da chapa inferior) que é decorrente da peculiar distribuição de tensões trativas na interface entre as chapas, ver Figura 101.

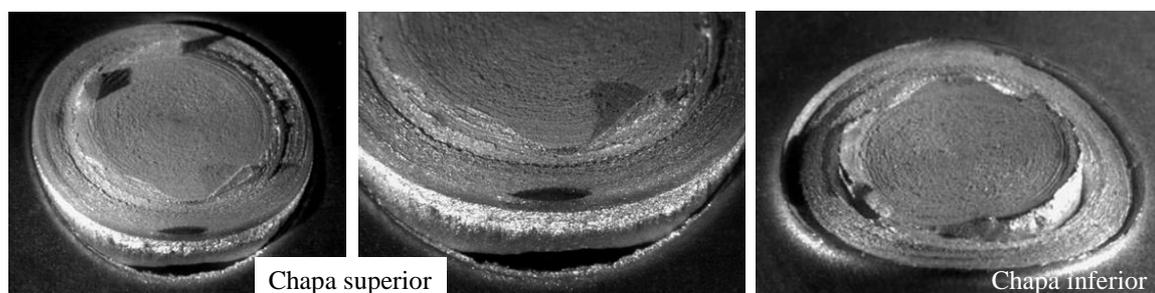


Figura 103. Modo de falha do tipo interfacial com trinca circunferencial sob solicitação de tração em amostra produzida com a condição de soldagem 41 (2400 rpm / 3s).

A Figura 104 mostra a secção transversal deste tipo de falha (interfacial com trinca circumferencial) em uma amostra produzida com a condição de soldagem 41 (2400 rpm / 3s). De um lado do botão de solda tem-se uma TC completamente desenvolvida enquanto que no lado oposto se vê um estágio inicial do crescimento da TC.

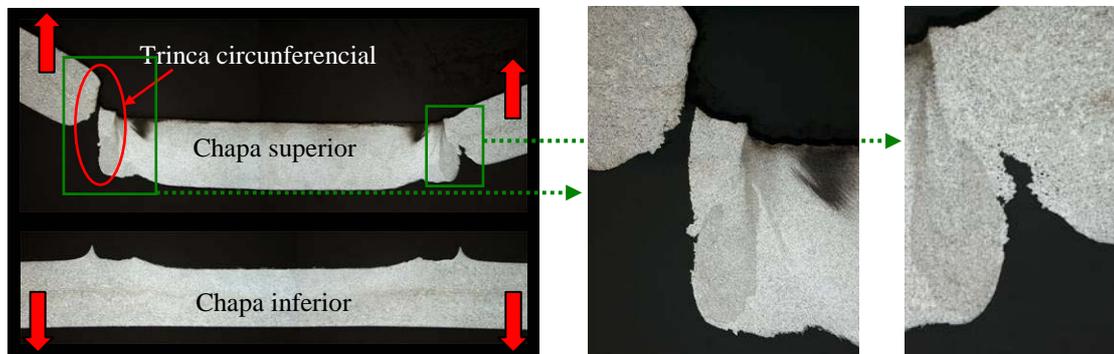


Figura 104. Secção transversal de falha do tipo interfacial sob solicitação de tração da condição de soldagem 42 (2400 rpm / 3 s).

Na Figura 105 estão mostrados detalhes da superfície de fratura. A TC é nucleada por um mecanismo de coalescência de microcavidades decorrente de sobrecarga de tensão trativa perpendicularmente à Cunha. Essas tensões são decorrentes da flexão imposta sobre o botão de solda dada a natureza do ensaio de tração, ver Figura 101. Estas tensões se tornam ainda mais intensas na medida em que a TC avança em direção à superfície e a secção resistente remanescente na chapa superior vai diminuindo. Também observa-se o aspecto rugoso da superfície onde ocorreu o rasgamento da US.

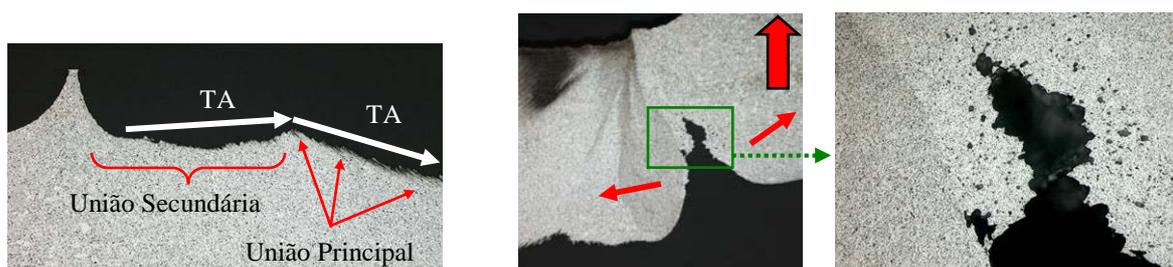


Figura 105. Detalhes da fratura no modo de falha interfacial com trinca circumferencial sob solicitação de cisalhamento em amostra da condição de soldagem 42 (2400 rpm / 3 s).

A Figura 106A mostra a comparação do comportamento mecânico entre as amostras da condição 33 e 42, onde novamente se vê que modos de falha semelhantes podem resultar em desempenho diferenciado. O comportamento da junta será definido

pelos mecanismos de fratura, que no caso de soldas produzidas com tempos mais longos tendem a ser de caráter mais dúctil. Neste tipo de falha (interfacial) a TA tende a se propagar de maneira brusca, conferindo um comportamento frágil à junta soldada. Já o rasgamento da US (nucleação da TA) e a formação de TC são mecanismos que demandam energia, oferecendo uma certa tenacidade à junta. O comportamento final será, então, definido pelo efeito global destes mecanismos.

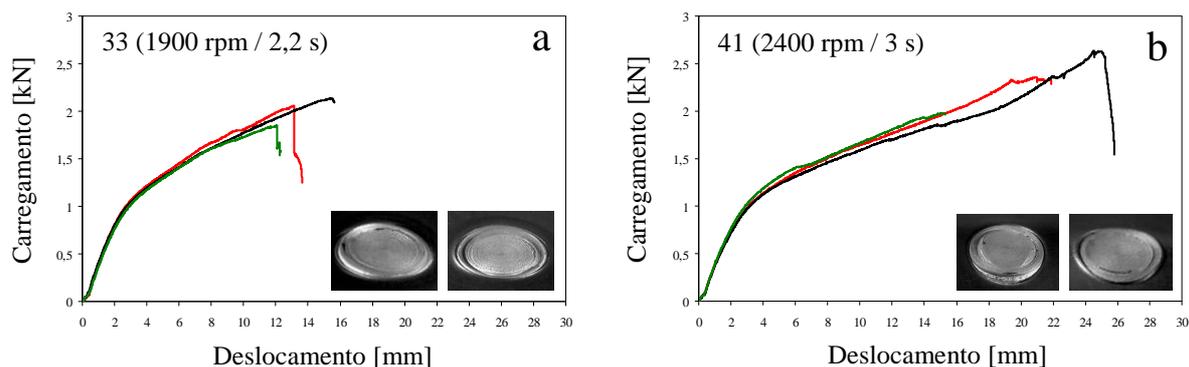


Figura 106. Comparação do desempenho mecânico dentre falhas do tipo interfacial: (a) simples e (b) com trinca circunferencial.

Destaca-se que mesmo dentre as amostras de uma mesma condição de soldagem (que romperam com o mesmo modo de falha) ocorrem certas variações. Dentre essas variações, nas amostras mais dúcteis o rasgamento da US e a TC são mais pronunciados

Por fim têm-se os modos de falha do tipo arrancamento parcial invertido e arrancamento total. São dois modos de falha semelhantes tendo apenas a TC na chapa inferior como diferença no caso do arrancamento total. Estes dois modos de falha foram observados apenas dentre as condições com tempos curtos de soldagem (2,2 e 2,6 s) acompanhados de alta rotação ou rotação intermediária (2400 e 2900 rpm). Esta observação sugere que esses modos de falha estão fortemente associados à transição entre US e UP (ver Figura 97) que é mais abrupta nestas condições. Observa-se na superfície de fratura destes dois modos de falha um pronunciado rasgamento da US. Esta observação é coerente com as apresentadas anteriormente, uma vez que a adesão entre as chapas na US é menos resistente para soldas de rotação alta e moderada. A Figura 107 mostra a superfície de fratura da falha do tipo arrancamento parcial invertido em uma amostra da condição 32 (2400 rpm / 2 s).

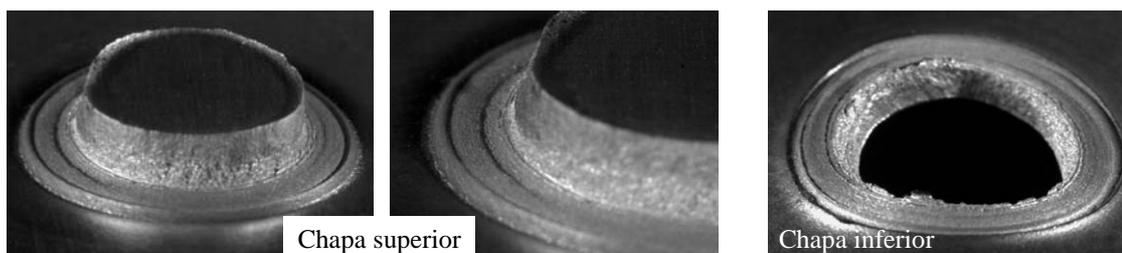


Figura 107. Fratura do tipo arrancamento parcial invertido sob sollicitação de tração em amostra de solda produzida com a condição de soldagem 32 (2400 rpm / 2 s).

Destaca-se que as condições de soldagem às quais estes modos de falha estão associados (alta rotação e tempo curto e moderado de soldagem) sugerem soldas de modesto desempenho mecânico. Ao contrário, estes modos de falha mostraram alta resistência e ductilidade. A Figura 108 mostra a secção transversal destes dois tipos de fratura. Na falha do tipo arrancamento parcial invertido está mostrada uma amostra da condição de soldagem 38 (2400 rpm / 2,6 s) e na falha por arrancamento total, a condição 35 (2400 rpm / 2,2 s). Nos dois casos a TC na chapa inferior se formou na interface US/UP, dada a abrupta transição entre estas duas regiões do botão de solda. Observa-se também que na falha do tipo arrancamento total, a TC na chapa superior nucleou a partir da Cunha e não no defeito de soldagem. Como já abordado anteriormente, a sollicitação de tração é mais tolerante à presença de defeitos de soldagem devido à distribuição de tensões no entorno do botão de solda (ver Figura 101).

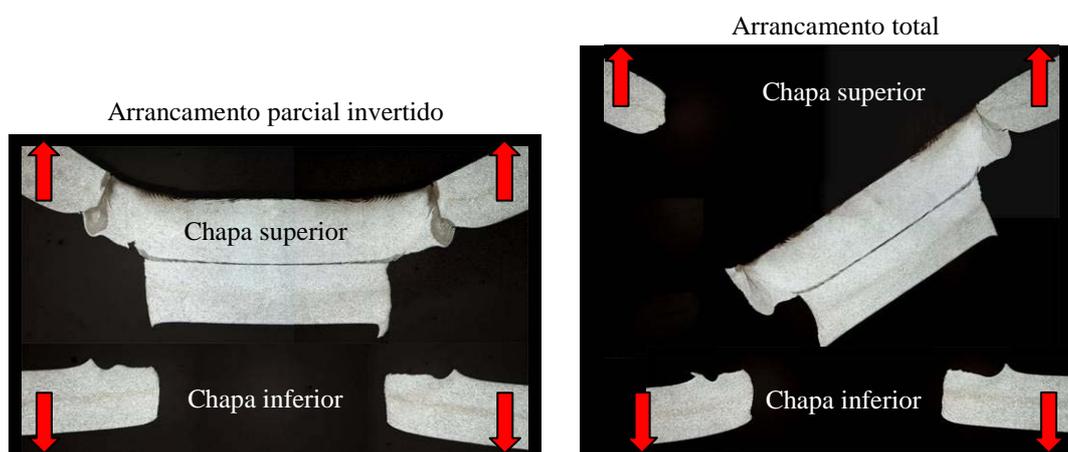


Figura 108. Secção transversal das falhas do tipo arrancamento parcial invertido (38 - 2400 rpm / 2,6 s) e arrancamento total (35 - 2400 rpm / 2,2 s) sob sollicitação de tração.

Nestes dois tipos de falha é visível o rasgamento da US, desenvolvendo uma TA no entorno do botão de solda, reduzindo a secção resistente da junta. Adicionalmente, as

tensões na ponta da TA são intensificadas na medida em que a junta se deforma durante a aplicação da carga. A partir deste ponto a falha poderia ocorrer de maneira interfacial, com a TA se propagando para o interior do botão de solda, ao longo da UP. No entanto, as condições da interface entre US e UP favorecem a nucleação da TC neste ponto, como mostrado em detalhe na Figura 109.

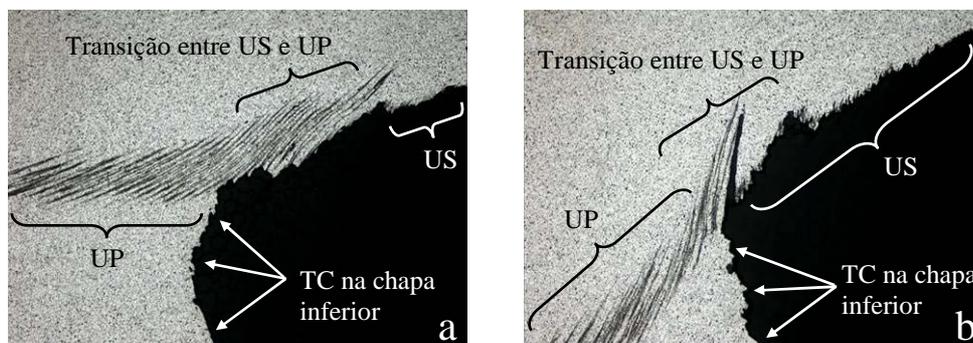


Figura 109. Detalhe mostrado a nucleação da TC na chapa inferior a partir da interface entre US e UP: (a) condição 38 (2400 rpm / 2,6 s) e (b) condição 35 (2400 rpm / 2,2 s).

Na falha do tipo arrancamento total (condição 38), a TC na chapa superior leva a uma maior deformação do botão de solda, tornando mais fácil a nucleação da TC na chapa inferior. Já no caso da falha do tipo arrancamento parcial invertido, não se forma TC na chapa superior, fazendo a carga sobre a solda aumentar até que as tensões na ponta da TA sejam suficientes para a nucleação da TC na chapa inferior. Isto resulta numa falha mais brusca e, conseqüentemente, num comportamento mais frágil para a falha por arrancamento parcial invertido. A Figura 110 mostra as curvas carregamento x deslocamento para essas duas amostras. Note o comportamento mais dúctil da falha por arrancamento total, proporcionado pela nucleação e propagação da TC na chapa superior.

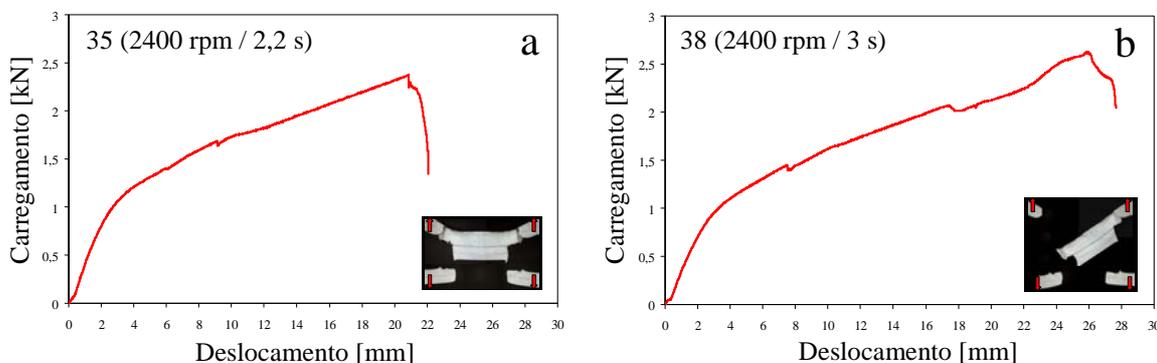


Figura 110. Comparação do desempenho mecânico para as falhas do tipo: (a) arrancamento parcial invertido e (b) arrancamento total.

### 5.5 Resumo das análises de falha

Com os resultados obtidos é possível estabelecer um modelo dos mecanismos de fratura que em conjunto levarão à falha da junta soldada sob sollicitação de cisalhamento. A Figura 111 mostra, esquematicamente, os detalhes geométricos de uma solda FSpW da liga 6181-T4 e os possíveis locais de nucleação da TA e TC quando da aplicação de uma carga de cisalhamento sobre a junta.

Em termos gerais o modelo para a fratura das soldas sob sollicitação de cisalhamento considerando uma solda livre de defeitos de soldagem é estabelecido na seguinte seqüência:

a) A aplicação de uma carga externa sobre a junta soldada tende a cisalhar o botão de solda, ocasionando a distribuição de tensões mostrada na Figura 69;

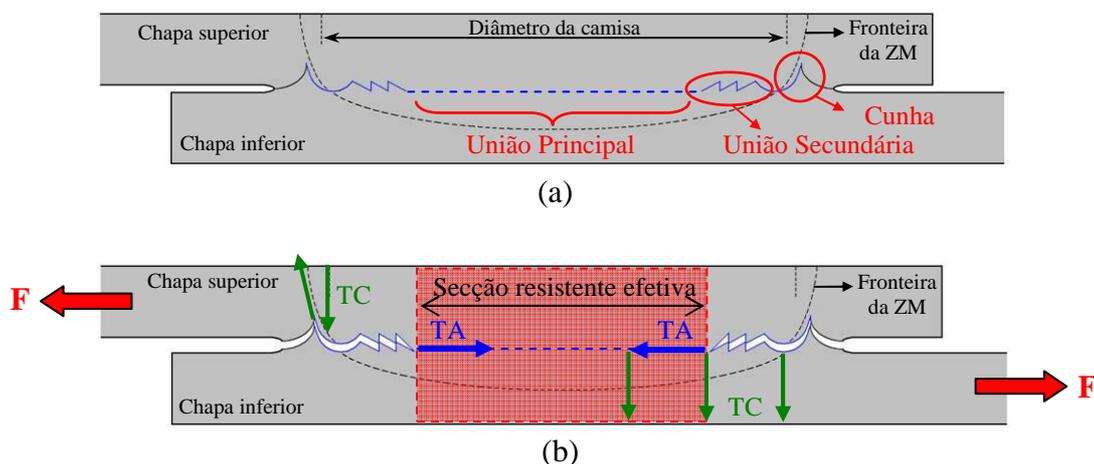


Figura 111. Representação esquemática de uma solda FSpW mostrando: (a) detalhes geométricos da junta e (b) possíveis locais de nucleação de TA e TC sob sollicitação de tração.

b) Aumentando a intensidade da carga externa faz com que aumente também os níveis de tensão no entorno do botão que, a partir de uma certa magnitude, promove o rasgamento da US nucleando a TA, como mostrado na Figura 111. Isto implica na redução da secção resistente efetiva da junta (Figura 111b);

c) O nível de tensão no entorno do botão de solda na chapa superior é intensificado pela Cunha devido sua geometria pontiaguda. A tensão também é amplificada na extremidade da TA que tende a se estender para o interior da solda ao longo da UP, como indicado na Figura 111b;

d) Na medida em que a carga externa vai aumentando, o nível de tensão no cume da Cunha atinge tal patamar que uma TC é nucleada a partir dela e tende a se abrir para a superfície da chapa superior e, em seguida, propagar no entorno do botão de solda;

e) A seqüência da evolução da falha a partir deste estágio vai depender primariamente da qualidade da UP. Em soldas em que este apresenta alta resistência a probabilidade maior é que a TC continue propagando ao longo da chapa superior. Uma TC na chapa inferior também pode nuclear e propagar em algum dos pontos favoráveis mostrados na Figura 111b e crescer juntamente com a TC da chapa superior. Note que quanto maior a diferença de propriedades (transição brusca) entre US e UP (rotação moderada e alta) mais propensa é a nucleação de TC na chapa inferior. Uma terceira possibilidade é ocorrer fratura interfacial, principalmente se a TA propagou ao longo da UP, reduzindo assim a secção resistente efetiva da solda.

Soldas produzidas com tempos curtos de soldagem apresentam defeitos de soldagem do tipo falta de mistura e falta de preenchimento. Estes defeitos levam ao fácil desenvolvimento de TC na chapa superior sob solicitação de cisalhamento, comprometendo o desempenho da junta.

A Cunha desempenha um papel importante no desenvolvimento da falha sob cisalhamento, por atuar como um concentrador de tensões. As análises da micrografia da secção transversal das soldas mostraram que a Cunha se torna mais delgada (pontiaguda) quanto mais longo for o tempo de soldagem. Este comportamento é coerente com a teoria do aporte de energia (ver capítulo 2.1.2) que prevê uma maior temperatura e conseqüentemente maior plastificação da chapa inferior para tempos longos de soldagem. A maior temperatura leva a uma maior plastificação da chapa inferior, tornando a Cunha mais delgada e pontiaguda. Desta maneira ele se torna um severo intensificador de tensões dentro da junta, levando à nucleação de TC na chapa superior sob baixos/moderados níveis de carregamento. A Figura 112 mostra a Cunha para duas condições de soldagem onde a única diferença foi o tempo de soldagem (3 e 3,4 s). É notória a diferença de tamanho da Cunha e, principalmente, o quão pontiaguda ela é no caso da soldagem a 3,4 s.

Além do efeito da temperatura, o fluxo em espiral de material, promovido pela rosca da camisa da ferramenta, também é um fator de efeito sobre a agudeza da Cunha. Soldas de tempo mais longo significam fluxo de maior intensidade favorecendo assim, a deformação da Cunha.

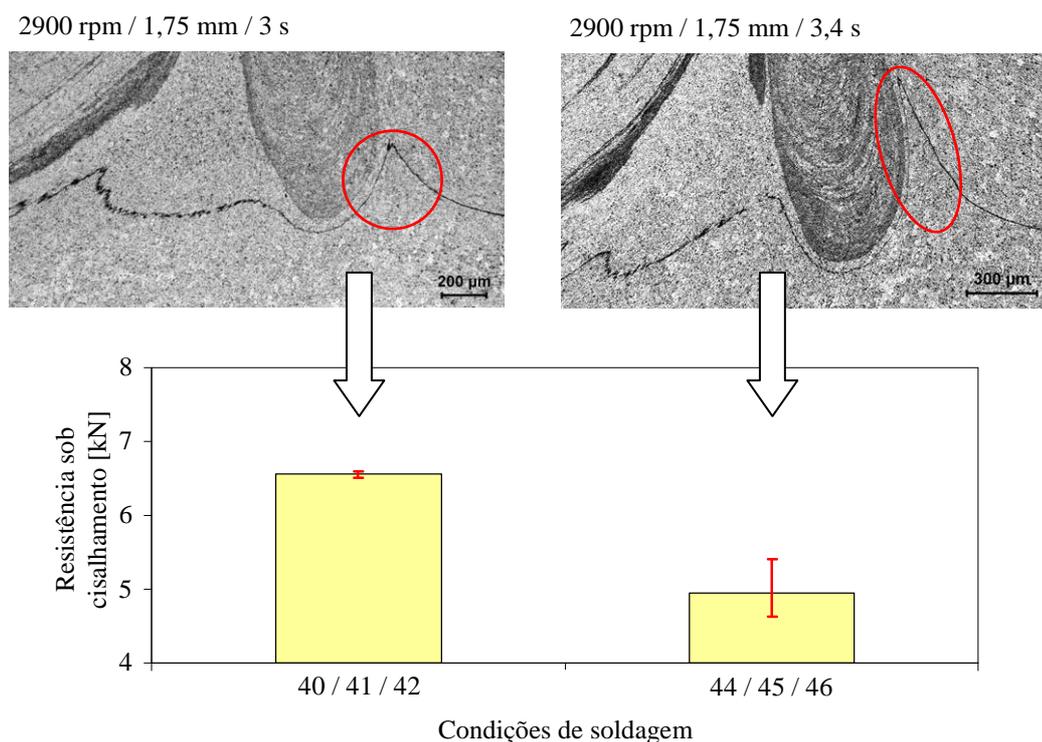


Figura 112. Efeito do tempo de soldagem na geometria da Cunha em soldas produzidas com tempo de soldagem de 3 s e 3,4 s.

Na Figura 112 também está mostrado o resultado da resistência mecânica medida no ensaio de cisalhamento para as duas condições. Este fenômeno explica a queda do desempenho mecânico para tempos muito longos de soldagem, como foi apresentado nos resultados dos testes de cisalhamento.

Nos testes de tração não houve a mesma disparidade de comportamento observada nos teste de cisalhamento. Ficou claro que este tipo de solicitação é mais tolerante à presença de defeitos de soldagem, devido à distribuição de tensões no entorno do botão de solda, como foi mostrado na Figura 101. Este fato contribuiu para nivelar o desempenho das soldas com tempos curtos de soldagem (penalizadas com defeitos), com as soldas de tempos mais longos. Contudo, observou-se uma pequena vantagem das soldas produzidas com velocidade de rotação moderada (2400 rpm) e alta (2900 rpm) sobre as soldas de baixa rotação (1900 rpm). Este comportamento é explicado pela transição brusca entre US e UP nas soldas produzidas com rotações mais rápidas, como foi exemplificado na Figura 97. Sob solicitação de tração, isto favorece a nucleação de TC na chapa inferior, o que demanda energia, conferindo maior ductilidade à junta. Os testes de tração também

tornaram bem evidentes os benefícios da propagação de TA e TC sobre o desempenho mecânico das soldas. Em fratura interfacial simples (onde não ocorre TA ou TC) a falha ocorre abruptamente, com comportamento bastante frágil. Por outro lado, este mesmo tipo de fratura quando acompanhado de TC (falha interfacial com trinca circumferencial) apresenta alta ductilidade, como mostrado na Figura 106b.

A Figura 113 mostra um desenho esquemático de uma junta FSpW da liga 6181-T4, indicando os pontos de nucleação da TA e TC sob solicitação de tração. Note que neste tipo de solicitação a TC na chapa inferior sempre se forma na região de transição entre US e UP.

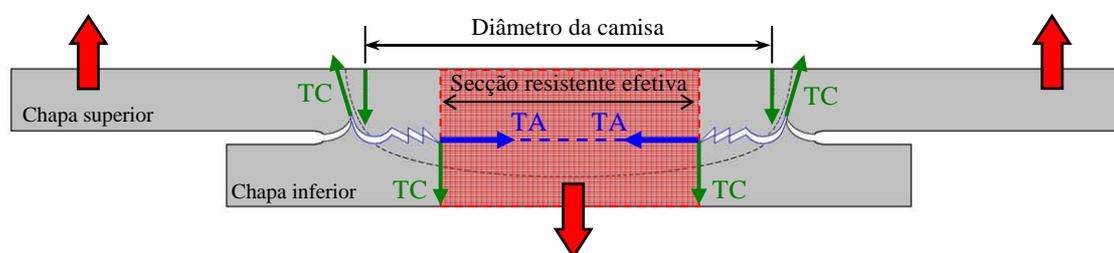


Figura 113. Representação esquemática de uma solda FSpW mostrando detalhes geométricos da junta e os possíveis locais de nucleação de TA e TC sob solicitação de tração.

É importante também fazer a comparação dos resultados obtidos neste trabalho com outros processos para união por ponto, como o processo de soldagem por resistência elétrica, por exemplo. A Figura 114 mostra as curvas de resistência para algumas ligas de alumínio soldadas por resistência elétrica e por rebiteagem. As curvas foram adaptadas dos trabalhos de Arbegast et. al. [68] e da Silva et. al. [97] e construídas com base nas especificações da norma MIL-HDBK-5H [71]. Esta norma especifica a resistência mínima por ponto de união (rebite ou solda ponto) em função do diâmetro do rebite ou da espessura das chapas no caso de solda ponto. Destaca-se que não há uma curva específica da liga 6181, portanto esta comparação tem um caráter qualitativo, para mostrar o potencial que o processo FSpW apresenta frente a processos de união consagrados.

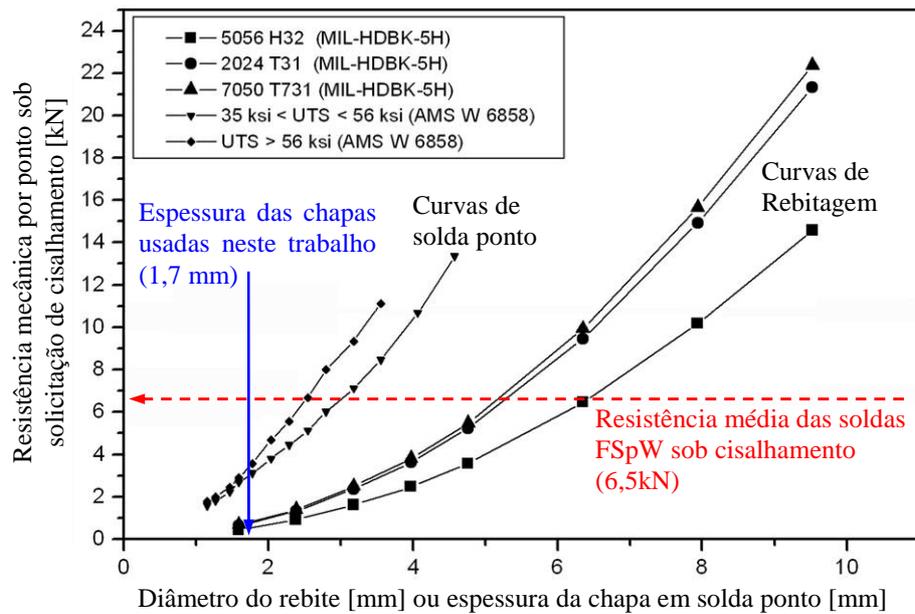


Figura 114. Comparação da resistência mecânica sob cisalhamento das soldas FSpW com o processo de soldagem a ponto por resistência elétrica, com base na norma MIL-HDBK-5H [71].

## 6 CONCLUSÕES

Neste trabalho foi feito o estudo de um novo processo de soldagem a ponto denominado Friction Spot Welding (FSpW) destinado à produção de juntas sobrepostas. Este processo foi concebido e patenteado pelo grupo de soldagem no estado sólido no Centro de Pesquisas GKSS na Alemanha. O processo consiste no uso de uma ferramenta rotativa que produz a solda através de energia térmica e mecânica, sendo aplicável para qualquer material que apresente boa plasticidade. Neste estudo, foram investigadas juntas sobrepostas em chapas com 1,7 mm de espessura da liga de alumínio 6181 na condição T4, produzidas com diferentes combinações de parâmetros de processo. As soldas foram caracterizadas mecânica e metalurgicamente com o objetivo de entender os mecanismos de formação da união bem como buscar a otimização do desempenho mecânico sob solicitação de cisalhamento e de tração por meio de análise de falha.

Os resultados obtidos mostraram que soldas de alta resistência mecânica e alta reprodutibilidade são possíveis para a liga AA6181-T4 com este novo processo de soldagem. Ademais, tem-se as seguintes conclusões:

- A junta FSpW da liga 6181-T4 é constituída por três elementos: a) Cunha, b) União Secundária e c) União Principal.
- Estes elementos exercem um papel fundamental no desenvolvimento da fratura da solda FSpW da liga AA6181-T4 refletindo, desta forma, no seu desempenho mecânico.
- A fratura, tanto em solicitação de cisalhamento como de tração, se desenvolve pela nucleação e propagação de dois tipos de trincas: a trinca anular (TA) com plano paralelo à superfície das chapas e a trinca circunferencial (TC) com plano perpendicular à superfície das chapas. A TA está associada com o rasgamento da União Secundária. A TC pode se formar em diferentes pontos do botão: a) em defeitos de soldagem, b) no cume da Cunha, c) na ponta da TA ou d) nas regiões de transição entre os elementos da união (Cunha/US ou US/UP).

➤ A Cunha, quando muito aguda for (longo tempo de soldagem e alta rotação), tende a nuclear facilmente uma TC na chapa superior quando em solicitação de cisalhamento, resultando em queda da resistência mecânica. Em solicitação de tração a Cunha também se mostrou importante, mas não tanto como no caso de cisalhamento.

➤ As trincas TA e TC conferem ductilidade à junta não comprometendo, em muitos casos (dependendo das condições na US e UP), a resistência final da junta. Por essa razão fratura do tipo interfacial não é sinônimo de solda de baixa qualidade nos processos FSpW.

➤ As medições de dureza mostraram que o material é significativamente modificado pelo processo de soldagem, com diminuição da dureza da ordem de 12,5% na fronteira entre ZTMA e ZTA e aumento de 20% na ZM. Como a liga 6181 é endurecível por precipitação, conclui-se que o processo de soldagem está modificando a condição das partículas endurecedoras desta liga, o que condiz com observações da literatura.

➤ O perfil de dureza se mostrou praticamente idêntico em todas as condições de soldagem, com pequenas variações no tamanho da área “endurecida” e dureza máxima atingida na ZM. Isto leva a conclusão de que as transformações metalúrgicas que o processo impõe sobre o material não variam grandemente dentre as condições de soldagem estudadas.

➤ Dois tipos defeitos de soldagem podem ocorrer nas soldas produzidas com tempos curtos de soldagem (2 a 2,6 s): a) falta de mistura e b) falta de preenchimento.

➤ A solicitação de tração não se mostrou muito sensível a defeitos de soldagem por gerar tensões compressivas no entorno do botão de solda na superfície da chapa superior.

➤ A combinação otimizada de parâmetros de soldagem é baixa rotação (1900 rpm) e tempo moderado de soldagem (3 s), devido aos seguintes fatores:

- O tempo moderado de soldagem resulta numa solda livre de defeitos do tipo falta de mistura ou falta de preenchimento;
- A Cunha se torna moderadamente pronunciada, tendendo a nuclear uma TC em seu vértice, mas sob níveis elevados de tensão;
- A nucleação da TC a partir da Cunha é vantajosa, visto que ela propaga pela ZTMA (região de maior tenacidade);

- O tempo mais longo de processo implica num maior aporte de energia ao material, resultando em melhores propriedades da US e UP;
- A baixa rotação contribui para uma US com boa adesão entre as chapas superior e inferior.

## 7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Investigar condições de soldagem com velocidade de rotação mais baixa que 1900 rpm;
- Medir temperaturas em diferentes distâncias do botão de solda;
- Investigar, utilizando microscopia de transmissão, a evolução dos precipitados nas diferentes zonas da solda e confrontar com as medições de temperatura;
- Instrumentar a máquina de soldagem FSpW para medição de torque durante a soldagem e fazer o monitoramento deste para diferentes combinações de velocidade de rotação e tempo de soldagem. Verificar se realmente está ocorrendo “stick/slip” (quedas bruscas do torque) e determinar o seu limiar de transição (em termos de velocidade de rotação e tempo de soldagem);
- Implementar modelo numérico que contemple modelos de falha para prever o comportamento de juntas soldadas. Confrontar os resultados com as análises deste trabalho.

## 8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] V. Tran, et. al. Failure loads of spot friction welds in aluminium 6111-T4 sheets under quasi-static and dynamic loading conditions. SAE International, 2007-01-0983, 2007.
- [2] S. Arul, et. al. Microstructure and failure mechanisms of spot friction welds in lap-shear specimens of aluminium 5754 sheets. SAE International, 2005-01-1256, 2005.
- [3] P. Lin, J. Pan, T. Pan. Fatigue failure of spot friction welds in aluminium 6111-T4 sheets under cyclic loading conditions. 2006-01-1207, 2006.
- [4] C. Schilling, J.F. dos Santos. Verfahren und Vorrichtung zum Verbinden von wenigstens zwei Aneinanderliegenden Werkstücken nach der Methode des Reibschweissens. Patent Application Amtl. Az. 199 55737.3 (1999).
- [5] C. Schilling, J.F. dos Santos. Method and Device for Linking at Least Two Adjoining Work Pieces by Friction Welding. International Patent Publication WO/2001/036144. 25<sup>th</sup> May 2005.
- [6] “Mazda develops world’s first aluminium joining technology using friction heat”, Mazda media release, February 27, 2003. <http://www.mazda.com/publicity/release/2003/>.
- [7] A.C. Addison, A.J. Robelou, Friction Stir Spot Welding: Principal parameters and their effects, Proceedings of the 5<sup>th</sup> International Symposium on Friction Stir Welding – 5<sup>th</sup> ISFSW, 14-16 September 2004, Metz, France.
- [8] H. Badarinarayan, F. Hunt, K. Okamoto. Friction Stir Stitch Welding – Process Development and Mechanical Property Evaluation. 6<sup>th</sup> International Symposium of Friction Stir Welding ISFSW6, 10-13 October 2006, Montreal, Canada.
- [9] K. Okamoto, F. Hunt, S. Hirano, Development of Friction Stir Welding Technique and Machine for Aluminium Sheet Metal Assembly – Friction Stir Welding of Aluminium for Automotive Applications (2) - 2005 SAE Congress, Detroit, SAE Technical paper SP-1959, p 121-125.
- [10] Mazda Motor Corporation. “Mazda develops world’s first steel and aluminium joining technology using friction heat”, Mazda Media release, June 2, 2005, <http://www.mazda.com/publicity/release/2005/200506/050602.html>
- [11] R. Hancock. Friction welding of aluminium cuts energy costs by 99%. Welding Journal 83, pp 40, 2004.
- [12] Y. Zhou, et. al. Experimental simulation of surface pitting of degraded electrodes in RSW of aluminium alloys. Materials Science and Technology 20, pp 1226-1232, 2004.
- [13] J. Varis. Economics of clinched joint compared to riveted joint and example of applying calculations to volume product. Journal of Materials Science and Technology 172, pp 130-138, 2006.
- [14] L. Han, et. al. The effect of prestraining on the mechanical behaviour of SPR aluminium alloy sheets. Materials and Design 27, pp 1108-1113, 2006.

- [15] M. Valant, E. Yarrapareddy and R. Kovacevic, A novel tool design for friction stir spot welding, Proceedings of the 7<sup>th</sup> International Conference on Trends in Welding Research, May 16-20, 2005, Callaway Gardens Resort, Pine Mountain, Georgia, USA.
- [16] W.J. Kyffin, A. C. Addison, J. Martin, P.L. Threadgill, Recent developments in friction stir spot welding of automotive steel, Proceedings of the 12<sup>th</sup> sheet metal welding conference, May 9-12, 2006, Livonia, USA. 2006B.
- [17] S. G. Arul, et. al. Microstructures and Failure Mechanism of Spot Friction Welds in Lap-Shear Specimens of Aluminium 5754 Sheets. 2005 SAE congress, Detroit, SAE Technical Paper 2005-01-1256, Warrendale, USA. SAE, 135-140.
- [18] P.-C. Lin, et. al. Microstructures and failure mechanisms of spot friction welds in lap-shear specimens of aluminium 6111-T4 sheets, SP-1842, SAE Technical Paper 2004-01-1330, Warrendale, USA, 2004.
- [19] R. S. Mishra, et. al. Friction stir spot welding of 6016 aluminium alloy, Friction Stir Welding and Processing IV, TMS 2007, 341-347.
- [20] S. Lathabai et. al. Friction Stir Spot Welding of Automotive Lightweight Alloys. Proceedings of the 7<sup>th</sup> International Conference on Trends in Welding Research. Pine Mountain, Georgia, USA, May 16-20, 2005.
- [21] S. Lathabai et. al. Friction spot joining of an axtruded Al-Mg-Si alloy. Scripta Materialia, vol 55, pp 899-902, 2006.
- [22] T. Rosendo, et. al. Friction spot welding of AA2024 T3 aluminium alloy – a feasibility study, Euromat 2007, Nuremberg, 10<sup>th</sup> – 13<sup>th</sup> September 2007.
- [23] M. D Tier, et. al. The Influence of Weld Microstructure on Mechanical Properties of Friction Spot Welding of Aluminium Alloys, 7<sup>th</sup> International symposium on friction stir welding, Awaji Island, Japan, 20-22 May, 2008.
- [24] M. D. Tier, et. al. SAE Aerospace Manufacturing and Automated Fastening Conference 2008, September 16-18, North Charleston, South Carolina, USA.
- [25] J. A. E. Mazzaferro, et. al. Preliminary investigation on the mechanical behaviour of aluminium friction spot welds, 7<sup>th</sup> International symposium on friction stir welding, Awaji Island, Japan, 20-22 May, 2008.
- [26] J. A. E. Mazzaferro, et. al. Study on mechanical behaviour of friction spot welds, IIW International Congress, IIW 2008, São Paulo, SP, 18-21 May 2008.
- [27] T. Rosendo, et. al. Investigation of Friction Spot Welding of AA6181-T4 Alloy. Proceedings of the 2008 IABC International Automotive Body Congress. Vaals, Netherland, June 10-11, 2008.
- [28] A. M. da Silva, et. al. Performance Evaluation of 2-mm thick alclad AA2024 T3 Aluminium Alloy Friction Spot Welding. SAE International, 07ATC-103, 2007.
- [29] J. Staley, W. Hunt. Needs of the Aircraft Industry for Aluminium Products. 12<sup>th</sup> Annual NCMS Technical Conference & Expo, 4-6 May, Florida, EUA, 1998.
- [30] T. Rosendo, et. al. Investigation on Friction Spot Welding of Aeronautic AA2024-T3 and AA7075-T6 Alloys. CONSOLDA – Congresso Nacional de Soldagem, Caxias do Sul, Brasil, 2007.
- [31] <http://www.key-to-metaUS.com/Article55.htm> acessado em 04 de maio de 2008.
- [32] ASM Handbook. Vol 2 - Properties and selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials. ASM International. 1992.
- [33] A. Hofmann. Deep drawing of process optimized blanks. Journal of Materials Processing Technology 119, pp 127-132, 2001.
- [34] North et. al. Understanding friction welding. Tsinghua University, Beijing, 2000.

- [35] P. Su, A. Gerlich, T. North. Friction stir spot welding of aluminium and magnesium alloy sheets. SAE International, 2005.
- [36] Gerlich, A., Su, P., North, T. Peak temperatures and microstructures in aluminium and magnesium alloy friction stir spot welds. Science and technology of welding and joining, vol 10, 2005.
- [37] North, T., et. al. Zona de mistura Formation in Al 7075-T6 Spot Welds.
- [38] Gerlich, A., et. al. Friction stir spot welding of aluminium and magnesium alloys. Material Forum, vol 29, 2005.
- [39] T. Kaspary. Preenchimento do furo remanescente em soldas por fricção com mistura mecânica de reparo em alumínio 6056-T4. Dissertação de mestrado. Programa de Pós Graduação em Engenharia Metalúrgica, de Minas e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil, 2005.
- [40] Gerlich, A., Su, P., North, T. Tool penetration during friction stir spot welding of Al and Mg alloys. Journal of Materials Science, vol 40, pp 6473-6381, 2005.
- [41] P.-C. Lin, S.-H. Lin, J. Pan, T. Pan. Fracture and fatigue mechanisms of spot friction welds in lap-shear specimens of aluminium 6111-T4 sheets. SAE International, 2005.
- [42] P.-C. Lin, J. Pan, T. Pan. Investigation of fatigue lives of spot friction welds in lap-shear specimens of aluminium 6111-T4 sheets based on fracture mechanics. SAE International, 2005.
- [43] K. Muci-Küchler et. al. Visualization of material flow in friction stir spot welding. SAE International, 2005.
- [44] A. Nunes, J. McClure, A. Ávila. Torque and plunge force during the plunge phase of friction stir welding. Proceedings of the 7<sup>th</sup> International Conference on Trends in Welding Research, Maio 16-20, Pine Mountain Georgia, USA, 2005.
- [45] M. Valant, E. Yarrapareddy, R. Kovacevic. Novel tool design for friction stir spot welding. Proceedings of the 7<sup>th</sup> International Conference on Trends in Welding Research, Maio 16-20, Pine Mountain Georgia, USA, 2005.
- [46] J. Hinrichs, et. al. Friction stir welding for the 21<sup>st</sup> century automotive industry.
- [47] A. Gerlich, et. al. Mechanism of stir zone formation during friction stir spot welding. Proceedings of the friction stir welding Colloquium, Austria, 2006.
- [48] W.M. Thomas et. al, Friction stir butt welding, International Patent Appl. N° 9125978.8, December 1991, U.S. Patent N° 5,460,317.
- [49] A. Gerlich, G. Avramovic-Cingara, T. North. Stir zone microstructure and strain rate during Al 7075-T6 friction stir spot welding. Metallurgical Transactions, May 18, 2006.
- [50] D. Mitling, et. al. Structure-properties relations in spot friction welded (also known as friction stir spot welded) 6111 aluminium. Materials Science and Engineering A 441, pp 79796, 2006.
- [51] P. Su, et. al. Energy generation and stir zone dimensions in friction stir spot welds. SAE International 2006.
- [52] P. Su, et. al. Energy utilization and generation during friction stir spot welding.
- [53] Y Tozaki, Y Uematsu, K. Tokaji. Effect of welding condition on tensile strength of dissimilar friction spot welds between different aluminium alloys.
- [54] Y. Uematsu, K. Tokaji, S. Murata. Fatigue behaviour of friction stir spot welded joints in Al-Mg-Si alloys.

- [55] Y Tozaki, Y Uematsu, K. Tokaji. Effect of processing parameters on static strength of dissimilar friction stir spot welds between different aluminium alloys. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials and Structures*, 2007.
- [56] W. S. Chang, et. al. Evaluation of friction spot joining weldability of Al alloys for automotive. *Materials science forum*, vol 539-543, pp 411-416, 2007.
- [57] S. Kalagara, K. Muci.Küchler, W. Arbegast. Preliminary study of material flow in friction stir spot welding using copper as marker material. *Friction stir welding and processing IV, TMS*, 2007.
- [58] R. S. Mishra, et. al. Friction stir spot welding of 6016 aluminium alloy. *Friction stir welding and processing IV, TMS*, 2007.
- [59] T. North, et. al. Transient local melting in Al7075-T6 friction stir spot welds. *Materials science forum*, vol 539-543, pp 411-416, 2007.
- [60] P. Su, et. al. Intermixing in dissimilar friction stir spot welds. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2006.
- [61] D.-A Wang, S.-C Lee. Microstructures and failure mechanisms of friction stir spot welds of aluminium 6061-T6 sheets. *Journal of materials processing technology*, 2006.
- [62] ASTM E 112-96:2000. Standard Test Method for Determining Average Grain Size. *Annual book of ASTM Standards*, vol. 03.03, pp. 240-263, 2000.
- [63] L. N. Payton. Metal cutting theory and friction stir welding. *Proceedings of the 7<sup>th</sup> International Conference on Trends in Welding Research*, Maio 16-20, Pine Mountain Georgia, USA, 2005.
- [64] C. W. Olea. Influence of energy input in friction stir welding on structure evolution and mechanical behaviour of precipitation-hardening in aluminium alloys (AA2024-T351, AA6013-T6 and Al-Mg-Sc). *Tese de doutorado, Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade de Bochum, Alemanha*, 2008.
- [65] C. Olea et. al. A sub-structural analysis of friction stir welded joints in an AA 6056 Al-alloy in T4 and T6 temper conditions. *Materials Science and Engineering, A* 454-455, pp 52-62, 2007.
- [66] K. Muci-Küchler et. al. Numerical simulation of the friction stir spot welding process.
- [67] 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.
- [68] C. D. Allen, W. J. Arbegast. Evaluation of friction spot welds in aluminium alloys. *SAE International*, 2005.
- [69] T.-Y Pan, A. Joaquin, D. E. Wilkosz. *Spot friction welding for sheet aluminium joining*. 2004.
- [70] F. Hunt, H. Badarinarayan, K. Okamoto. Design of experiments for friction stir stitch welding of aluminium alloy 6022-T4. *SAE International*, 2006.
- [71] *Military Handbook: MIL-HDBK-5H. Metallic Materials and Elements for Aerospace Vehicle Structures*. 1998.
- [72] DIN EN ISO 14273. Specimens Dimensions and Procedure for Shear Testing Resistance Spot, Seam and Embossed Projection Welds. *Norma técnica para testes de cisalhamento em juntas sobrepostas de solda ponto*, 2002.

- [73] DIN EN ISO 14272. Probenmasse und Verfahren für die Kopfzugprüfung an Widerstandspunkt- und BuckeUSchweissungen mit geprägten Buckeln. Norma técnica para testes de tração em juntas sobrepostas de solda ponto, 2002.
- [74] DIN EN ISO 14324. Widerstandspunktschweissen – Zerstörende Prüfung von Schweissungen – Schwinfestigkeitsprüfung von Punktschweissverbindungen. Norma técnica para testes de fadiga em juntas sobrepostas de solda ponto. 2003.
- [75] S. Sheikhi. Herstellung und Bewertung der Umformbarkeit Von reibrührgeschweißten Tailored blanks aus Aluminiumlegierungen. Tese de doutorado. Universidade de Duisburg, Departamento de Engenharia Mecânica, Essen, Alemanha, 2006.
- [76] H. Knoll. Untersuchungen von Reibpunktschweißverbindungen in Aluminiumlegierungen. Trabalho de graduação em engenharia mecânica. Escola Técnica de Düsseldorf, Universidade de Ciências Aplicadas, 2007.
- [77] S. Sheikhi S., J. F. dos Santos. Effect of process parameter on mechanical properties of friction stir welded tailored blanks from aluminium alloy 6181-T4. *Science and Technology of Welding and Joining*, vol.12, pp. 370-375, 2007.
- [78] N. Koch, et. al. An Investigation of Friction Spot Welding of Thin Aluminium Sheets. *Aeromat 2003*, 14<sup>th</sup> Advanced Aerospace Materials & Processes Conference and Expositions, Dayton, USA, June 2003.
- [79] K. H. Muci-Küchler, et. al. Numerical simulation of the friction stir welding process. SAE International, 2004.
- [80] S. K. Itapu, K. H. Muci-Küchler. Visualization of material flow in the refill friction stir spot welding processes. SAE International, 2004.
- [81] C. Omerem, et. al. Screening for process variable in refill friction spot welding of 6061 aluminium sheet. *Friction stir welding and processing IV*, TMS, 2007.
- [82] S. G. Arul, et. al. Effects of surface treatment (lubricants) on spot friction welded joints made of 6111-T4 aluminium sheets. SAE International 2007.
- [83] H. Badarinarayan, et al. Study of plunge motion during friction stir spot welding – temperature and flow pattern. TMS.
- [84] T. -Y. Pan, W. Zhu, W. J. Schwartz. Spot friction welding – a new joining methods for aluminium sheets. *Proceedings of the 2005 IABC International Automotive Body Congress*. Ann Arbor, EUA, September 20-21, 2005.
- [85] P. -C. Lin, J. Pan, T. Pan. Failure modes and fatigue life estimations of spot friction welds in lap-shear specimens of aluminium 6111-T4 sheets. Part 1: Welds made by a concave tool. *International Journal of Fatigue* 30, pp 74-89, 2008.
- [86] P. -C. Lin, J. Pan, T. Pan. Failure modes and fatigue life estimations of spot friction welds in lap-shear specimens of aluminium 6111-T4 sheets. Part 2: Welds made by a flat tool. *International Journal of Fatigue* 30, pp 90-105, 2008.
- [87] Y. Uematsu, et. al. Effect of re-filling probe hole on tensile failure and fatigue behaviour of friction stir spot welded joints in Al-Mg-Si alloy. *International Journal of Fatigue* 30, pp 1956-1966, 2008.
- [88] D.-A. Wang, P.-C. Lin, J. Pan. Geometric functions of stress intensity factor solutions for spot welds in lap-shear specimens. *International Journal of Solids and Structures* 42, pp 6299-6318, 2005.
- [89] S. Zhang. Approximate Stress Intensity Factors and Notch Stresses for Common Spot-Welded Specimens. *Welding Journal, Welding Research Supplement*, Maio, 1999.

- [90] L. P. Borrego. Analysis of low cycle fatigue in AlMgSi aluminium alloys. *Engineering failure analysis* 11, pp 715-725, 2004.
- [91] J. A. Newman, N. E. Dowling. A crack growth approach to life prediction of spot-welded lap joints. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, vol 21, pp 1123-1132, 1998.
- [92] N. Pan, S. D. Sheppard. Stress intensity factors in spot welds. *Engineering Fracture Mechanics* 70, pp 671-684, 2003.
- [93] <http://www.gkss.de/>. Acessado em 20 de setembro de 2009.
- [94] C. B. Smith, J. F. Hinrichs, P. C. Ruehl. Friction stir and friction stir spot welding – lean, mean and green.
- [95] J. Brown, et. al. Evaluation of swept friction stir spot welding through sealants and surface treatments.
- [96] Webpage: [www.infomet.com.br/al\\_processos\\_fabricacao.php](http://www.infomet.com.br/al_processos_fabricacao.php). Acessado dia 2 de Julho de 2008.
- [97] A. M. da Silva, et. al. 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, pp 36-44, 3/2007.
- [98] Relatório do projeto PROBRAL. Progress report – 2007: Friction Spot Welding and Friction Stir Spot Welding of Lightweight Alloys. Referência: LK11102WMP0202, GKSS, Geesthacht, Alemanha, 2007.

## ANEXOS

### A.1. Resultados de dureza

As Figura 115 a Figura 125 apresentam os perfis de microdureza medidos em todas as condições de soldagem estudadas neste trabalho. Os perfis foram medidos a meia altura da chapa superior.



Figura 115 Perfil de microdureza da condição de soldagem 31 (2900 rpm / 2 s), medida a meia espessura da chapa superior.

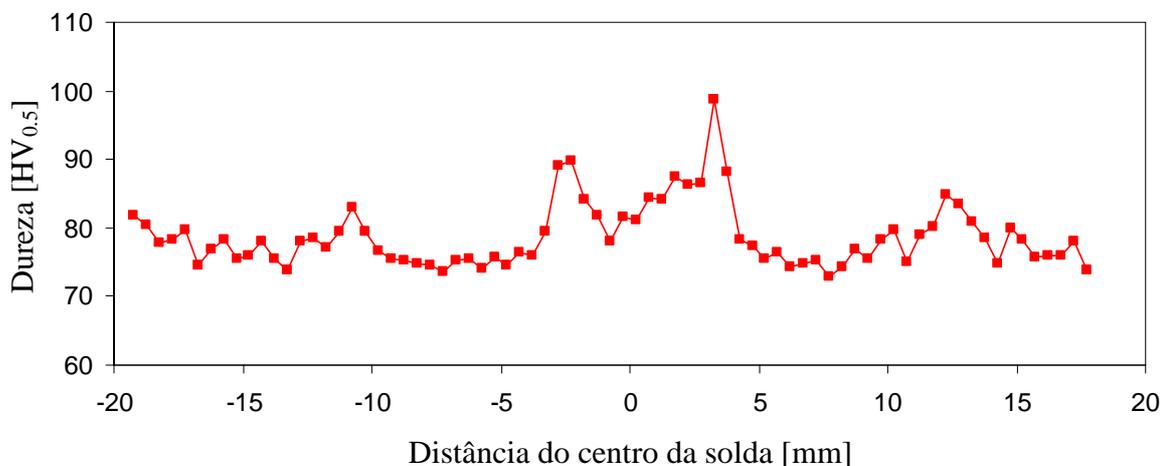


Figura 116 Perfil de microdureza da condição de soldagem 32 (2400 rpm / 2 s), medida a meia espessura da chapa superior.

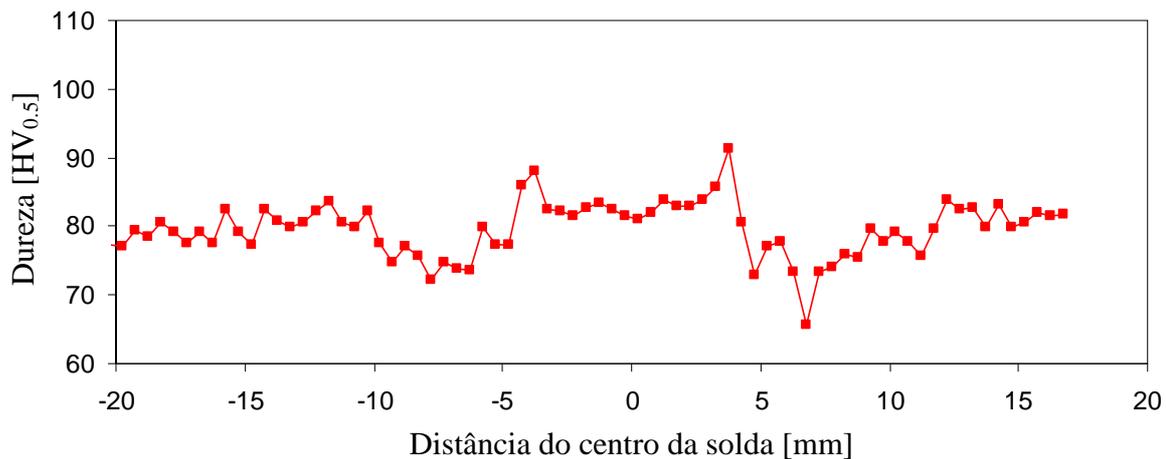


Figura 117 Perfil de microdureza da condição de soldagem 33 (1900 rpm / 2 s), medida a meia espessura da chapa superior.

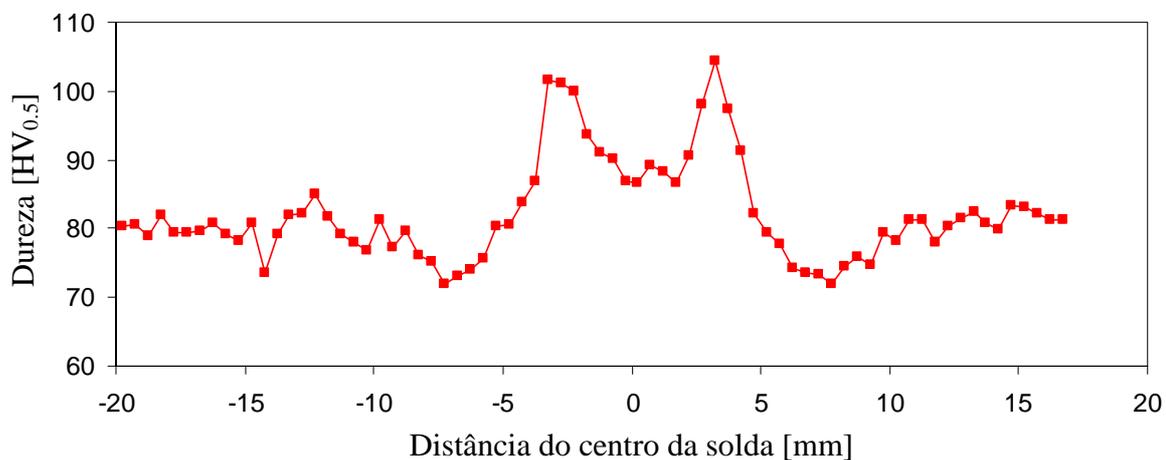


Figura 118 Perfil de microdureza da condição de soldagem 34 (2900 rpm / 2,2 s), medida a meia espessura da chapa superior.

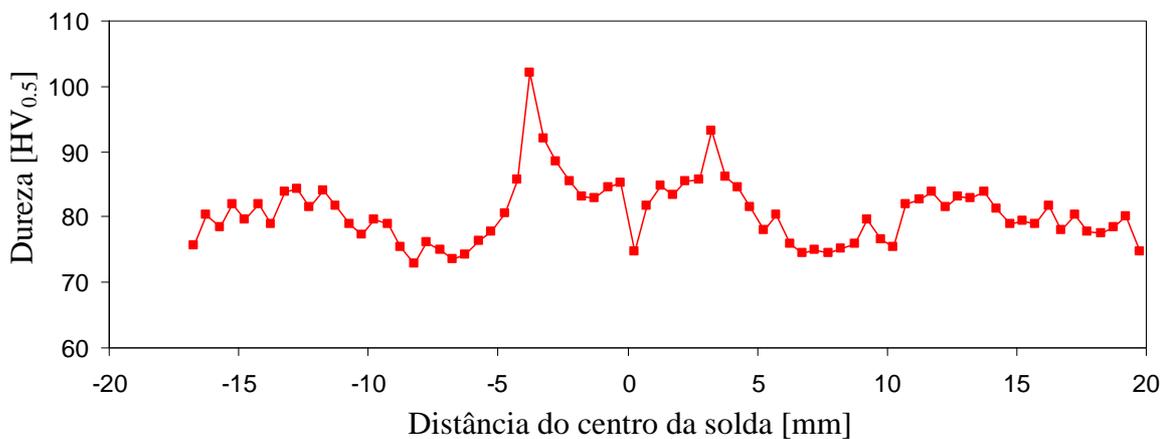


Figura 119 Perfil de microdureza da condição de soldagem 35 (2400 rpm / 2,2 s), medida a meia espessura da chapa superior.

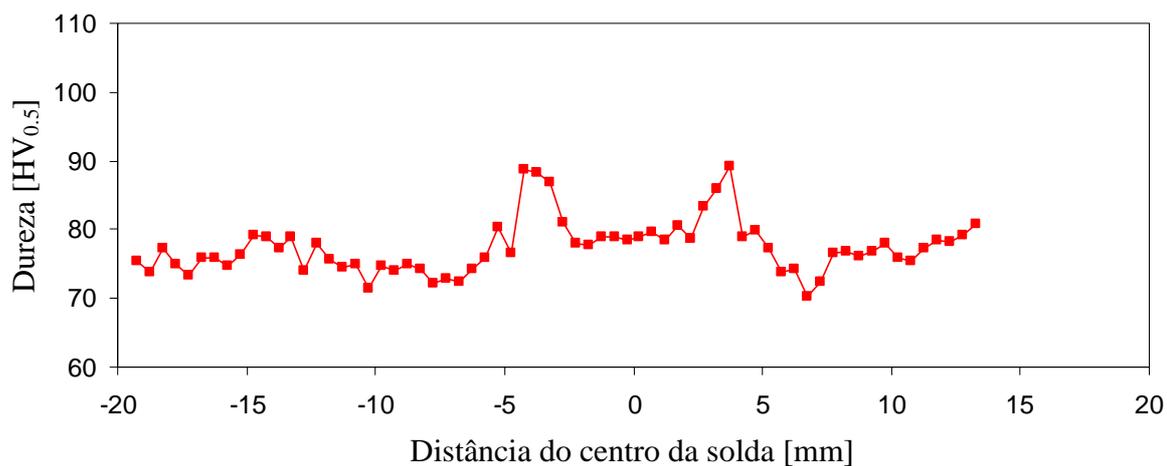


Figura 120 Perfil de microdureza da condição de soldagem 36 (1900 rpm / 2,2 s), medida a meia espessura da chapa superior.

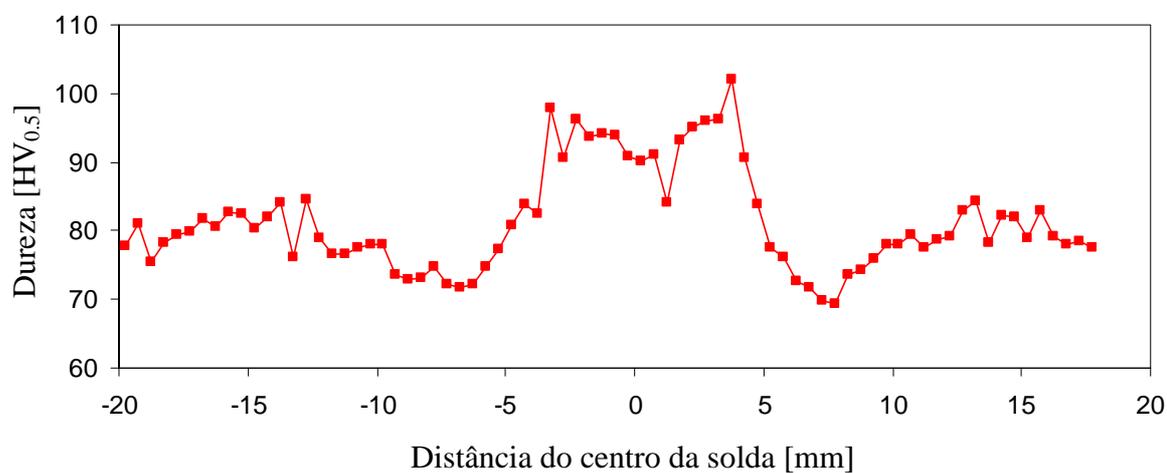


Figura 121 Perfil de microdureza da condição de soldagem 37 (2900 rpm / 2,6 s), medida a meia espessura da chapa superior.

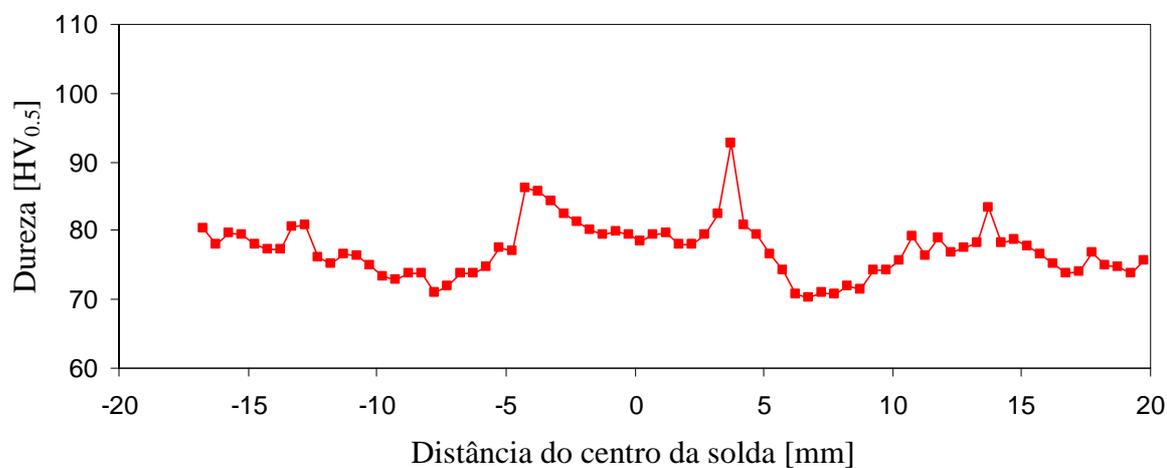


Figura 122 Perfil de microdureza da condição de soldagem 39 (1900 rpm / 2,6 s), medida a meia espessura da chapa superior.

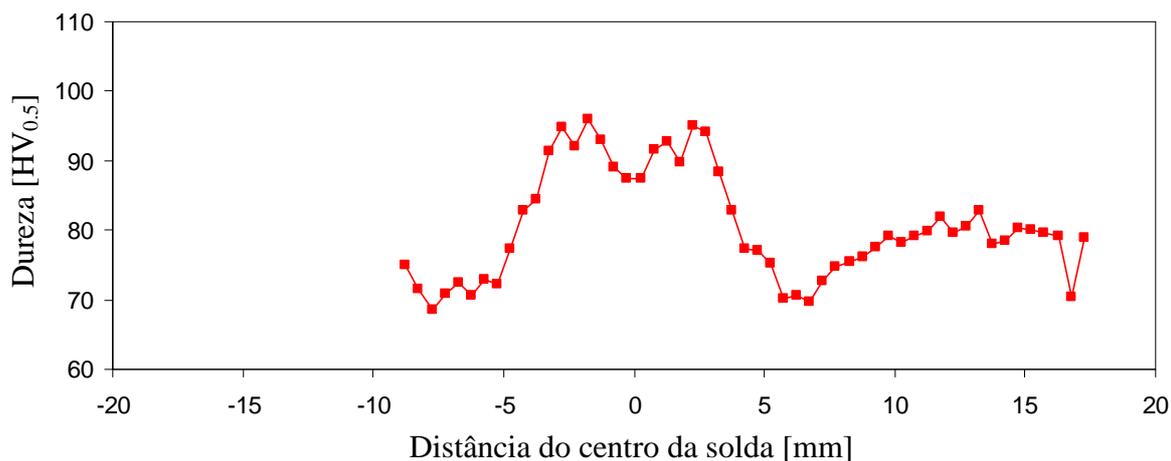


Figura 123 Perfil de microdureza da condição de soldagem 40 (2900 rpm / 3 s), medida a meia espessura da chapa superior.

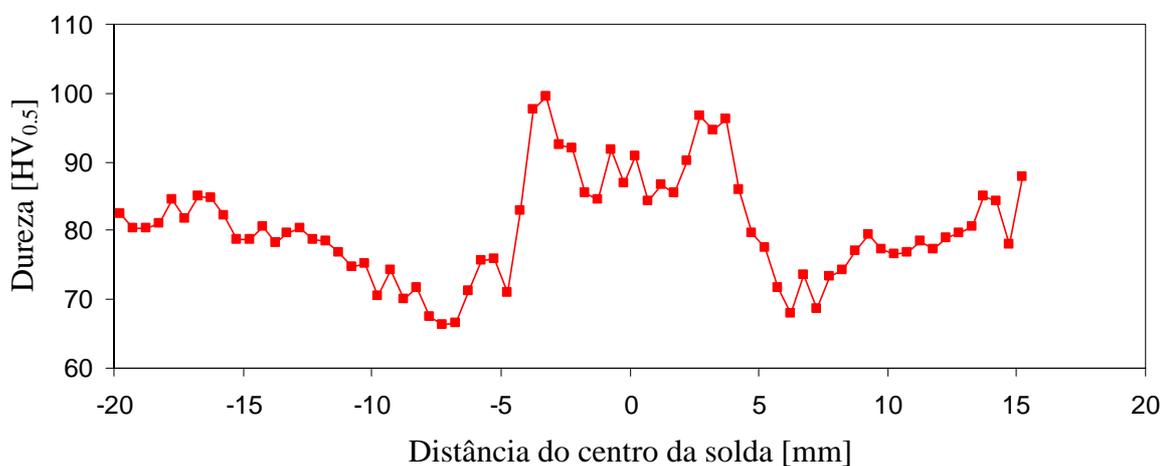


Figura 124 Perfil de microdureza da condição de soldagem 45 (2400 rpm / 3,4 s), medida a meia espessura da chapa superior.

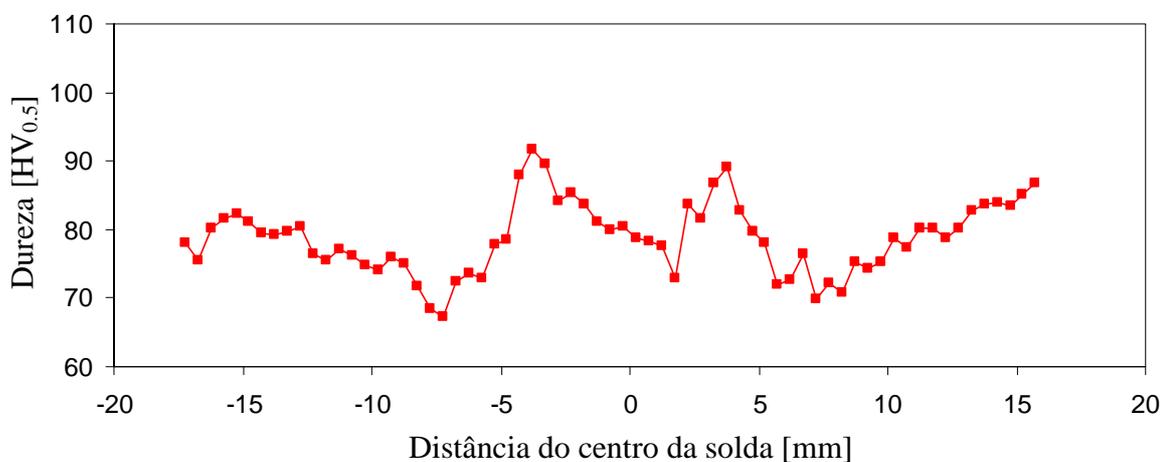


Figura 125 Perfil de microdureza da condição de soldagem 46 (1900 rpm / 3,4 s), medida a meia espessura da chapa superior.

### A.2. Condição de soldagem complementar (tempo curto de processamento)

Sabe-se que um processo para ser competitivo na indústria precisa ser atrativo em termos de custos operacionais, facilidade de implementação, viabilidade técnica e tempo de operação. Atualmente é consenso de que para fazer frente à soldagem a ponto por resistência elétrica, qualquer processo novo precisa satisfazer os critérios acima com tempos de operação de 2 a 3 s no máximo. Desta maneira foi feita a avaliação de uma outra condição de soldagem, além das estudadas neste trabalho. Nesta nova condição de soldagem utilizou-se a seguinte configuração de parâmetros: velocidade de rotação de 2400 rpm, tempo total de soldagem de 2 s e profundidade de penetração de 1,65 mm. A Tabela 4 mostra como esta condição de soldagem se situa em relação as demais condições estudadas.

Tabela 4. Parâmetros de processo das soldas estudadas neste trabalho, incluindo a nova condição 43.

Tempo de soldagem [s]	2			2.2			2.6			3			3.4		
Velocidade de rotação [x1000 rpm]	2.9	2.4	1.9	2.9	2.4	1.9	2.9	2.4	1.9	2.9	2.4	1.9	2.9	2.4	1.9
Penetração* [mm]	1,65														
	43														
	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	44	45	46

\* Nota: Tomando a superfície da chapa superior como referência.

Destaca-se que esta condição de soldagem é semelhante à condição 32 (2400 rpm / 2 s) diferenciando-se pela profundidade de penetração de 1,65 mm. É importante destacar, no entanto, que o processamento é mais lento nesta nova condição 43, uma vez que no mesmo intervalo de 2 s a ferramenta penetra numa profundidade menor (1,65 mm ao invés de 1,75 mm). Em outras palavras, com esta condição procura-se unir os benefícios de uma velocidade de penetração mais lenta da ferramenta com um tempo rápido de soldagem em sacrifício da profundidade de penetração. Quantificando a velocidade ou taxa de penetração da ferramenta para as condições 32 e 43, tem-se os resultados mostrados nas equações 3 e 4.

- Condição de soldagem 32 (2400 rpm / 2 s / 1,75mm):

$$\text{Velocidade de penetração} = \frac{\text{Deslocamento da ferramenta}}{\text{Tempo de soldagem}} = \frac{2 \times 1,75\text{mm}}{2 \text{ s}} = 1,75 \text{ mm/s} \quad [3]$$

- Condição de soldagem 43 (2400 rpm / 2 s / 1,65mm):

$$\text{Velocidade de penetração} = \frac{\text{Deslocamento da ferramenta}}{\text{Tempo de soldagem}} = \frac{2 \times 1,65\text{mm}}{2 \text{ s}} = 1,65 \text{ mm/s} \quad [4]$$

Obs: Note que nas equações 3 e 4 a profundidade de penetração está multiplicada por 2 devido ao deslocamento total da ferramenta (penetração mais retração).

Para esta condição de soldagem também foram realizados ensaio mecânicos de cisalhamento e tração como descritos no item 3 (Materiais e métodos). Na Figura 126 estão mostrados os resultados da resistência mecânica sob solicitação de cisalhamento para todas as condições de soldagem juntamente com o resultado obtido para a condição 43. Note que as três primeiras condições de soldagem (destacadas pelo círculo maior) utilizam o mesmo tempo de processamento que a condição 43, ou seja, 2 s. É notório o benefício desta condição de soldagem, tanto em termos da resistência média como de repetitividade frente às outras produzidas com 2 s.

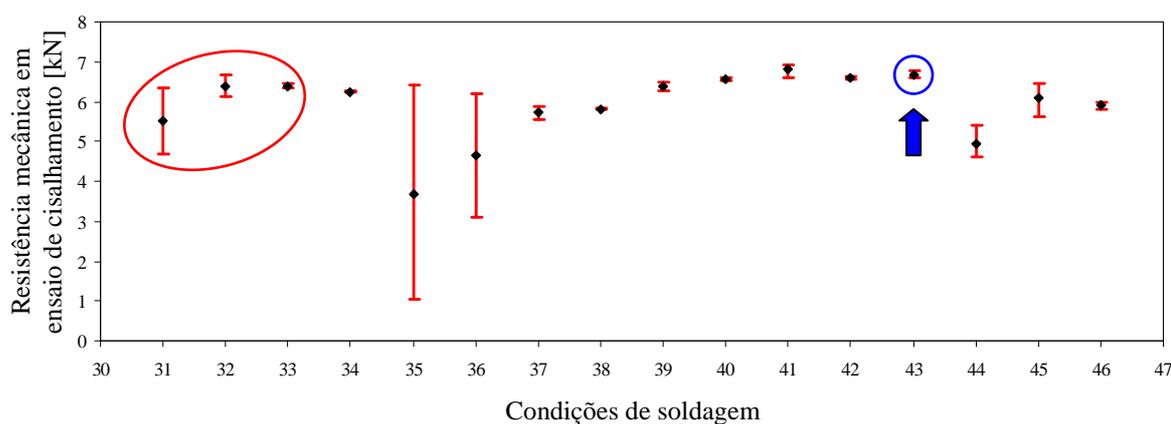


Figura 126. Resistência mecânica em ensaio de cisalhamento incluindo os resultados obtidos para a condição 43 (2400 rpm / 2 s / 1,65 mm).

Em ensaios de tração a condição 43 também mostrou vantagem frente as outras condições de soldagem, como mostra a Figura 127. O círculo maior destaca as condições de soldagem que utilizam o mesmo tempo de processamento que a condição 43 (2 s).

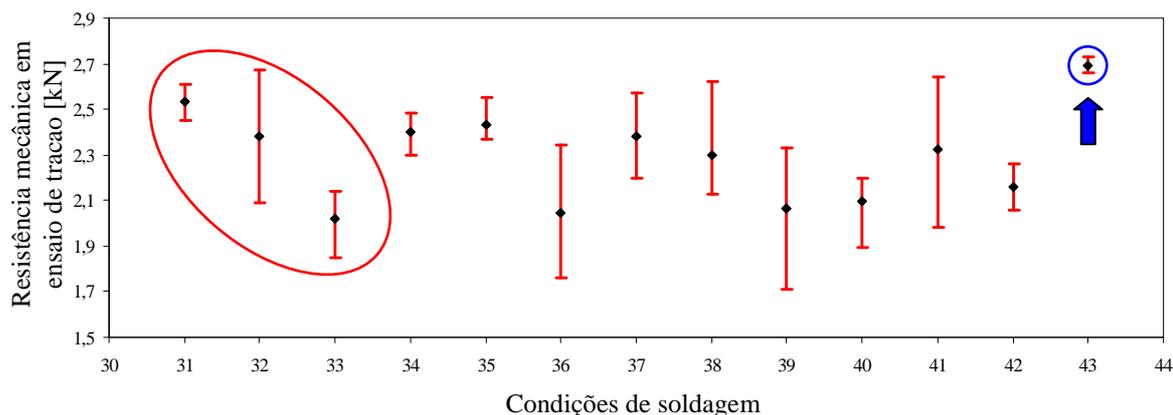


Figura 127. Resistência mecânica em ensaio de tração incluindo os resultados obtidos para a condição 43 (2400 rpm / 2 s / 1,65 mm).

Esta condição de soldagem apresentou um modo de falha do tipo interfacial simples sob solicitação de cisalhamento, sendo a única condição a romper com este modo de falha. É importante destacar que para as outras condições de soldagem sob cisalhamento a falha interfacial não foi de ocorrência muito comum (pela facilidade do desenvolvimento de TCs e sua prevalência no desenvolvimento da falha) e esteve sempre acompanhada de TC. Uma possível explicação para este comportamento da condição 43 poderia ser que a ausência de defeito de soldagem estaria forçando as TCs de nuclearem na Cunha, bastante moderada (não pontiaguda) neste tempo de soldagem. Contudo, a macrografia da secção transversal da junta produzida com a condição de soldagem 43 evidenciou a presença de defeito de soldagem, como mostra a Figura 128.

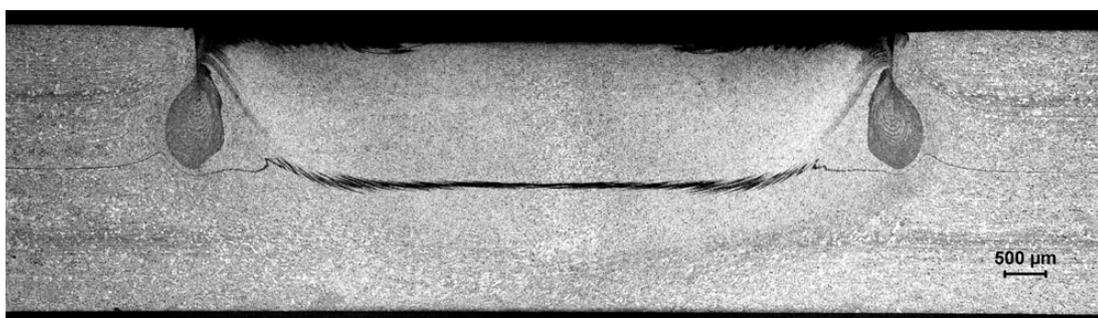


Figura 128. Macrografia da secção transversal de junta produzida com a condição de soldagem 43 (2400 rpm / 2 s / 1,65 mm).

Por outro lado, a comparação do defeito de soldagem entre as condições de soldagem 32 e 43 mostra que o defeito é menor para a condição 43, como mostrado na Figura 129. Este resultado está de acordo com o esperado, dada a menor velocidade de penetração desta condição de soldagem. A menor velocidade de penetração resulta conseqüentemente numa menor taxa de deformação do material da chapa superior imposta pela camisa da ferramenta.

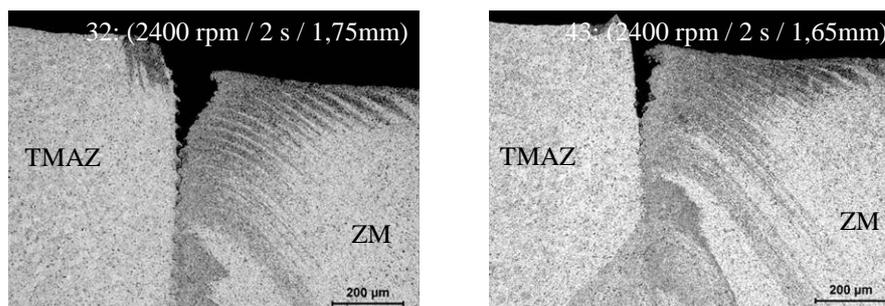


Figura 129. Detalhe dos defeitos do tipo falta de mistura e falta de preenchimento nas soldas produzidas com a condição de soldagem 32 e 43.

Como mencionado anteriormente, esta condição de soldagem sob solicitação de cisalhamento rompeu por fratura interfacial simples. A Figura 130 mostra a secção transversal de uma amostra fraturada após ensaio de cisalhamento, juntamente com as curvas carga x deslocamento das três amostras testadas.

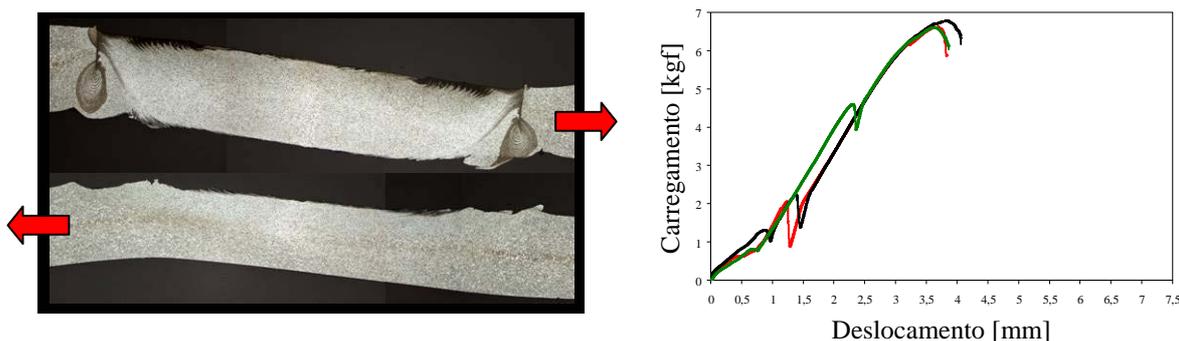


Figura 130. Secção transversal de fratura interfacial simples e curvas carga x alongamento em amostra soldada com a condição de soldagem 43 (2400 rpm / 2 s / 1,65 mm).

O aspecto negativo desta condição de soldagem é o seu comportamento frágil, como está evidenciado pelas curvas carga x deslocamento da Figura 130. As razões para

este comportamento se devem à ausência de TC e a diferença de propriedades entre a União Secundária e a União Principal. O tempo curto de soldagem (2 s) não favorece uma boa adesão entre a chapa superior e inferior na União Secundária. Desta maneira o rasgamento da União Secundária ocorre sob níveis baixos de carregamento, de tal modo que a secção resistente efetiva da junta se torna pequena logo no início do ensaio de cisalhamento. O resultado é a falha abrupta ao longo da União Principal o que ocorre sob nível alto de carregamento, devido à boa adesão nesta região.

A.3. Ferramenta de soldagem

A Figura 131 mostra detalhes e dimensões do anel de fixação da ferramenta de soldagem.

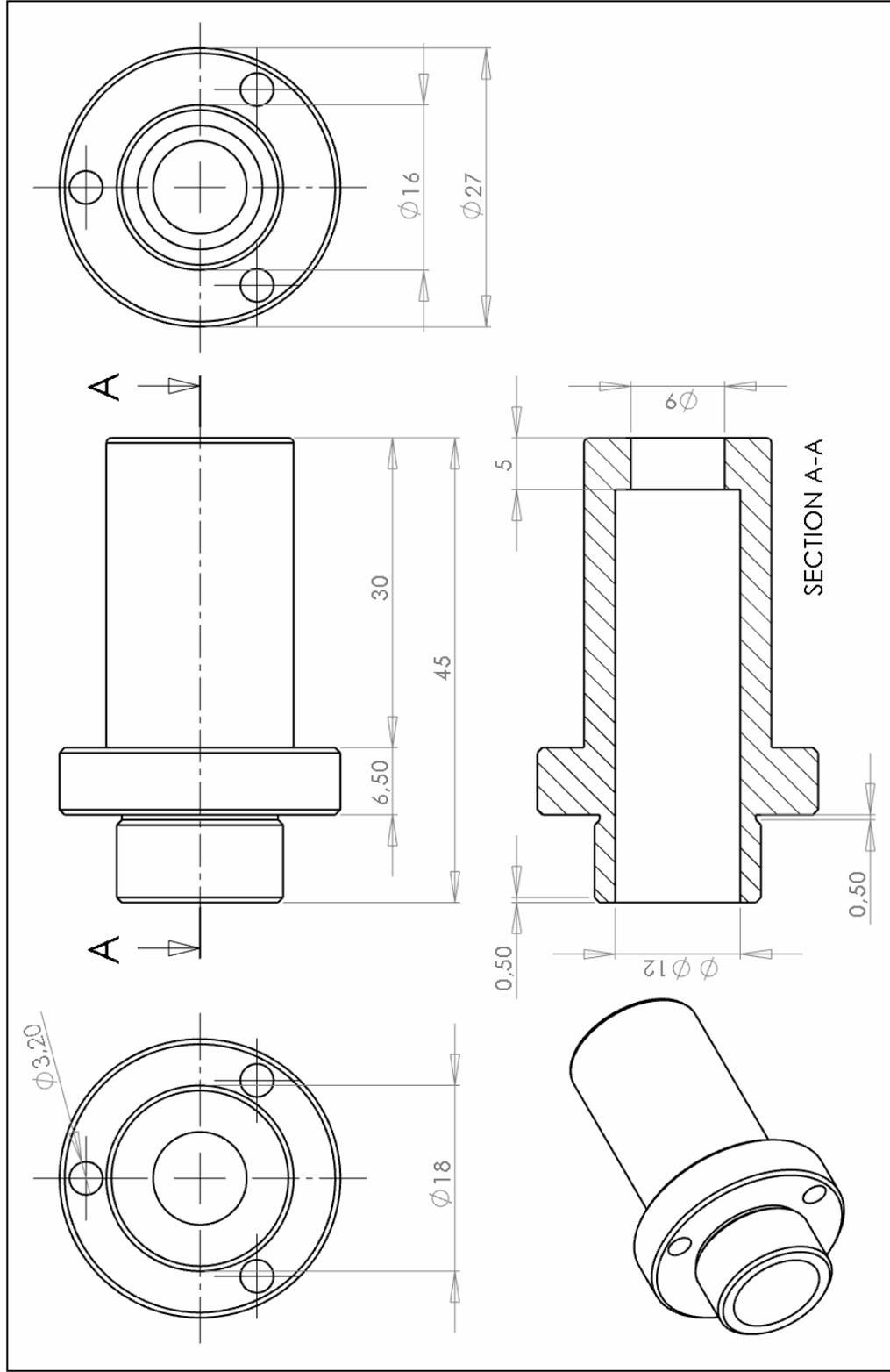


Figura 131. Desenho técnico mostrando as dimensões do anel de fixação da ferramenta de soldagem.

A Figura 132 mostra detalhes e dimensões da camisa da ferramenta de soldagem.

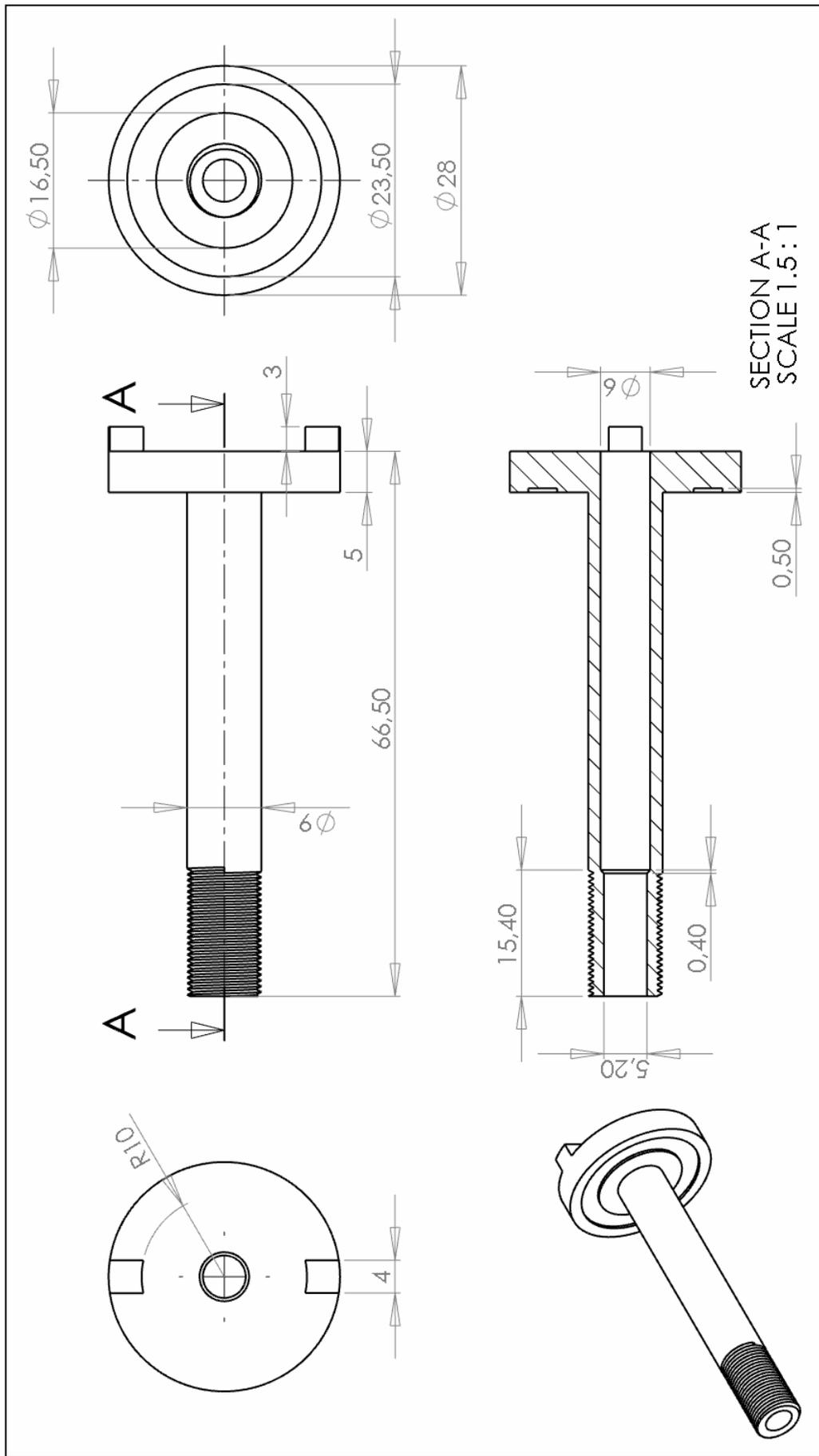


Figura 132. Desenho técnico mostrando as dimensões da camisa da ferramenta de soldagem.

A Figura 133 mostra detalhes e dimensões do pino da ferramenta de soldagem.

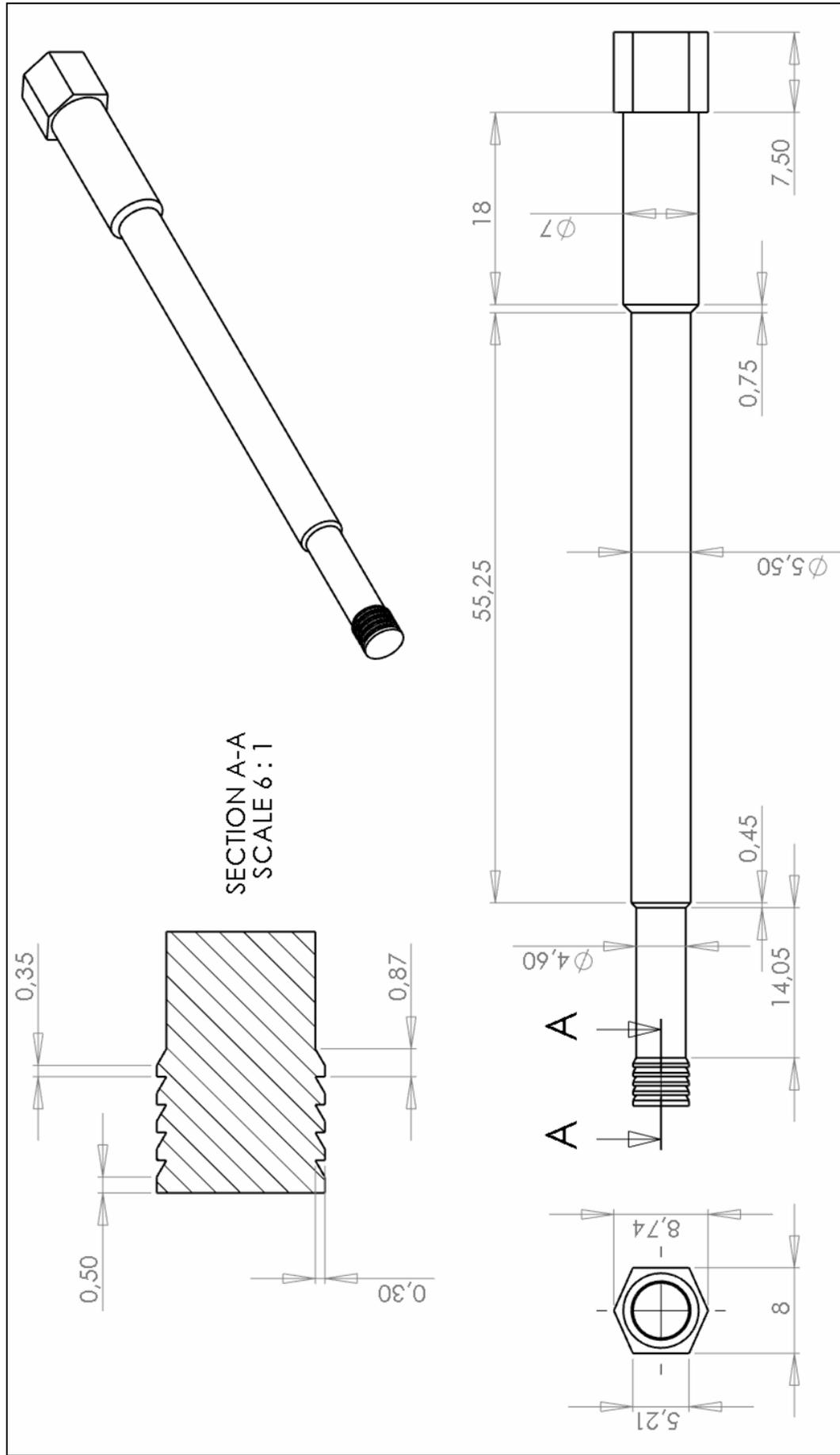


Figura 133. Desenho técnico mostrando as dimensões do pino da ferramenta de soldagem.

#### A.4. Corpos de prova dos ensaios mecânicos monotônicos

A Figura 134 mostra as dimensões do corpo de prova utilizado nos testes de cisalhamento com base na norma DIN EN ISO 14273 [72].

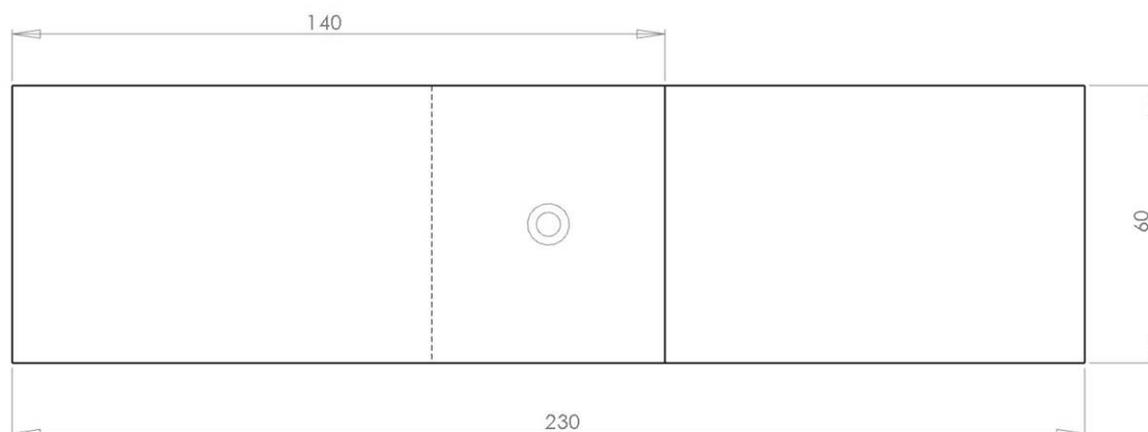


Figura 134. Dimensões do corpo de prova utilizado nos testes de cisalhamento.

Figura 135 mostra as dimensões do corpo de prova utilizado nos teste de tração com base na norma DIN EN ISO 14272 [73].

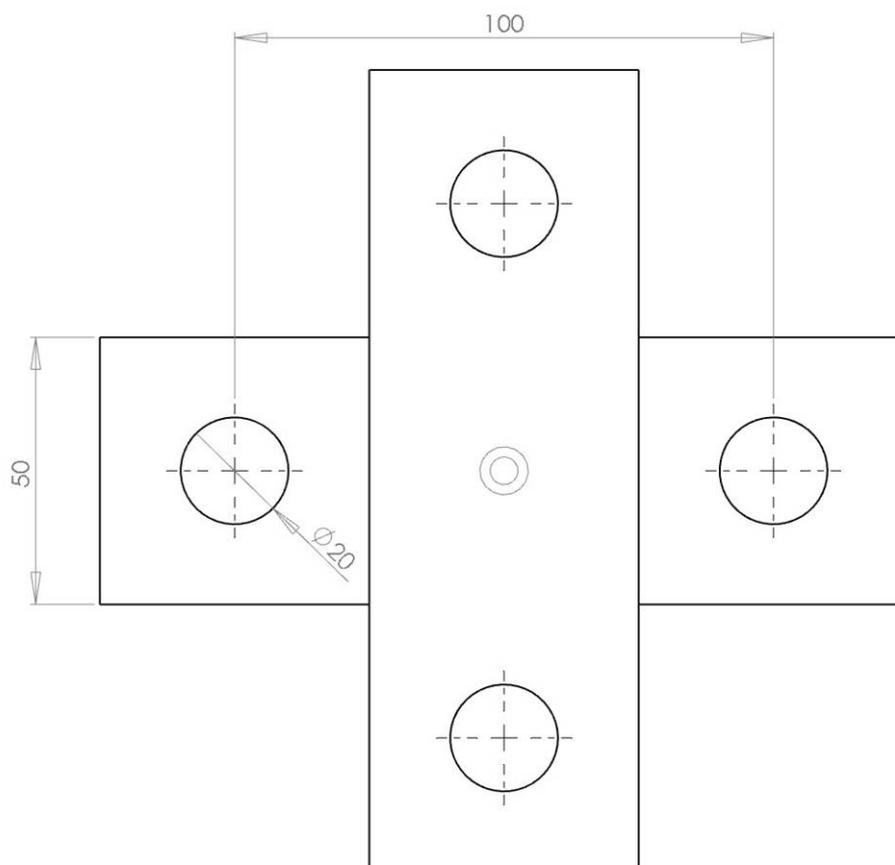


Figura 135. Dimensões do corpo de prova utilizado nos testes de tração.

#### A.5. Centro de Pesquisas GKSS

O GKSS (Gesellschaft für Kernenergie in Schiffbau und Schiffahrt) é um centro de pesquisa alemão (parte da Associação Helmholtz de centros de pesquisa alemães) com duas instalações: uma na cidade de Geesthacht (Figura 136), nas proximidades de Hamburgo, e outra em Teltow, próximo à cidade de Berlim. Fundado em 1956 com a intenção de construir navios de propulsão nuclear, o GKSS passou a ser um centro de pesquisa científica em 1974, aumentando consideravelmente a pesquisa em metais leves na década de 90. Atualmente é reconhecido como um dos mais modernos e renomados centros de pesquisa neste segmento. Com aproximadamente 800 funcionários atuando em projetos nacionais e internacionais, com preocupações como o fornecimento de energia e a conservação dos recursos naturais, tem como slogan “conhecimento gera utilidade”. Com aproximadamente 72,4 milhões de euros de investimentos anuais, majoritariamente provindos do governo alemão e com uma parcela da iniciativa privada, o centro de pesquisa se divide em três institutos: instituto de pesquisas costeiras, instituto de pesquisa em polímeros e instituto de pesquisa em materiais. Ainda conta com um centro de inovação tecnológica, o GITZ [93].



Figura 136. Vista aérea do Centro de Pesquisas alemão GKSS, à margem do rio Elbe em Geesthacht na Alemanha.

O instituto de pesquisa em materiais é subdividido em quatro áreas de atuação: mecânica dos materiais, física dos materiais, tecnologia dos materiais e centro de inovações em magnésio. O grupo de soldagem no estado sólido, dirigido pelo Dr. Jorge F. dos Santos, é parte integrante da divisão de mecânica dos materiais, dentro do instituto de pesquisa de materiais. É composto atualmente por 19 pessoas, incluindo técnicos,

graduandos, mestrandos, doutorandos e doutores, trabalhando em nove diferentes processos de união, todos no estado sólido, em ligas metálicas (similares e dissimilares) e na união de metais com polímeros. Tem infra-estrutura para a realização de soldas nos nove processos de união, e também para análise mecânica e microestrutural das amostras.