

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS, METALÚRGICA
E DE MATERIAIS.

RENAN MENSCH LANDELL

**ANÁLISE DO FLUXO DE MATERIAL NO PROCESSO DE
SOLDAGEM POR FRICÇÃO COM PINO CONSUMÍVEL**

Porto Alegre

2016

RENAN MENSCH LANDELL

**ANÁLISE DO FLUXO DE MATERIAL NO PROCESSO DE SOLDAGEM POR
FRICÇÃO COM PINO CONSUMÍVEL**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Área de concentração: Ciência e Tecnologia dos Materiais.

ORIENTADOR: Prof. Dr. Telmo Roberto Strohaecker

Porto Alegre

2016

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

Reitor: Carlos Alexandre Neto

Vice-Reitor: Rui Vicenter Oppermann

ESCOLA DE ENGENHARIA

Diretora: Denise Carpena Dal Molin

Vice-Diretor: Carlos Eduardo Pereira

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO

Coordenador: Carlos Pérez Bergmann

Mensch Landell, Renan
ANÁLISE DO FLUXO DE MATERIAL NO PROCESSO DE
SOLDAGEM POR FRICÇÃO COM PINO CONSUMÍVEL / Renan
Mensch Landell. -- 2016.
100 f.

Orientador: Prof. Dr. Telmo Roberto Strohaecker.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do
Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de
Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de
Materiais, Porto Alegre, BR-RS, 2016.

1. Soldagem por fricção. 2. FHPP. 3. Fluxo de
material. 4. Tomografia computacional. I. Roberto
Strohaecker, Prof. Dr. Telmo, orient. II. Título.

RENAN MENSCH LANDELL

ANÁLISE DO FLUXO DE MATERIAL DO PROCESSO DE SOLDAGEM POR FRICÇÃO COM PINO CONSUMÍVEL

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia, área de concentração Ciência e Tecnologia dos Materiais, e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora.

Orientador: _____

Prof. Dr. Telmo Roberto Strohaecker, UFRGS

Banca Examinadora:

Prof. Dra. Cintia C. Petry Mazzaferro, UFRGS

Prof. Dr. Luciano Volcanoglo Biehl, FURG

Dra. Mariane Chludzinski, UFRGS

Coordenador do PPGE3M:

Prof. Dr. Carlos Pérez Bergmann

Porto Alegre, (maio de 2016)

Dedico esse trabalho as pessoas que amo,
que sempre me incentivaram a me desenvolver
pessoal e profissionalmente.

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador Professor Dr. Telmo Roberto Strohaecker pela oportunidade de realizar minha pesquisa no Laboratório de Metalurgia Física (LAMEF) da UFRGS e pela orientação ao longo deste trabalho.

À Dra. Mariane Chludzinski e ao Eng. Diogo Buzzatti pelo suporte nas realizações das soldas.

Ao Msc. Eng. Fabiano Mattei e aos demais integrantes do grupo Proeng CDT pelo apoio e coleguismo durante esse período.

Aos demais colegas do LAMEF que auxiliaram na usinagem e preparação dos corpos de provas.

Ao Msc. Eng. Ivan Britto e à empresa General Eletric (GE), por disponibilizarem a utilização do equipamento de tomografia computacional para realização das análises.

Às famílias Mensch, Landell e Presotto pelo carinho e apoio.

RESUMO

Em substituição aos processos de reparo de defeitos por soldagem por arco elétrico, a Soldagem por Fricção com Pino Consumível ou *Friction Hydro Pillar Processing* (FHPP) vem sendo estudada devido a suas diversas vantagens sobre os processos convencionais de reparo. Isso se deve a não ocorrência de fusão do metal base e do metal de adição, ao reduzido tempo de processamento (inferior a um minuto, na maioria dos casos) e à possibilidade de automação do processo. Entretanto, por ser um processo relativamente novo, pouco se sabe sobre o mecanismo de deposição de material e a influência deste na qualidade final da junta soldada. Desta forma, a análise do fluxo de material proposta por esse estudo visa contribuir na compreensão da distribuição do material no interior da junta soldada. Para isso, um traçador de titânio foi inserido no interior da solda de um pino de aço SAE 4140. Para a avaliação das juntas soldadas com o traçador de titânio, foram feitas análises de macro e micrografia, além da análise por raios X por meio de um tomógrafo industrial. A partir dos resultados, constatou-se que o processo de FHPP apresenta dois fluxos distintos: o primeiro relativo à distribuição de material do centro do pino, já o segundo referente à distribuição de material da parede do pino. O material do centro do pino tem a tendência de acumular-se no fundo da solda e por meio dos planos de cisalhamento criados, o material do centro do pino é transportado para a periferia do pino. Já o segundo fluxo de material ocorre entre as superfícies de contato do pino e do furo. É um escoamento de expulsão de material, sendo expulso com a rebarba. Ainda, foi verificado que a mistura de material ocorre somente nas regiões onde há atrito entre as peças: ponta do pino com o fundo do furo, parede do pino com a parede do furo e no plano de cisalhamento a quente. Portanto, a partir do conhecimento do fluxo de material é possível prever a distribuição de particulados no interior da solda, uma vez que elas tendem a se acumular nas regiões com maior intensidade de fluxo. Além disso, a utilização da técnica de tomografia computacional mostrou-se eficaz na identificação de trincas no interior de juntas soldadas por fricção e também para as análises de fluxo em soldas com materiais dissimilares.

Palavras-chaves: Soldagem por fricção, FHPP, fluxo de material, tomografia computacional.

ABSTRACT

The replacement of electric arc welding at cracks repairs by the Friction Hydro Pillar Processing (FHPP) it's being studied due the several advantages of this new process. With the FHPP the process time is less than one minute, the welding temperature is bellow to the melting temperature of the material and the process can be automated. However, as it is a relatively new repair welding process, there are not many information about the material distribution mechanism and the influence of it at the final weld quality. Thus, the material flow analysis proposed by this study intends to contribute to the material comprehension distribution inside the weld. Therefore, a titanium tracer was inserted inside a SAE 4140 steel pin. To evaluate the welds, the samples were analyzed by metallography and by industrial tomography. With the results, were found two different materials flows. The first describes the flow of the material at the center of the pin and the second describes the flow of the material of the faying surface of the pin. The material at the center of the pin tends to accumulate at the bottom of the weld and just above this few volume, appears the hot shear plane that allow the material from the center of the pin flows intermittent to the periphery. Nevertheless, this material is not expelled with the flash. The second flow is the material of the faying surface outside of the center pin, which on part goes to the top of the weld and it is expelled with the flash, and the other goes to the bottom of the weld, but doesn't arrives because of the material already deposited. Furthermore, it was verified that the material stir occurs specially at the regions that the friction happens: faying surface of the pin and the hole and the shear plane. Thus, with that information it is possible to predict the distribution of particulate, as inclusions, inside the weld. Besides that, the industrial tomography proved that is able to identify cracks inside the welds and it is a great tool at the flow analysis of dissimilar welds.

Keywords: Friction welding, FHPP, material Flow, computational tomography.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Etapas do processo de soldagem por fricção. Adaptado de (MACHADO, 1996).	17
Figura 2 – Linhas de fluxos do material durante a soldagem. Adaptado de (BRANDI, 1995).	18
Figura 3 - Comportamento das variáveis do processo divididas em seis etapas (ANDRADE, 2011).	19
Figura 4 – Deformação plástica em pino de aço inoxidável no início da solda (MEYER, 2003).	20
Figura 5 – Escoamento do material para o centro do raio (MEYER, 2003).	21
Figura 6 – Fluxo de material plastificado para a região periférica do pino (MEYER, 2003). .	22
Figura 7 – Parâmetros controlados durante a soldagem por atrito convencional (SOUZA, 2006).	24
Figura 8 – Relação entre taxa de queima e força axial para solda entre duas barras de 1” de aço médio carbono (adaptado de ELLIS, 1972).	25
Figura 9 – Efeito da taxa de queima na resistência à tração (ELLIS, 1972).	26
Figura 10 – Relação entre os parâmetros de soldagem (adaptado de MEYER, 2003).	27
Figura 11 – Etapas do processo de soldagem FHPP: (i) Rotação e aproximação, (ii) atrito inicial, (iii) aquecimento, (iv) forjamento e (v) extração do pino.	28
Figura 12 – Geometrias utilizadas no processo FHPP. Na esquerda a geometria cilíndrica e na direita a geometria cônica (PIRES, 2007).	29
Figura 13 - Macrografia típica do processo FHPP e suas respectivas zonas (HATTINGH ET AL., 2011).	30
Figura 14 – Macrografia com trinca na região de união da rebarba (HATTINGH ET AL., 2011).	31
Figura 15 – Velocidade do fluxo de material na superfície de fricção no tempo de 4.1 segundos (SHU-DE et al., 2012).	33
Figura 16 – Desenho esquemático do processo de <i>Friction Stir Welding</i> (MISHRA; KUMAR, 2014).	34

Figura 17 – Ilustração esquemática do fluxo de material na zona de mistura em diversas velocidades de rotação (FUJII ET AL. 2006).....	35
Figura 18 – Geometria do pino e base com traçador de níquel (MEYER, 2003).	37
Figura 19 – Macrografias das soldas de FHPP com traçador de níquel com diferentes parâmetros de soldagem (MEYER, 2003).....	38
Figura 20 – Preenchimento do furo na solda por FHPP com traçador de níquel com diferentes consumos finais (MEYER, 2004).....	38
Figura 21 – Identificação das regiões da solda e relação entre o fluxo de material e o torque (YIN et al., 2015).....	40
Figura 22 – Comportamento do fluxo de material sobre diferentes forças axiais (YIN et al., 2015).....	40
Figura 23 – Exemplo de atenuação dos raios X. Fótons atenuados em função da espessura de um meio (a) e gráfico da atenuação dos fótons pela espessura (b) (TETZNER, 2008).....	42
Figura 24 – Imagem tomográfica com escala de atenuação linear. Amostra de rocha ígnea (TETZNER, 2008).....	43
Figura 25 - Tomografia de amostras de alumínio. Amostra com defeitos simulados (a) e amostra de alumínio fundido com a presença de porosidades (b) (MASCHIO, 1997).....	44
Figura 26 – Malha poligonal reconstruída de um isolador tipo pino, a seta identifica uma bolha interna (GODOI, 2012).....	44
Figura 27 – Imagem renderizada em escala de cinza (a) e imagem renderizada utilizando cores para diferentes densidades (b). As setas indicam os defeitos (SILVA; BALDO, 2013).	45
Figura 28 – Imagens de projeções das seções virtuais e da renderização em 3D de um conjunto de fios de cobre revestidos com verniz (SILVA, BALDO E YAMANAKA, 2013).	46
Figura 29 – Fluxograma da metodologia.....	47
Figura 30 – Equipamento para soldagem por fricção MSA 50 (ANDRADE, 2011).....	50
Figura 31 – Vista isométrica (a) e vista frontal com corte transversal (b).	51
Figura 32 – Dimensões em mm: do furo da base (a), do pino (b), do pino com furo do traçador centralizado (c) e do pino com furo do traçador deslocado (d).	51
Figura 33 – Pinos e base para análise de parâmetros.	53

Figura 34 – Soldas de definição de parâmetros seccionadas por eletroerosão.....	54
Figura 35 – Linhas em vermelho, indicando o local de medição do perfil de microdureza da solda 05.....	56
Figura 36 – Amostra soldada (a) e corpo de prova para o tomógrafo computacional (b).....	57
Figura 37 – Equipamento de tomografia (a) e fixação da peça e tubos emissores de raios X (b).....	58
Figura 38 – Gráfico de densidade (kg/m^3) pela tensão de escoamento (MPa).....	59
Figura 39 – Gráfico de temperatura de fusão (K) pela máxima temperatura em serviço (K).....	60
Figura 40 – Representação da distribuição do titânio nas soldas 04 (a), 05 (b), 06 (c), 09 (d) e 10 (e).....	68
Figura 41 – Fluxo de material do titânio na soldagem por fricção com pino consumível.....	69
Figura 42 – Desenho esquemático da localização e dispersão das inclusões antes e depois da soldagem. Em vermelho estão representadas as inclusões de MnS (CHLUDZINSKI, 2013).....	70
Figura 43 – Regiões da solda 04: material base do pino (a), macrografia da solda 04 (b), trinca entre o pino e a rebarba (c), material base da base (d), ZTA base (e) e ZTA do pino (f).....	71
Figura 44 – Linhas de bandeamento das rebarbas do furo e do pino da amostra 05.....	72
Figura 45 – Micrografia da linha de união entre o pino e o furo da base e a distribuição do material do traçador da amostra 04.....	73
Figura 46 – Micrografia da linha de união entre o pino e o furo da base e a distribuição do material do traçador da amostra 05.....	73
Figura 47 – Micrografia da linha de união entre o pino e o furo da base e a distribuição do material do traçador da amostra 06.....	74
Figura 48 - Micrografia da linha de união entre o pino e o furo da base e a distribuição do material do traçador (imagem mais clara) da amostra 09.....	75
Figura 49 - Micrografia da linha de união entre o pino e o furo da base e a distribuição do material do traçador da amostra 10.....	76
Figura 50 – Perfil de microdureza (HV) horizontal da solda 05, em (a) macrografia e (b) gráfico de dureza. Material da base (MB), zona termicamente afetada (ZTA), zona termo mecanicamente afetada (ZTMA) e traçador de titânio (Ti).....	77

Figura 51 – Perfil de microdureza (HV) vertical da solda 05 em (a) macrografia e (b) gráfico de dureza. Material da base (MB), material do pino (MP), zona termicamente afetada (ZTA) e zona termo mecanicamente afetada (ZTMA).	77
Figura 52 – Vista do corte transversal frontal (a) e vista do corte transversal frontal rotacionada (b) do volume 3D da solda 07.	79
Figura 53 – Evolução do fluxo de Ti inserido no centro do pino da solda 07. Altura entre planos de 0,31mm.	80
Figura 54 – Renderização em três dimensões do traçador de titânio (a) e (b). Plano de cisalhamento a quente em diferentes ângulos (c), (d) e (e). Solda 08.	82
Figura 55 – Vista da seção transversal no centro da junta soldada (a) e vista da seção transversal deslocada do centro da junta soldada (b) da amostra 08.	83
Figura 56 – Evolução do fluxo de Ti inserido fora do centro do pino da solda 08. Altura entre os planos de 0,30mm para as primeiras nove imagens, para as demais a altura foi aumentada.	84
Figura 57 – Renderização em três dimensões do traçador de titânio (a), (b), (c) e (d). Solda 08.	86
Figura 58 – Macrografia da solda 11.	95
Figura 59 – Fluxo do traçador de cobre na solda 11.	96
Figura 60 – Micrografias da região central do traçador de cobre.	97

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Comparação entre os processos convencional e inercial de soldagem (BRANDI, 1995).....	16
Tabela 2 – Parâmetros de soldagem utilizados por Andrade (2011) e Hattingh et al. (2011)..	31
Tabela 3 – Estudos do fluxo de material no FSW (MISHRA e KUMAR, 2014).	35
Tabela 4 – Comparação entre os parâmetros de soldagem de referência.....	52
Tabela 5 – Comparação entre os parâmetros utilizados pelos autores e os propostos nesse estudo.....	53
Tabela 6 – Parâmetros utilizados nas amostras soldadas.	55
Tabela 7 – Propriedades das ligas Ti-6Al-4V e SAE 4140 (CES).....	61
Tabela 8 – Composição química típica em % de peso da liga Ti-6Al-4V (ASM, 1992).....	61
Tabela 9 – Composição química em % de peso da liga SAE 4140 (ASM, 1993).	61
Tabela 10 – Composição química em % de peso da liga Ti-6Al-4V.	61
Tabela 11 – Composição química em % de peso da liga SAE 4140.....	61
Tabela 12 – Dureza medida nas amostras.	62
Tabela 13 – Macrografia e registro dos parâmetros das soldas 01, 02 e 03. Descontinuidades e trincas indicadas pelas setas.....	63
Tabela 14 – Macrografias e gráficos das soldas 04, 05, 06, 09 e 10 com traçador.	66
Tabela 15 – Corpo de provas e volume em 3D das soldas.....	78

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ASM: *American Society for Metal*

CES: *Cambridge Engineering Selector*

GE: *General Eletric*

FHPP: *Friction Hydro Pillar Process*

FSW: *Friction Stir Welding*

PCQ: Plano de Cisalhamento a Quente

TC: Tomografia Computacional

Ti: Titânio

ZTA: Zona Termicamente Afetada

ZTMA: Zona Termo Mecanicamente Afetada

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1	SOLDAGEM POR FRICÇÃO	16
2.1.1	Caracterização das etapas de soldagem por fricção.....	19
2.1.2	Parâmetros de soldagem	23
2.1.3	Influência dos parâmetros de soldagem	24
2.1.4	Soldagem por fricção com pino consumível (FHPP).....	27
2.1.5	Fluxo de material durante a solda por fricção.....	32
2.2	TOMOGRAFIA COMPUTADORIZADA	41
2.2.1	Funcionamento da tomografia computadorizada	41
2.2.2	Aplicações da tomografia industrial	43
3	METODOLOGIA.....	47
3.1	SELEÇÃO DOS MATERIAIS	48
3.2	EQUIPAMENTO PARA SOLDAGEM POR FRICÇÃO.....	49
3.3	GEOMETRIA E CONFIGURAÇÃO DAS AMOSTRAS PARA SOLDA	50
3.4	DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS DE SOLDAGEM	51
3.5	SOLDAS COM TRAÇADOR.....	54
3.5.1	Macrografia.....	55
3.5.2	Micrografia.....	55
3.5.3	Microdureza	56
3.6	ANÁLISE COM TOMÓGRAFO INDUSTRIAL.....	56
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	59
4.1	SELEÇÃO DOS MATERIAIS	59
4.2	ANÁLISES PRELIMINARES	62
4.3	SOLDAS COM TRAÇADOR DE TITÂNIO.....	65
4.3.1	Macrografia.....	65
4.3.2	Micrografia.....	70
4.3.3	Microdureza	76
4.4	ANÁLISE COM TOMÓGRAFO COMPUTACIONAL	77
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	87

6	CONCLUSÕES.....	89
7	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	90
	REFERÊNCIAS	91
	APÊNDICE – SOLDA COM TRAÇADOR DE COBRE.....	95

1 INTRODUÇÃO

Na indústria do petróleo, paradas para realizações de manutenções têm um alto custo e, muitas vezes, trazem risco à segurança dos operadores devido ao contato com substâncias inflamáveis e ambientes adversos. Conforme Agência Brasil (2013), a produção diária de petróleo no Brasil no mês de março de 2013 teve uma redução de 8,2% em relação ao mês anterior devido ao tempo utilizado nas manutenções programadas. Portanto, o desenvolvimento de novas tecnologias de processos de reparos que atendam as indústrias tanto em qualidade, quanto em rapidez, é uma busca constante para maximizar a produção.

Assim, em substituição à solda por arco elétrico, normalmente utilizada em reparos, a Soldagem por Fricção com Pino Consumível ou *Friction Hydro Pillar Processing* (FHPP) vem sendo estudada com o objetivo de ser aplicada na manutenção de dutos e estruturas metálicas *offshore*. Esse novo processo apresenta diversas vantagens em relação aos métodos convencionais de soldagem. Uma dessas vantagens é a não ocorrência da poça de fusão, característica crítica de outros processos de soldagem. Segundo Meyer (2003), a coexistência simultânea de um arco de solda e aço fundido em um ambiente com alta umidade é motivo de preocupação. Isso se deve ao fato de que ao fundir um material em um ambiente com alta umidade, existe o risco de o material ficar com alto teor de hidrogênio, fragilizando assim a região soldada.

O processo de FHPP, resumidamente, consiste em usinar um furo na região da trinca e inserir um pino em rotação. Com o calor gerado pelo atrito entre as faces (furo e pino), o material do pino plastifica e escoar, preenchendo o furo. Com o preenchimento do material aliado à força axial imposta, ocorre a união metalúrgica entre as peças. Por ser um processo em estado sólido, sem a fusão dos materiais, ele pode ser utilizado na presença de hidrocarbonetos. Além disso, é possível soldar na presença de umidade e em locais submersos com menor risco de fragilização por hidrogênio (PIRES, 2007). Essas características diferem-se dos métodos convencionais, como a solda por arco elétrico, que precisam de controles rigorosos para serem utilizados nesses ambientes. Paes (2013) apresenta as dificuldades enfrentadas nos reparos em tanques de armazenamento de óleo em navios de extração de petróleo, nos quais a execução de um reparo por soldagem convencional torna necessária a total remoção dos hidrocarbonetos do espaço vapor do tanque, tal medida asseguraria a segurança para a operação.

Além disso, a pressão hidrostática não é um fator limitante para a utilização da solda por fricção, assim como é para as juntas soldadas por arco elétrico. A união entre as peças é rápida, normalmente inferior a um minuto, possuindo uma boa repetitividade e o processo pode ser automatizado.

Essa nova perspectiva de reparo rápido, eficiente, de qualidade e de baixo custo operacional tem sido reconhecida pelas empresas que passaram a investir no desenvolvimento dessa tecnologia junto às universidades e centros de pesquisas por todo o mundo. Esses estudos buscam entender melhor o processo, criando bancos de dados com os parâmetros ideais de soldagem para a união de diferentes tipos de materiais e analisando as propriedades finais das soldas por meio de diferentes ensaios mecânicos. Existem diversos trabalhos publicados a respeito do processo de soldagem por fricção, porém referente à tecnologia de FHPP esse número é reduzido.

Portanto, esse trabalho tem como objetivo entender o comportamento do fluxo de material durante a soldagem por fricção com pino consumível. A partir dos resultados obtidos, será possível entender os problemas relacionados à contaminação superficial e a dispersão de particulados. A presença de inclusões na região da solda diminui a tenacidade do material e, por isso, é importante conhecer sua distribuição dentro da junta soldada. Além disso, não é usual realizar o preparo das superfícies dos materiais antes da soldagem por fricção, acreditando-se que os óxidos e contaminantes são expulsos pela rebarba final. Também, dificuldades com a falta de preenchimento são recorrentes e um melhor entendimento da distribuição do material pode ajudar a resolvê-los.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 SOLDAGEM POR FRICÇÃO

O primeiro registro da utilização da técnica de soldagem por fricção ocorreu em 1891, nos Estados Unidos da América. A partir dessa data, outros países como a Alemanha, em 1929, a Inglaterra, entre 1941 e 1942, e a União Soviética, em 1956, também registraram o desenvolvimento de patentes a respeito desse novo processo (SILVA, 2015; MACHADO, 1996). A soldagem por fricção ou atrito é um processo de união no estado sólido o qual transforma a energia mecânica em energia térmica por meio do atrito para a união de materiais (ASM, 1993; SILVA, 2015; MACHADO, 1996).

Existem dois tipos de processos de geração de energia que são utilizados: a soldagem por atrito direta ou convencional e a inercial (ASM, 1993). A principal diferença entre elas é o tipo de acionamento utilizado: na convencional é utilizado um motor girando a velocidade constante, no qual a rotação da peça está diretamente ligada à rotação do motor, enquanto que no inercial a velocidade da peça é gerada por um volante com energia previamente acumulada. Tal diferença tem influência direta na determinação dos parâmetros iniciais da solda e também em sua qualidade final. A Tabela 1 apresenta uma breve comparação entre as características dos dois processos.

Tabela 1 – Comparação entre os processos convencional e inercial de soldagem (BRANDI, 1995).

Parâmetros	Convencional	Inercial
Tempo de solda	Maior (10 vezes o tempo do processo inercial)	Menor
Energia	Menor (12 – 47 W/mm ²)	Maior (23 – 174 W/mm ²)
Torque	Menor	Maior
Tamanho da zona termicamente afetada (ZTA)	Maior	Menor
Resistência mecânica	Menor (linhas de fluxo radiais)	Maior (linhas de fluxo em hélice)

Para a revisão bibliográfica será analisado somente o processo convencional, uma vez que o equipamento utilizado para esse estudo se enquadra nessa classificação.

O método de soldagem por atrito pode ser dividido em quatro etapas. Com as peças montadas coaxialmente, a primeira etapa consiste na rotação de pelo menos uma das peças e a aproximação das faces. Na segunda, as faces entram em contato e a energia cinética é transformada em energia térmica por meio do atrito. Depois de aquecidas as peças, na terceira fase o material alcança o seu estado plástico e a rebarba ou *flash* começa a ser formada. Na quarta e última etapa, a rotação é interrompida e é aplicada a força de forjamento para garantir a união metalúrgica das peças. Essa etapa pode ser chamada de forjamento ou recalque. A Figura 1 exemplifica o processo descrito.

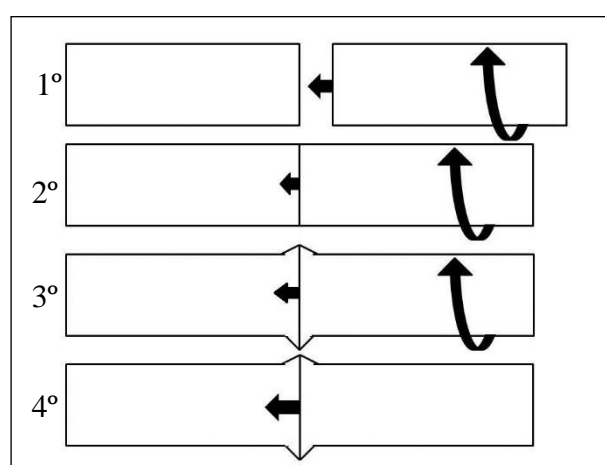


Figura 1 – Etapas do processo de soldagem por fricção. Adaptado de (MACHADO, 1996).

É um processo com um elevado nível de complexidade, o qual constitui na interação de diversos fenômenos. Na soldagem por fricção, há um intenso calor localizado na superfície em atrito e durante o processo ocorre a união entre as superfícies em contato e em sequência a destruição dessa adesão, devido ao movimento relativo entre as mesmas. Além dessas interações, também ocorre uma grande variação do gradiente de temperatura em pequenos volumes do metal. Também estão presentes no processo: altas pressões localizadas, trabalho a frio, recristalização, possível destruição dos filmes de óxidos, remoção de óxidos e contaminantes junto a rebarba e a variação do valor do limite de resistência ao escoamento do material e do coeficiente de atrito com o aumento da temperatura (PAES, 2013).

Porém, mesmo sendo complexa, a soldagem por atrito apresenta grandes vantagens quando comparada aos processos convencionais utilizados. Segundo Machado (1996), as principais vantagens são:

- Não é necessária a utilização de metal de adição;

- Sofre pouca ou nenhuma influência do meio externo;
- A junta apresenta alta qualidade e boas propriedades mecânicas;
- O tamanho da ZTA é reduzido;
- Menores gastos com energia elétrica;
- Tempo de soldagem reduzido;
- Baixa temperatura de processamento, entre 60% e 80% da temperatura de fusão (FLIPO, 2015). Segundo Meyer (2003), a temperatura de fusão do material pode ser alcançada em regiões localizadas, ocasionando uma queda substancial na geração de calor. Consequentemente, a dissipação de calor aumenta e a fusão não consegue manter-se;
- União entre materiais dissimilares (YEH, 2012).

Assim, é possível conseguir juntas soldadas que apresentem características mecânicas e metalúrgicas melhores a, pelo menos, um dos materiais utilizados (BRANDI, 1995). Antes de soldar, na maioria dos casos, não são necessárias etapas de limpeza das superfícies, pois durante a soldagem as impurezas e óxidos presentes na superfície são expulsos pelo fluxo de material. Conforme a Figura 2, a soldagem por fricção convencional apresenta linhas de fluxo radial de material escoado, ou seja, o metal plastificado escoado do centro para o perímetro (MACHADO, 1996; BRANDI, 1995).

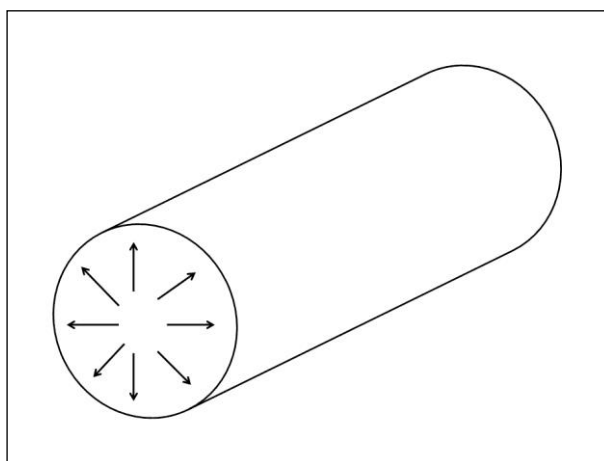


Figura 2 – Linhas de fluxos do material durante a soldagem. Adaptado de (BRANDI, 1995).

Como qualquer processo, a solda por atrito apresenta limitações. De acordo com Mattei (2011) e Machado (1996), as principais desvantagens são: as peças devem possuir geometria compatível com as características do processo; alto investimento no equipamento;

normalmente ao menos uma das peças precisa ser rotacionada; o alinhamento das peças pode interferir nos resultados.

2.1.1 Caracterização das etapas de soldagem por fricção

O processo de soldagem por fricção é dividido por diversos autores em quatro etapas, sendo elas na ordem cronológica: atrito inicial, aquecimento, frenagem e forjamento, conforme descrito anteriormente (MEYER, 2003; MATTEI, 2011). Porém, segundo Lebedev e Chernenko (1991 apud PIRES, 2007, p.13) e Andrade (2011), o mesmo processo pode ser dividido mais detalhadamente em seis etapas. Conforme a Figura 3, é possível observar a divisão das seis fases no gráfico, no qual no eixo das ordenadas estão presentes os principais parâmetros como: torque $M(t)$, velocidade de rotação $n(t)$, força axial $F(t)$, deslocamento $\Delta L(t)$, potência $N(t)$ e temperatura $T(t)$ em função do tempo.

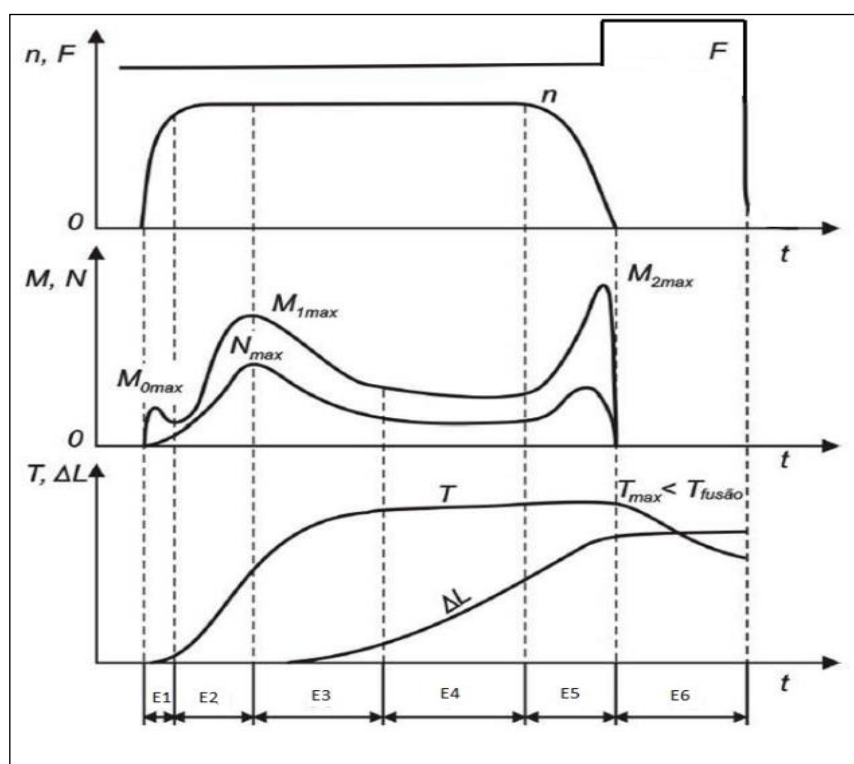


Figura 3 - Comportamento das variáveis do processo divididas em seis etapas (ANDRADE, 2011).

Na etapa inicial E1, verifica-se o contato entre as faces das peças a serem soldadas e uma forte interação mecânica entre as superfícies (efeito “esmerilhamento”). O primeiro

máximo do valor do torque (M_{0max}) ocorre nessa etapa, devido à aspereza presente nas superfícies em contato e a alta tensão na região superficial. Com o aumento da velocidade rotacional, até permanecer constante, o torque apresenta uma pequena queda em função da lubrificação limítrofe que ocorre devido à presença de impurezas superficiais. As impurezas superficiais (como graxa, óleo e água) são destruídas quando a temperatura chega aproximadamente a 150-200°C, dando início a um atrito sem lubrificação e, conseqüentemente, ao aumento da temperatura e do gradiente de temperatura (PAES, 2013). Meyer (2003) afirma que no primeiro contato entre as faces é exercida uma alta pressão localizada provocando uma deformação plástica das superfícies. Nessa etapa, a região entre 0,3 e 0,7 do raio é submetida a severas deformações e a um rápido aquecimento, enquanto o restante da superfície permanece inalterado.

Meyer (2003) também apresenta um experimento no qual depois de interromper (na etapa inicial) uma solda entre duas barras de aço inoxidável, as superfícies de contato apresentaram uma grande deformação na região a 0,7 do raio. Na Figura 4 é possível visualizar a deformação plástica (região mais escura) dos pinos.

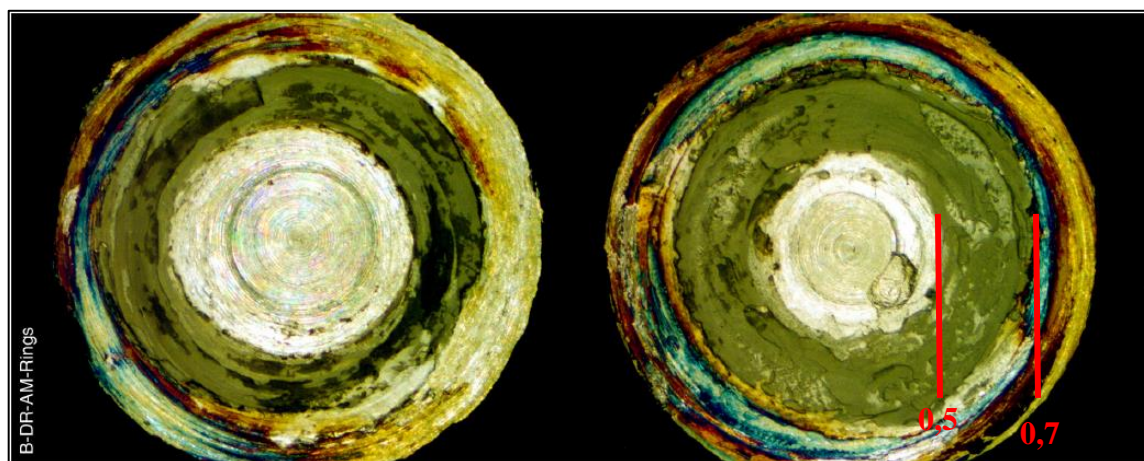


Figura 4 – Deformação plástica em pino de aço inoxidável no início da solda (MEYER, 2003).

Segundo Crossland (1971), as condições de baixas forças radiais e o reduzido fluxo de material, na região plastificada, obstruem a eliminação das partículas contaminantes da superfície. Essa concentração de material resulta em um aquecimento local e posterior rompimento de uma fina camada de material plastificado. Devido a esse processo, ocorre o rompimento dos óxidos e das camadas de adsorção e, assim, as contaminações presentes nas

superfícies são removidas. Com as reações químicas produzidas pelo atrito e a elevação brusca da temperatura são formados novos óxidos.

A etapa E2 é definida pelo aumento da área de contato inicial e conseqüentemente a elevação da temperatura, esse período também envolve um elevado aumento no número de interações entre as asperezas. Devido à elevação da temperatura, as propriedades do material como limite de escoamento e resistência mecânica são intensamente reduzidas, aumentando assim, a componente adesiva do atrito. Nessa fase ocorre um alto aumento no torque, alcançando o seu segundo máximo (M1max) e por conseqüência da potência de soldagem (PIRES, 2007). Meyer (2003) afirma que o processo de aumento da área de contato inicia-se na região do anel a 0,3 a 0,7 do raio, já deformado plasticamente, e vai em direção ao centro do pino, conforme Figura 5.

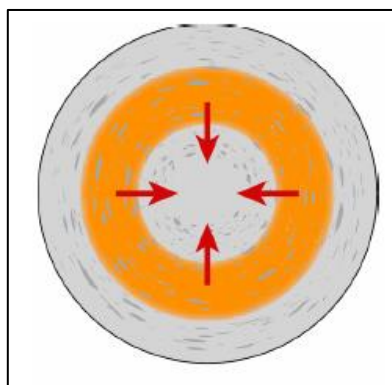


Figura 5 – Escoamento do material para o centro do raio (MEYER, 2003).

Na região do centro da peça a temperatura é menor, em virtude da menor velocidade tangencial. Por conseguinte, há uma menor deformação plástica. Conforme a Equação 1, pode-se verificar que a geração de calor está diretamente relacionada com o raio da peça, quanto mais afastado do centro, maior será a velocidade tangencial (MISHRA; KUMAR, 2014).

$$dQ = w \cdot r \cdot dF \quad \text{Eq.(1)}$$

Onde:

dQ = geração de calor por unidade de tempo;

w = velocidade angular ou tangencial;

r = raio;

dF = força.

Na terceira etapa E3, ocorre uma acentuada queda no torque em decorrência da formação de um filme viscoplástico de baixa resistência ao cisalhamento entre as superfícies de contato. O coeficiente de atrito diminui em decorrência da criação do filme que atua como um lubrificante. A temperatura se mantém em elevação, porém com uma taxa menor que a anterior, fazendo com que a camada de material plastificado aumente, tornando assim, mais fácil a expulsão do material plastificado para a região mais periférica do pino. A partir desse momento é iniciada a formação da rebarba (*flash*) com a extrusão do metal (PIRES, 2007; MEYER, 2003). A Figura 6 apresenta o fluxo de material escoando do centro para as regiões mais externas.

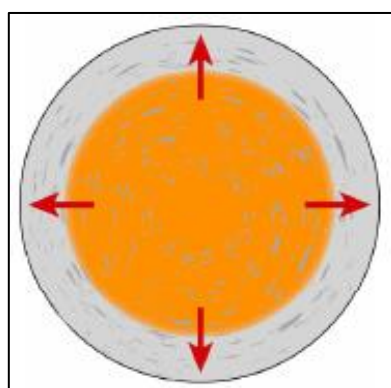


Figura 6 – Fluxo de material plastificado para a região periférica do pino (MEYER, 2003).

Em seguida na E4, tem-se um comportamento estacionário do processo, no qual a temperatura, o torque, o comprimento de queima e a geração de calor mantem-se constantes. Ao final dessa etapa, já é possível a formação de uma união metalúrgica devido à uniformização da deformação plástica, a ativação das superfícies e as condições de aquecimento (PAES, 2013).

No período de desaceleração (etapa E5), ocorre o segundo pico do torque com o aumento do atrito em decorrência da diminuição da rotação. Durante essa fase o comprimento de queima (consumo do pino) também é intensificado, aumentando a temperatura da rebarba ao expulsar o material mais aquecido do centro. Ao final, a união metalúrgica entre as peças é intensificada. (PIRES, 2007; MEYER 2003).

Finalmente, na sexta fase E6 é realizado o forjamento. A rotação da peça é interrompida e é aplicada uma força normal às faces para intensificar a união metalúrgica. Ao longo das fases anteriores a adesão entre as faces ocorre de forma pontual e somente na etapa de forjamento é que ocorre uma adesão homogênea. O aumento da força axial resulta em uma repentina elevação da taxa de queima, uma maior quantidade do pino é consumida em um menor tempo. As camadas de óxidos produzidas nas regiões mais afastadas agora são expulsas com a rebarba. Ao final dessa fase, tem-se o encerramento do processo de solda e o material começa a resfriar ocasionando a recristalização estática, a regeneração dos cristais e a diminuição das tensões internas. Outra característica dessa fase é a melhora nas propriedades mecânicas do material como: limite de resistência à tração e dureza (MEYER, 2003; PIRES, 2007; ANDRADE, 2011).

2.1.2 Parâmetros de soldagem

Segundo ASM (1993), os principais parâmetros que influenciam na qualidade final da solda por fricção são:

- Velocidade relativa da superfície;
- Pressão / Força axial aplicada;
- Temperatura da superfície;
- Propriedades do material;
- Condições das superfícies e a presença de filmes nas superfícies.

Os três primeiros parâmetros estão relacionados ao processo de soldagem por atrito, e os dois últimos, aos materiais utilizados. Outros autores como Andrade (2006) e Meyer (2003), além de considerarem os parâmetros anteriores, também julgaram relevantes as demais características:

- Tempo de aquecimento;
- Comprimento de queima, que é o consumo do material do pino durante a solda;
- Rigidez elástica das superfícies de atrito;
- Tempo requerido para desaceleração;
- Duração e grandeza da força de forjamento;
- Geometria da junta.

Durante o processo, dos 11 parâmetros listados anteriormente, três deles são essenciais para um bom desempenho do processo: a velocidade de rotação, a pressão aplicada e o tempo de aplicação da força e por isso devem ser controlados (ASM, 1993). Porém há máquinas que no lugar de monitorar o tempo, analisam o consumo do pino para determinar o fim do ciclo de soldagem. A Figura 7, apresenta um gráfico no qual é possível visualizar as principais variáveis que devem ser controladas em função do tempo de processo e o comportamento de cada uma durante a soldagem.

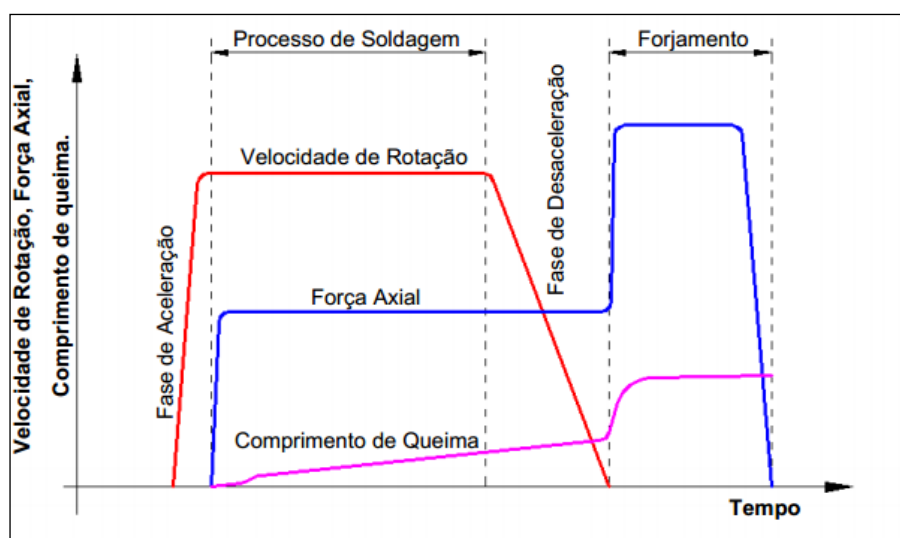


Figura 7 – Parâmetros controlados durante a soldagem por atrito convencional (SOUZA, 2006).

2.1.3 Influência dos parâmetros de soldagem

Todos os parâmetros descritos na seção anterior são importantes para que ao final da solda ocorra uma boa união metalúrgica entre as peças, porém o controle da velocidade de rotação, força axial e consumo do pino são fundamentais. As mudanças dessas variáveis influenciam diretamente no resultado final da junta soldada.

Velocidade de rotação: está diretamente relacionada com o aporte térmico, ou seja, a quantidade de energia adicionada. Altas velocidades ocasionam o polimento das superfícies em contato e resultam em um maior tempo até que os materiais alcancem as condições plásticas ideais. Tal comportamento pode estar relacionado às condições viscoplásticas do material na interface. Isso permitiria uma maior propagação da energia térmica na direção axial, elevando a temperatura final do conjunto e, conseqüentemente, uma maior ZTA (zona termicamente afetada), menor taxa de resfriamento e queda nas

propriedades mecânicas como resistência e dureza. Além disso, segundo Ellis (1972) a utilização de altas velocidades de rotação diminuem a taxa de queima, conforme o gráfico da Figura 8. Em contra partida, velocidades baixas, resultam em um menor aporte térmico e, conseqüentemente, em uma menor ZTA, maior velocidade de resfriamento e aumento nas propriedades mecânicas (PIRES, 2007; ANDRADE, 2011). Segundo Meyer (2003), baixas velocidades para algumas juntas dissimilares seriam benéficas, pois minimizam a formação de componentes intermetálicos frágeis.

Força axial: esse parâmetro possui grande importância no processo, pois é responsável por manter as superfícies em contato, eliminar o filme de óxido e formar a ligação metálica (PIRES, 2007; ANDRADE, 2007). Segundo Paes (2013), a força axial pode variar durante todo o processo, tanto na fase de aquecimento quanto no forjamento. Ainda, a força controla a potência requerida, o gradiente de temperatura na junta e o comprimento de queima. Já o autor Ellis (1972) afirma que a aplicação de forças elevadas aumenta a taxa de queima do pino e, conseqüentemente, reduz o tempo de soldagem. Em seu trabalho, foi analisada a influência da variação da força axial nas propriedades em um conjunto de barras de aço de médio carbono, a Figura 8 apresenta os resultados obtidos. Além disso, a utilização de uma elevada força axial reduz a ZTA e favorece o refinamento dos grãos, melhorando assim as propriedades mecânicas como resistência à tração, dureza e tenacidade. Em contrapartida, a utilização de baixos valores de força axial tende a aumentar a ZTA, diminuir a taxa de consumo de material e aumentar o tempo final de soldagem (ELLIS, 1972).

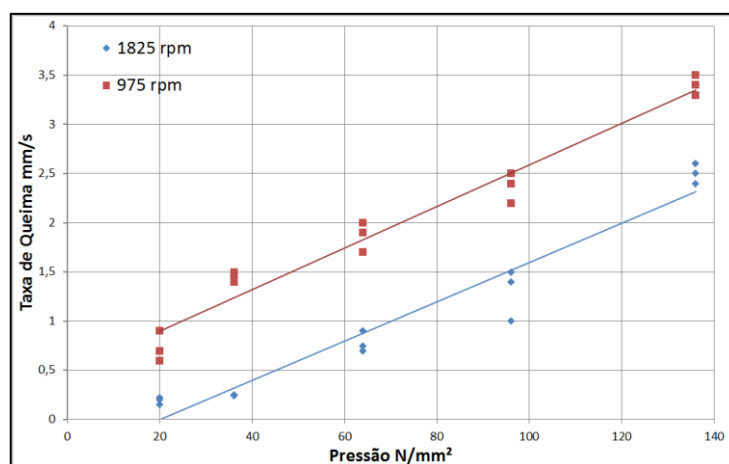


Figura 8 – Relação entre taxa de queima e força axial para solda entre duas barras de 1” de aço médio carbono (adaptado de ELLIS, 1972).

Taxa de queima: descreve a velocidade com que o elemento rotacionado é processado linearmente durante a soldagem. É utilizado para monitorar o início e o final do ciclo, quando determinado consumo linear é atingido, além de influenciar as propriedades finais da solda. A velocidade de rotação e a força axial interferem diretamente nesse parâmetro, uma vez que baixas velocidades e forças elevadas proporcionam taxas de queima mais elevadas (PIRES, 2007; ANDRADE, 2011). Segundo Ellis (1972), taxas maiores de queima favorecem o desenvolvimento de maiores valores de limite de resistência, uma vez que o tempo de soldagem tende a ser menor, resultando em uma maior taxa de resfriamento sobre a junta soldada. A Figura 9 apresenta os resultados obtidos pelos estudos de Ellis (1972).

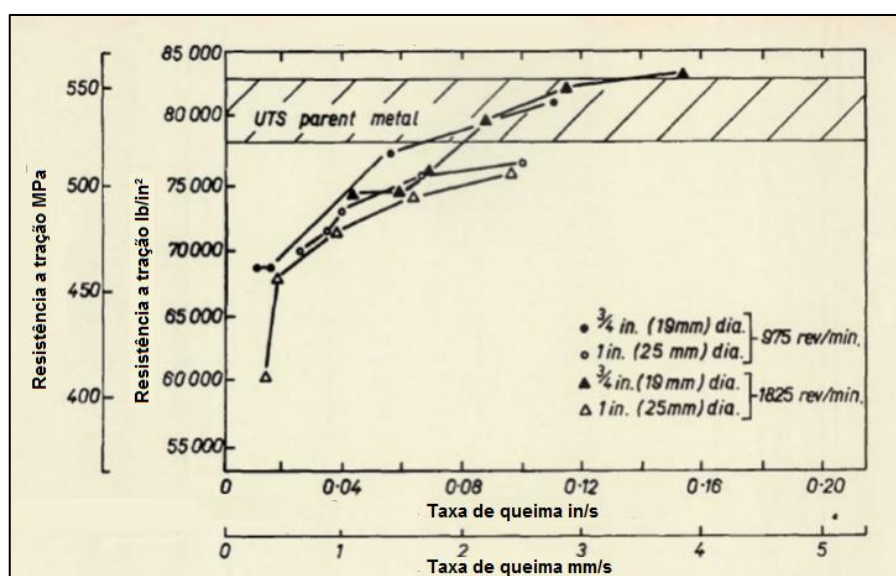


Figura 9 – Efeito da taxa de queima na resistência à tração (ELLIS, 1972).

Tempo de aquecimento: segundo Pires (2007) e Andrade (2011) é o período em que está ocorrendo atrito entre as superfícies e, conseqüentemente, gerando calor. Começa quando ocorre o contato inicial das superfícies e termina ao cessar a rotação. Portanto, está diretamente relacionado com a rotação, quanto maior a velocidade, maior é o tempo de aquecimento, devido à criação de uma fina camada de material plastificado entre o pino e o furo, diminuindo o atrito entre as peças. Além disso, o tempo de aquecimento é influenciado pela força axial, elevados valores de força tendem a resultar menores tempos de aquecimento.

Conforme Ellis (1972), o tempo de aquecimento é importante, principalmente quando se utiliza uma taxa de queima baixa, pois ele definirá a microestrutura da interface e também controla a profundidade do aquecimento e, por conseguinte, a ZTA.

Portanto, os parâmetros de soldagem influenciam diretamente na qualidade final da solda. Dependendo do parâmetro alterado, pode influenciar em mais de uma característica do processo. A Figura 10 apresenta um fluxograma com as relações entre os parâmetros e a influência que cada um tem em relação aos outros. Por exemplo: diminuir a taxa de queima resulta em um maior tempo de soldagem.

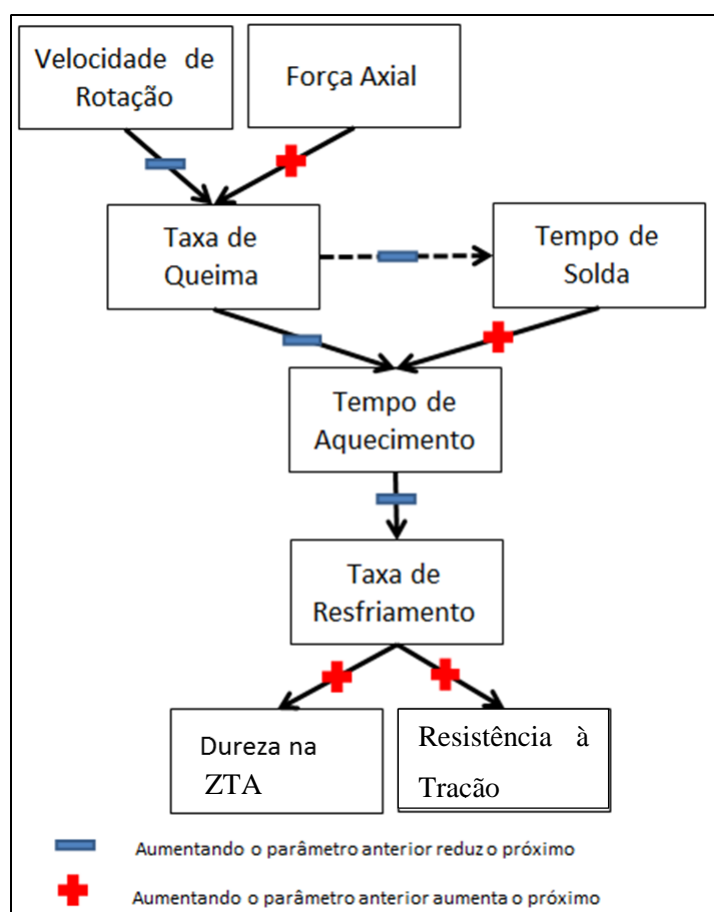


Figura 10 – Relação entre os parâmetros de soldagem (adaptado de MEYER, 2003).

2.1.4 Soldagem por fricção com pino consumível (FHPP)

A soldagem por fricção com pino consumível, também conhecido como *Friction Hydro Pillar Processing* (FHPP) é um processo relativamente novo desenvolvido pelo *The Welding Institute* no início dos anos 90. O FHPP foi criado para unir e reparar estruturas

ferrosas e não ferrosas, além disso, devido às vantagens associadas à soldagem por fricção, pode ser utilizada em ambientes hostis como: na presença de radiação, submersos e com risco de explosão. Por apresentar essas vantagens, pode ser utilizada para reparos de estruturas metálicas nas indústrias de transporte, naval e aeroespacial, podendo ser automatizada para a garantia da qualidade, da reprodutibilidade e da segurança (YEH, 2012).

O processo é dividido em cinco etapas: (i) rotação e aproximação, no qual o pino é rotacionado a uma determinada velocidade pré-estabelecida e é aproximado do furo; (ii) atrito inicial, onde as superfícies do furo e do pino entram em contato e a energia cinética é transformada em energia térmica; (iii) aquecimento, o material aquece até atingir o estado plástico, a partir desse momento o material do pino flui pelo furo e começa a formar a rebarba; (iv) forjamento, a rotação do pino é interrompida e é aplicada a força de forjamento, que pode ser igual ou maior a força axial utilizada durante o processo; (v) extração do pino, no final da solda o pino é cortado na altura da superfície da base. Na Figura 11 é possível visualizar a representação do processo descrito anteriormente. Por ser um processo que sofre grande deformação a quente, tem-se como resultado na região de união uma zona de recristalização com uma microestrutura refinada (PIRES, 2007; CHLUDZINSKI, M. et al., 2011).

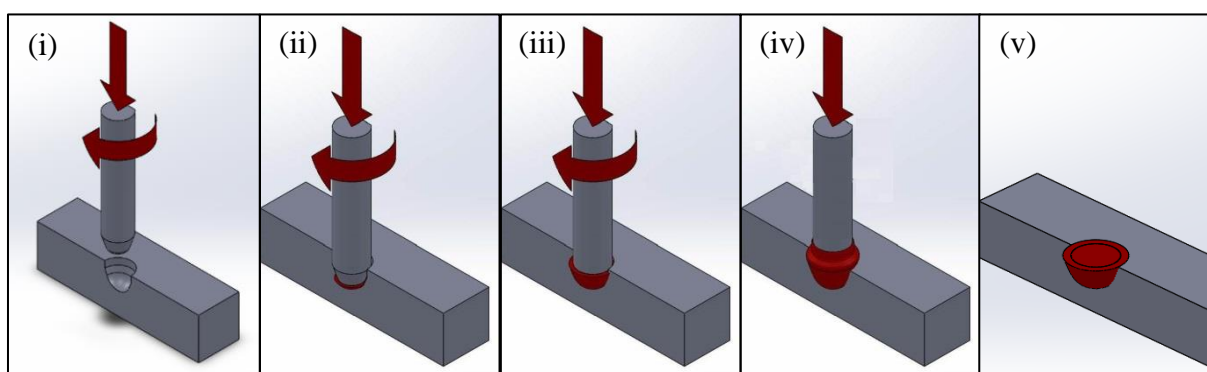


Figura 11 – Etapas do processo de soldagem FHPP: (i) Rotação e aproximação, (ii) atrito inicial, (iii) aquecimento, (iv) forjamento e (v) extração do pino.

De acordo Nicholas (1995), devido à massa metálica viscosa formada na região de processamento do pino, o conceito de hidrostática é válido para a distribuição da força aplicada no pino e no restante das superfícies. Porém, segundo Meyer (2003), a pressão aplicada na ponta do pino não é igual a pressão aplicada nas laterais e, portanto, as pressões

na interface lateral pino-furo se distribuem em forma de gradiente. Ele chegou a essa conclusão após medir a força resultante com células de carga distribuídas pela lateral do furo.

Na soldagem FHPP a geometria do furo e do pino possuem uma grande influência na qualidade final da união. Para esse processo, foram desenvolvidas duas geometrias diferentes: uma cilíndrica e outra cônica, conforme a Figura 12. Segundo Nicholas (1995) e Pinheiro et al. (2001), a escolha entre utilizar o perfil cônico ou o perfil cilíndrico está na aplicação. Para paredes com espessuras grossas, é aconselhável utilizar o perfil cilíndrico, e para paredes mais finas é utilizada a geometria cônica. Isso se deve ao fato de que em paredes com grandes espessuras, a utilização da geometria cônica exigiria maiores diâmetros dos pinos e, conseqüentemente, máquinas com maiores potências. Além disso, conforme Meyer (2003), a utilização de uma geometria cônica possibilita uma melhor distribuição das forças aplicadas, resultando em uma melhor união nas laterais.

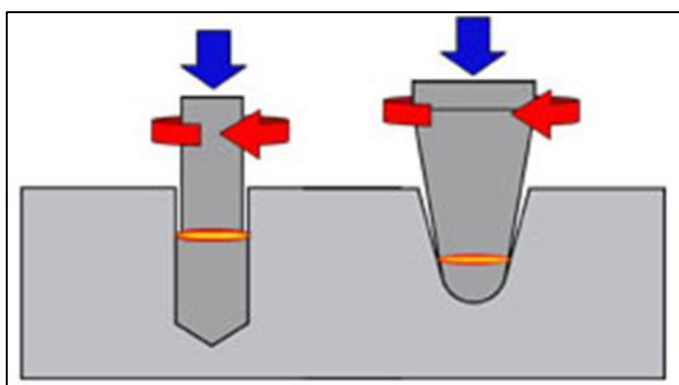


Figura 12 – Geometrias utilizadas no processo FHPP. Na esquerda a geometria cilíndrica e na direita a geometria cônica (PIRES, 2007).

Ainda analisando a geometria das peças, estudos comprovam que a geometria do furo é mais determinante para uma boa qualidade da solda do que a geometria do pino. Meyer (2003) e Xu et al. (2014) chegaram a essa mesma conclusão após estudarem o assunto. Meyer (2003) por meio da realização de diversas soldas variando os raios dos furos e dos pinos e Xu et al. (2014) utilizando um software de simulação numérica e validando seus resultados com soldas reais. Xu et al. (2014) também afirmam que furos com raios mais arredondados tendem a apresentar soldas sem defeitos, uma vez que raios maiores facilitam o escoamento do material.

Diversos autores utilizam como primeira análise de resultados a macrografia do corte transversal, conforme Figura 13. Com essa verificação é possível identificar discontinuidades como vazios e trincas. Segundo Mattei (2011), as regiões nas quais esses defeitos se concentram estão localizadas na linha de união entre o pino e o furo. Além disso, a partir da macrografia é possível visualizar as zonas da solda. Hattingh et al. (2011) identificaram em seu artigo as seguintes regiões: de mistura interfacial (*mixing zone*), afetada termicamente pela alta temperatura (HT HAZ), afetada termicamente pela baixa temperatura (LT HAZ), de mistura (*stir zone*) e forjada (*forged zone*), conforme Figura 13.

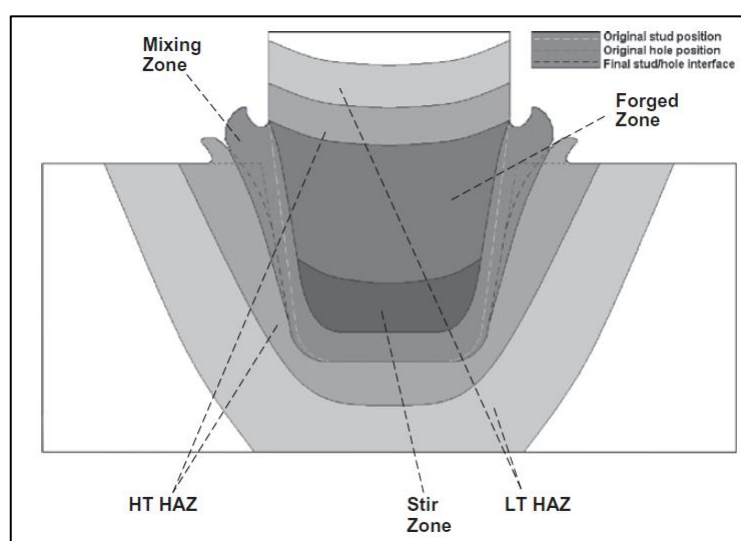


Figura 13 - Macrografia típica do processo FHPP e suas respectivas zonas (HATTINGH ET AL., 2011).

Seguindo a metodologia já apresentada nos itens 2.1.2 e 2.1.3, os principais parâmetros que precisam ser definidos e controlados durante a soldagem por pino consumível são: rotação do pino, força axial e comprimento de queima ou consumo do pino. Assim sendo, autores como Andrade (2011) e Hattingh et al. (2011) publicaram em seus estudos os parâmetros utilizados para soldar aços médio e alto carbono e de baixa liga. Após as soldagens, os autores realizaram análises macrográficas e ensaios mecânicos (microdureza e tração) para avaliar a qualidade final da solda e definir os melhores parâmetros de soldagem.

No trabalho apresentado por Hattingh et al. (2011), diversas soldas realizadas apresentaram micro trincas nas regiões de união da rebarba, conforme Figura 14. E a partir das análises das trincas e dos parâmetros, concluíram que o aparecimento de trincas na união da rebarba está diretamente relacionado com a força axial aplicada. Valores de força mais

baixas tendem a diminuir o comprimento da trinca ou até mesmo não apresentar esse tipo de defeito. Outra análise realizada pelos autores foi a comparação das propriedades mecânicas com a variação dos parâmetros. Por meio desta comparação concluiu-se que os maiores valores de resistência à tração foram obtidos nos seguintes parâmetros: baixa força axial, alta rotação e alto consumo.

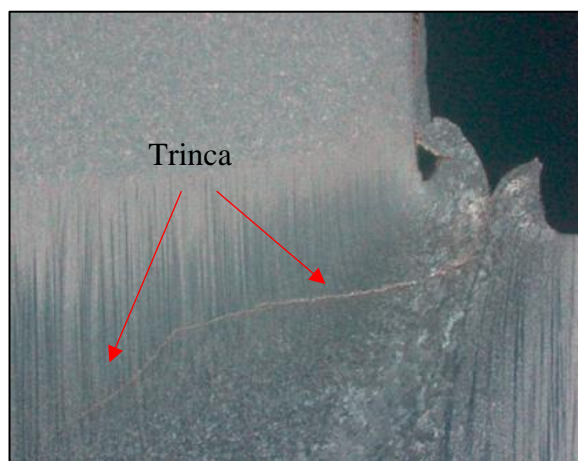


Figura 14 – Macrografia com trinca na região de união da rebarba (HATTINGH ET AL., 2011).

A Tabela 2 apresenta os valores de rotação, força axial, força de forjamento, tempo de forjamento e consumo utilizados pelos autores. Além dessas informações, são apresentados os materiais utilizados como base e pino e suas respectivas geometrias.

Tabela 2 – Parâmetros de soldagem utilizados por Andrade (2011) e Hattingh et al. (2011).

Autor	Material Base	Material Pino	Geometria	Rotação (rpm)	Força Axial (kN)	Força de Forjamento (kN)	Tempo de forjamento (s)	Consumo (mm)
Andrade (2011)	BS 4360	SAE 4140	Cônica	5000	5	15	5	8,0
					10	20		
					15	25		
					25	35		
					35	45		
				8000	5	15	5	8,0
					10	20		
					15	25		
					25	35		
					35	45		
Hattings	SAE 4140	SAE 4140	Cônica	6000	10,5	-	-	4,5

et al. (2011)					20,6	-	-	4,0
					27,5	-	-	3,2
					10,9	-	-	6,3
					20,6	-	-	6,5
					27,1	-	-	5,4
					11,7	-	-	9,0
					20,6	-	-	7,9
					27,1	-	-	7,7
Hattings et al. (2011)	SAE 4140	SAE 4140	Cônica	4250	9,3	-	-	4,1
					21,0	-	-	4,1
					27,5	-	-	4,0
					10,5	-	-	5,7
					20,2	-	-	5,8
					26,7	-	-	5,2
					11,3	-	-	9,0
					21,0	-	-	7,9
					27,9	-	-	7,6
				2500	10,9	-	-	4,5
					21,4	-	-	4,0
					27,9	-	-	3,0
					10,9	-	-	6,6
					21,0	-	-	6,6
					26,7	-	-	6,3
					10,5	-	-	8,2
					21,0	-	-	8,5
					26,7	-	-	7,3

2.1.5 Fluxo de material durante a solda por fricção

Existem poucos estudos referentes ao comportamento do fluxo de material durante os processos de soldagem por fricção. Shu-de et al. (2012), simularam o fluxo de material durante a soldagem por fricção entre dois anéis de aço de diâmetro interno de 50 mm e diâmetro externo de 80 mm. Utilizando um software de Elementos Finitos, eles avaliaram a influência das variáveis de processo (velocidade, força axial e tempo de soldagem) sobre a velocidade do fluxo de material. A partir dos dados obtidos, foi concluído que a velocidade de escoamento no centro do anel é menor que nas periferias internas e externas e o aumento do tempo de fricção, da pressão axial e da velocidade de rotação estão diretamente relacionadas com o aumento da rebarba e da velocidade de escoamento. A Figura 15 apresenta um dos resultados obtidos, sendo possível observar que no centro da parede do anel a velocidade é

zero, enquanto que nas extremidades interna e externa do anel a velocidade é superior a 5 mm/s.

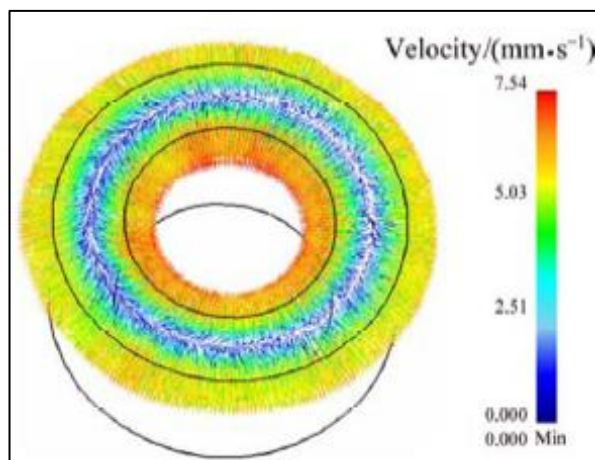


Figura 15 – Velocidade do fluxo de material na superfície de fricção no tempo de 4.1 segundos (SHU-DE et al., 2012).

Fujii et al. (2006) também estudaram o fluxo de material durante a soldagem por fricção, porém esse trabalho analisou o processo de *Friction Stir Welding* (FSW). Nesse processo, uma ferramenta com elevada resistência mecânica e resistência ao desgaste é utilizada para gerar atrito entre as peças e, conseqüentemente, calor. Diferentemente do processo de FHPP, no FSW não há o consumo do pino, a união ocorre devido à mistura do material das peças. A ferramenta além de ter o movimento de rotação também tem o movimento de translação. Esse método é muito utilizado para a soldagem de chapas. A Figura 16 apresenta o processo de FSW.

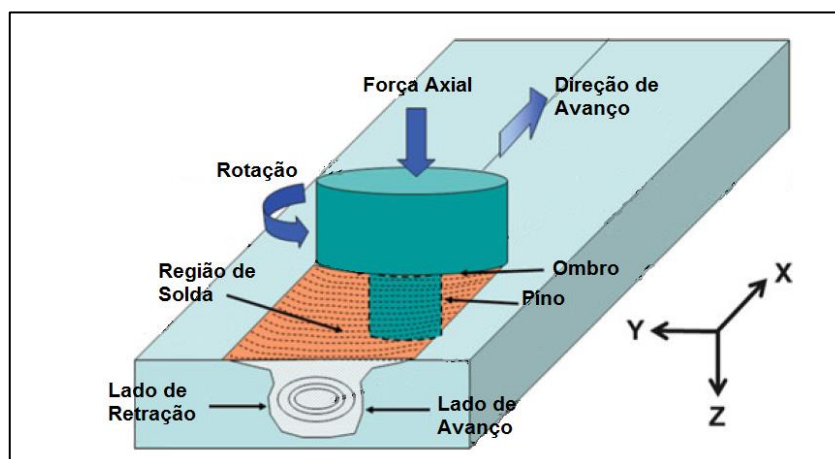


Figura 16 – Desenho esquemático do processo de *Friction Stir Welding* (MISHRA; KUMAR, 2014).

Para estudar o fluxo de material, Fujii et al. (2006) soldaram duas placas de liga de alumínio e utilizando um microscópio eletrônico de varredura, analisaram a dispersão das partículas de silício presentes na liga. Com o estudo foi possível confirmar que com determinados parâmetros, as partículas de Si do topo e da base da região de mistura se alinhavam horizontalmente e longitudinalmente nas regiões do lado de retração (LR) e lado de avanço (LA), conforme Figura 16. E quando há um baixo aporte térmico na região de solda as partículas de Si se arranjam de forma aleatória nas regiões de fundo e de lado de retração. A Figura 17 apresenta os resultados do estudo. Mantendo a força de 14,2 kN, a velocidade de deslocamento horizontal linear de 500 mm/min e variando a velocidade de rotação é possível observar a variação do fluxo de material por meio das flechas que indicam a direção e sentido do material.

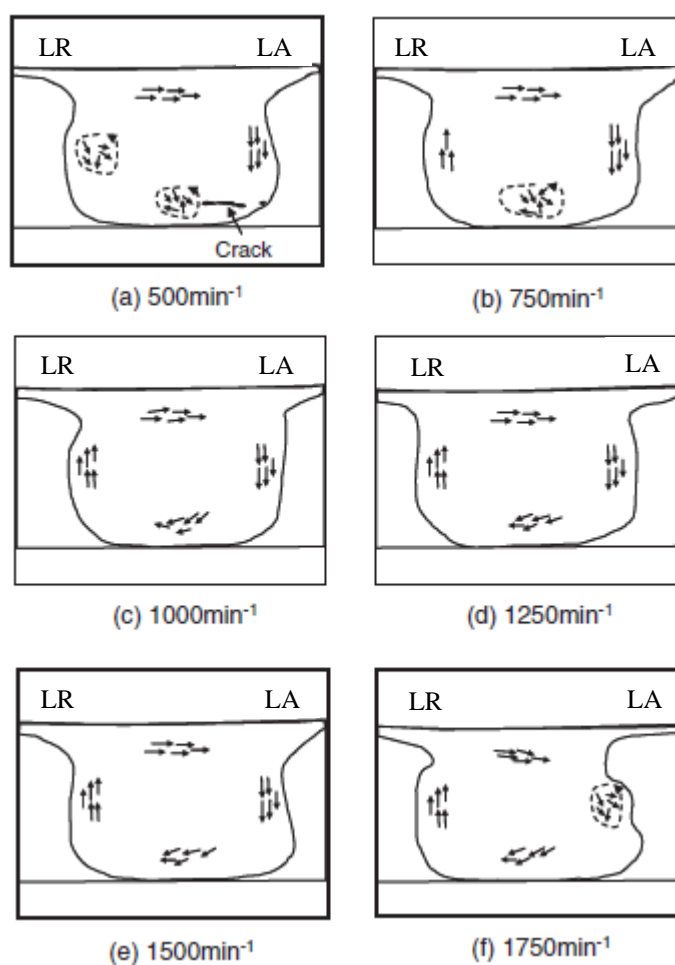


Figura 17 – Ilustração esquemática do fluxo de material na zona de mistura em diversas velocidades de rotação (FUJII ET AL. 2006).

Para o processo de FSW existem diversos estudos sobre o fluxo de material, Mishra e Kumar (2014) resumiram em seu livro uma lista dos estudos realizados e o padrão de fluxo encontrado por diversos pesquisadores. A Tabela 3 apresenta um resumo dos estudos relacionados ao fluxo de material no FSW, na primeira coluna é apresentado o método utilizado para identificação do fluxo e na segunda os resultados obtidos.

Tabela 3 – Estudos do fluxo de material no FSW (MISHRA e KUMAR, 2014).

Tipo de Estudo	Padrão de Fluxo
Solda entre AA2195-T8 com marcador de AA5454-H32	(a) A mistura de material ocorre somente na região afetada pelo ombro da ferramenta; (b) Na zona afetada pelo pino o material move-se por trás de

	<p>sua posição original;</p> <p>(c) Para pinos roscados existe um segundo fluxo de material na vertical.</p>
Traçador radioativo Ni em AA2219-T8	(a) O metal gira em torno da ferramenta em uma fina camada logo abaixo da superfície de cisalhamento.
Lâmina de cobre ao longo da superfície de contato no AA6061-T6	<p>(a) O material do lado de avanço é depositado atrás do pino no lado de avanço;</p> <p>(b) O material do lado de retração permanece no mesmo lado;</p> <p>(c) O movimento de vortex dentro da zona de rotação é associado com o pino.</p>
Traçadores de Al-30vol%SiC e Al20 vol%W na liga AA7050	<p>(a) Movimento ascendente do material a frente do pino;</p> <p>(b) Na região de avanço ouve uma distribuição maior do traçador comparada a linha de centro da solda;</p> <p>(c) Movimento descendente do material devido às ranhuras na ferramenta.</p>
Traçador de cobre em uma liga de AA2024-T3	<p>(a) Velocidade média do fluxo de material igual a 0,1 -0,3 vezes a velocidade de rotação da ferramenta;</p> <p>(b) Três zonas de rotação ao redor da ferramenta são propostas: rotação, transição e deflexão;</p> <p>(c) Na zona de rotação o material adere à ferramenta e percorrer diferentes rotações.</p>

Para o processo de FHPP, Meyer (2003) utilizou em seu estudo um traçador de níquel inserido no pino para analisar o fluxo de material durante o processo. A utilização do níquel como traçador foi devido a não reação desse material ao entrar em contato com o reagente metalográfico Nital. Foi utilizada a geometria cilíndrica para as soldas, com chanfros de 45° e 50° tanto para o pino quanto para o furo. A Figura 18 apresenta a geometria do furo e do pino junto com o traçador de níquel inserido.



Figura 18 – Geometria do pino e base com traçador de níquel (MEYER, 2003).

Nove parâmetros de soldagem foram utilizados tendo como variação entre cada um a velocidade de rotação e a pressão axial. A Figura 19 apresenta as macrografias obtidas para cada um dos parâmetros utilizados nas soldas. A partir desse estudo, Meyer (2003) concluiu que maiores rotações e pressões axiais resultam em uma deformação mais irregular do traçador e uma macroestrutura não homogênea. Além disso, foi verificado que o material do traçador não fluiu para a extremidade, indicando que o material do centro do pino tende a se depositar no centro da solda. Após analisar os resultados, foi escolhido um dos parâmetros e soldadas oito amostras com o objetivo de observar o desenvolvimento do preenchimento ao longo do processo. Para isso, as soldas foram interrompidas em diferentes taxas de queima. Com base nessas soldas é possível observar toda a evolução da formação do *flash*, conforme Figura 20.

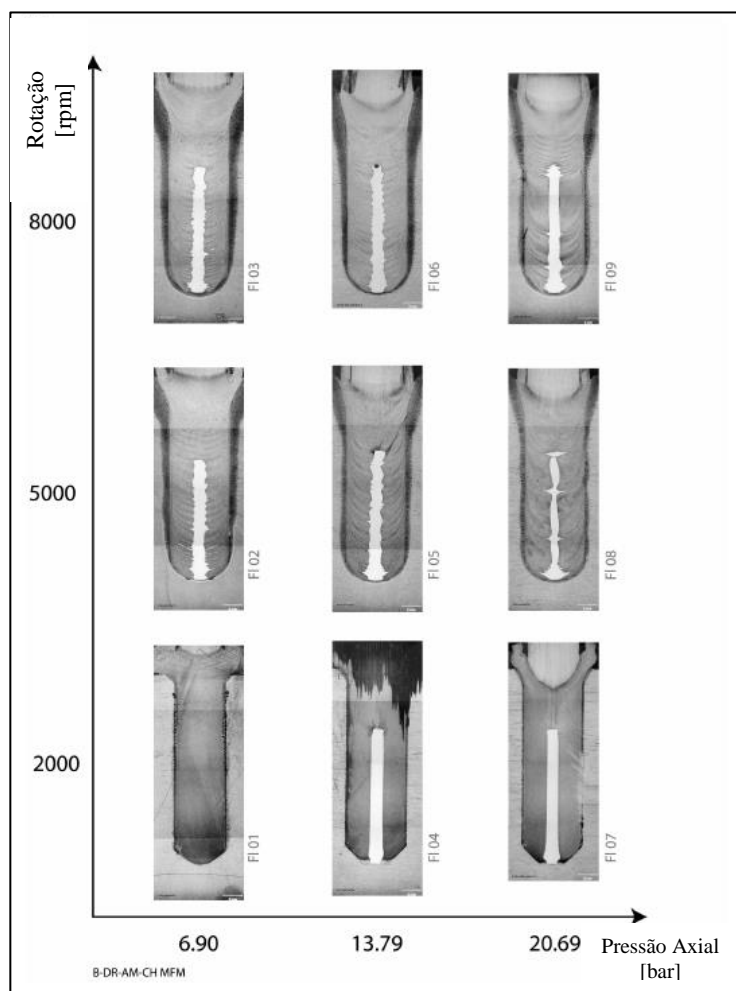


Figura 19 – Macrografias das soldas de FHPP com traçador de níquel com diferentes parâmetros de soldagem (MEYER, 2003).

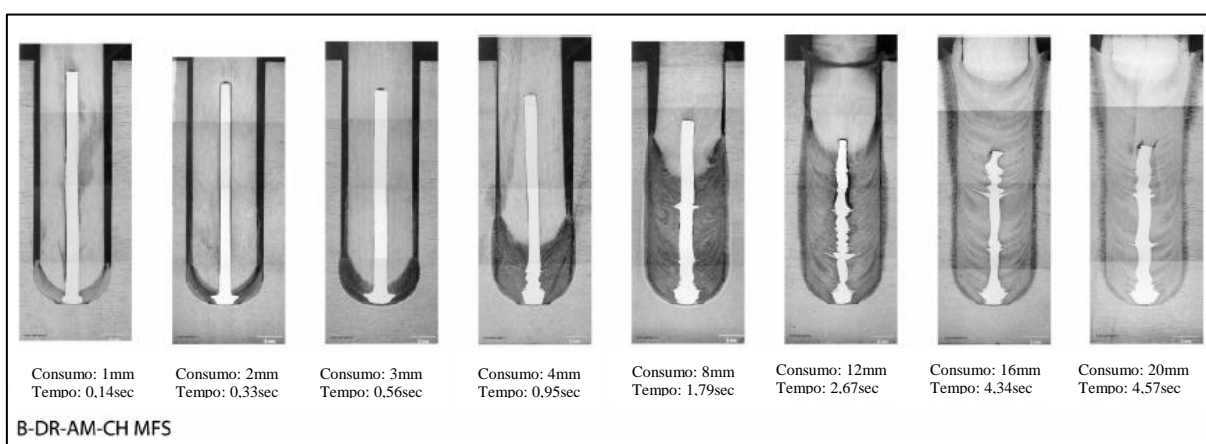


Figura 20 – Preenchimento do furo na solda por FHPP com traçador de níquel com diferentes consumos finais (MEYER, 2004).

Ao final de seu trabalho Meyer (2003), sugere um estudo mais focado para o transporte de material, analisando o fluxo nas três dimensões durante o processo de FHPP. Ainda é aconselhada a utilização de traçadores com diâmetros menores e em diferentes locais do pino e do furo.

Um estudo mais recente publicado por Yin et al. (2015), analisou a influência do fluxo de material nas propriedades mecânicas finais da solda e, também, relacionou o fluxo de material com os parâmetros de soldagem utilizados. Para o estudo, Yin et al. (2015) soldaram amostras de um tubo de aço API 5L X65 pelo processo de FHPP submerso em água e para analisar o fluxo de material inseriram um traçador de níquel no interior do pino.

Pela análise macrográfica da seção transversal da solda, os autores correlacionaram a dispersão do níquel com a variação do torque durante o processo. A partir dessa análise foi possível identificar três regiões com diferentes fluxos de material:

- Região controlada pelo aquecimento (HDP): é definido como o tempo entre o início da soldagem e o momento em que ocorre o primeiro cisalhamento plástico, o que resulta em uma queda substancial no torque. Nesse estágio o fluxo de material é menor quando comparado com os outros, aumentando a incidência de defeitos relacionados ao preenchimento nessa região;
- Região de transição entre aquecimento e cisalhamento (HSTP): nessa fase ocorre a diminuição do torque e o acúmulo do material plastificado no centro do pino, sem a ocorrência de cisalhamento;
- Região controlada pelo cisalhamento (SDP): é a fase na qual o cisalhamento e o consumo do pino se mantem regulares e, além disso, o torque estabiliza em valores menores que os anteriores. Nessa fase acontece um intenso e regular fluxo de material, o que segundo os autores é a razão pela qual nessa região a ocorrência de defeitos é menor.

A Figura 21 apresenta o gráfico do torque pelo tempo, identificando o início e o final das três regiões apresentadas por Yin et al. (2015). Nessa mesma figura, é possível comparar a representação da solda exibida junto ao gráfico com uma imagem real. As regiões escuras na solda são o níquel cisalhado na matriz do aço.

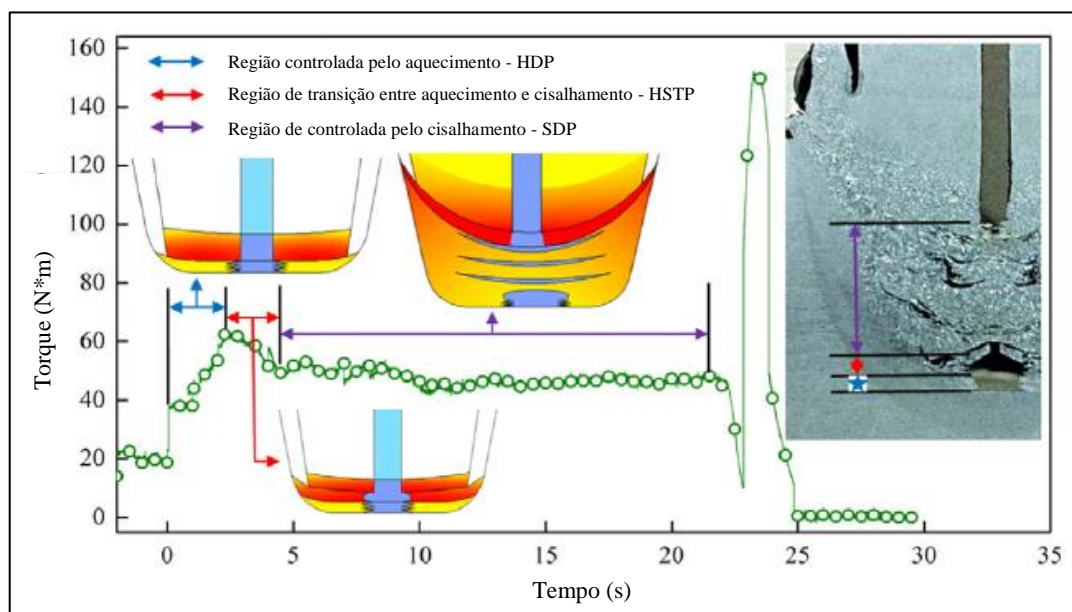


Figura 21 – Identificação das regiões da solda e relação entre o fluxo de material e o torque (YIN et al., 2015).

Nesse mesmo estudo os autores verificaram a relação entre a força axial e o fluxo de material resultante e concluíram que quanto maior a força axial, mais intenso o fluxo de material e, conseqüentemente, menor a ocorrência de defeitos. Essa mesma relação entre defeitos na região de solda e a força axial utilizada é apresentada por Hattingh et al. (2011). Segundo Yin et al. (2015), isso ocorre devido a maior energia adicionada na solda com o aumento da força. Na Figura 22 os autores Yin et al. (2015) apresentam quatro soldas realizadas com diferentes forças (25, 30, 40 e 50 kN), nela é possível identificar defeitos na solda com menor força. Além disso, quanto maior a força axial, menor é a região controlada pelo cisalhamento e mais cisalhada a região de transição entre aquecimento e cisalhamento.

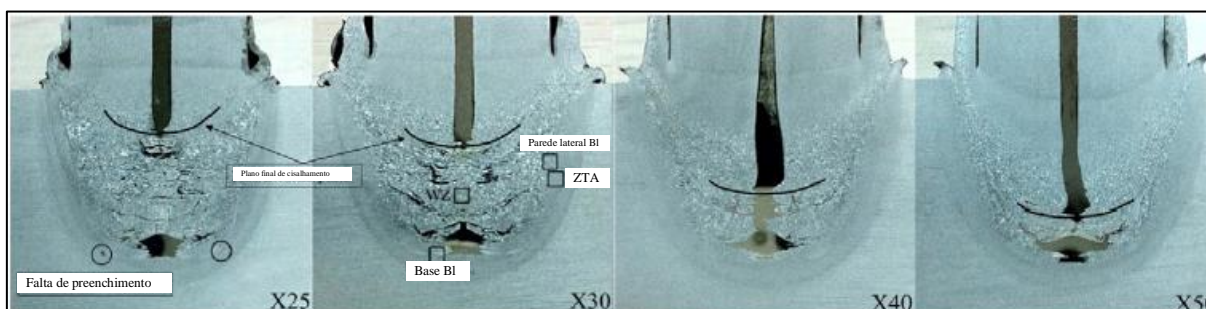


Figura 22 – Comportamento do fluxo de material sobre diferentes forças axiais (YIN et al., 2015).

2.2 TOMOGRAFIA COMPUTADORIZADA

A tomografia computadorizada de raios-X (TC) é uma técnica de ensaio não destrutiva (END), que fornece imagens tridimensionais internas de objetos sólidos. Diferentemente da radiografia convencional que provê imagens bidimensionais as quais são sobrepostas em um filme, a TC produz representações tridimensionais a partir de várias radiografias tiradas de ângulos diferentes, possibilitando assim a localização espacial de uma descontinuidade. Além disso, como as imagens não são sobrepostas, há uma melhor qualidade nos resultados na TC (MASCHIO, 1997).

Também, segundo os autores Silva, Baldo e Yamanaka (2013), a tomografia computadorizada por raios X possui como vantagem a capacidade de obter uma grande quantidade de pontos de forma mais rápida em peças com geometria complexas, quando comparadas a métodos de medição ópticos (scanners e câmeras de alta precisão) e/ou táteis (paquímetro, micrômetros, traçadores tridimensionais). Essa vantagem se deve a não necessidade de reposicionar a peça e/ou dispositivo de medição durante a medição de diferentes cotas.

2.2.1 Funcionamento da tomografia computadorizada

A formação da imagem é fundamentada na atenuação sofrida pelos raios X ao passar pela matéria e é reconstruída utilizando-se múltiplas projeções. O princípio de atenuação dos raios X está relacionado com a densidade do material, uma vez que a intensidade diminui devido à interação dos fótons com a matéria. Assim, considerando um corpo de densidade homogênea, a equação que governa a atenuação do feixe é descrita na Equação 2. Sendo: I a intensidade do feixe transmitido através do material, I_0 a intensidade do feixe incidente no material, μ o coeficiente de atenuação linear e x a espessura em centímetros. Essa equação é conhecida como lei de Bee-Bauguer e é válida somente para feixes monoenergéticos (GODOI, 2012).

$$I = I_0 e^{-\mu x} \quad \text{Eq. (2)}$$

Em um caso real, no qual existe a variação de espessura do corpo de x_1 a x_n e a diferença do coeficiente de atenuação de μ_1 a μ_n , a Equação 2 é descrita na Equação 3. Essa

redução ocorre devido à absorção e pelo espalhamento dos átomos da matéria. A Figura 23 exemplifica o fenômeno de atenuação dos fótons incidentes em função da espessura de um meio absorvedor de coeficiente de atenuação linear $\mu = 0,1/\text{cm}$.

$$I = I_0 \cdot \exp\left(\sum_{i=1}^n \mu_i \cdot x_i\right) \quad \text{Eq. (3)}$$

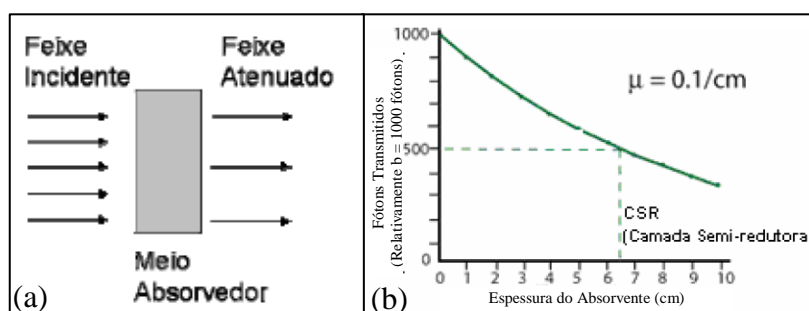


Figura 23 – Exemplo de atenuação dos raios X. Fótons atenuados em função da espessura de um meio (a) e gráfico da atenuação dos fótons pela espessura (b) (TETZNER, 2008).

Para a formação de uma imagem com qualidade, a partir do coeficiente de atenuação são definidos os parâmetros de processo. Conforme Maschio (1997), os principais parâmetros utilizados são: a potência, a espessura de corte, o campo de visão e o tamanho da matriz.

Potência: é alterada com a variação da tensão e/ou corrente do gerador de raios X. Ao aumentar a tensão, a intensidade dos raios e consequentemente o poder de penetração são aumentados. Além desses fatores, pode-se variar o tempo de exposição da amostra, que ao combinar com a intensidade da corrente fornece o parâmetro de miliampère-segundo (mAs), que é uma medida quantitativa do feixe de raios X. O mAs determina o número total de fótons produzidos.

Espessura de corte: é a espessura percorrida pelo feixe de raios X. É um parâmetro importante, pois o sistema utiliza as informações resultantes da varredura do volume e converte em um plano. Quanto menor a espessura, mais próximo do ideal será o valor do pixel. O valor de cada pixel representa a atenuação média sofrida pelos raios X no volume correspondente.

Campo de visão: é o espaço do tomógrafo onde se posiciona o objeto ou paciente (região de Grantry). A variação do campo de visão permite modificar a escala para facilitar a análise. O tamanho do campo de visão e o tamanho da matriz determinam o tamanho do pixel da imagem.

2.2.2 Aplicações da tomografia industrial

Fora a área médica, a TC é muito utilizada no campo industrial. Tendo como principais aplicações a localização de discontinuidades como poros, a identificação de falta de preenchimento e a caracterização de componentes. Abaixo seguem alguns trabalhos em que foram utilizados a TC industrial nas análises de materiais.

Tetzner (2008) apresentou a aplicação da tomografia computadorizada industrial na análise morfológica de rochas. Tal técnica possibilita a identificação de gemas preciosas no interior das pedras sem a necessidade de cortá-las. Por meio da variação do coeficiente de atenuação do material, o autor apresentou a diferença de densidade presente em uma rocha ígnea. A Figura 24 apresenta o resultado no trabalho.

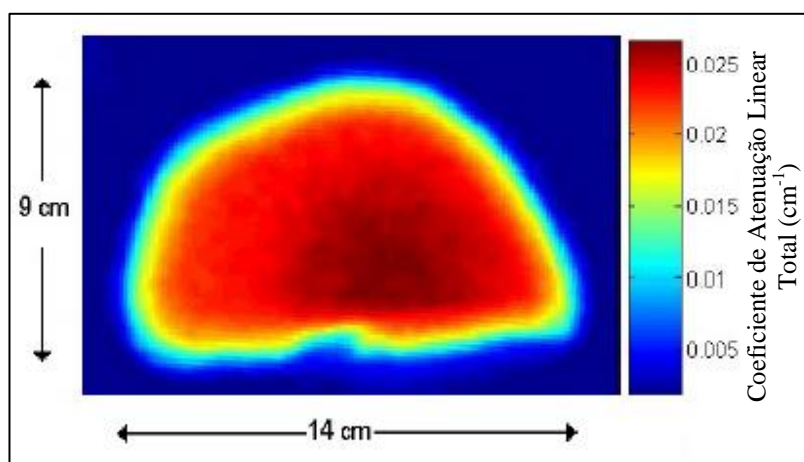


Figura 24 – Imagem tomográfica com escala de atenuação linear. Amostra de rocha ígnea (TETZNER, 2008).

Maschio (1997) demonstra a aplicabilidade da TC como uma técnica de ensaio não destrutivo utilizando materiais e componentes de diferentes densidades e geometrias. Para a validação do estudo, o autor comparou defeitos reais com defeitos simulados. Em seu trabalho foi utilizado um tomógrafo médico para as análises. A Figura 25 mostra duas tomografias de

amostras de alumínio, sendo uma com defeitos prévios e outra de uma amostra de alumínio fundido com a presença de porosidade.

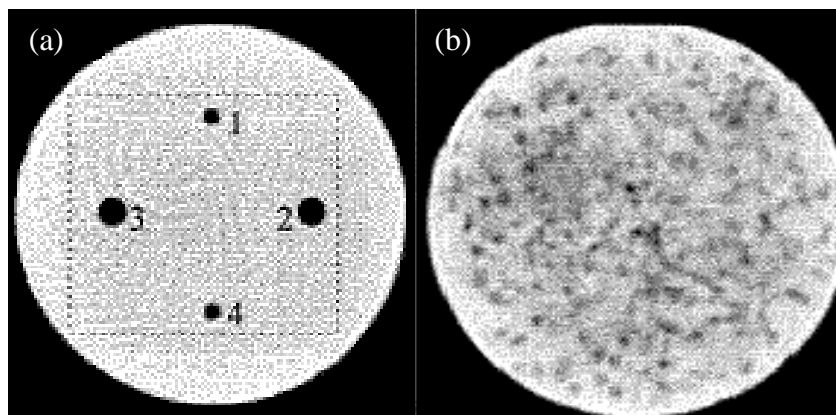


Figura 25 - Tomografia de amostras de alumínio. Amostra com defeitos simulados (a) e amostra de alumínio fundido com a presença de porosidades (b) (MASCHIO, 1997).

Godoi (2012) propôs uma nova metodologia para o reconhecimento de padrões 3D em tomografias industriais. Para a validação do método, foi realizado um estudo de caso com a identificação de defeitos em isoladores poliméricos utilizados em redes de distribuição elétrica. A Figura 26 apresenta a reconstrução da malha poligonal de isolador tipo pino, nela é possível identificar uma bolha na região interna.

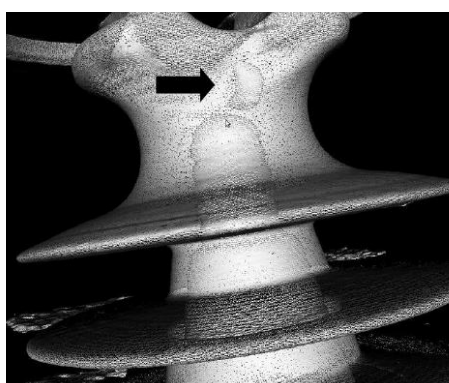


Figura 26 – Malha poligonal reconstruída de um isolador tipo pino, a seta identifica uma bolha interna (GODOI, 2012).

Silva e Baldo (2013) realizaram uma inspeção de qualidade de material e uma avaliação dimensional de uma biela automotiva de liga de aço. Para esse estudo, foram utilizados os seguintes parâmetros:

- Tensão aplicada de 200 kV;
- Corrente aplicada de 850 μ A;
- Tempo de exposição 2000 ms;
- Filtro de 3 mm de estanho.

A Figura 27 apresenta duas imagens renderizadas de uma biela automotiva fundida, uma na escala de cinza e outra imagem com escalas de cores para diferenciação da densidade. Nesta imagem é possível identificar uma falha na densidade do material, identificada pela seta.

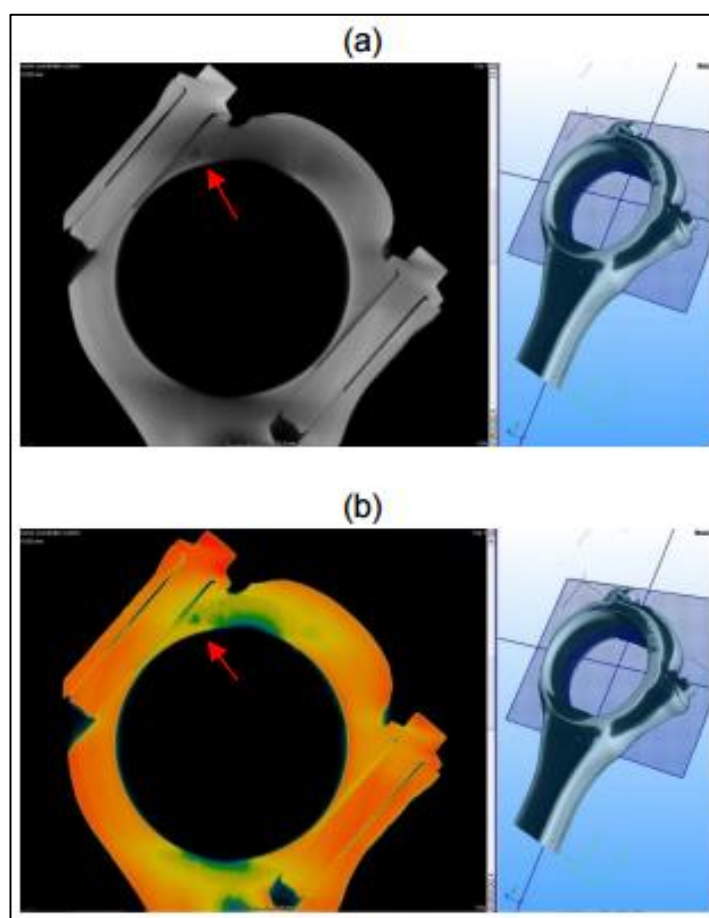


Figura 27 – Imagem renderizada em escala de cinza (a) e imagem renderizada utilizando cores para diferentes densidades (b). As setas indicam os defeitos (SILVA; BALDO, 2013).

Silva, Baldo e Yamanaka (2013) publicaram em seu artigo a análise de componentes compostos por mais de um material. Neste trabalho são apresentadas as dificuldades de se analisar componentes com diferentes materiais, como por exemplo, analisar uma peça composta por dois ou mais materiais, sendo o de maior densidade envolto por um de menor densidade. Os raios X ao interagirem com o material mais denso podem ter a tendência de espalhar, ou seja, ser refletido ou refratado, acarretando no volume resultante um ocultamento do material menos denso.

Nesse estudo, os autores apresentaram três exemplos de aplicação de raios X na análise de componentes de diferentes materiais, sendo eles: análise da continuidade da camada isolante de verniz em fios de cobre; avaliação do alinhamento entre um eixo metálico e seu revestimento plástico; e a análise da distribuição das fases em uma amostra de asfalto. A Figura 28 apresenta as imagens da tomografia de um fio de cobre.

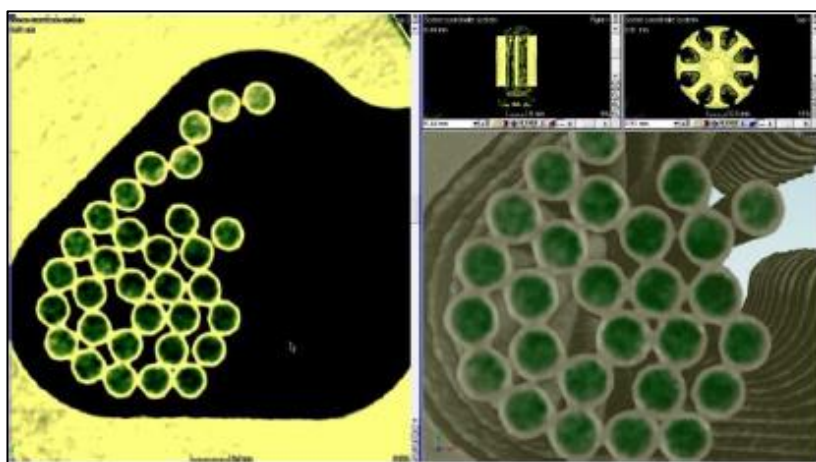


Figura 28 – Imagens de projeções das seções virtuais e da renderização em 3D de um conjunto de fios de cobre revestidos com verniz (SILVA, BALDO E YAMANAKA, 2013).

3 METODOLOGIA

A metodologia utilizada nesse estudo encontra-se resumida no fluxograma apresentado pela Figura 29.

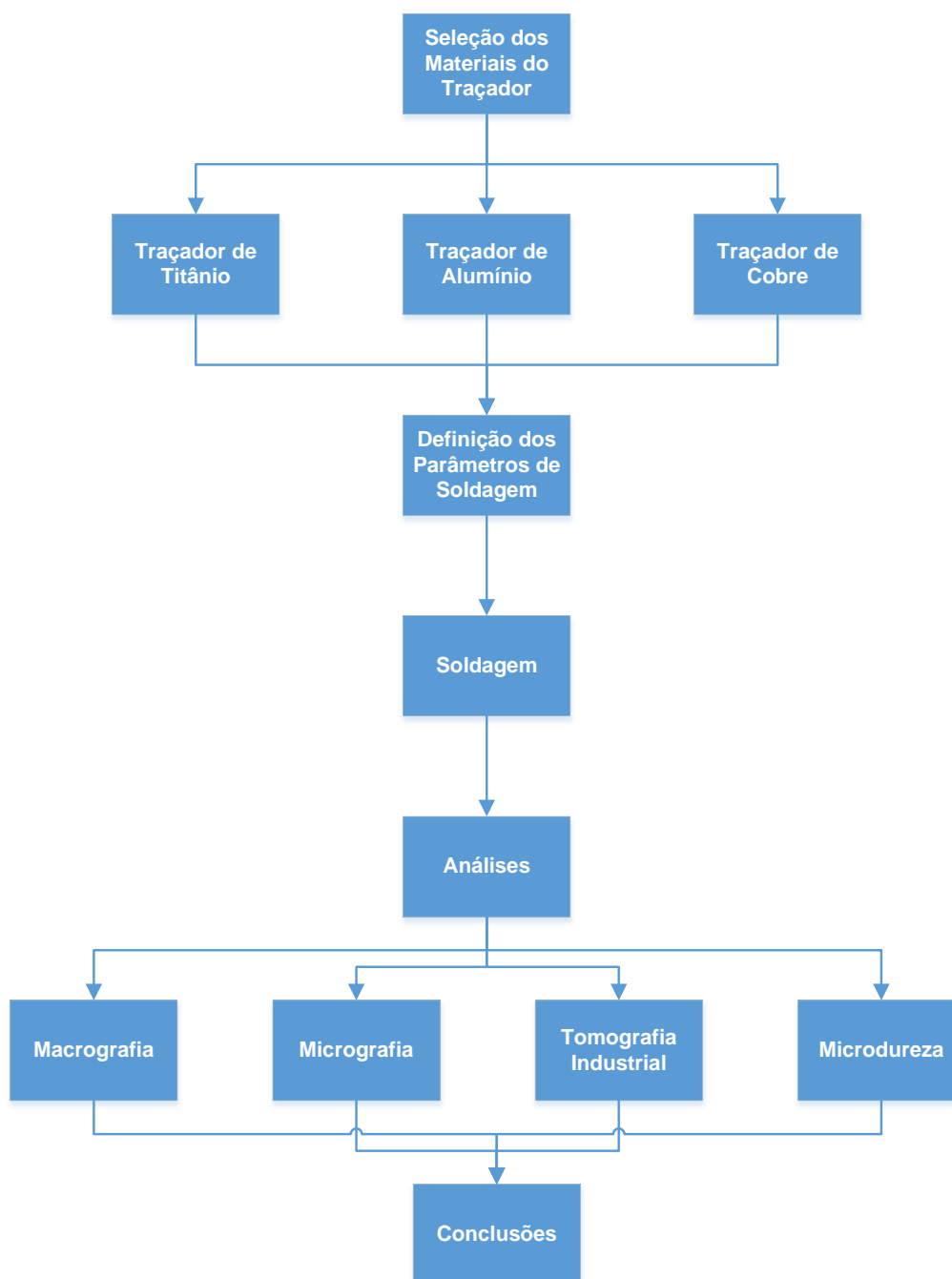


Figura 29 – Fluxograma da metodologia.

3.1 SELEÇÃO DOS MATERIAIS

Para a realização desse estudo, foi definida a utilização de um metal dissimilar como traçador para possibilitar a análise do fluxo de material, assim como os autores Meyer (2003) e Paes (2013). Portanto, a primeira parte do trabalho consistiu em selecionar os materiais do pino, da base e do traçador (material inserido no pino). Para essa definição, foram estabelecidos os seguintes critérios de seleção:

- Pino e base de mesmo material (liga de aço);
- Diferença de densidade entre o traçador e o conjunto para solda (pino e base) para facilitar a identificação na análise de raios X;
- Dureza do traçador e do conjunto para solda com valores próximos;
- Tensão de escoamento dos materiais com valores próximos;
- Temperatura de fusão do traçador e do conjunto para solda com valores próximos. Caso fossem selecionados materiais com pontos de fusão muito diferentes, poderia ocorrer a fusão de um material durante a soldagem ou entrar em estado plástico muito antes que o outro.

A partir desses critérios, foi utilizado o software CES (*Cambridge Engineering Selector*) para identificar os possíveis materiais do conjunto soldado e do traçador. Dois gráficos foram criados: um relacionando a densidade com a tensão de escoamento, e outro comparando o ponto de fusão com a temperatura máxima em serviço para diversas ligas metálicas.

3.2 EQUIPAMENTO PARA SOLDAGEM POR FRICÇÃO

O equipamento utilizado para realização das soldas, denominado MSA 50, foi desenvolvido pelo Laboratório de Metalurgia Física da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (LOPEZ, 2010; ANDRADE, 2011). A Figura 30 apresenta a imagem do equipamento, o qual é composto pelos seguintes componentes:

- Pórtico de sustentação;
- Atuador hidráulico;
- Motor hidráulico;
- Célula de carga;
- Suporte de fixação para o pino consumível rotacional;
- Mesa de fixação para a base;
- Sensor de deslocamento;
- Sensor de rotação.

Para o controle dos parâmetros de soldagem, a máquina possibilita a variação da força axial, da velocidade de rotação, do deslocamento axial e da força e tempo de forjamento. Esse monitoramento é realizado por um conjunto de controladores digitais servo-hidráulicos *Flex Test Workstation* da marca MTS. O equipamento MSA 50 tem a capacidade de aplicação de força axial de até 50 kN, deslocamento axial igual a 220 mm e velocidade de rotação entre 0 e 8100 rpm.



Figura 30 – Equipamento para soldagem por fricção MSA 50 (ANDRADE, 2011).

3.3 GEOMETRIA E CONFIGURAÇÃO DAS AMOSTRAS PARA SOLDA

Para realizar a soldagem por FHPP foi definida uma geometria de pino e de furo tipo cônica. Diferentemente da geometria cônica apresentada na Figura 12, a geometria utilizada nesse trabalho possui um raio maior na ponta do pino e no fundo do furo para proporcionar valores mais homogêneos de tensão (pressão) nas superfícies de contato no início da solda. Além disso, um maior raio da ponta do pino e do fundo do furo propicia um aquecimento mais uniforme do material, uma vez que a área de contato aumenta. Consequentemente, há um fluxo de material mais constante, evitando assim problemas como a falta de preenchimento.

A Figura 31 apresenta a vista isométrica da montagem entre o pino e a base (a) e a vista frontal cortada transversalmente (b). Na vista frontal, é possível observar o furo de 2 mm de diâmetro na ponta do pino onde foi inserido o traçador de titânio. O traçador foi inserido por interferência no pino antes da usinagem da geometria.

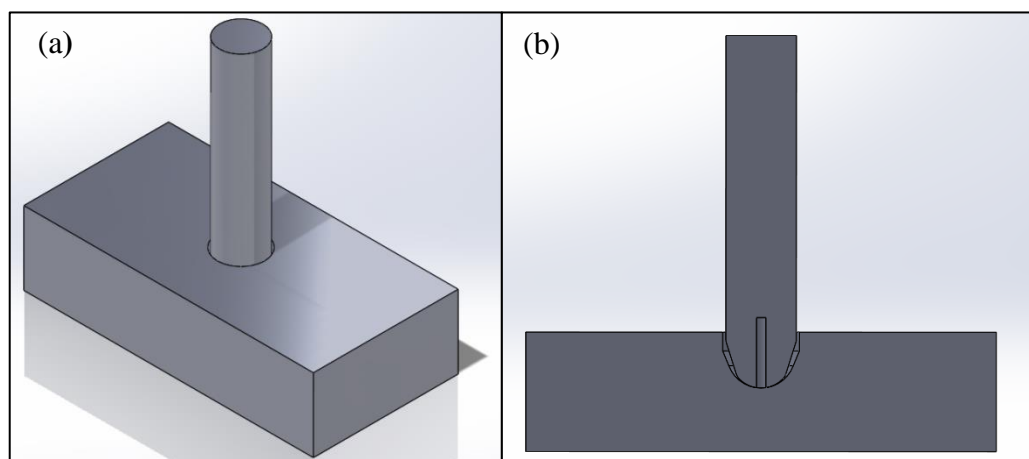


Figura 31 – Vista isométrica (a) e vista frontal com corte transversal (b).

Já na Figura 32, é possível verificar as cotas das geometrias do pino e do furo da base utilizadas. As bases foram feitas a partir de barras cilíndricas de 100 mm de diâmetro e 25 mm de espessura e os pinos de barras cilíndricas de 15 mm de diâmetro. A Figura 32 apresenta três desenhos do pino, Figura 32 (b) pino sem furo, utilizado para a definição dos parâmetros e Figura 32 (c) e (d) com furo centralizado e deslocado para estudo do fluxo com traçador de titânio.

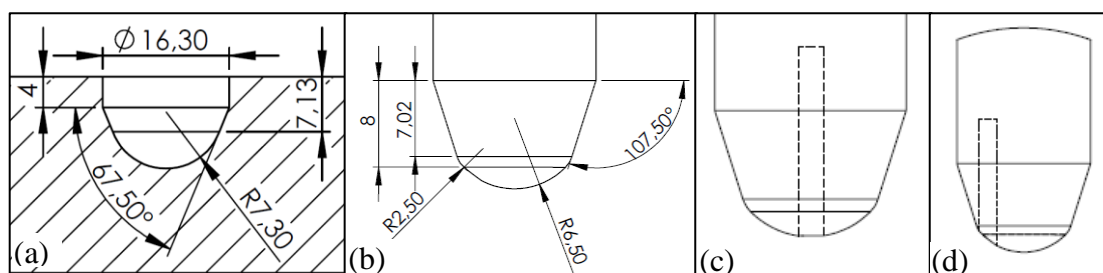


Figura 32 – Dimensões em mm: do furo da base (a), do pino (b), do pino com furo do traçador centralizado (c) e do pino com furo do traçador deslocado (d).

3.4 DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS DE SOLDAGEM

A partir dos resultados obtidos dos diversos parâmetros de soldagem utilizados pelos autores Hattingh et al. (2011) e Andrade (2011) apresentados na seção 2.1.4, foram definidos três parâmetros diferentes para serem testados. Os autores Hattingh et al. (2011) definiram os melhores parâmetros como sendo velocidade de rotação igual a 6000 rpm, força axial de 11,5

kN e consumo igual a 9 mm. Já Andrade (2011), apresenta como os melhores parâmetros os valores de 8000 rpm para rotação, 15 kN para força axial e 8 mm de consumo.

Uma vez que as geometrias e os diâmetros dos pinos e dos furos utilizados pelos autores são diferentes, os valores de força, velocidade de rotação e consumo foram convertidos para facilitar a comparação. As forças axiais foram transformadas em tensão superficial, ou seja, a força foi dividida pela área de contato inicial do pino; a velocidade de rotação passou de rotações por minuto para metros por segundo (levando em consideração o raio de cada pino); e o consumo do pino foi relacionado com o volume vazio a ser preenchido pelo material plastificado. A Tabela 4 apresenta essas alterações para os dados de Hattingh et al. (2011) e Andrade (2011). Nessa mesma tabela, é apresentada a relação entre consumo utilizado e consumo mínimo necessário para o preenchimento do furo, sendo possível verificar quantas vezes o autor aumentou o consumo em relação ao mínimo necessário.

Tabela 4 – Comparação entre os parâmetros de soldagem de referência.

Parâmetros	Hattingh et al. (2011)	Andrade (2011)
Área de contato inicial do pino (mm ²)	63,6	50,24
Força (kN)	11,5	15
Tensão superficial inicial (MPa)	181	299
Velocidade de rotação (rpm)	6000	8000
Velocidade linear de rotação (m/s)	5,65	6,7
Consumo (mm)	9	8
Volume vazio (mm ³)	657,06	655,96
Consumo mínimo do pino necessário para preencher o volume vazio (mm)	2,16	3,71
Relação entre consumo utilizado e consumo mínimo	4,17	2,15

A partir dos dados da Tabela 4, foram definidos três parâmetros para serem testados sem o traçador na geometria apresentada na seção 3.3. Assim, os parâmetros de consumo e rotação foram fixados em 7 mm e 7000 rpm e a força axial em 15, 27 e 35 kN. A Tabela 5 apresenta a comparação entre os parâmetros utilizados pelos autores da Tabela 4 com os parâmetros definidos para esse trabalho. A escolha de manter dois parâmetros fixos e variar somente a força axial deve-se a maior influência deste parâmetro na qualidade final da solda (HATTINGH et al 2011; YIN et al. 2015 e ELLIS, 1972). Além disso, as soldas foram realizadas com uma taxa de aplicação de força igual a 15 kN/s e a força de forjamento foi igual à força axial aplicada durante aproximadamente 15 segundos.

Tabela 5 – Comparação entre os parâmetros utilizados pelos autores e os propostos nesse estudo.

Parâmetros	Hattingh et al. (2011)	Andrade (2011)	Proposto
Tensão superficial inicial (MPa)	181	299	184 / 331 / 429
Velocidade linear de rotação (m/s)	5,65	6,7	5,5
Relação entre consumo utilizado e consumo mínimo	4,17	2,15	2,94

As três soldas para definição do parâmetro ideal foram realizadas em uma mesma base redonda de 100 mm de diâmetro e com a distância de 25,80 mm do centro da base com o centro dos furos. Para manter uma distância igual entre os furos, as soldas foram realizadas com uma defasagem de 120° um do outro, conforme Figura 33.

**Figura 33 – Pinos e base para análise de parâmetros.**

Depois de soldadas, as amostras 01, 02 e 03 foram cortadas transversalmente por meio da eletroerosão a fio. Após cortadas, as superfícies das amostras foram preparadas com lixas de diferentes granulometrias, seguindo a seguinte ordem: 120, 220, 320, 400, 600 e 1200 *Mesh*. Em seguida as amostras foram atacadas com solução de Nital 5%. Isso possibilitou a visualização do interior da solda, analisando de forma qualitativa o preenchimento do furo e a extensão da ZTA e a união na interface pino e furo. A Figura 34 apresenta as amostras após o corte por eletroerosão.



Figura 34 – Soldas de definição de parâmetros seccionadas por eletroerosão.

3.5 SOLDAS COM TRAÇADOR

Depois de analisar as três primeiras soldas foi escolhido entre os parâmetros utilizados o que melhor apresentou preenchimento e menor quantidade de defeitos. A partir desse parâmetro, foram soldadas mais quatro amostras (solda 04, 05, 06 e 07) utilizando o traçador de titânio inserido no interior do pino. Além dessas amostras, foram realizadas mais três soldas, das quais duas utilizaram os mesmos parâmetros das soldas 04, 05, 06 e 07, porém com o traçador de titânio deslocado 4 mm do centro. O furo deslocado teve o objetivo de permitir a visualização do fluxo de material entre a parede do pino e do furo. Essas amostras foram nomeadas como soldas 08 e 09.

A última solda com traçador de titânio (amostra 10) foi realizada para verificar a influência do aumento do consumo do pino na intensidade do fluxo do traçador. Com o cilindro de titânio inserido no centro do pino, foram utilizados os seguintes parâmetros de soldagem: força axial igual a 35 kN, velocidade de rotação de 7000 rpm e consumo de pino de 9 mm.

Adicionalmente foi realizada uma solda alterando o traçador do centro do pino de titânio para cobre. Essa modificação teve como objetivo avaliar a característica do cobre ao percorrer os contornos de grãos do aço nas condições de alta temperatura e pressão e também de verificar o comportamento de outro material como traçador. A amostra 11 utilizou os mesmos parâmetros da solda 04. Os resultados dessa análise estão apresentados no apêndice. A Tabela 6 apresenta o resumo das soldas realizadas nesse estudo.

Tabela 6 – Parâmetros utilizados nas amostras soldadas.

Amostra	Força (kN)	Rotação (rpm)	Consumo (mm)	Traçador?	Posição do traçador
01	15	7000	7	Não	-
02	27	7000	7	Não	-
03	35	7000	7	Não	-
04	35	7000	7	Sim (Ti)	Centro do Pino
05	35	7000	7	Sim (Ti)	Centro do Pino
06	35	7000	2	Sim (Ti)	Centro do Pino
07	35	7000	7	Sim (Ti)	Centro do Pino
08	35	7000	7	Sim (Ti)	Deslocado do centro
09	35	7000	7	Sim (Ti)	Deslocado do centro
10	35	7000	9	Sim (Ti)	Centro do Pino
11	35	7000	7	Sim (Cu)	Centro do Pino

3.5.1 Macrografia

Depois de soldadas, as amostras 04, 05, 06, 09 e 10 foram cortadas transversalmente por meio da eletroerosão a fio e embutidas. Na sequência, foi realizada a preparação das superfícies das amostras com lixas de diferentes granulometrias, seguindo a seguinte ordem: 120, 220, 320, 400, 600 e 1200 *Mesh*.

Depois de lixadas, as soldas foram atacadas quimicamente com o reagente Nital 5%. Esse reagente é amplamente utilizado para revelar a microestrutura de aços ao carbono. Uma vez que a camada passiva de óxido presente no titânio não deixa o Nital atacar o titânio, o material traçador ficou em destaque em meio ao aço. Ao final do processo foram feitas as imagens macrográficas da região de solda das amostras.

3.5.2 Micrografia

Após a realização das macrografias, as amostras foram polidas com panos e pastas de diamante de 4 μm e 1 μm e para análise no microscópio ótico. Foram verificadas microestrutura, descontinuidades e dispersão do material do traçador. No microscópio foram registradas as imagens das seguintes regiões: material base do pino e da base, ZTA do pino, ZTA da base, linha de união entre pino e base, região da trinca e fluxo de material do titânio.

3.5.3 Microdureza

A mesma superfície preparada para as análises metalográficas da amostra 05 foi utilizada para a realização do ensaio de Microdureza Vickers com carga de 300 gramas. Para esse ensaio foi utilizado um Microdurômetro automático Instron modelo Tukon 2100B. A partir desses perfis é possível avaliar as propriedades mecânicas da solda, assim como caracterizar a microestrutura resultante. Foram realizados dois perfis de dureza: um no sentido vertical do pino, deslocado 5,30 mm do centro, e outro no sentido horizontal a 2 mm do topo da base. Os perfis horizontal e vertical tiveram 29,4 mm e 23,7 mm de comprimento e espaçamento entre as medições de 0,3 mm. O perfil vertical foi deslocado para fora do centro para que a endentação não fosse feita em cima do material do titânio. A Figura 35 apresenta as linhas de medição do perfil de microdureza realizado na solda 05.

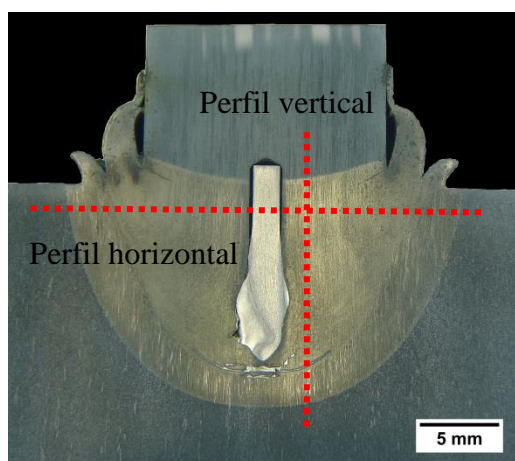


Figura 35 – Linhas em vermelho, indicando o local de medição do perfil de microdureza da solda 05.

3.6 ANÁLISE COM TOMÓGRAFO INDUSTRIAL

Além das análises por meio da macro e micrografia, foram separadas duas soldas para serem analisadas por um tomógrafo industrial, uma com o traçador inserido no centro do pino e outra com o traçador inserido a quatro milímetros de distância do eixo central do pino. As amostras 07 e 08 foram selecionadas para verificar a dispersão em 3D do traçador de titânio na junta soldada, tanto no centro do pino quanto na linha de união.

Depois de soldadas, as amostras 07 e 08 foram usinadas para reduzir a espessura de material no entorno da junta soldada. A etapa de usinagem foi necessária para reduzir o efeito de atenuação dos raios X pelo aço e, assim, conseguir imagens com melhor resolução. Foi retirado um corpo de prova na forma de um cilindro com 21 mm de diâmetro, conforme Figura 36.

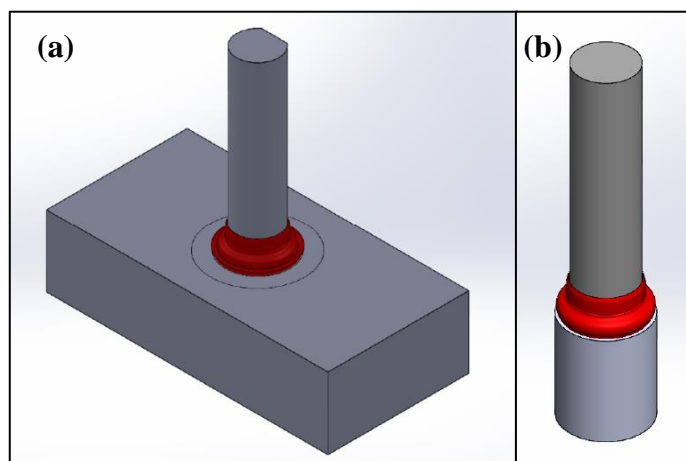


Figura 36 – Amostra soldada (a) e corpo de prova para o tomógrafo computacional (b).

Para a realização das tomografias, foi disponibilizado pelo Centro de Pesquisa Global da *General Eletric* (GE), localizado na cidade do Rio de Janeiro (RJ), o tomógrafo modelo Phoenix V-Tome-X-M fabricado pela GE. O equipamento possui dois tubos emissores de raios X com diferentes potências. Para as análises das amostras, utilizou-se o tubo com capacidade de 300 kV de tensão e a potência máxima de 500W, o mesmo possui uma resolução na ordem de microns. As amostras foram posicionadas perpendicularmente em relação aos raios X emitidos pelo tubo e ao longo do processo a peça foi rotacionada 360° em torno do eixo de fixação. A Figura 37 apresenta o equipamento utilizado e o posicionamento da peça.

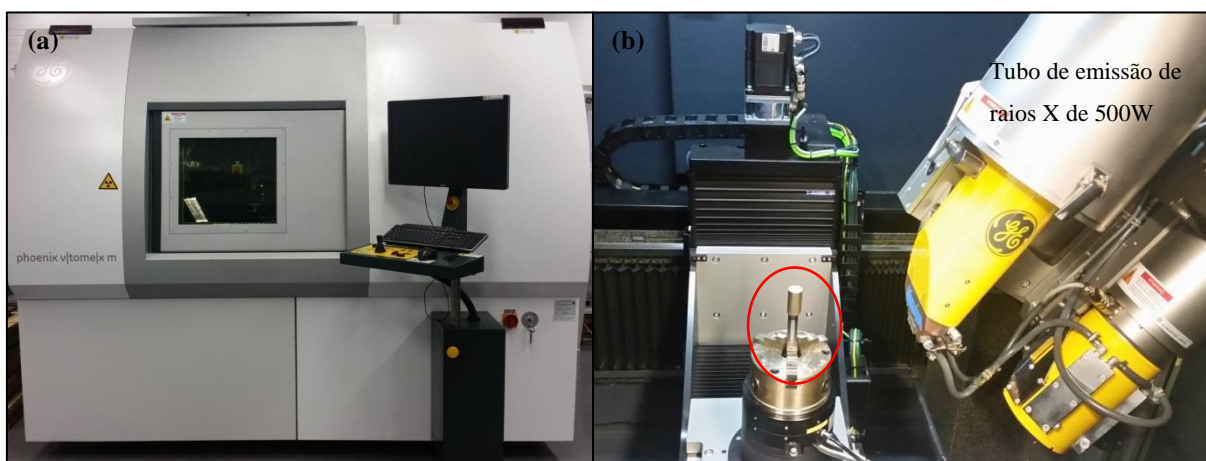


Figura 37 – Equipamento de tomografia (a) e fixação da peça e tubos emissores de raios X (b).

Para cada amostra os parâmetros de corrente, tensão e número de imagens criadas foram variados entre 200 e 215 kV, 190 e 300 mA e 1400 e 1800 imagens, afim de alcançar a melhor resolução. Além disso, foi utilizado um filtro de 0,1 mm de cobre. Depois de realizado o escaneamento das peças, os arquivos foram importados para o software livre de renderização de imagens Voreen. Com o software foram realizadas três análises, sendo a primeira o corte transversal do volume da peça para localizar o traçador e eventuais defeitos como trincas e descontinuidades. Depois de realizar o corte transversal, foram feitos diversos cortes de topo da solda, começando na intersecção entre a ponta do pino e o fundo do furo e subindo em direção a rebarba. As imagens de topo foram utilizadas para descrever as etapas de deposição do traçador ao longo da junta soldada. E, por último, foi criado o volume em 3D somente do traçador de titânio e do caminho percorrido por ele.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 SELEÇÃO DOS MATERIAIS

A primeira parte do trabalho consistiu em selecionar os materiais do pino, da base e do traçador (material inserido no pino). Conforme apresentado na seção 3.1, foram criados dois gráficos a partir do software CES. A Figura 38 relaciona a densidade com a tensão de escoamento, já a Figura 39 compara o ponto de fusão com a temperatura máxima em serviço de diversas ligas metálicas.

Analisando as densidades de cada liga no primeiro gráfico e já definindo o material do pino e da base como sendo de aço (densidade média de 8000 kg/m^3), as seguintes ligas foram pré-selecionadas: as de titânio (4500 kg/m^3), as de alumínio (2700 kg/m^3) e as de magnésio (1700 kg/m^3). As ligas pré-selecionadas como material para o enxerto além de possuírem uma densidade muito abaixo do valor médio das ligas de aço, também possuem valores de tensão de escoamento próximos as dos aços. Outras ligas como níquel e cobre também apresentam valores de tensão de escoamento na faixa dos aços, porém a diferença de densidade é menor, o que poderia dificultar a identificação dos materiais pela análise com raios X.

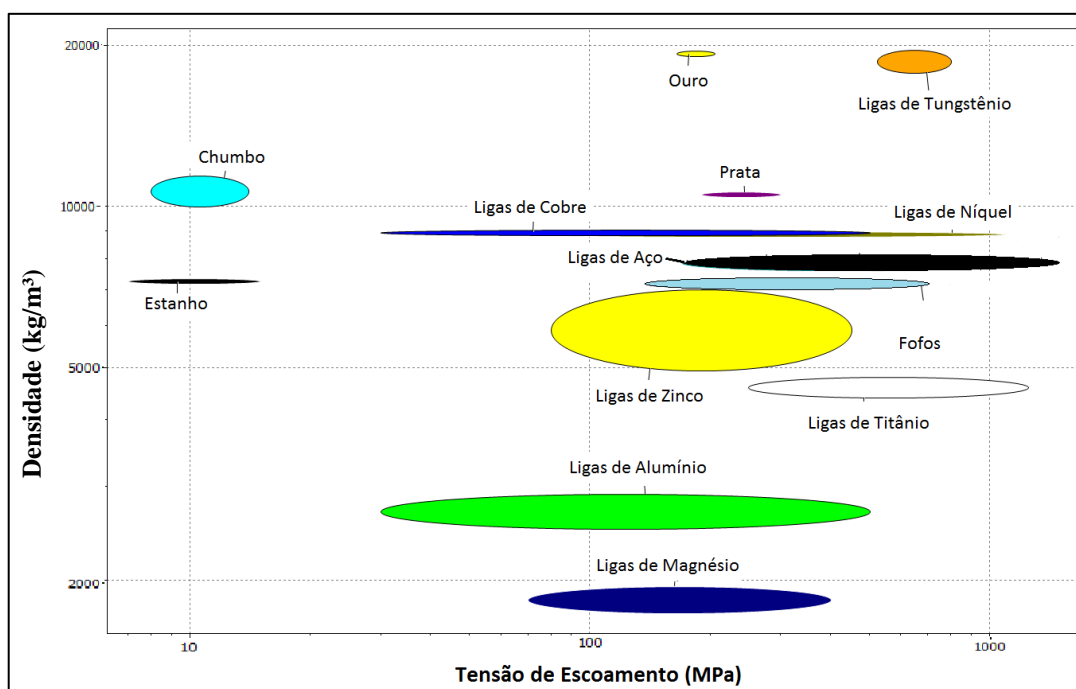


Figura 38 – Gráfico de densidade (kg/m^3) pela tensão de escoamento (MPa).

No segundo gráfico (Figura 39) as ligas de alumínio e as de magnésio foram descartadas por terem uma temperatura de fusão menor que a temperatura máxima alcançada pelo processo de fricção. Desta forma, restou a liga de titânio como material para o traçador.

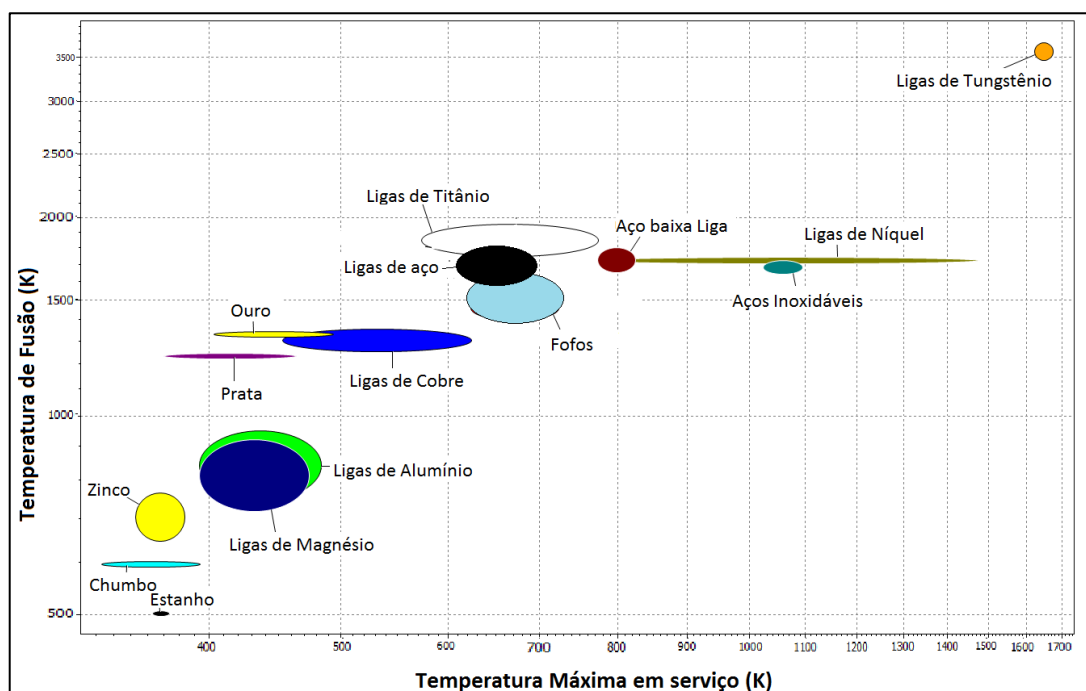


Figura 39 – Gráfico de temperatura de fusão (K) pela máxima temperatura em serviço (K).

Portanto, a partir das informações apresentadas pelo software CES, a liga de titânio Ti-6Al-4V foi definida como material para o traçador devido as boas propriedades mecânicas, comparáveis às dos aços de médio carbono. A partir das propriedades dessa liga (tensão de escoamento e dureza), o material do pino e da base foi definido utilizando o software CES. Com base nos resultados da pesquisa, a liga SAE 4140 foi estabelecida para o pino e a base. A Tabela 7 apresenta a dureza Vickers e a tensão de escoamento de ambos os materiais, de acordo com o software CES. Já a Tabela 8 e a Tabela 9 apresentam as composições químicas nominais das ligas Ti-6Al-4V e SAE 4140, respectivamente. Conforme o software, as ligas de SAE 4140 e Ti-6Al-4V apresentam valores de temperatura de fusão próximos, 1430°C para a de aço e 1660°C para a de titânio.

Tabela 7 – Propriedades das ligas Ti-6Al-4V e SAE 4140 (CES).

Liga	Dureza (HV)	Tensão de Escoamento (MPa)
Ti-6Al-4V	337 - 373	786 - 910
SAE 4140	335 - 410	1020 - 1260

Tabela 8 – Composição química típica em % de peso da liga Ti-6Al-4V (ASM, 1992).

Material	N	C	Fe	O	Al	V
TI-6Al-4V	0,05	0,10	0,3	0,2	6	4

Tabela 9 – Composição química em % de peso da liga SAE 4140 (ASM, 1993).

Material	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
SAE 4140	0,38-0,43	0,15-0,35	0,75-1,00	0,035	0,04	0,8-1,1	0,15-0,25

Após a aquisição dos materiais, foram realizadas as análises de composição química e dureza. Para verificação da composição dos materiais foi utilizada a análise de espectrometria de emissão ótica. As Tabela 10 e Tabela 11 apresentam as médias aritméticas de três análises para cada material.

Tabela 10 – Composição química em % de peso da liga Ti-6Al-4V.

Material	N	C	Fe	O	Al	V
TI-6Al-4V	0,027	0,0045	0,052	0,055	6,47	3,41

Tabela 11 – Composição química em % de peso da liga SAE 4140.

Material	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
SAE 4140 Base	0,40	0,24	0,82	<0,001	0,017	1,00	0,18
SAE 4140 Pino	0,40	0,18	0,82	0,007	0,004	0,91	0,41

Para analisar a dureza do material foi utilizado o método de dureza Rockwell C com carga de 150 kg, para possibilitar a comparação com os dados da Tabela 7 os valores foram convertidos para Vickers. A Tabela 12 apresenta o resultado da média aritmética de cinco pontos para cada material.

Tabela 12 – Dureza medida nas amostras.

Liga	Dureza (HRC)	Dureza (HV)
Ti-6Al-4V	28	286
SAE 4140 (pino)	31	310
SAE 4140 (base)	23	255

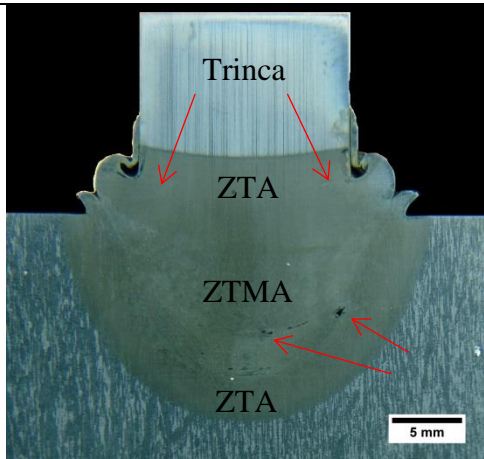
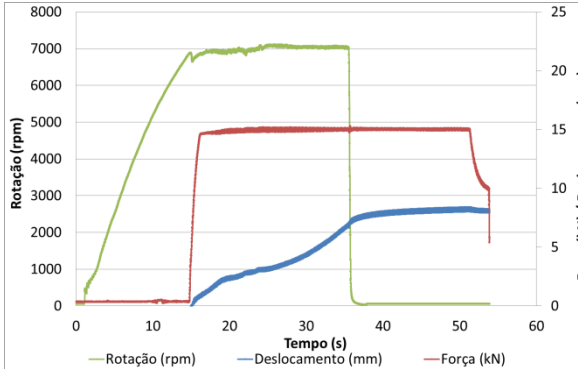
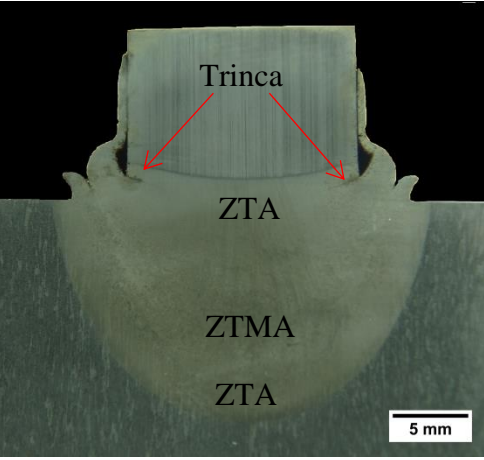
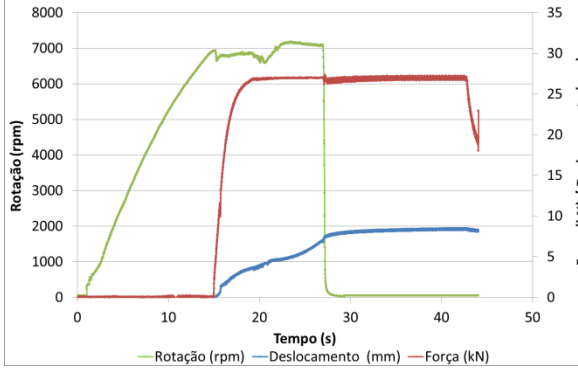
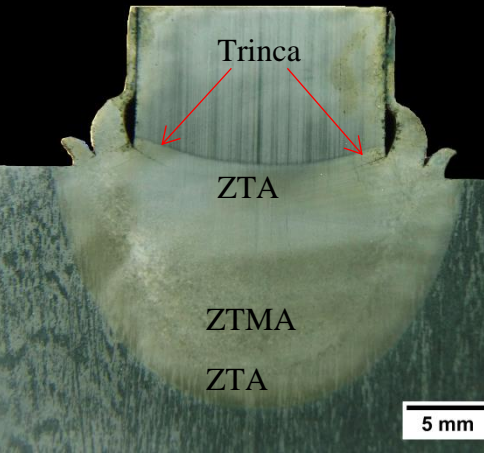
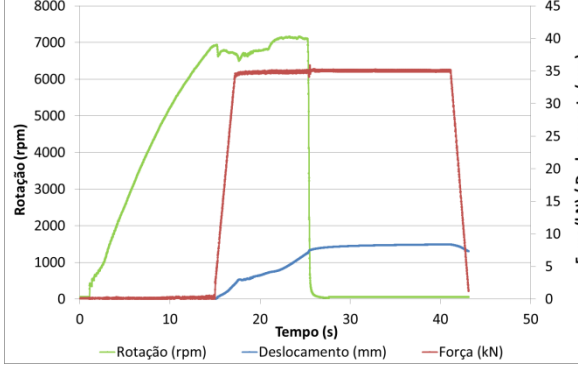
4.2 ANÁLISES PRELIMINARES

Depois de soldadas, as amostras 01, 02 e 03 foram cortadas transversalmente, lixadas e atacadas quimicamente para visualização de possíveis defeitos de preenchimento e verificação da ZTA. Conforme a Tabela 13, é possível visualizar as imagens das três soldas e identificar as regiões de ZTA (zona termicamente afetada) e de ZTMA (zona termo mecanicamente afetada). Além disso, na mesma tabela são apresentados os gráficos dos registros dos parâmetros de velocidade de rotação em rpm (linha verde), consumo ou *burn-off* em milímetros (linha azul) e força axial em quilo-newtons (linha vermelha) pelo tempo em segundos. As amostras apresentaram tempos de aquecimento diferentes. O tempo de aquecimento inicia-se no contato entre as faces do pino e do furo e termina com a parada da rotação. As amostras 01, 02 e 03 apresentaram 20, 14 e 10 segundos de tempo de aquecimento, respectivamente.

Analisando as amostras individualmente pode-se identificar a falta de preenchimento em alguns locais da solda 01 (pontos mais escuros). Estas discontinuidades estão localizadas na ZTMA, próximas à linha de união, e no centro da solda. Esses defeitos podem estar relacionados com a baixa força axial aplicada durante o processo, uma vez que a força está diretamente relacionada com a intensidade do fluxo de material (HATTINGHS et al., 2011; YIN et al., 2015). Além da falta de preenchimento, a solda 01 também apresentou uma trinca longitudinal no pino, iniciando na superfície e indo em direção ao centro da peça. Porém essa trinca foi desconsiderada, uma vez que ela se encontra acima do topo da base e, portanto, não tem influência no resultado final. Já as soldas 02 e 03 não apresentaram defeitos relacionados

à falta de preenchimento na região de solda, porém em ambas ocorreram a mesma trinca da solda 01 na região do pino.

Tabela 13 – Macrografia e registro dos parâmetros das soldas 01, 02 e 03. Descontinuidades e trincas indicadas pelas setas.

Solda	Macrografia	Gráfico
01	 <p>Trinca</p> <p>ZTA</p> <p>ZTMA</p> <p>ZTA</p> <p>5 mm</p>	 <p>Rotação (rpm)</p> <p>Tempo (s)</p> <p>Força (kN) / Deslocamento (mm)</p> <p>— Rotação (rpm) — Deslocamento (mm) — Força (kN)</p>
02	 <p>Trinca</p> <p>ZTA</p> <p>ZTMA</p> <p>ZTA</p> <p>5 mm</p>	 <p>Rotação (rpm)</p> <p>Tempo (s)</p> <p>Força (kN) / Deslocamento (mm)</p> <p>— Rotação (rpm) — Deslocamento (mm) — Força (kN)</p>
03	 <p>Trinca</p> <p>ZTA</p> <p>ZTMA</p> <p>ZTA</p> <p>5 mm</p>	 <p>Rotação (rpm)</p> <p>Tempo (s)</p> <p>Força (kN) / Deslocamento (mm)</p> <p>— Rotação (rpm) — Deslocamento (mm) — Força (kN)</p>

Todas as amostras apresentaram a rebarba ou *flash* com geometrias similares, porém pode-se notar que com a variação da força axial, as alturas das rebarbas mudaram. Também é possível observar nas macrografias da Tabela 13 a deformação da parede do furo em todas as amostras. Após a análise macrográfica, o parâmetro da solda 01 foi descartado devido aos defeitos de preenchimento presentes. Os parâmetros das soldas 02 e 03 apresentaram bons resultados, contudo para a realização da solda dos pinos com traçador de titânio, foi escolhido o parâmetro com maior força axial (35 kN) devido às vantagens de se utilizar uma força mais elevada, conforme apresentado nas seções 2.1.4 e 2.1.5.

4.3 SOLDAS COM TRAÇADOR DE TITÂNIO

4.3.1 Macrografia

Depois de soldar as amostras com traçador central (04, 05, 06 e 10) e com o traçador deslocado (09), foi seguido o mesmo procedimento de análise realizado na seção 3.5.1: corte transversal, lixamento e ataque químico. Com o ataque químico, foi possível analisar o fluxo de material do titânio plastificado com maior facilidade, uma vez que o titânio não reage com o Nital. A Tabela 14 permite visualizar as imagens das macrografias das soldas e seus respectivos gráficos com os parâmetros de soldagem. Durante a soldagem da amostra 06, devido à má fixação do pino na pinça da máquina MSA 50, ocorreu o escorregamento do pino durante a aplicação da força axial. Por consequência desse problema a solda foi interrompida antes de estar finalizada, mesmo assim, foi realizada a análise a fim de conhecer o comportamento do fluxo de material no início do processo. Os tempos de aquecimento foram de aproximadamente 10 segundos para as soldas 04 e 05, dois segundos para a solda 06, 16 segundos para a solda 09 e 11 segundos para a solda 10.

Conforme esperado, todas as amostras com o traçador inserido no centro do pino obtiveram uma dispersão semelhante. Segundo Paes (2013), a resistência à torção a quente do pino pode ser excedida durante o processamento e tal fenômeno acarretaria na formação de planos de cisalhamento a quente (PCQ). A partir dos PCQs presentes nas imagens da Tabela 14, é possível observar o caminho percorrido pelo material plastificado do titânio ao longo da formação da junta soldada.

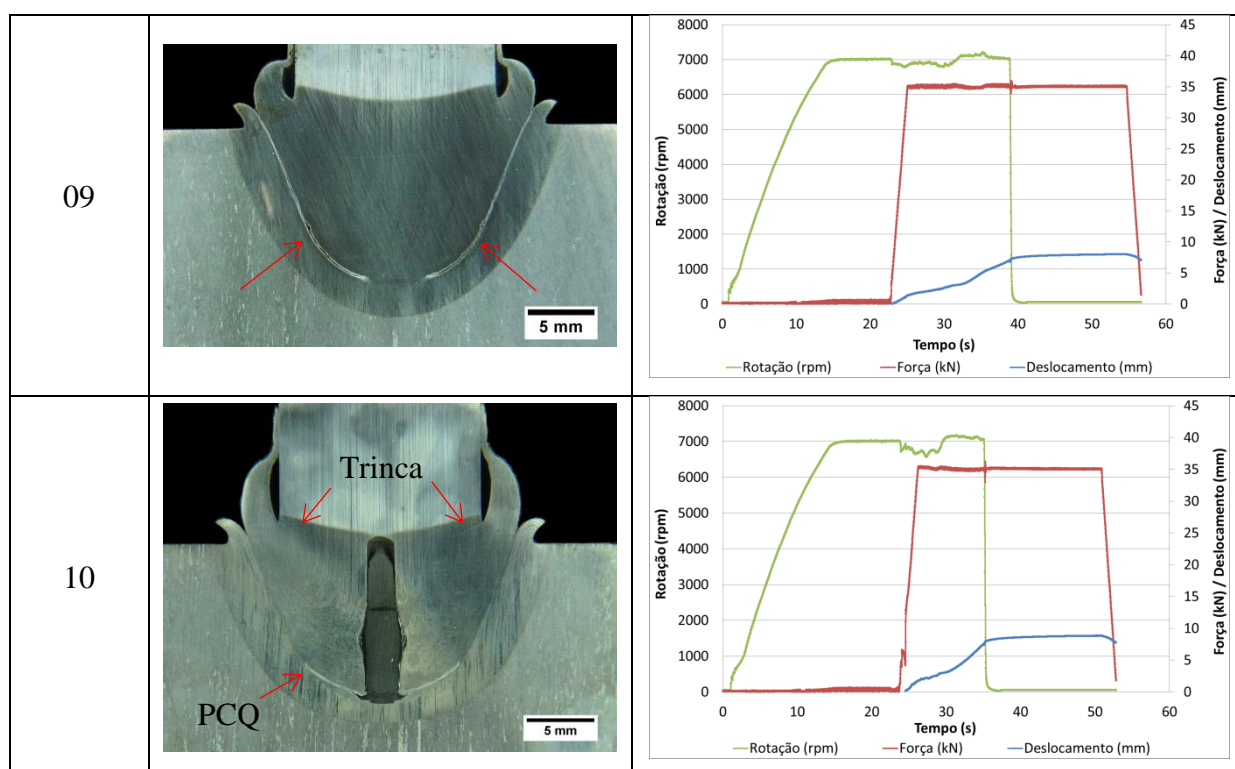
Pelo padrão de fluxo apresentado nas soldas com o traçador inserido no centro, pode-se verificar que o material do titânio escoou seguindo a geometria do furo. Essa dispersão indica o fluxo de material central do pino, que é movimentado em direção às laterais do furo e para cima, preenchendo a cavidade. Contudo, o traçador não chegou a ser expulso com a rebarba.

Outra característica do processo é a variação da velocidade relativa da superfície, de acordo com a distância do centro do pino. Quanto mais afastado do centro, maior será a velocidade de determinado ponto; quanto mais próximo do centro, menor será a velocidade, tendendo a zero. Portanto, o centro do pino deverá apresentar uma menor geração de calor e, conseqüentemente, uma menor mistura de material. Além disso, a extração de calor é maior no início da soldagem devido à baixa temperatura da base. Com uma menor taxa de aquecimento e alta extração de calor, o centro do pino leva mais tempo para plastificar, o que

dificulta o escoamento desse volume de material ao longo da solda. Tal característica pode ser comprovada pelas imagens, devido ao acúmulo de titânio na região de intersecção entre o fundo do furo e a ponta do pino. O mesmo tipo de trinca presente nas soldas sem traçador, na região de união entre a rebarba e o pino, foi encontrado nas amostras 04, 05, 06 e 10.

Tabela 14 – Macrografias e gráficos das soldas 04, 05, 06, 09 e 10 com traçador.

Solda	Macrografia	Gráfico de Parâmetros
04		
05		
06		



As soldas 04 e 05 apresentaram um perfil de fluxo semelhante, com dois PCQ discerníveis, onde o primeiro encontra-se próxima a linha de união e apresenta uma distribuição simétrica. Abaixo do primeiro PCQ, há um pequeno volume de titânio acumulado. Já o segundo PCQ escoou por uma distância menor e não apresentou simetria nas imagens. A não simetria do segundo PCQ pode estar relacionada à forma de deposição de material do pino, que aliada à rotação, tende a depositar material seguindo um perfil helicoidal.

A amostra 06, conforme mencionado anteriormente não foi finalizada, sendo interrompida logo no início do processo. No gráfico é possível identificar o momento em que a solda cessou próximo aos 17 segundos, quando a rotação cai para zero. Mesmo após a parada da rotação, a força de forjamento foi aplicada. Pode-se verificar pela imagem que ocorreu acúmulo de material do traçador na intersecção entre a ponta do pino e o fundo do furo. Esse volume apresenta-se em maior quantidade quando comparada com as soldas 04 e 05.

A solda 09 foi realizada com o traçador de titânio deslocado 4 mm do centro e os mesmos parâmetros das soldas 04 e 05. Na imagem, não é possível localizar o traçador, visto que ele foi inserido fora do centro e, portanto, não há simetria no corte transversal. Porém, é possível identificar o material do titânio (região mais clara) distribuído ao longo da linha de

união entre o pino e o furo. Pela macrografia verificou-se que o traçador de titânio plastificou e escoou em direção à saída da rebarba e para baixo, mas não chegou a atingir a região de contato entre a ponta do pino e o fundo do furo. Além disso, o titânio foi expulso com a rebarba. A amostra apresentou um vazio entre o pino e o furo (indicado por setas na imagem) devido ao escoamento do titânio por essa região, contudo foi a única solda em que não foi encontrada a trinca entre a rebarba e o pino.

A amostra 10, que foi realizada com um consumo de 2 mm a mais do que as soldas 04 e a 05, apresentou somente um PCQ. Esse plano de cisalhamento a quente está localizado mais próximo à linha de união e também percorreu uma distância maior do raio, quando comparada às amostras anteriores.

Para facilitar o entendimento do fluxo de material nas amostras, foram realizados os desenhos da dispersão do material do traçador a partir das macrografias da Tabela 14, conforme a Figura 40. Qualquer variação na altura do traçador pode estar relacionada ao processo de usinagem e não ao consumo do pino durante o processo.

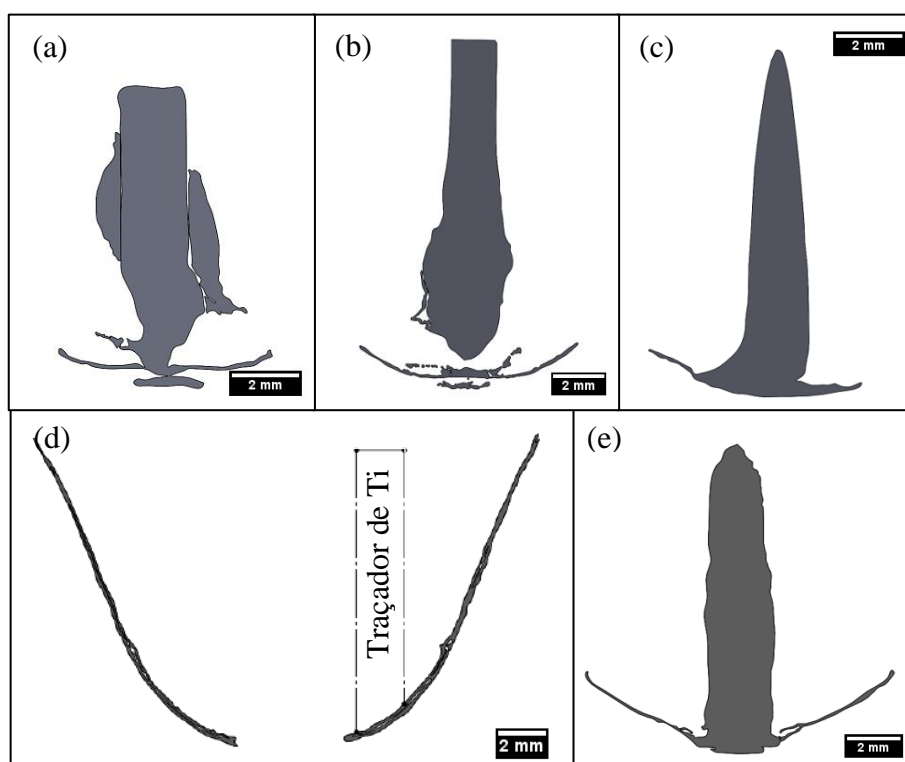


Figura 40 – Representação da distribuição do titânio nas soldas 04 (a), 05 (b), 06 (c), 09 (d) e 10 (e).

Unindo os resultados obtidos com o traçador de titânio inserido no centro do pino e deslocado do centro, soldas 05 e 09, tem-se o fluxo de material durante o processo de FHPP. A Figura 41 apresenta a montagem do perfil de distribuição do titânio das soldas 05 e 09, na qual as setas indicam o fluxo de material do pino central e do pino deslocado 4 mm do centro. Pela montagem, pode-se perceber que existe um maior fluxo de material na parede, uma vez que o titânio plastificado percorreu grande parte da linha de união. O material do traçador inserido fora do centro chegou a ser expulso com a rebarba, porém teve seu fluxo interrompido ao chegar à ponta do pino. Em contrapartida, o material do centro do pino apresenta um menor fluxo, tendendo a ficar acumulado na intersecção entre o fundo do furo e a ponta do pino. Acima desse material acumulado o fluxo de material aumenta devido ao PCQ.

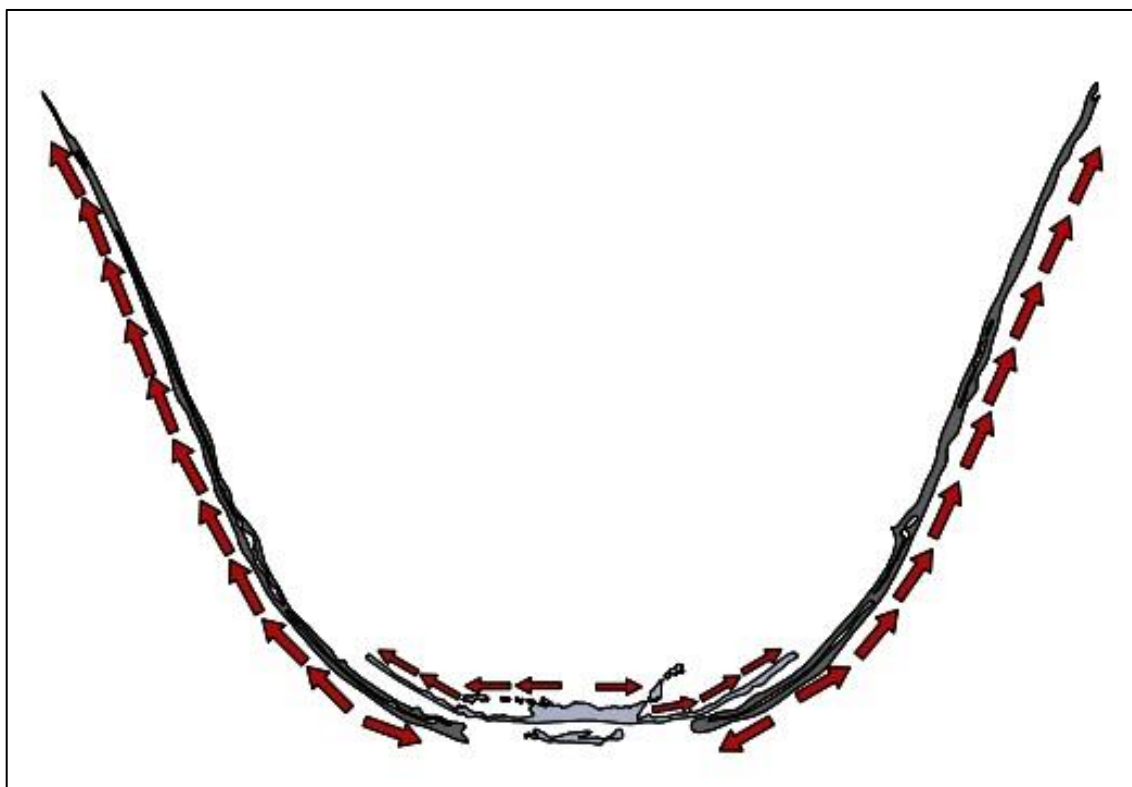


Figura 41 – Fluxo de material do titânio na soldagem por fricção com pino consumível.

A partir do entendimento do fluxo de material na junta soldada, é possível prever a dispersão de particulados. Segundo Chludzinski (2013), ao soldar pinos e bases por FHPP, verificou que as inclusões de MnS presentes nos materiais participaram do processo de mistura, o que resultava na alteração em seus formatos. Após a realização de análises

fractográficas das juntas, Chludzinski (2013) verificou que as inclusões tiveram seu formato alterado, passando de originalmente alongadas para arredondadas e com dimensões menores que as iniciais. Além disso, devido à fragmentação das inclusões, ocorreu o aumento da quantidade de inclusões dispersas. A Figura 42 apresenta o resultado do trabalho da autora, no qual na linha de união encontram-se dispersas as partículas de inclusões deformadas.

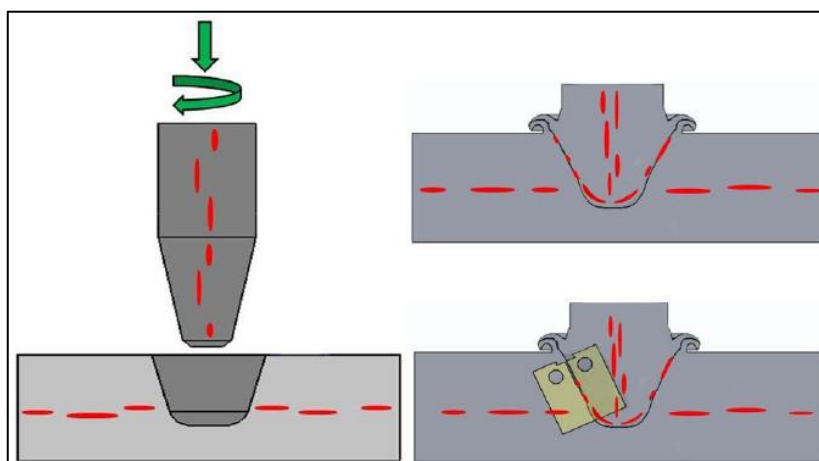


Figura 42 – Desenho esquemático da localização e dispersão das inclusões antes e depois da soldagem. Em vermelho estão representadas as inclusões de MnS (CHLUDZINSKI, 2013).

Portanto, ao comparar a Figura 41 com a Figura 42, percebe-se que a quebra e a distribuição das inclusões ocorrem nos locais com maior intensidade de fluxo. Ou seja, na intersecção da parede do pino e do furo e nos PCQs serão os locais preferenciais para a deposição das inclusões, o que resulta na fragilização dessa região, uma vez que as inclusões são locais de nucleação e propagação de trincas.

4.3.2 Micrografia

As micrografias foram realizadas em seis regiões, sendo elas: material base do pino, material base da base, ZTA do pino, ZTA da base, trinca do pino e linha de união entre pino e base. A partir das imagens do microscópio, conseguiu-se distinguir com maior facilidade o material de titânio do aço, verificar o caminho percorrido pela trinca e analisar a mudança de microestrutura do material.

A Figura 43 mostra a localização de cada ponto verificado e a micrografia correspondente. Como todas as amostras foram realizadas com o mesmo parâmetro de

soldagem, somente serão apresentadas as micrografias da solda 04, uma vez que as regiões analisadas se apresentam semelhantes em todas as soldas.

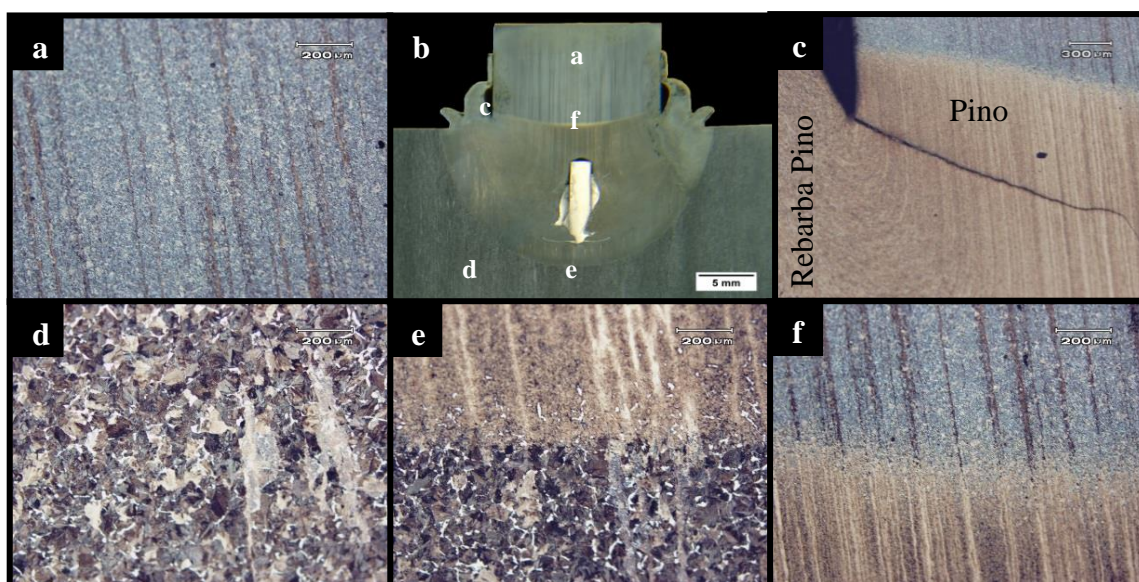


Figura 43 – Regiões da solda 04: material base do pino (a), macrografia da solda 04 (b), trinca entre o pino e a rebarba (c), material base da base (d), ZTA base (e) e ZTA do pino (f).

Nas imagens (a) e (d) da Figura 43, pode-se identificar no material base do pino e da base a mesma microestrutura perlítica com ferrita no contorno de grãos. Porém, há uma grande diferença no tamanho dos grãos, os quais no material base do pino estão mais refinados que no material base da base. Além disso, é possível visualizar o bandeamento da perlita intercalada com ferrita paralelas à direção de laminação da barra.

Já a Figura 43 (e) e (f) apresentam as zonas termicamente afetadas (ZTA) da base e do pino. Para a análise dessa região foi selecionada a área entre os limites do final do material base e o início da ZTA, possibilitando assim visualizar com maior facilidade a mudança da microestrutura das bandas de perlita e ferrita para bandas de martensita não revenida. Mesmo após o aquecimento dessa região, ainda é possível observar as linhas de bandeamento. Na Figura 43 (c) se observa que ao final da trinca ocorre a mudança de direção da propagação, indo para o centro da solda. Nessa mesma imagem aparecem as linhas de bandeamento do pino que possibilitam um melhor entendimento do fluxo do material. No canto inferior esquerdo dessa mesma imagem, as linhas perdem o padrão apresentando-se com outro

direcionamento, o que evidencia a ocorrência da mistura do material nessa região. Também é possível verificar que algumas linhas acompanham a direção do escoamento do *flash*.

A Figura 44 exibe a imagem da mesma região da Figura 43 (c), porém com mais detalhes. Com essa imagem pode-se identificar a linha de união entre as rebarbas do furo e do pino. Na rebarba do furo as linhas de bandeamento encontram-se intactas, mostrando que não ocorreu a mistura de material nessa região. A parede do furo foi apenas conformada a quente. Já na rebarba do pino há um intenso fluxo de material, uma vez que não é possível identificar as linhas de bandeamento. Nessa mesma figura é possível identificar com maior clareza o percurso da trinca.

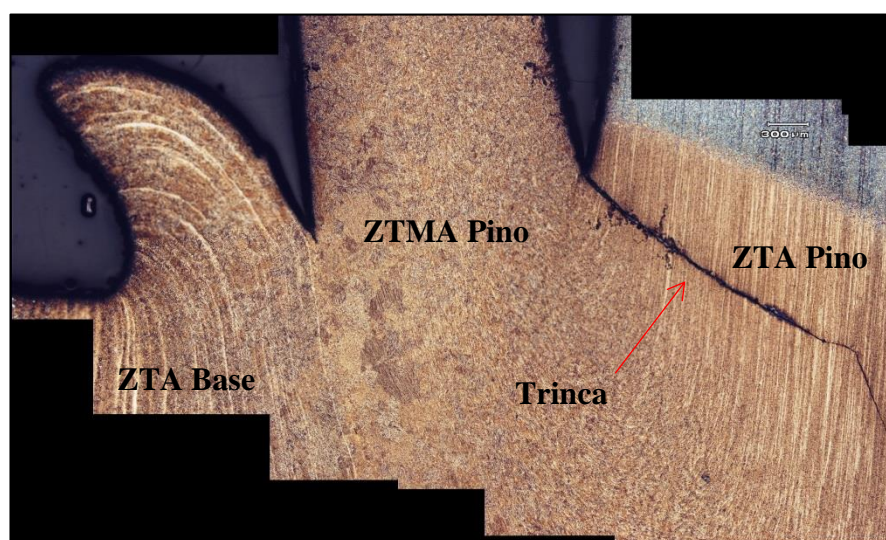


Figura 44 – Linhas de bandeamento das rebarbas do furo e do pino da amostra 05.

Para a região de escoamento do material do traçador, foram realizadas diversas micrografias a fim de facilitar a identificação e o percurso do titânio ao longo da junta soldada. Pelas Figura 45, 46, 47, 48 e 49 percebe-se que as linhas de bandeamento permaneceram verticais, porém ao se aproximarem da linha de união elas mudaram de direção, seguindo o fluxo de saída da rebarba. Essa mudança de direção evidencia a ocorrência da mistura do material do pino com o material da base.

A Figura 45 apresenta a micrografia da região de dispersão do titânio da amostra 04. Na imagem é possível identificar com maior facilidade o titânio na matriz de aço. Também é possível visualizar o material acumulado na intersecção entre o pino e a base, com o comprimento de 1,40 mm e altura de 0,18 mm no centro. Logo acima está o primeiro PCQ, a

0,10 mm de distância do material titânio acumulado e com 5,56 mm de comprimento de ponta a ponta.

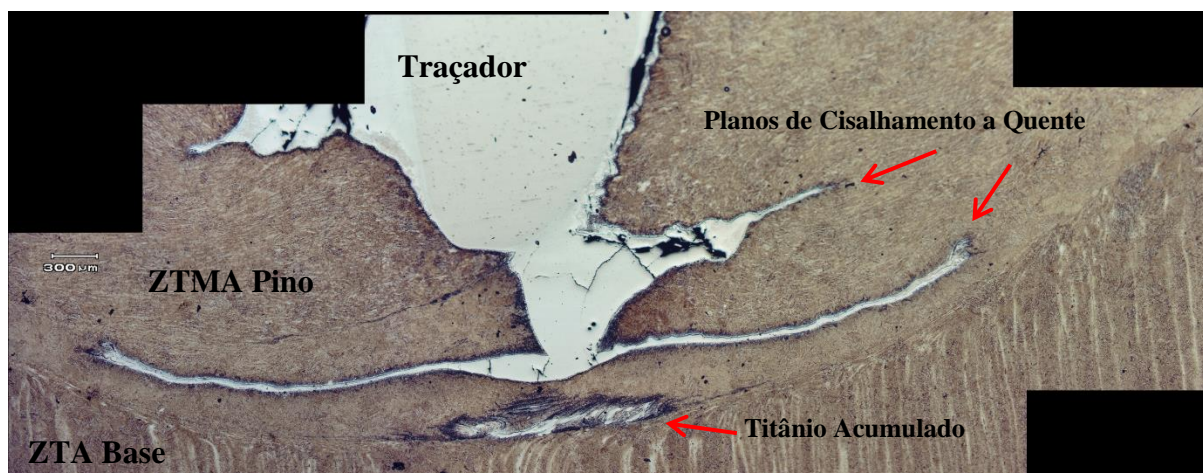


Figura 45 – Micrografia da linha de união entre o pino e o furo da base e a distribuição do material do traçador da amostra 04.

A amostra 05 (Figura 46) apresenta um comportamento semelhante ao da amostra 04, com o acúmulo de titânio na ponta do pino e logo acima o plano de cisalhamento a quente do pino. O volume acumulado de titânio tem 2,06 mm de comprimento e 0,21 mm de altura no centro. Já o PCQ possui um comprimento total de 8,14 mm.

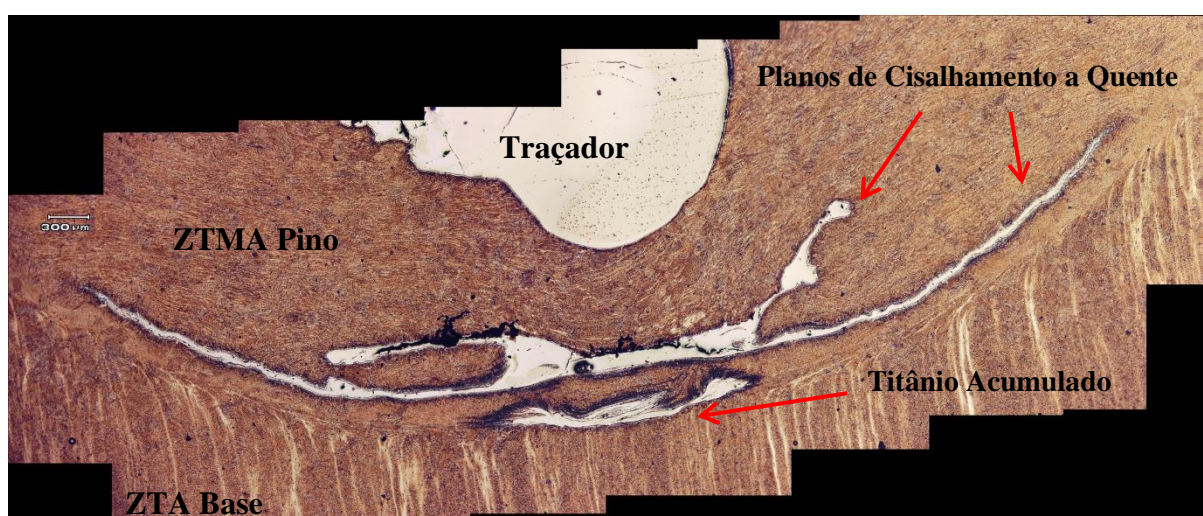


Figura 46 – Micrografia da linha de união entre o pino e o furo da base e a distribuição do material do traçador da amostra 05.

A partir da Figura 47 é possível visualizar o início do processo de FHPP, no qual ocorreu o consumo do pino de aproximadamente 2 mm. Pela imagem pode-se identificar o início da formação do volume acumulado de titânio na linha de união da ponta do pino. Esse volume apresenta-se maior que as soldas 04 e 05 com 0,38 mm de altura e 3,58 de comprimento do PCQ. Além disso, o PCQ está unido ao volume de titânio acumulado.

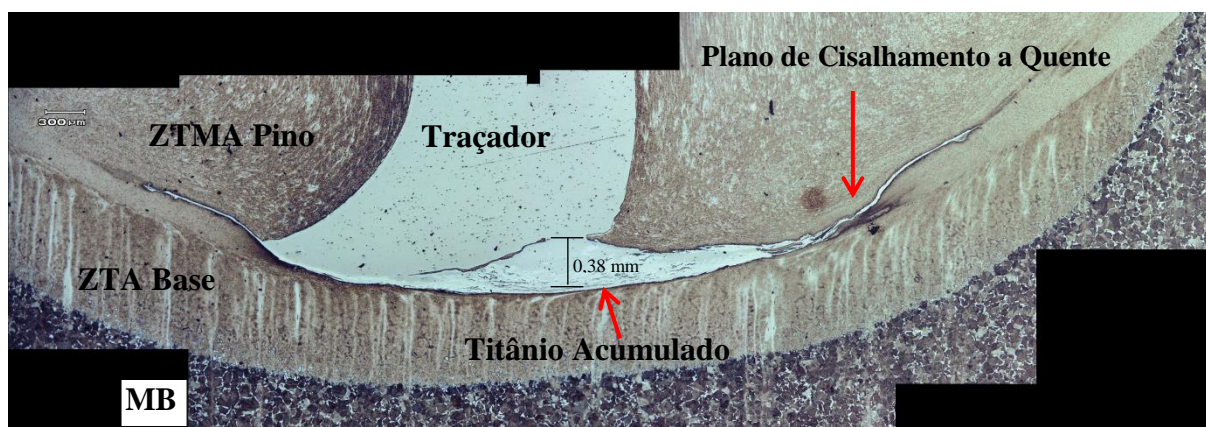


Figura 47 – Micrografia da linha de união entre o pino e o furo da base e a distribuição do material do traçador da amostra 06.

A Figura 48 mostra o escoamento do material plastificado do traçador, quando o mesmo foi inserido a 4 mm de distância do centro. Coincidentemente, foi nessa mesma distância do centro que ocorreu a falta de preenchimento na linha de união. Esse vazio observado está relacionado ao escoamento do titânio pela linha de união, uma vez que nas amostras realizadas com os mesmos parâmetros, porém sem o traçador deslocado, não apresentaram esse defeito. É possível observar que o titânio escoou em duas direções, para cima junto com a rebarba e para baixo. Esse comportamento assemelha-se ao reportado por Meyer (2003), no qual o autor afirma que entre 0,3 e 0,7 do raio ocorre o início do aquecimento do pino e após o material dessa região plastificar, ele escoou em direção ao centro e depois para a periferia do pino, conforme apresentado na seção 2.1.

Pela Figura 48, ainda é possível perceber que o escoamento foi interrompido na intersecção entre o fundo do furo e a ponta do pino. A distância entre os finais do escoamento na região inferior da solda é de 3,58 mm. A partir dessa amostra fica evidenciado que o escoamento de material dessa região afastada do centro do pino é mais intenso. Portanto, eventuais inclusões que estejam nessa região, terão a tendência de se distribuírem ao longo da linha de união.

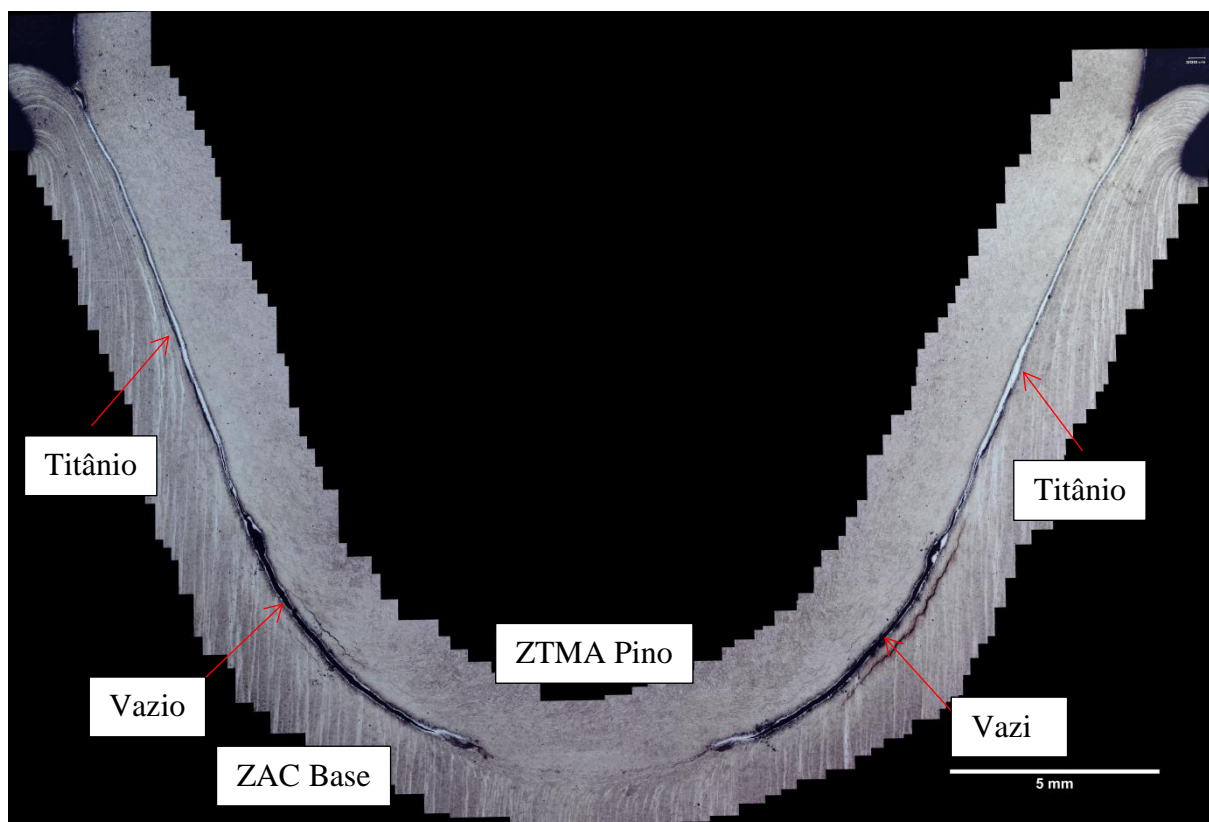


Figura 48 - Micrografia da linha de união entre o pino e o furo da base e a distribuição do material do traçador (imagem mais clara) da amostra 09.

Ao aumentar o consumo do pino em 2 mm, ocorreu uma pequena alteração no padrão de distribuição do titânio. O volume de titânio acumulado permaneceu com dimensões próximas as da solda 04 e 05, com 1,95 mm de comprimento e 0,17 de altura. Porém o plano de cisalhamento a quente abrangeu uma maior área do pino, com uma distância entre os finais do PCQ de 10,34 mm.

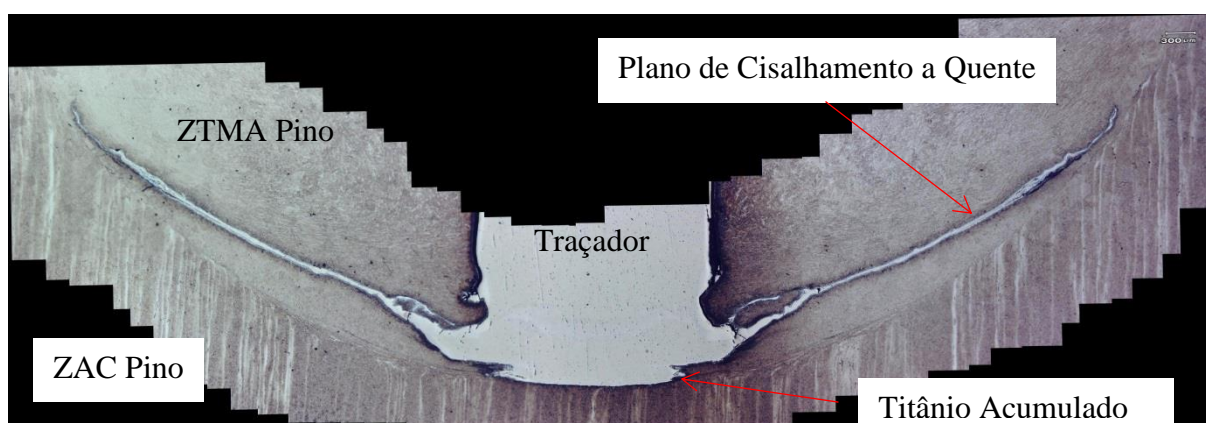


Figura 49 - Micrografia da linha de união entre o pino e o furo da base e a distribuição do material do traçador da amostra 10.

4.3.3 Microdureza

As mudanças microestruturais resultantes do processo de soldagem por fricção modificaram significativamente as propriedades mecânicas dos materiais. Conforme visto na seção 4.3.2, Figura 43, a microestrutura do material base SAE 4140 passou de perlítica e ferrítica para uma microestrutura martensítica não revenida. E, conseqüentemente, a dureza do material aumentou nessas regiões.

A Figura 50 e a Figura 51 apresentam os gráficos e as macrografias dos perfis de dureza horizontal e vertical da solda 05, identificando a localização dos pontos de medição e as diferentes zonas. Além disso, nos gráficos estão presentes os valores de dureza dos materiais antes da soldagem para facilitar a comparação. No perfil horizontal, percebe-se que o material base da base permaneceu com a dureza inicial de aproximadamente de 269 HV. Ao entrar na ZTA da base a dureza aumentou para uma média de 656 HV e logo após na ZTMA do pino para 731 HV. Mesmo depois da transformação microestrutural, a ZTA do pino permaneceu com uma dureza maior que a ZTA da base, tendo uma média de 680 HV. E por final, foi identificado o aumento da dureza no material do titânio, passando para 353 HV.

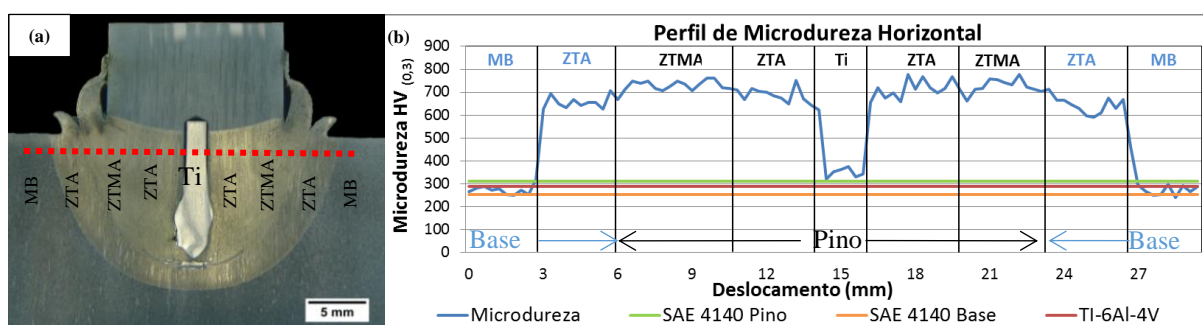


Figura 50 – Perfil de microdureza (HV) horizontal da solda 05, em (a) macrografia e (b) gráfico de dureza. Material da base (MB), zona termicamente afetada (ZTA), zona termo mecanicamente afetada (ZTMA) e traçador de titânio (Ti).

A Figura 51 mostra o perfil de microdureza vertical da solda 05, com a imagem da macrografia e o gráfico com a dureza. Seguindo o mesmo padrão do perfil de microdureza horizontal, ocorreu o aumento da dureza na ZTA e na ZTMA do pino, com valor médio de 645 HV e 678 HV, respectivamente. Já na ZTA da base foi medida uma média de dureza igual a 652 HV.

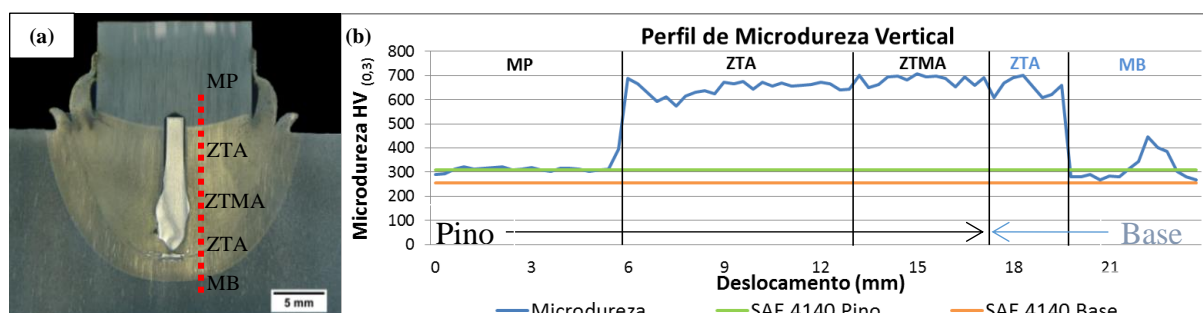






Figura 51 – Perfil de microdureza (HV) vertical da solda 05 em (a) macrografia e (b) gráfico de dureza. Material da base (MB), material do pino (MP), zona termicamente afetada (ZTA) e zona termo mecanicamente afetada (ZTMA).

4.4 ANÁLISE COM TOMÓGRAFO COMPUTACIONAL

Depois de geradas as imagens pelo tomógrafo computacional, os arquivos foram importados para o software de renderização e depois criados os volumes em 3D das soldas. A Tabela 15 apresenta o volume gerado das soldas 07 e 08. A partir de cada volume é possível analisar o interior da solda sem ter que cortar a amostra real. Nas imagens geradas as regiões mais escuras são as menos densas, enquanto que as regiões mais claras são as mais densas.

Tabela 15 – Corpo de provas e volume em 3D das soldas.

Amostra	Corpo de Prova	Modelo em 3D formado pelo TC
07		
08		

A primeira análise realizada nos modelos foi o corte transversal no centro do pino, o que possibilitou identificar a presença do traçador e eventuais discontinuidades na junta soldada. A Figura 52 apresenta duas vistas do corte transversal da solda 07. Em ambas as imagens são possíveis visualizar o traçador de titânio inserido no interior da solda. Na imagem (a) da Figura 52 pode-se identificar o fluxo de material do traçador pela linha de união da junta soldada, além das trincas presentes no pino. Já a imagem (b) da Figura 52 mostra a mesma superfície da imagem (a), porém nela a trinca está centralizada e a peça está rotacionada.

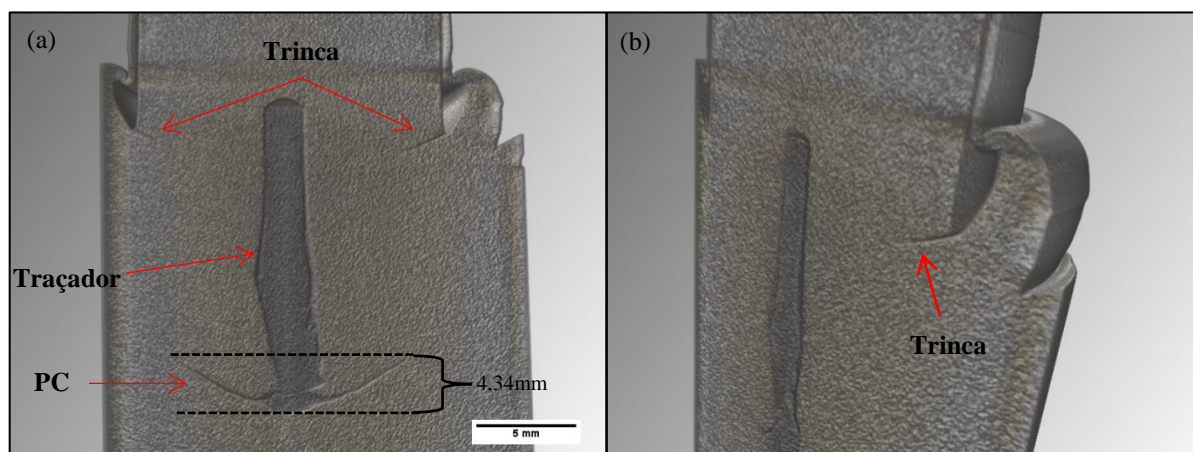


Figura 52 – Vista do corte transversal frontal (a) e vista do corte transversal frontal rotacionada (b) do volume 3D da solda 07.

Depois de realizadas as vistas do corte transversal, foram feitas uma sequência de imagens de topo da amostra 07 (amostra com traçador centralizado) para descrever a evolução do fluxo do titânio pela linha de união (Figura 53). As imagens são planos horizontais que começam na intersecção entre a ponta do pino e o fundo do furo e vão subindo em direção à saída da rebarba, conforme apresentado na Figura 52 (a). Na Figura 53, o titânio aparece em um tom de cinza mais escuro que o aço. A distância entre cada plano analisado foi de 0,31 mm, sendo percorrida uma altura total de 4,34 mm da primeira a última imagem. Analisando as quatro primeiras imagens da Figura 53 pode-se visualizar o início da deposição do titânio no fundo do furo e a formação do volume de traçador acumulado nessa região. A partir da quinta imagem, o Ti se separa do volume acumulado e começa a percorrer a linha de união da solda e a se distanciar do centro do pino até que na última imagem seja quase imperceptível a visualização do traçador na linha de união. Nas imagens o traçador não está centralizado devido ao corte realizado na preparação do corpo de prova.

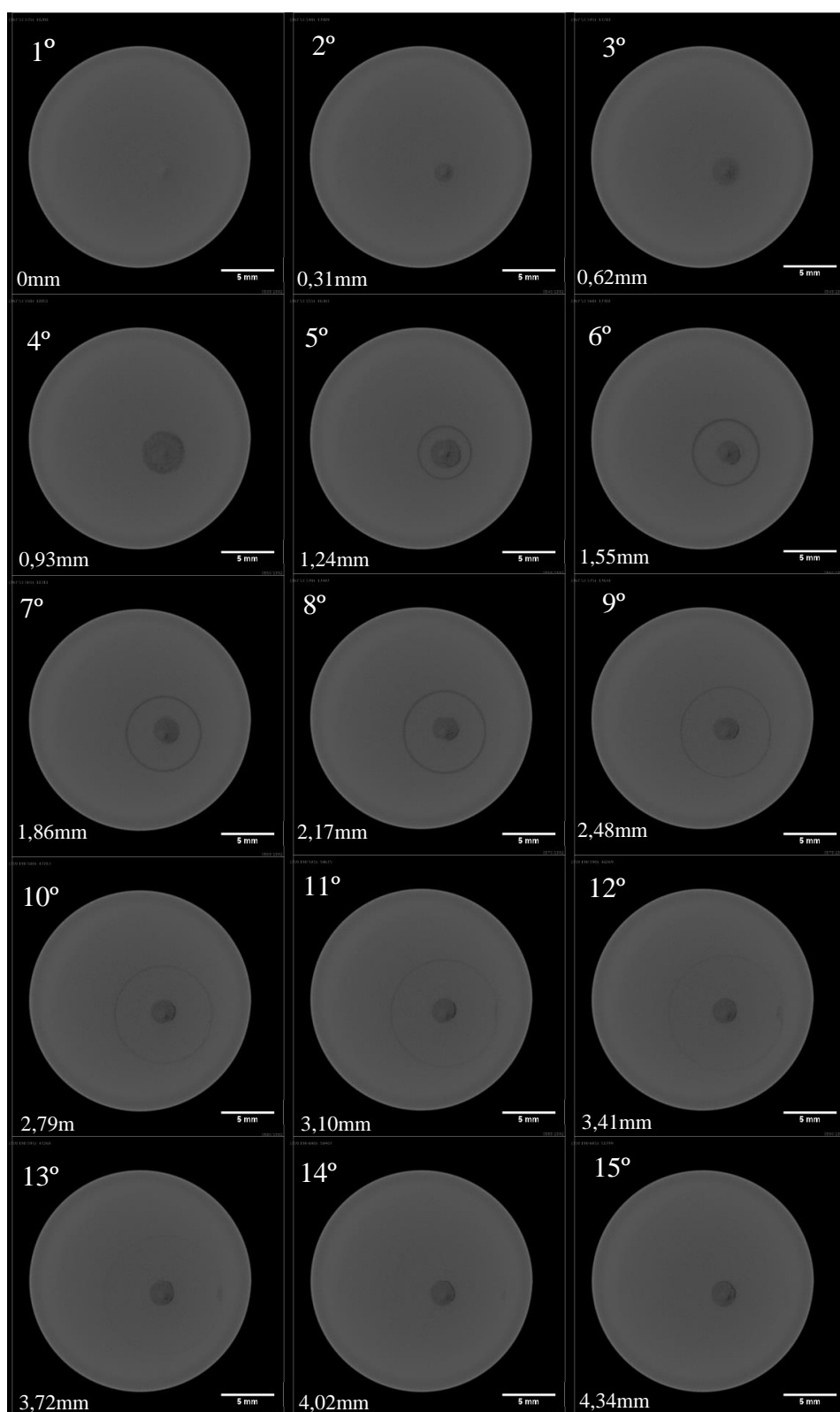


Figura 53 – Evolução do fluxo de Ti inserido no centro do pino da solda 07. Altura entre planos de 0,31mm.

Como última análise para a solda 07, foi renderizada uma imagem em três dimensões do traçador de titânio. Para isso, a opacidade do material do aço, que é mais claro nas imagens devido a maior densidade, foi alterada para torná-lo translúcido e assim possibilitar a visualização do titânio no interior do corpo de prova.

As imagens (a) e (b) da Figura 54 apresentam o volume do traçador destacado no centro da junta soldada em diferentes ângulos, o primeiro com a vista frontal, a qual possibilita visualizar a superfície interna do PCQ e a segunda com a vista mais inferior, destacando a parte externa do PCQ. Por essas imagens, é possível confirmar o primeiro fluxo do processo de FHPP, o qual ocorre com o acúmulo de material na ponta do pino, e logo acima começa o escoamento do material da ponta do pino até certa altura da solda, seguindo a geometria do furo da base. Também é possível verificar que ocorreu a inclinação do traçador.

Já nas imagens (c), (d) e (e) estão destacados os planos de cisalhamento a quente, cada imagem foi realizada de um ângulo diferente, o que confirmou o processo de deposição de material em forma helicoidal do titânio. Nas imagens (d) e (e), ainda é possível visualizar a torção sofrida pelo traçador, pelo padrão de alinhamento em diagonal das linhas da superfície do traçador. Além disso, ao analisar somente o PCQ, foram identificadas marcas ao longo do escoamento do titânio. Por meio dessas marcas é possível afirmar que o escoamento do material se dá de forma intermitente, ou seja, não contínuo.

Na Figura 54 é possível visualizar uma nuvem de pontos mais escuros no entorno do traçador e uma linha vertical no centro da solda, abaixo do PCQ. Somente pela análise de raios X não é possível afirmar se esse material pertence ao pino de aço ou ao traçador de titânio., uma vez que não foi possível identificar esses pontos nas macro e micrografias.

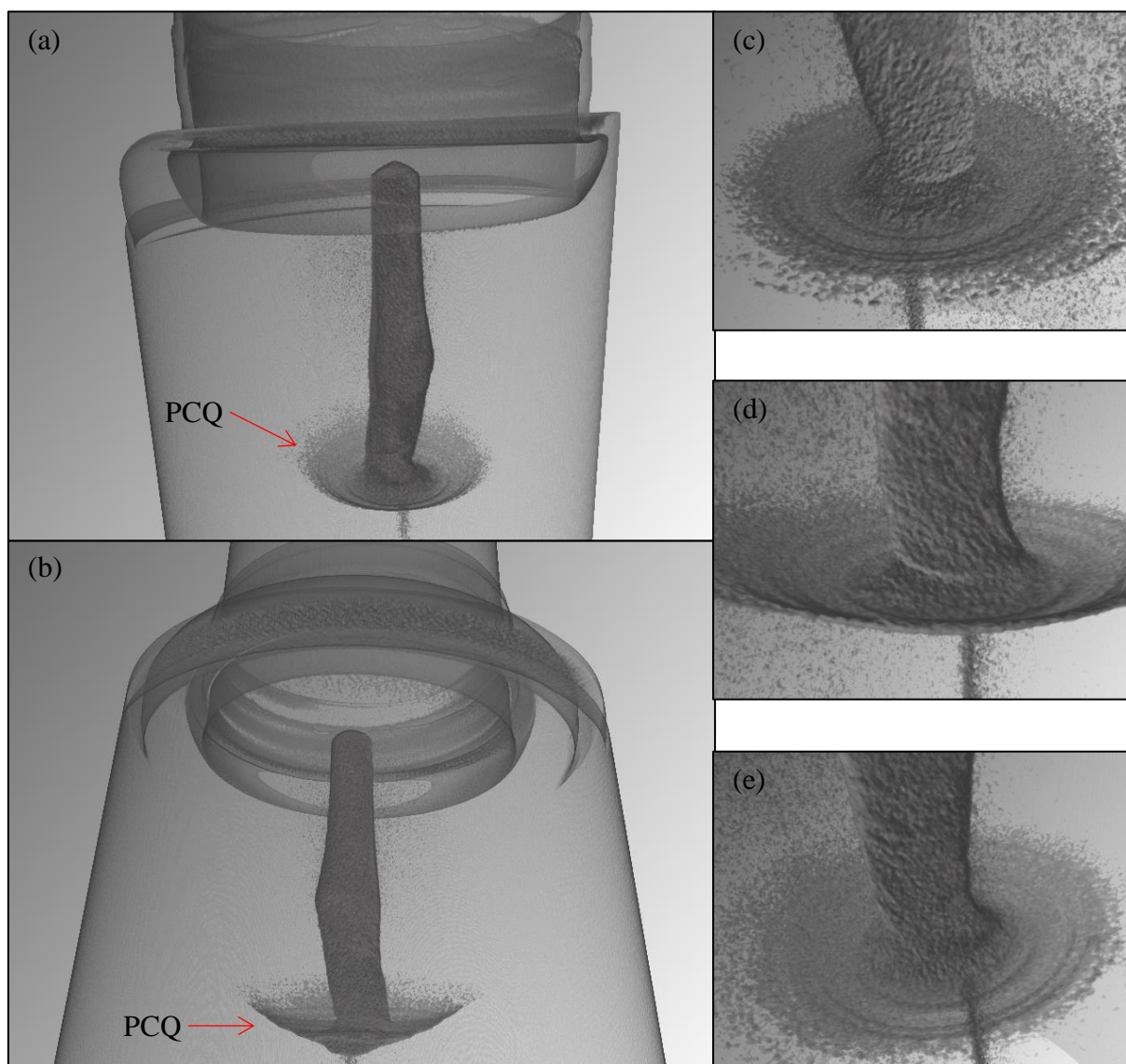


Figura 54 – Renderização em três dimensões do traçador de titânio (a) e (b). Plano de cisalhamento a quente em diferentes ângulos (c), (d) e (e). Solda 08.

A Figura 55 apresenta as vistas da secção transversal do volume da solda 08. Na imagem (a) está a vista frontal da secção transversal do centro da solda, na qual é possível identificar o traçador (material com coloração mais escura) deslocado do eixo central do pino e, além disso, o escoamento do mesmo após o processo. Nessa mesma imagem ainda é possível localizar as trincas na região do pino. Já na imagem (b) a secção foi deslocada do centro da solda para uma região mais periférica, a partir dessa região até a superfície externa do corpo de prova a trinca tornou-se passante.

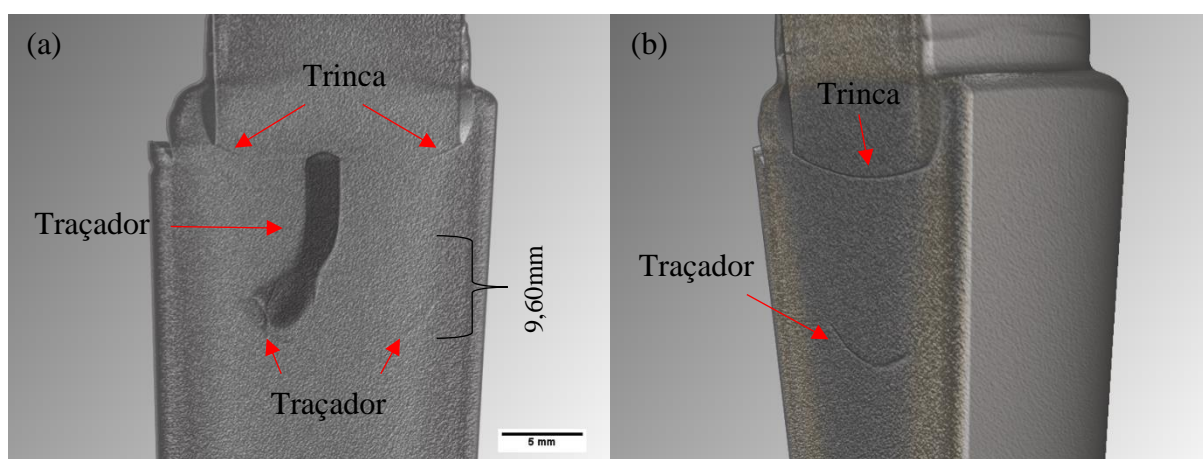


Figura 55 – Vista da seção transversal no centro da junta soldada (a) e vista da seção transversal deslocada do centro da junta soldada (b) da amostra 08.

Após analisar as seções transversais da solda 08 (com traçador deslocado do centro), foram feitas as vistas dos cortes de topo da amostra. A primeira imagem foi realizada na intersecção entre a ponta do pino e do furo e as demais foram feitas subindo em direção à rebarba. Os cortes foram realizados com uma distância de 0,30 mm entre cada um para as nove primeiras imagens, a partir da décima imagem a altura foi aumentada. Ao final, foi percorrida uma altura total de 9,60 mm da junta soldada, conforme apresentado na Figura 55. A Figura 56 apresenta a sequência das imagens de topo.

Na primeira imagem está o início da deposição de material do traçador, representado por uma pequena parábola em um tom de cinza mais escuro que o resto. Nas três imagens seguintes, o pino do traçador começa a aparecer com maior intensidade e pode-se verificar que o titânio percorreu todo o diâmetro da linha de união naquela altura. Seguindo a sequência de imagens, é possível observar que o traçador se desloca ao redor do eixo central do pino e ao longo dessa trajetória ocorre a deposição de material. Comparando a posição inicial do traçador com a final, pode-se afirmar que o mesmo não chegou a completar uma revolução em torno do eixo central, o traçador percorreu aproximadamente 180°. Tal comportamento explica o porquê não foi encontrado material depositado do traçador ao longo de toda altura da linha de união, assim como na amostra 09.

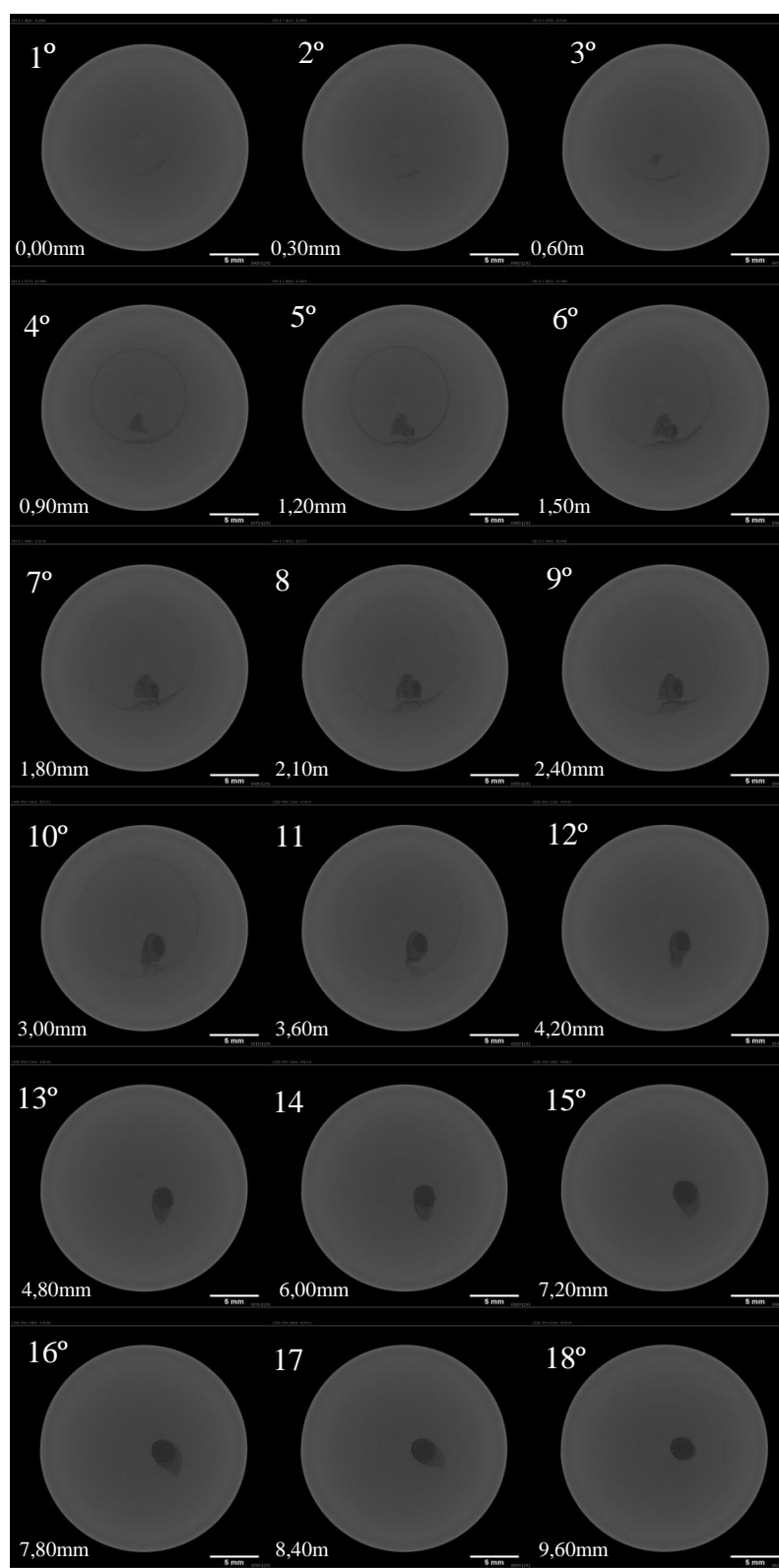


Figura 56 – Evolução do fluxo de Ti inserido fora do centro do pino da solda 08. Altura entre os planos de 0,30mm para as primeiras nove imagens, para as demais a altura foi aumentada.

Seguindo o procedimento de análise, a Figura 57 apresenta o volume em três dimensões do traçador. São quatro imagens, onde na imagem (a) está o corpo de prova da amostra 08, visto por completo e com o material do aço translúcido para evidenciar o material do titânio. Já na imagem (b) o filtro utilizado para deixar o material do aço translúcido foi reduzido, permitindo a visualização do escoamento do traçador em todo o diâmetro da linha de união até determinada altura. Pode-se perceber pela imagem, que o escoamento teve o formato de uma “parábola” e não foi expulso junto à rebarba. Além disso, a redução do filtro resultou no aparecimento do material do aço no centro da amostra em um tom de cinza mais claro.

Para a imagem (c) o filtro foi novamente alterado, desta vez para permitir somente a visualização do traçador. Nessa imagem nota-se a curvatura do traçador devido a força do escoamento do material base do pino em direção a saída da rebarba. Com a redução do filtro, a camada mais fina de titânio escoada também desapareceu, restando apenas a camada mais grossa, que sai da ponta do pino e completa a revolução em torno do pino. Na imagem (d) da Figura 57 o traçador é vista toda por cima. A partir dessa imagem é verificada a torção sofrida pelo pino do traçador e também o mecanismo de deformação de material em forma helicoidal.

Pela Figura 57, ainda é possível afirmar que, com exceção das regiões onde ocorre o atrito entre o pino e o furo e os planos de cisalhamentos criados, não há mistura de material no pino. Caso houvesse mistura, não seria possível identificar o traçador em sua forma original cilíndrica no interior da junta soldada.

Diferentemente da amostra 09, também soldada com o traçador inserido fora do centro do pino, a amostra 08 não apresentou a expulsão do titânio junto com a rebarba. Ao comparar a imagem (b) da Figura 57 com a Figura 47 da amostra 09 é possível confirmar que as duas amostras tiveram o mesmo padrão de escoamento, ou seja, o titânio plastificado tendeu a ir para fundo da junta soldada e para fora da rebarba. Porém na amostra 08 o escoamento do titânio parou antes que ele fosse expulso. Como ambas as amostras foram realizadas com os mesmos parâmetros de processo, essa diferença no escoamento pode estar associada a um possível escorregamento do traçador dentro do furo, o que reduziu o consumo do mesmo.

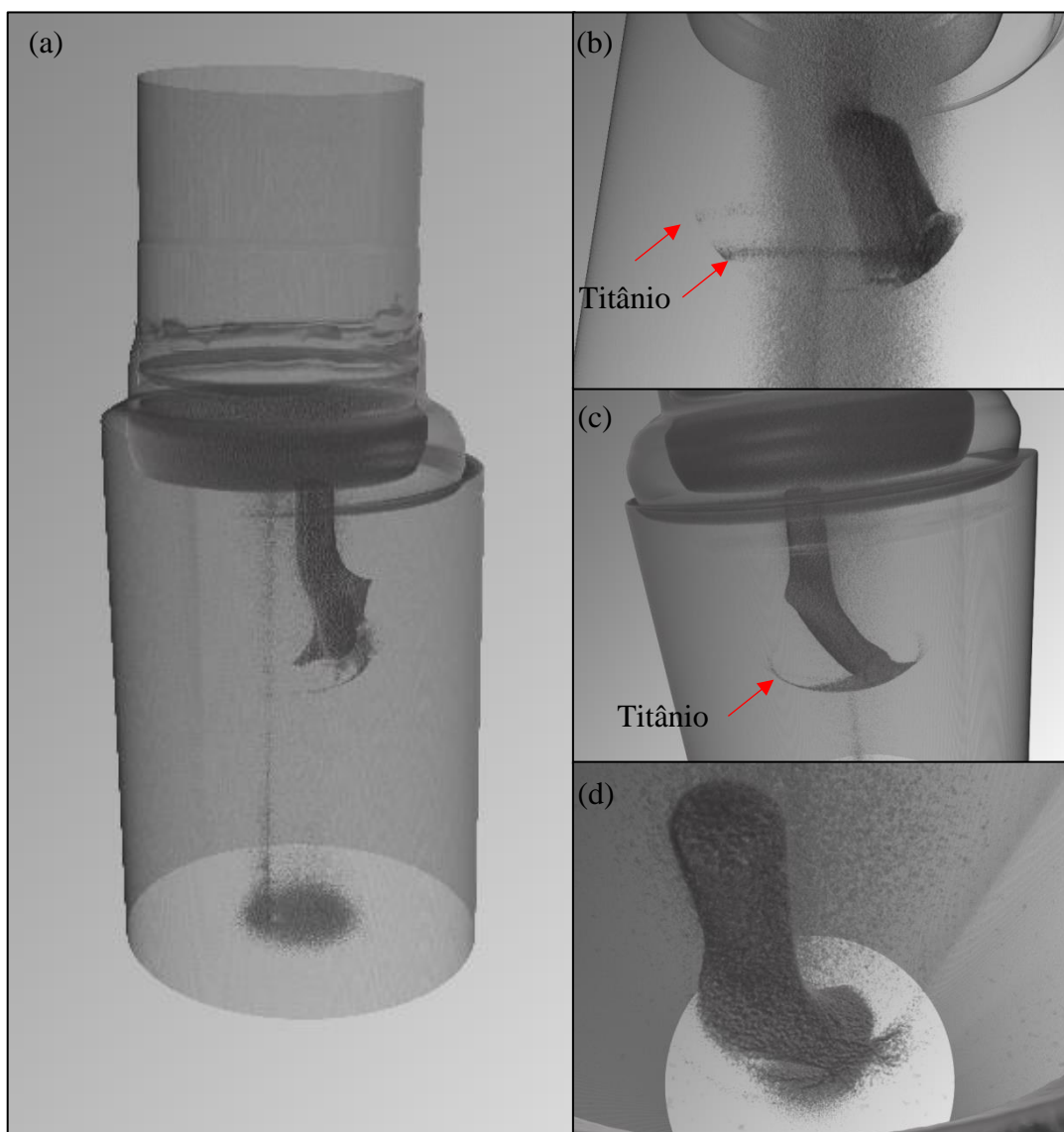


Figura 57 – Renderização em três dimensões do traçador de titânio (a), (b), (c) e (d). Solda 08.

Portanto, a utilização da tomografia industrial como ferramenta para análise de juntas soldadas e estudos de fluxos com materiais dissimilares mostrou-se eficaz e versátil, pois possibilitou a identificação de defeitos como trincas, sem a necessidade de realização de cortes das amostras e também permitiu a identificação em três dimensões do traçador utilizado para o estudo de fluxo.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir dos resultados apresentados nesse trabalho, pôde-se definir o padrão do fluxo de material do processo de FHPP. O processo de soldagem apresenta dois fluxos distintos, um referente ao material do centro do pino e o outro indicativo ao material da parede do pino. Ao inserir o traçador no centro do pino, evidenciou-se que um pequeno volume do traçador ficou acumulado na intersecção entre a ponta do pino e o fundo do furo. Esse volume apresenta pouca ou nenhuma mistura com a matriz de aço (base) e indica que não há a expulsão dos possíveis contaminantes superficiais dessa região. Tal característica pode estar relacionada à baixa geração de calor no centro do pino e também a alta extração de calor no início da solda, permitindo que o material dessa região demore mais para chegar ao estado plástico.

Logo acima dessa região ocorre o plano de cisalhamento a quente (PCQ), que representa o momento em que a resistência à torção a quente do pino é rompida. Nesse momento, o material do centro do pino escoava de forma intermitente para a região mais periférica, seguindo a geometria do furo, porém não é expulso com a rebarba. Tal comportamento foi evidenciado em todas as amostras com traçador de titânio inserido no centro do pino. Também foi evidenciada a variação do PCQ de acordo com o parâmetro utilizado. Na amostra que teve o parâmetro de consumo do pino aumentado ocorreu um maior escoamento do titânio plastificado. O PCQ desta amostra apresentou um maior comprimento de dispersão do que as amostras soldadas com menor consumo do pino, além disso, também ocorreu a diminuição entre a altura do PCQ em relação à linha de união.

Além disso, ao posicionar o traçador deslocado 4 mm do centro, foi evidenciado o segundo fluxo de material. Uma fina camada de titânio escoou pela linha de união em direção à rebarba e a ponta do pino. O titânio plastificado foi expulso com a rebarba, já o material que escoou para a ponta do pino teve o seu fluxo interrompido antes de chegar a fundo da solda. Essa interrupção no fluxo pode estar relacionada com o acúmulo de material encontrado na ponta do pino, pois, conforme visto na solda interrompida no início do processo, esse volume de material é o primeiro a ser depositado pelo pino.

Pelas análises realizadas a partir dos volumes gerados no tomógrafo industrial, ficou comprovado o mecanismo de deformação do material do pino é de forma helicoidal. Ainda, foi verificado que não há mistura de material no interior da junta soldada, com exceção das regiões onde ocorre o atrito entre pino e furo e nos planos de cisalhamento a quente. Do

mesmo modo, a utilização da técnica de tomografia industrial se mostrou eficaz para as análises de fluxo de material em juntas soldadas com materiais dissimilares e também na identificação de defeitos como trincas nas soldas realizadas por fricção.

Portanto, a partir desse padrão de escoamento apresentado pelas amostras, é possível prever a dispersão de particulados no interior das juntas soldadas pelo processo de *Friction Hydro Pillar Processing*. Os locais que apresentaram mistura de material, a intersecção da parede do pino e nos planos de cisalhamento a quente, são os locais onde o transporte de particulados pode ocorrer. Tal resultado confirma a conclusão da Chludzinski (2013), em que a autora afirma que as inclusões de MnS presentes no pino antes da soldagem, tem sua morfologia alterada pelo processo e tendem a se acumularem nas regiões de maior intensidade de fluxo (intersecção entre a parede do pino e do furo).

6 CONCLUSÕES

As conclusões deste trabalho foram baseadas a partir dos resultados obtidos utilizando determinada: geometria de furo e pino, materiais para conjunto pino e base e parâmetros de soldagem, e qualquer alteração de uma dessas características pode influenciar no resultado final. Além disso, unindo os resultados das metalografias e das tomografias computacionais, pode-se concluir que:

- Existem dois fluxos de materiais no processo de soldagem de FHPP: um referente ao material do centro do pino e outro relativo ao material da parede do pino;
- O material da ponta do pino tende a acumular-se no fundo da solda, não expulsando as contaminações presentes nessa superfície;
- Os planos de cisalhamento a quente (PCQ) são o mecanismo de transporte de material do centro do pino para a periferia. Ocorre de forma intermitente e não expulsa o material junto com a rebarba;
- A técnica de tomografia industrial se mostrou uma ferramenta eficaz para as análises de fluxo de materiais dissimilares e também na identificação de defeitos em juntas soldadas por fricção;
- A variação do consumo do pino influencia no tamanho do PCQ;
- O material da parede do pino tende a se dispersar pela linha de união, indo em direção ao fundo da solda e sendo expulso junto com a rebarba;
- O mecanismo de deformação do material é de forma helicoidal;
- A mistura de material ocorre nas regiões onde há atrito entre pino e furo e nos planos de cisalhamento a quente;
- Os particulados tenderam a se acumularem nas regiões de maior intensidade de fluxo, ou seja, na intersecção da parede e do pino e nos planos de cisalhamento a quente.

7 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Recomenda-se, para trabalhos futuros, a avaliação dos seguintes tópicos:

- Verificar se há influência da dureza no fluxo de material. Soldar base e pino de alta dureza, base e pino de baixa dureza, base de alta dureza e pino de baixa dureza e base de baixa dureza e pino de alta dureza;
- Verificar a influência da geometria no fluxo final de material;
- Modelagem numérica do processo de FHPP e validação do fluxo de material com os resultados obtidos nesse estudo;
- Realização de análise química e metalográfica na região próxima ao traçador, para verificar se os pontos de mesma densidade identificados pelos raios X ao redor traçador são compostos pelo titânio ou apenas “ruído” na imagem.

REFERÊNCIAS

- Agência Brasil. **Manutenção de Plataformas Provocou Queda na Produção de Petróleo em Março.** Disponível em: <http://memoria.abc.com.br/agenciabrasil/noticia/2013-05-03/manutencao-de-plataformas-provocou-queda-na-producao-de-petroleo-em-marco>. Acesso em 15 dezembro de 2014.
- ANDRADE, Leandro Vanz de. **Projeto de máquina de solda por atrito e análise de soldas dissimilares.** 2011. 82 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.
- ASM – AMERICAN SOCIETY FOR METALS, **ASM Handbook Vol. 1:** Properties and Selection: Irons, Steels, and High Performance Alloys. 10 ed., 1993.
- ASM – AMERICAN SOCIETY FOR METALS, **ASM Handbook Vol. 2:** Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special - Purpose Materials. 2 ed., 1992.
- ASM – AMERICAN SOCIETY FOR METALS, **ASM Handbook Vol. 6:** Welding, Brazing and Soldering. 8 ed., 1993.
- BRANDI, Sérgio Duarte. Soldagem por atrito. In: WAINER, Emílio; BRANDI, Sérgio Duarte; MELLO, Fábio Décourt Homem de. **Soldagem: Processos e Metalurgia.** São Paulo: Edgard Blücher Ltda, 1995. p. 317-333.
- CHLUDZINSKI, Mariane. **Avaliação da Tenacidade à Fratura em Juntas Soldadas por Fricção com Pino Consumível.** 2013. 164 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.
- CROSSLAND, B. “**Friction Welding: Recommended Practices for Friction Welding**”. In: Contemporary Physic, 12(6), p.599-574, 1971.
- ELLIS, C.R.G., "Continuous Drive Friction Welding of Mild Steel". in Welding Journal, 1972(April): p. 183s-197s.
- FLIPO, Bertrand. “**Dissimilar friction welding of Titanium to Stainless Steel.** Disponível em: <http://www.twi-global.com/technical->

[knowledge/industrial-member-reports/dissimilar-friction-welding-of-titanium-to-stainless-steel-1040-2013/](https://www.knowledge/industrial-member-reports/dissimilar-friction-welding-of-titanium-to-stainless-steel-1040-2013/) . Acesso em: 27 fev. 2015.

FUJII, Hidetoshi et al. “**Estimation of Material Flow in Stir Zone during Friction Stir Welding by Distribution Measurement of Si Particles**”. Materials Transactions, Japan, v. 47, n. 1, p.224-232, 2006.

GODOI, Walmor Cardoso. **Reconhecimento de Padrões 3D em Tomografia Industrial**. 2012. 164 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia e Ciência dos Materiais, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2012.

HATTINGH, D.g. et al. **Process parameter influence on performance of friction taper stud welds in AISI 4140 steel**. Materials and Design. Port Elizabeth, fev. 2011. p. 3421-3430.

LÓPEZ, Facundo Sebastián. **Montagem e Avaliação de Uma Máquina de Solda por Fricção**. 2010. 63 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

MACHADO, Ivan Guerra. **Soldagem & Técnicas Conexas: conexões**. Porto Alegre: Ivan Guerra Machado, 1996. 477 p.

MASCHIO, Célio. **Tomografia Computadorizada de Raios-X como Técnica de Ensaio Não Destrutivo de Materiais**. 1997. 95 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Unicamp, Campinas, 1997.

MATTEI, Fabiano. **Desenvolvimento de Equipamento para Estudo de Soldagem por Fricção**. 2011. 166 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

MEYER, Axel. **Friction Hydro Pillar Processing: Bonding Mechanism and Properties**. 2003. 135 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica e Elétrica, Gemeinsamen Fakultät Für Maschinenbau Und Elektrotechnik Der Technischen Universität Carolo, Braunschweig, 2004.

MISHRA, Rajiv Sharan; KUMAR, Partha Sarathi de Nilesh. **Friction Stir Welding and Processing: Science and Engineering**. Denton: Springer, 2014. (347).

NICHOLAS, E.D., **Friction Hydro-Pillar Processing Advances in Welding Technology**, 11th Annual North American Research Conference, 7-9 Nov., 1995.

PAES, Marcelo Torres Piza. **Processamento termomecânico de pinos de aço no interior de cavidades de aço C-Mn através de soldagem por atrito rotacional**. 2013. 333 f. Tese (Doutorado) - Programa de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.

PINHEIRO, Gustavo Alves et al. Costura por Fricção: Fundamentos e Aplicações. In: 8. CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO, 1., 2001, Curitiba. **Anais...** . Curitiba: Cobef, 2001. p. 1 - 7.

PIRES, R. R., **Efeito da Geometria, da Força e da Rotação no Reparo por Atrito**, Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, 2007.

SHU-DE, Ji et al. **3D numerical analysis of material flow behavior and flash formation of 45# steel in continuous drive friction welding**. Trans. Nonferrous Met. Soc., China, p.528-533, 25 out. 2012.

SILVA, Fernanda Laureti Thomaz da; GIMENES júnior, Luiz. **Soldagem por Fricção**. Disponível em: <http://www.infosolda.com.br/artigos/processos-de-soldagem/355-soldagem-por-friccao-frw.html> . Acesso em: 19 jan. 2015.

SILVA, Diogo Cesar Borges; BALDO, Crhistian Raffaello. **Análise de materiais e dimensionamento de peças metálicas utilizando tomografia computadorizada de raios x**. Enqualab-2013 - Congresso da Qualidade em Metrologia, São Paulo, p.1-10, 27 ago. 2013.

SILVA, Diogo Cesar B.; BALDO, Crhistian R.; YAMANAKA, Douglas M.. **Desafios Envolvidos na medição de componentes compostos por mais de um material utilizando tomografia computadorizada por absorção de raios X**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METROLOGIA, 7., 2013, Ouro Preto. **Anais...** . Ouro Preto: Iaea, 2013. p. 1 - 4.

SOUZA, Robson José de. **Desenvolvimento, projeto de construção de um equipamento de reparo de trincas por atrito**. 2006. 104 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2006.

TETZNER, Guaraciaba de Campos. **Aplicação da Tomografia Computadorizada Industrial na Análise de Rochas**. 2008. 87 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Física, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo, 2008.

XU, Y.C. et al. **Numerical Simulation of the Effects of Various Stud and Hole Configurations on Friction Hydro-Pillar Processing**. International Journal of Mechanical Sciences, China, p. 44-52, 2015.

YEH, Felipe Wu Tzong. **Avaliação de Descontinuidades no Reparo em Placas de Aço por "Friction Hydro Pillar Processing (FHPP) via Ultrassom e Micrografia**. 2012. 71 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

YIN, Yayun et al. **Material flow influence on the weld formation and mechanical performance in underwater friction taper plug welds for pipeline steel**. Materials and Design. Tianjin, set. 2015. p. 990-999. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0264127515305323> .
Acesso em: 6 nov. 2015.

APÊNDICE – SOLDA COM TRAÇADOR DE COBRE

A solda com traçador de cobre foi realizada para verificar a capacidade do cobre de percorrer os perfis de grãos do aço, quando em contato em alta temperatura e pressão, fenômeno conhecido como fragilização por metal líquido. Adicionalmente, a utilização de um material diferente do titânio como traçador pode resultar em uma distribuição do traçador diferente.

A Figura 58 apresenta a macrografia da junta soldada, pela imagem é possível observar o pino de cobre e o caminho percorrido pelo material plastificado. Diferentemente das soldas realizadas com o Ti, o Cu misturou-se mais com o aço. O material do traçador ficou acumulado na intersecção entre a ponta do pino e o fundo do furo e a partir dessa região escoou para a rebarba, sendo expulsa com a mesma. Além disso, foram encontrados pequenos volumes de aço do pino dispersos dentro do pino do traçador.

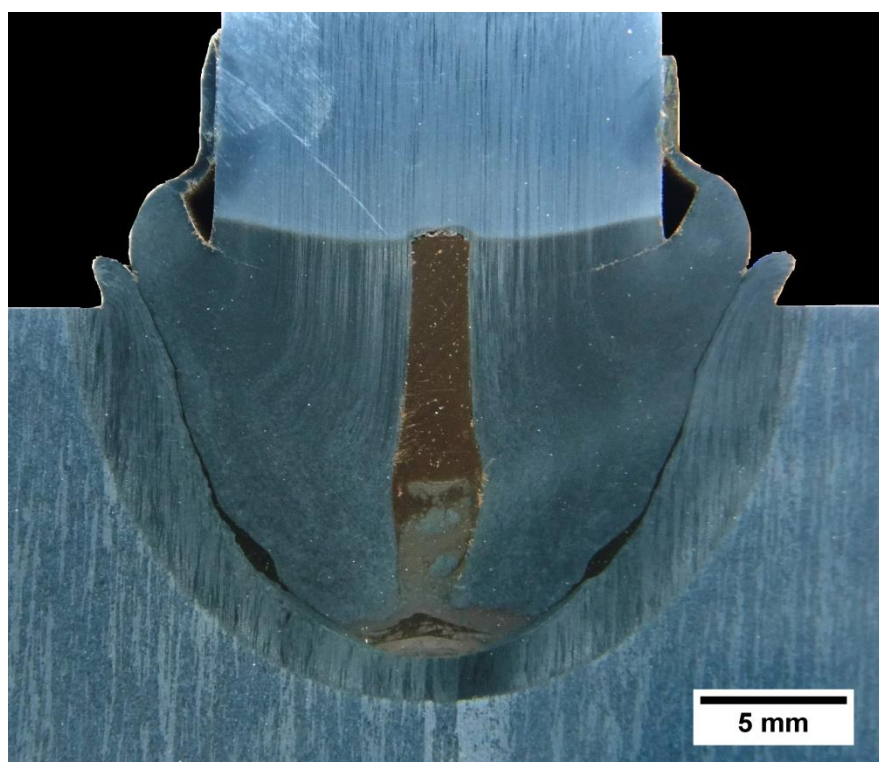


Figura 58 – Macrografia da solda 11.

Seguindo as análises realizadas para as soldas com traçador de titânio, a solda 11 foi avaliada com um microscópio óptico. A Figura 59 apresenta o fluxo do cobre dentro da junta

soldada, em amarelo está o cobre e em cinza escuro, presente na linha de união e na região central do pino, é o resultado da mistura do cobre no contorno de grãos do aço. Diferentemente das soldas com traçador de titânio, a mistura do traçador foi mais intensa. O cobre escoou até a saída da rebarba e, além disso, o material do pino foi para dentro do traçador.

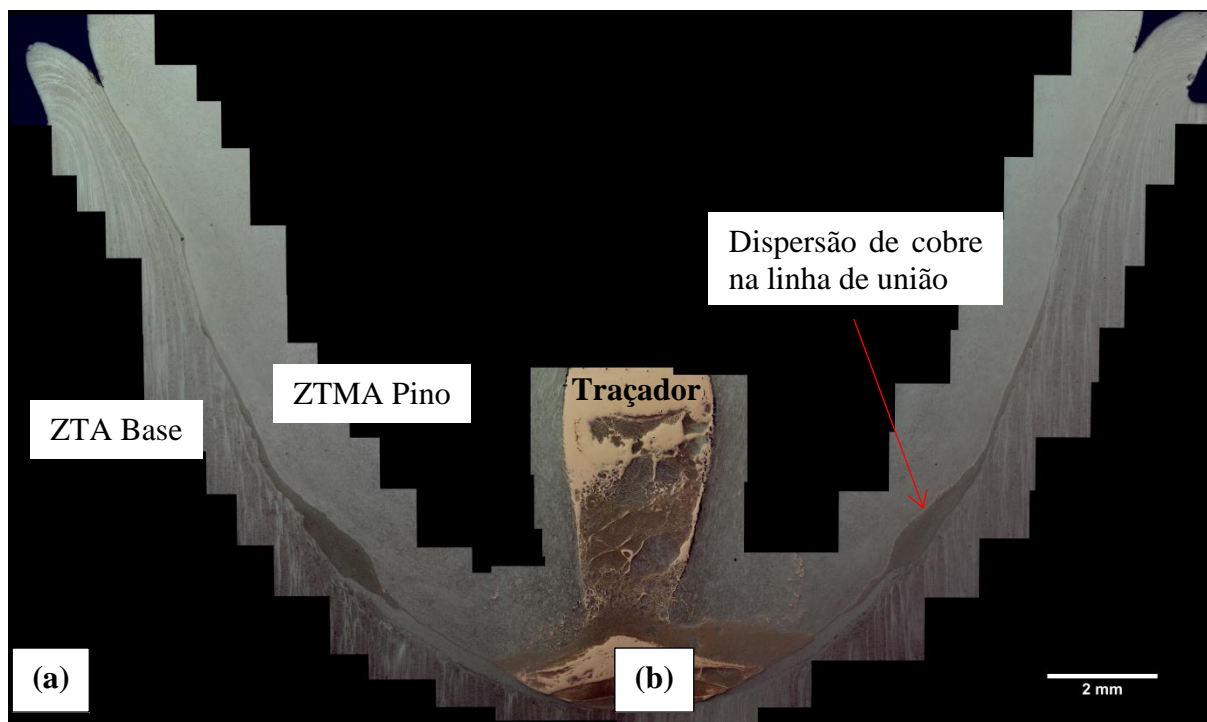


Figura 59 – Fluxo do traçador de cobre na solda 11.

Para melhor visualização da mistura entre o cobre e o aço, foram realizadas duas micrografias na região do centro do traçador, conforme a Figura 60. A partir dessas imagens, é possível verificar que grãos de martensita não revenida migraram para o traçador de cobre. Esses grãos apresentam diferentes tamanhos e morfologias, por exemplo: na imagem (a) da Figura 60, no canto inferior direito, encontram-se grãos de martensita não revenida de menores dimensões, provenientes do maior processamento mecânico. Esse mesmo padrão aparece no escoamento do cobre pela linha de união.

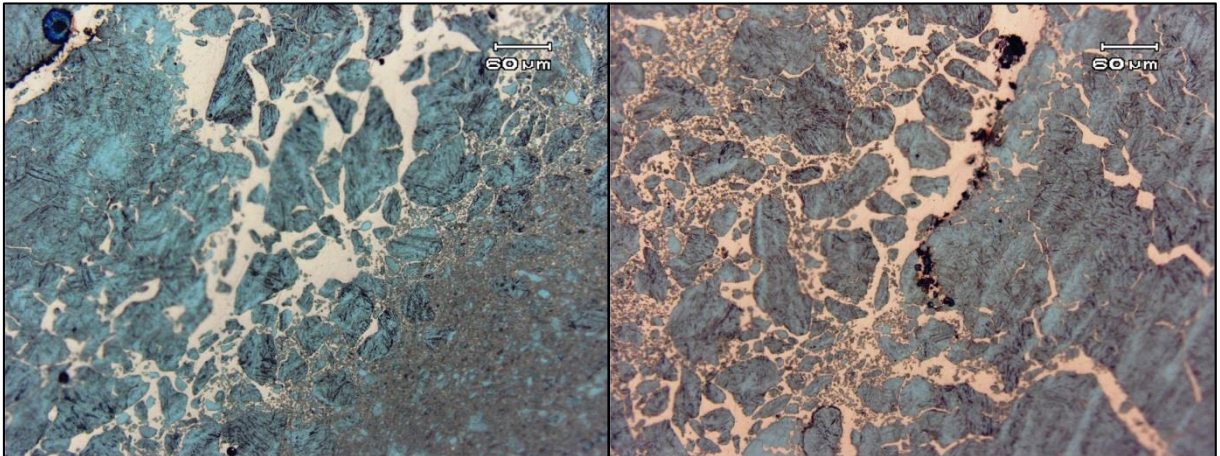


Figura 60 – Micrografias da região central do traçador de cobre.