

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
Escola de Engenharia  
Programa de Pós Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e  
de Materiais (PPGE3M)

AVALIAÇÃO DE DESCONTINUIDADES NO REPARO EM  
PLACAS DE AÇO POR “*FRICITION HYDRO PILLAR PROCESSING*”  
(FHPP) VIA ULTRASSOM E MICROGRAFIA

Felipe Wu Tzong Yeh

Dissertação para obtenção do título de Mestre  
em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais

Porto Alegre

2012

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
Escola de Engenharia  
Programa de Pós Graduação em Engenharia de Minas, Metalurgia e  
de Materiais (PPGE3M)

AVALIAÇÃO DE DESCONTINUIDADES NO REPARO EM  
PLACAS DE AÇO POR “*FRICITION HYDRO PILLAR PROCESSING*”  
(FHPP) VIA ULTRASSOM E MICROGRAFIA

Felipe Wu Tzong Yeh  
Engenheiro Metalúrgico

Trabalho realizado no Laboratório de Metalurgia Física (LAMEF) do Departamento de Metalurgia (DEMET) da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), dentro do Programa de Pós-Graduação de Minas, Metalúrgica e de Materiais - PPGEM, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Área de Concentração: Ciência e Tecnologia dos Materiais

Porto Alegre

2012

II

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

Orientador: Prof. Dr. Thomas Clarke

Banca Examinadora:

Dr. Rubem Manoel de Braga - UFRGS

Dr. Toni Roger Schifelhain de Lima - UFRGS

Prof. Dra. Cláudia Teresa Teles Farias - IFBahia

Prof. Dr. Telmo Roberto Strohaecker

Coordenador do PPGEM

*Dedico esta dissertação aos meus pais*

## **AGRADECIMENTOS**

Sobretudo ao meu orientador Prof. Dr. Thomas Clarke por me “estender a mão” e depositar a sua confiança em mim, pela motivação, apoio a este trabalho, conselhos, amizade e boas lembranças.

Ao Prof. Dr. Telmo Strohaecker pela recepção, apoio, oportunidade de crescimento, confiança e orientação.

Ao colega Fabiano Mattei que, as custas de muito trabalho, foi responsável pela produção dos componentes que são objeto deste estudo.

Aos colegas do Laboratório de Metalurgia Física da UFRGS, que compõem a minha “segunda família”, pelo ótimo ambiente de trabalho, amizades e companheirismo.

A CAPES pelo apoio financeiro.

A minha família por todo amor e incentivo.

## SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS .....	VI
SUMÁRIO.....	VII
ÍNDICE DE FIGURAS:.....	XII
ÍNDICE DE TABELAS: .....	XV
ÍNDICE DE SÍMBOLOS E ABREVIACÕES:.....	XVI
RESUMO .....	XVII
ABSTRACT .....	XVIII
<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>3</b>
2.1 Tecnologias de processamento por atrito .....	3
2.2 “Friction Hydro Pillar Processing” (FHPP).....	4
2.2.1 FHPP – furos paralelos.....	8
2.2.2 FHPP – Furos cônicos .....	9
2.2.3 Avaliação de soldas FHPP.....	10
2.2.4 Defeitos .....	11
2.3 Ensaios não destrutivos e ultrassom.....	12
<b>3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL .....</b>	<b>17</b>
<b>4 RESULTADOS .....</b>	<b>21</b>
4.1 Macrografias .....	21
4.2 Soldas com pino de aço ASTM A36 .....	22
4.2.1 Junta soldada com força axial de 200kN .....	22
4.2.2 Junta soldada com força axial de 250kN .....	26
4.2.3 Junta soldada com força axial de 300kN .....	29
4.2.4 Junta soldada com força axial de 350kN .....	33
4.3 Soldas realizadas com pino de aço SAE 8620.....	37
4.3.1 Junta soldada com força axial de 200kN .....	37
4.3.2 Junta soldada com força axial de 250kN .....	41
4.3.3 Junta soldada com força axial de 300kN .....	44
4.3.4 Junta soldada com força axial de 350kN .....	46
<b>5 DISCUSSÃO .....</b>	<b>49</b>
5.1 Modificação de inclusões.....	50
5.2 Descontinuidades na região do raio de curvatura inferior.....	51
<b>6 CONCLUSOES .....</b>	<b>55</b>
<b>7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>57</b>
<b>8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>58</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS:

Figura 1.(a): Soldagem por atrito orbital e (b) soldagem por atrito linear, adaptado de [9].	4
Figura 2: “ <i>Friction Stir Welding</i> ”, utilizado na união de alumínio e suas ligas [9].	4
Figura 3: Processo FHPP com o pino consumível (i), zona plastificada e transmissão de forças hidrostáticas (ii) e pilar de material depositado (iii) [11]	5
Figura 4: Ilustração de 3 pinos com marcadores de níquel em posições diferentes [12]	6
Figura 5: Corte perpendicular das 3 soldas feitas com pinos com marcador de níquel na posição central (a esquerda), a 4mm e a 7,5mm do centro (a direita), conforme Figura 72. [12]	6
Figura 6: Série de planos cisalhados [10]	9
Figura 7: Ilustração esquemática do processo FTSW	9
Figura 8. (a) Plano de corte do corpo de prova e (b) corpo de prova após o ensaio de dobramento [16].	10
Figura 9. (a) Resultado de ensaio de tração mostrando ponto de fratura longe da região afetada pelo calor [10].	10
Figura 10: Defeito de falta de adesão na posição central da interface inferior, indicado em vermelho [15].	11
Figura 11: Defeito de falta de preenchimento [2].	11
Figura 12: Resposta do elemento piezoeletrico a deformação e a um campo elétrico.	14
Figura 13: Representação da reflexão sofrida pela onda de ultrassom ao atingir interface de material com diferente impedância acústica por elementos finitos.	15
Figura 14: Representação de um ecograma correspondente a simulação por elementos finitos da Figura 14.	16
Figura 15. Desenho da geometria das chapas e pinos utilizados.	18
Figura 16. (a) e (b) Inclusões encontradas na região do pino do material A36	18
Figura 17: Vista superior da chapa após a retirada do corpo de prova por eletroerosão.	20
Figura 18. Resultados das macrografias das soldas com pinos A36 avaliadas com Nital 10%, 200kN, amostra 1(a) e 2(b), 250kN, amostra 1(c) e 2(d), 300kN, amostra 1(e) e 2 (f) e 350kN, amostra 1(g) e 2 (h).	21
Figura 19. Resultados das macrografias das soldas com pinos SAE 8620 avaliadas com Nital 10%, 200kN, amostra 1(a) e 2(b), 250kN, amostra 1(c) e 2(d), 300kN, amostra 1(e) e 2 (f) e 350kN, amostra 1(g) e 2 (h).	22
Figura 20: Regiões analisadas da solda com força axial de 200kN, amostra 1, em vermelho.	23
Figura 21. (a) Região com várias inclusões achatadas e (b) ecograma do ensaio de ultrassom com sinais de grande amplitude e picos próximos. Destacado em vermelho o sinal correspondente a micrografia.	23
Figura 22. (a) Região com várias inclusões achatadas de diversos tamanhos e (b) ecograma do ensaio de ultrassom com sinais de grande amplitude e picos próximos. Destacado em vermelho o sinal correspondente a micrografia.	23
Figura 23. (a) Outra região com algumas inclusões achatadas e (b) ecograma do ensaio de ultrassom com picos próximos. Destacado em vermelho o sinal correspondente a micrografia. ...	24
Figura 24. (a) Micro-vazios em volta da região de fluxo plástico de material, indicado pelas setas vermelhas e (b) ecograma do ensaio de ultrassom apresentando um sinal mais disperso. Destacado em vermelho o sinal correspondente a micrografia.	24
Figura 25: Regiões analisadas da solda com força axial de 200kN, amostra 2, em vermelho.	25

Figura 26. (a) Inclusão isolada e (b) ecograma do ensaio de ultrassom. Destacado em vermelho, o sinal correspondente a micrografia.....	25
Figura 27. (a) Inclusões adjacentes (algumas destacadas com a elipse vermelha) encontradas perto da região central da solda e (b) ecograma do ensaio de ultrassom. Destacado em vermelho, o sinal correspondente a micrografia.....	26
Figura 28: Regiões analisadas da solda com força axial de 250kN, amostra 1, em vermelho.....	26
Figura 29. (a) Região com algumas inclusões achatadas de até 300µm e (b) ecograma do ensaio de ultrassom com picos próximos. Destacado em vermelho o sinal correspondente a micrografia. ...	27
Figura 30. (a) Região com duas inclusões isoladas e (b) ecograma do ensaio de ultrassom. Destacado em vermelho o sinal correspondente a micrografia.....	27
Figura 31: Regiões analisadas da solda com força axial de 200kN, amostra 2, em vermelho.....	28
Figuras 32: (a) e (b) Regiões adjacentes com inclusões achatadas de aproximadamente 0,3mm.....	28
Figura 33. Ecograma do ensaio de ultrassom apresentando picos com grande amplitude. Destacado em vermelho, o sinal correspondente as Figuras 29.(a) e 29.(b). ....	29
Figura 34. (a) Região com três inclusões alongadas na direção do fluxo de material e (b) ecograma do ensaio de ultrassom apresentando picos bem próximos. Destacado em vermelho o sinal correspondente a micrografia.....	29
Figura 35: Regiões analisadas da solda com força axial de 300kN, amostra 1, em vermelho.....	30
Figura 36. (a) Inclusões próximas a região de interface entre o pino e a chapa e (b) ecograma do ensaio de ultrassom. Destacado em vermelho o sinal correspondente a micrografia. ....	30
Figura 37. (a) Inclusão encontrada junto a interface lateral da solda e próxima ao plano de incidência das ondas de ultrassom. ....	31
Figura 38: Regiões analisadas da solda com força axial de 300kN, amostra 2, em vermelho.....	31
Figura 39. (a) Inclusões de até aproximadamente 200µm e (b) ecograma do ensaio de ultrassom. Destacado em vermelho o sinal correspondente a micrografia. ....	32
Figura 40. (a) Duas inclusões de até aproximadamente 200µm alongadas na direção do fluxo de material e (b) ecograma do ensaio de ultrassom. Destacado em vermelho o sinal correspondente a micrografia.....	32
Figuras 41.(a) e (b) Regiões adjacentes na interface entre o material do pino e da chapa com defeito de falta de adesão. As setas em vermelho indicam a direção do fluxo de material. ....	33
Figura 42. Ecograma do ensaio de ultrassom. Destacado em vermelho, o sinal correspondente as Figuras 38.(a) e 38.(b).....	33
Figura 43: Regiões analisadas da solda com força axial de 350kN, amostra 1, em vermelho.....	34
Figura 44. (a) Microtrincas com morfologia ramificada na região de fluxo plástico do material e (b) ecograma com sinal espalhado do ensaio de ultrassom. Destacado em vermelho o sinal correspondente a micrografia.....	34
Figura 45. (a) Defeito de falta de adesão provocado por micro-vazios na interface de união entre os materiais e (b) ecograma do ensaio de ultrassom. Destacado em vermelho o sinal correspondente a micrografia.....	35
Figura 46: Regiões analisadas da solda com força axial de 350kN, amostra 2, em vermelho.....	35
Figura 47. (a) Inclusões alongada de aproximadamente 360µm e (b) ecograma do ensaio de ultrassom. Destacado em vermelho o sinal correspondente a micrografia, apresentando sinal com grande amplitude. ....	36
Figura 48. Ecograma do ensaio de ultrassom da região central. Destacado em vermelho, o sinal correspondente as Figuras 46.(a) e 46.(b) e Figuras 47.(a) e 47.(b). ....	36
Figura 49. (a) e (b) Inclusões adjacentes encontradas na região central da solda, algumas delas destacadas em vermelho.....	37
Figura 50. (a) e (b) Inclusões achatadas adjacentes encontradas na região central da solda, destacadas em vermelho.....	37
Figura 51: Regiões analisadas da solda com força axial de 200kN, amostra 1, em vermelho.....	38
Figura 52. (a) Inclusão alongada de aproximadamente 500µm na direção do fluxo de material e (b) ecograma do ensaio de ultrassom. Destacado em vermelho o sinal correspondente a micrografia. ....	38
Figura 53. (a) Inclusão alongada de aproximadamente 250µm e (b) ecograma do ensaio de ultrassom. Destacado em vermelho o sinal correspondente a micrografia.....	39
Figura 54. (a) Micro-vazios de até aproximadamente 20µm. As setas vermelhas indicam a direção do fluxo de material. ....	39
Figura 55: Regiões analisadas da solda com força axial de 200kN, amostra 2, em vermelho.....	40

Figura 56. (a) Inclusão espessa de aproximadamente 60µm e (b) ecograma do ensaio de ultrassom. Destacado em vermelho o sinal correspondente a micrografia. ....	40
Figura 57. (a) Inclusão espessa de aproximadamente 60µm e (b) ecograma do ensaio de ultrassom. Destacado em vermelho o sinal correspondente a micrografia. ....	41
Figura 58: Regiões analisadas da solda com força axial de 250kN, amostra 1, em vermelho.....	41
Figura 59. (a) Inclusão espessa de aproximadamente 150µm e (b) ecograma do ensaio de ultrassom. Destacado em vermelho o sinal correspondente a micrografia. ....	42
Figura 60: Regiões analisadas da solda com força axial de 250kN, amostra 2, em vermelho.....	42
Figura 61. (a) Inclusão achatada de aproximadamente 300µm e (b) ecograma do ensaio de ultrassom. Destacado em vermelho o sinal correspondente a micrografia.....	43
Figura 62. (a) Inclusões achatadas orientadas na direção do fluxo de material e (b) ecograma do ensaio de ultrassom apresentando dois picos muito próximos. Destacado em vermelho o sinal correspondente a micrografia.....	43
Figura 63: Regiões analisadas da solda com força axial de 300kN, amostra 1, em vermelho.....	44
Figura 65. (a) Inclusões espessa de aproximadamente 200µm orientada na direção do fluxo de material e (b) ecograma do ensaio de ultrassom apresentando um pico bem definido. Destacado em vermelho o sinal correspondente a micrografia.....	44
Figura 65. (a) Micro-vazios de aproximadamente 60µm contornando a interface entre os materiais. As setas em vermelho indicam o fluxo de material. (b) ecograma do ensaio de ultrassom. Destacado em vermelho o sinal correspondente a micrografia. ....	45
Figura 66: Regiões analisadas da solda com força axial de 300kN, amostra 2, em vermelho.....	45
Figura 67. (a) Micro-vazios de aproximadamente 60µm contornando a interface entre os materiais e (b) ecograma do ensaio de ultrassom. Destacado em vermelho o sinal correspondente a micrografia.....	46
Figura 68: Regiões analisadas da solda com força axial de 350kN, amostra 1, em vermelho.....	46
Figura 69. (a) Inclusão isolada de aproximadamente 500µm com formato achatado e (b) ecograma do ensaio de ultrassom. Destacado em vermelho o sinal correspondente a micrografia. ....	47
Figura 70: Regiões analisadas da solda com força axial de 350kN, amostra 2, em vermelho.....	47
Figura 71. (a) Micro-trincas na interface entre os materiais e (b) ecograma do ensaio de ultrassom, apresentando um sinal um pouco disperso. Destacado em vermelho o sinal correspondente a micrografia.....	48
Figura 72. (a-f) Amostras com segregação de inclusões achatadas no entorno da região central da solda. Soldas realizadas com: (a-c) 200kN e pino de aço A36; (d-f) 250kN e pino de aço A36; (g,h) 250kN e 350kN, respectivamente, ambas com pino de aço A36 com inclusões alongadas no sentido do fluxo de material junto a interface lateral da solda.....	51
Figura 73. (a) Amostra com presença de micro-vazios não maiores do que 20µm em comprimento ao redor da interface de união e (b) amostra micro-vazios de até 60µm acompanhando a linha da interface de união.....	52
Figura 74 (a) Amostra com micro-vazios não maiores do que 50 µm isoladamente, mas contornando quase que totalmente a linha da interface de união e (b) amostra com microtrincas na interface de união. ....	52
Figura 75. (a) Amostra com micro-vazios pontuais não maiores do que 30µm contornando a interface do material que fluiu, indicado pelas setas vermelhas e (b) amostra com microtrincas na interface de união com aspecto ramificado. ....	53
Figura 76. (a) Amostra com vazios lineares com tamanho superior a 200µm contornando a interface do material que fluiu, indicado pelas setas vermelhas e (b) amostra com microtrincas na interface de união.....	53
Figura 77. (a) Amostra com trinca com extensão superior a 1mm contornando a interface do material que fluiu.....	54

## ÍNDICE DE TABELAS:

<b>Tabela 1: Análise química da chapa e dos pinos, porcentagem em peso. ....</b>	<b>17</b>
<b>Tabela 2: Condições utilizadas nas soldagens. ....</b>	<b>19</b>

## ÍNDICE DE SÍMBOLOS E ABREVIACÕES:

FHPP	<i>“Friction Hydro Pillar Processing”</i>
ASTM	<i>“American Society for Testing and Materials”</i>
SAE	<i>“Society of Automotive Engineers”</i>
µm	micrômetros ( $10^{-6}$ m)
mm	milímetros ( $10^{-3}$ m)
ZAC	zona afetada pelo calor
N	Newton (medida de força)
kN	quilonewton (1000N)
FTSW	<i>“Friction Taper Stud Welding”</i>
“	polegada (25,4mm)

## RESUMO

Processos de soldagem por atrito apresentam diversas vantagens na união de materiais metálicos. O processamento de pinos por atrito ou “*Friction Hydro Pillar Processing*” (FHPP), é um exemplo de tecnologia de soldagem por atrito que pode ser utilizado no reparo de estruturas metálicas em ambientes hostis. Dependendo dos parâmetros de soldagem e dos materiais utilizados (pinos consumíveis e material base), as soldas FHPP podem apresentar defeitos como trincas na interface de união da junta e presença de inclusões. Tais defeitos e as tais inclusões comprometem a integridade mecânica e metalúrgica da solda, logo a inspeção utilizando ensaios não destrutivos é justificada. Utilizando o ensaio de ultrassom, soldas FHPP com chapas de aço ASTM A36 e pinos de aços ASTM A36 e SAE 8620 foram inspecionadas, variando somente as seguintes forças axiais do processo de soldagem: 200, 250, 300 e 350kN. Foi possível relacionar os resultados do ensaio de ultrassom com a localização de defeitos e inclusões nos corpos-de-prova e esses sinais foram validados através de micrografia das juntas estudadas.

**Palavras-chave:** Soldagem por atrito; Ultrassom; Inclusões; Defeitos.

## **ABSTRACT**

Friction welding processes have several advantages in the union of metallic materials. The friction processing of pins or Friction Hydro Pillar Processing (FHPP), is an example of friction welding technology that can be used in the repair of metallic structures in hostile environments. Depending on the welding parameters and materials used (consumable pins and base material), the FHPP welds can present defects like cracks in the bond surface and the presence of inclusions. Such inclusions and defects compromise the mechanical integrity of the weld and therefore a inspection using nondestructive evaluation is justified. Using ultrasonic testing, FHPP welds using ASTM A36 steel plates and ASTM A36 and SAE 8620 steel pins were surveyed, varying only the axial forces in the welding process: 200, 250, 300 and 350kN. It was possible to relate the ultrasound testing results with the location of defects and inclusions in the specimens and those signals were validated by the micrography of the joints studied.

**Key words:** Friction welding; Ultrasonic; Inclusions; Defects.

## 1.0 INTRODUÇÃO

Processos de soldagem por fricção podem substituir processos de soldagem convencionais a arco na união e reparos de estruturas metálicas tais como plataformas e navios utilizados na indústria de óleo e gás. Nestes processos o calor é produzido com o atrito de componentes sob uma carga axial, produzindo uma junta no estado sólido. Vantagens sobre processos convencionais incluem menor geração de calor (evitando altos ciclos térmicos no material), não utilização de consumíveis e gases de proteção e não ocorrência de fusão e degradação de propriedades mecânicas na forma de grande zona afetada pelo calor, difusão de hidrogênio, fragilização, porosidades e trincas de resfriamento, por exemplo. Além disso estes processos são ideais para unir materiais dissimilares (NICHOLAS, 2003).

O processo conhecido como *Friction Hydro Pillar Processing* (FHPP) consiste no preenchimento de um furo cilíndrico ou cônico (que continha uma descontinuidade anteriormente) plastificando um pino em rotação que se deforma com o calor gerado e com a carga aplicada, sem a ocorrência de fusão. O FHPP pode ser automatizado garantindo reprodutibilidade, qualidade da junta soldada e maior segurança durante o processo (MEYER, 2002). Esta técnica de reparo é aplicada visando a extensão da vida de materiais com aplicações na indústria de transportes, energia e naval. Possui potencial de aplicação na união de ligas avançadas (como ligas de Ni-Al, titânio e magnésio) para aplicação na indústria aeronáutica e automotiva (TWI, 1992).

Um grande desafio em FHPP é assegurar uma junta livre de defeitos e descontinuidades. Falta de união e micro trincas podem aparecer em qualquer região do material devido a geometria, fluxo de material e parâmetros de soldagem inadequados. Em perfis cônicos, ângulos de abertura muito grandes e com grande diferença entre o pino e o substrato facilitam o escoamento plástico do material, resultando em preenchimento

incompleto. Outras desvantagens incluem modificação de possíveis inclusões e complexa caracterização mecânica e metalúrgica (JARDIM et al., 2007).

As soldas são caracterizadas por análises metalográficas e ensaios mecânicos como ensaios de tração, impacto, dobramento e tenacidade a fratura são efetuados na tentativa de prever o desempenho do material em serviço. Associado a isso ensaios não-destrutivos podem ser utilizados na caracterização do material após o processamento, garantir a qualidade da solda e prevenir falhas em serviço.

A utilização do ultrassom na caracterização de soldas por fricção já foi assunto de alguns trabalhos. NAGY E ADLER [1992] caracterizam defeitos e falta de união metalúrgica na interface entre dois metais dissimilares. Além disso, a espessura da ZAC é determinada e correlacionada com a pressão de soldagem, servindo como indicador da qualidade da solda. Em outro trabalho (NAGY, 1992), os mesmos autores discutem a força de união de interfaces pela avaliação das camadas microestruturais através do espalhamento e atenuação do sinal de ultrassom. THOMAS e CHINN (1999) utilizam ondas longitudinais e transversais na diferenciação entre defeitos de união entre dois metais. A qualidade da união também é estudada por THOMPSON et al. (1989).

No presente trabalho buscou-se produzir uma solda isenta de macro-defeitos para a geometria adotada, identificar e diferenciar possíveis discontinuidades e inclusões no interior do reparo e verificar a influência do tipo de material utilizado no pino e diferentes forças axiais nos mesmos através do ensaio de ultrassom. Por fim, buscou-se verificar e validar os resultados com análises metalográficas.

## 2.0 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Tecnologias de processamento por atrito

O ato de atritar dois materiais para a produção de calor é conhecido há muito tempo. Em 1891 fricção foi utilizada pioneiramente como fonte de calor para soldagem e processamento de materiais. Com base nesse princípio surgiram vários processos de soldagem capazes de unir um vasto número de materiais e combinações de materiais similares e dissimilares. Esses processos ganharam aceitabilidade para grandes volumes de produção e atualmente são utilizados na produção de diversos componentes.

Com o calor produzido pelo atrito é possível plastificar uma área específica do material de forma eficiente e controlada, sem necessitar de material de consumo auxiliar e sem produzir fumos. Processos baseados em fricção podem ser utilizados na preparação de superfícies, soldagem, extrusão e endurecimento de materiais.

Soldagem por atrito é um processo de união em estado sólido onde a junta é obtida pelo movimento relativo das partes sob uma carga. Assim que a temperatura requerida e a deformação desejada são alcançadas, o movimento se cessa e a carga é mantida para formar a união. Para tanto é interessante que os materiais utilizados possam sofrer forjamento e possam produzir atrito na interface da solda (MEYER, 2002).

Os primeiros processos de soldagem eram baseados em movimentos rotacionais. A partir dos anos 70 muitos processos foram desenvolvidos. Movimentos orbitais e movimentos lineares recíprocos permitiram a união de geometrias não circulares (Figura 1.(a) e 1.(b)) (NICHOLAS, 2003). A partir dos anos 80 muitos processos novos foram surgindo, entre eles o “*friction hydro pillar processing*” (FHPP), o “*friction taper stud welding*” (FTSW) e o

“*friction stir welding*” (FSW), ilustrado na Figura 2. Uma grande vantagem desses processos é a possibilidade de produzir um produto no estado sólido, evitando-se desvantagens e defeitos associados a fusão dos materiais, ideal para unir materiais assimilares com diferentes temperaturas de fusão e propriedades físicas.

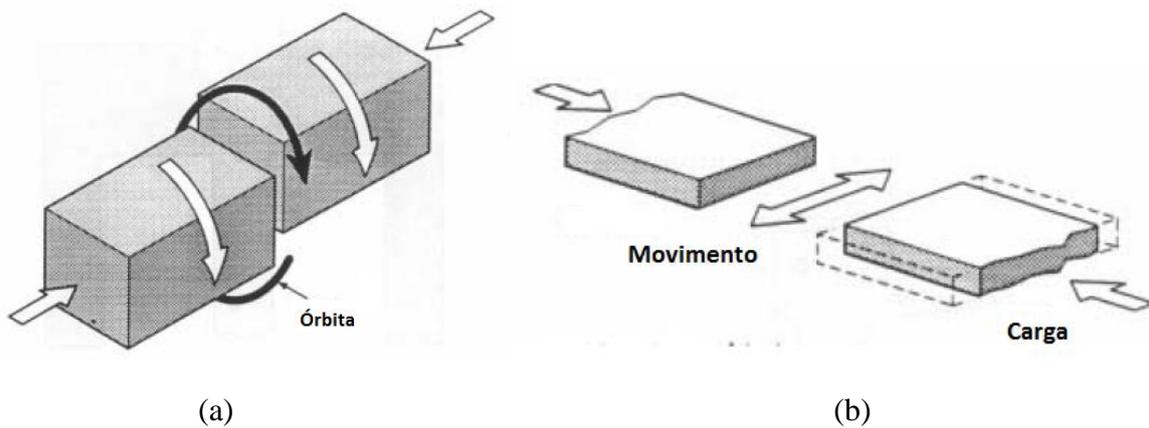


Figura 1.(a): Soldagem por atrito orbital e (b) soldagem por atrito linear, adaptado de [1].

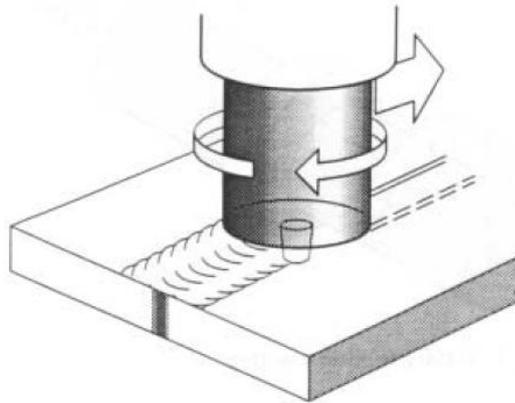


Figura 2: “*Friction Stir Welding*”, utilizado na união de alumínio e suas ligas (NICHOLAS, 2003).

## 2.2 “*Friction Hydro Pillar Processing*” (FHPP)

FHPP é um processo de soldagem de pinos por atrito desenvolvido ao longo da década de 90, utilizado para unir e reparar estruturas metálicas ferrosas ou não ferrosas (THOMAS e NICHOLAS, 1996). FHPP é um processo especialmente interessante para aplicações em

ambientes hostis como o submerso, na presença de radiação ou com perigo de explosão, pois utiliza máquinas leves que podem ser automatizadas.

No processo FHPP, primeiramente é usinado um furo cego na estrutura a ser feita o reparo, com formato cilíndrico. Em seguida um pino consumível é rotacionado e forçado axialmente contra o fundo do furo da estrutura que é mantida estável, gerando calor e camadas plastificadas de material. A camada plastificada coalesce e comprime uma série de interfaces adiabáticas helicoidais. O caráter viscoso da camada plastificada transmite forças hidrostáticamente axialmente e radialmente, para dentro do furo e para as paredes do furo, promovendo a união metalúrgica. Dessa forma a interface em atrito avança com a deposição e recristalização de material, preenchendo o furo (Figura 3).

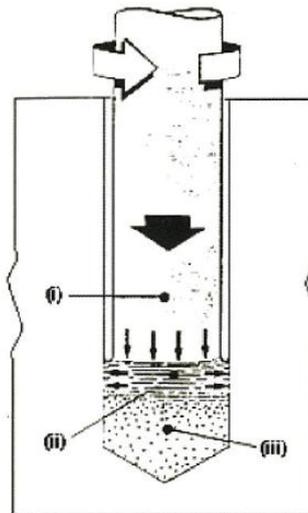


Figura 3: Processo FHPP com o pino consumível (i), zona plastificada e transmissão de forças hidrostáticas (ii) e pilar de material depositado (iii) (NICHOLAS, 2003).

O fluxo de material no interior das soldas já foi objeto de estudo. SHINODA e FUJIKAWA (2004) foram utilizados traçadores de níquel dentro do pino em diversas posições no processo FHPP para visualizar o fluxo de material após a soldagem (Figura 4).

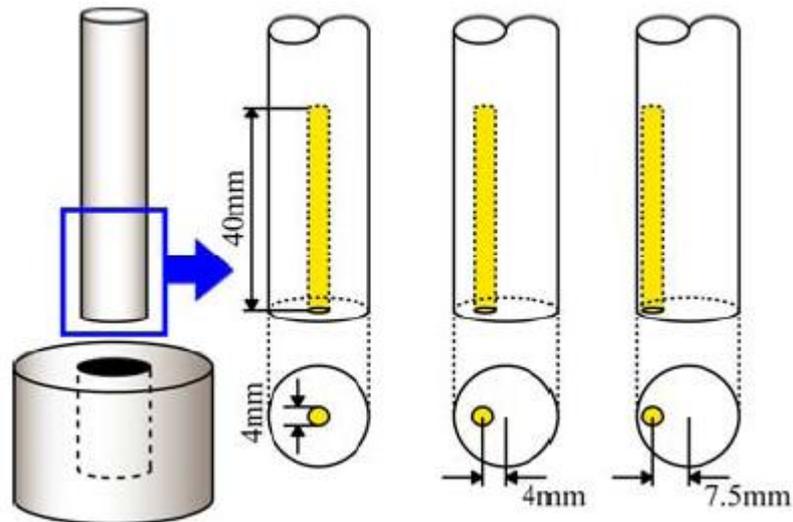


Figura 4: Ilustração de 3 pinos com marcadores de níquel em posições diferentes (SHINODA e FUJIKAWA).

Como resultado foi verificado material depositado helicoidalmente com aspecto achatado no plano perpendicular devido aos movimentos rotacionais do pino (Figura 5).

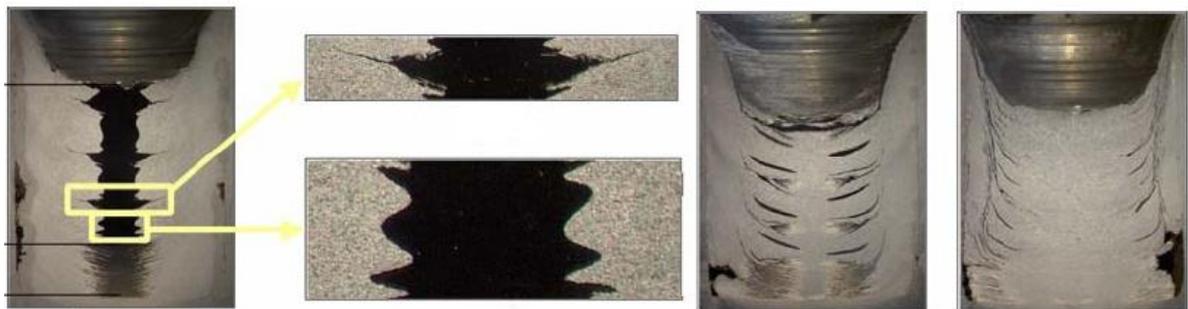


Figura 5: Corte perpendicular das 3 soldas feitas com pinos com marcadores de níquel na posição central (a esquerda), a 4mm e a 7,5mm do centro (a direita), conforme Figura 4 (SHINODA e FUJIKAWA).

Entre os parâmetros de processo mais importantes em FHPP podemos citar: velocidade de rotação, comprimento de queima, força axial aplicada sobre o pino durante e ao final da soldagem e tempo de aquecimento e pré-aquecimento.

Entre as variáveis do processo podemos citar a geometria do furo e do pino e a escolha dos materiais.

- Velocidade de rotação: a rotação do pino é o movimento relativo responsável pela geração de atrito/calor. O ajuste ótimo da velocidade de rotação é função dos demais parâmetros de

soldagem e combinações de materiais. Conforme Voinov (1968), com o aumento da velocidade de rotação acentua-se o efeito de polimento entre as interfaces, aumentando o tempo para atingir a temperatura desejada. Com o aumento do tempo de aquecimento, maior é a zona afetada pelo calor (ZAC), resultando em menor dureza e resistência a tração da junta soldada.

- Comprimento de queima: representa a quantidade de material processado e é tipicamente contabilizada pelo encurtamento sofrido pelo pino. O comprimento de queima deve ser no mínimo suficiente para o completo preenchimento do furo. O valor de comprimento de queima pode influenciar no número de defeitos associados ao fluxo de material e no acúmulo e formato de inclusões. A taxa de comprimento de queima é o encurtamento do pino pelo tempo e está relacionada ao tempo de soldagem, portanto tem influência na microestrutura e propriedades resultantes.

- Força axial: força aplicada axialmente normal a superfície do furo durante a soldagem. A força axial deve garantir o contato íntimo entre as superfícies, expulsando contaminações e evitando oxidação na região de soldagem. A força axial aplicada é transmitida hidrosticamente para o fundo e as paredes do furo, promovendo a união metalúrgica durante e após o processo. A manutenção ou aumento da força axial ao final da soldagem, além de contribuir para a união metalúrgica, pode promover a qualidade da solda, expulsando material sobre aquecido para fora da junta [14]. Tipicamente maiores forças geram menor tempo de soldagem e maior taxa de resfriamento, influenciando na microestrutura, ZAC e propriedades resultantes.

- Tempo de aquecimento: tempo corrido no qual os materiais estão sofrendo aquecimento. O tempo de aquecimento e a taxa de aquecimento se relacionam com a energia total envolvida no processo influenciando as propriedades microestruturais.

A combinação desses fatores influencia diretamente a qualidade final da solda. Mas, como resultado, podem ocorrer defeitos como falta de adesão e segregação de inclusões em regiões aleatórias da solda, impactando nas propriedades mecânicas da solda e no desempenho da estrutura.

Entre as vantagens do processo FHPP podemos citar:

- Grande penetração;

- Pode ser automatizado e controlado remotamente;
- Pode ser aplicado em ambientes hostis como submerso, gases explosivos, altamente magnético e com radiação;
- É capaz de unir materiais dissimilares;
- Menos poluente pela não utilização de gases consumíveis, geração de fumos e escória;
- Tem baixo custo de equipamento e operacional (consumível);
- É um processo rápido, podendo ser realizada em poucos segundos;
- Reprodutível, independe de operação manual;
- Qualidade superior nas propriedades mecânicas comparado a soldagem tradicional a arco;
- Evita e/ou diminui os problemas associados a fusão dos materiais em soldas convencionais (menores tensões térmicas e volumétricas e distorções na estrutura, limita a dissolução de gases, ZAC mais estreita com microestrutura menos dura e frágil);
- Pode dispensar tratamento térmico pós-soldagem;
- Preparação da superfície mais simples, dispensa limpeza especial;
- Pode ser utilizado no reparo de estruturas irreparáveis por outras técnicas de soldagem.

### **2.2.1 FHPP – furos paralelos**

Muitas soldas de qualidade já foram produzidas utilizando-se furos paralelos, auferidas por ensaios de tração, impacto e dobramento (THOMAS e NICHOLAS, 1996). Durante o processo a interface em atrito cisalha criando nova interface ao longo do pino consumível.

Se, durante o processo, a interface de fricção amolecer o material da interface fazendo com que entre em contato com as paredes laterais do furo, maior resistência torsional será criada. Esse fato pode fazer com que um novo plano rotacional possa surgir um pouco

distante da interface anterior. Novos planos rotacionais próximos a interface anterior fazem surgir uma série infinita de planos cisalhados, indicativo de uma boa solda (Figura 6) (THOMAS e NICHOLAS, 1996).



Figura 6: Série de planos cisalhados (THOMAS e NICHOLAS, 1996)

### **2.2.2 FHPP – Furos cônicos**

FHPP com furos e pinos cônicos são uma variação do processo. Se o ângulo do furo for muito obtuso o material plastificado não irá alcançar a parede do furo, efeito mais pronunciado em materiais com fluxo difícil na temperatura de forjamento. Esse fato pode vir a gerar defeitos como falta de preenchimento. O furo cônico permite comparativamente maiores velocidades de rotação e taxa de comprimento de queima. Furos e pinos cônicos fazem com que a interface de solda aumente com o decorrer do processo.

Alguns autores chamam esse processo de “*Friction Taper Stud Welding*” (FTSW) (DOUBELL, 2009). Além do ajuste dos parâmetros de soldagem, uma boa solda depende de uma boa geometria e relação entre os ângulos do furo e do pino. A Figura 7 ilustra o processo com geometria cônica.

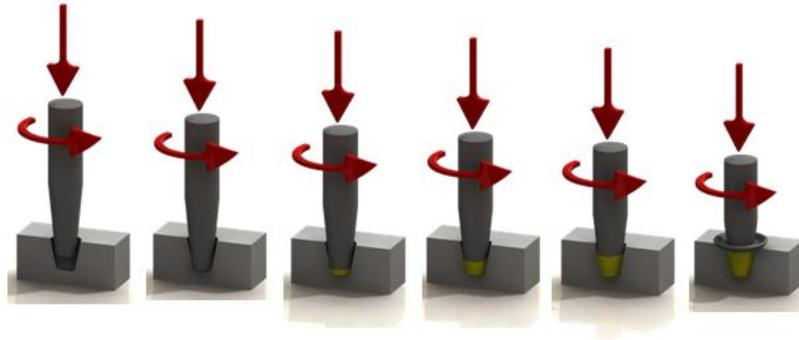
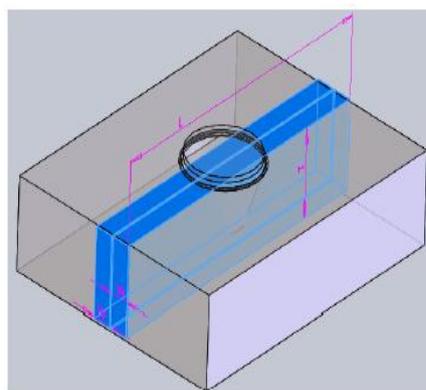


Figura 7: Ilustração esquemática do processo FTSW

### 2.2.3 Avaliação de soldas FHPP

Alguns ensaios mecânicos são realizados nas soldas para auferir a qualidade das juntas. Aliado a eles também podem ser realizadas análises micrográficas para avaliar a evolução microestrutural das soldas. São realizados principalmente os seguintes ensaios:

- Ensaio de dobramento: realizado para a análise da ductilidade e capacidade de deformação da junta. Para este ensaio é retirado um corpo de prova que corresponde a uma seção transversal da junta. Posteriormente o corpo de prova é dobrado até o ângulo onde há o aparecimento de uma trinca ou até 180° (Figura 8) (MATTEI, 2010).



(a)



(b)

Figura 8. (a) Plano de corte do corpo de prova e (b) corpo de prova após o ensaio de dobramento (MATTEI, 2010) .

- Ensaio de tração: realizado para se obter dados de resistência mecânica da junta soldada. Rupturas no metal base demonstram maior resistência da região de união. A Figura 9 ilustra o resultado de um ensaio de tração (PAES, 2009).

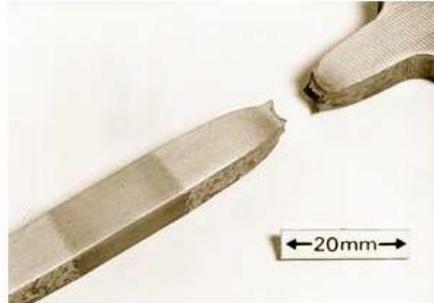


Figura 9. (a) Resultado de ensaio de tração mostrando ponto de fratura longe da região afetada pelo calor (PAES, 2009).

- Ensaio de impacto: realizado para se obter dados de tenacidade do material.
- Ensaio de dureza: realizado para se fazer uma relação entre a microestrutura resultante e as propriedades mecânicas. Os perfis selecionados buscam abranger toda a região afetada pelo calor, na seção longitudinal e transversal do corpo de prova.

#### 2.2.4 Defeitos

Defeitos de soldagem em FHPP e FTSW decorrem da má combinação dos parâmetros de soldagem, da geometria adotada e da má combinação entre materiais. Alguns defeitos que podem ocorrer são por exemplo falta de adesão (Figura 10) e falta de preenchimento (Figura 11).

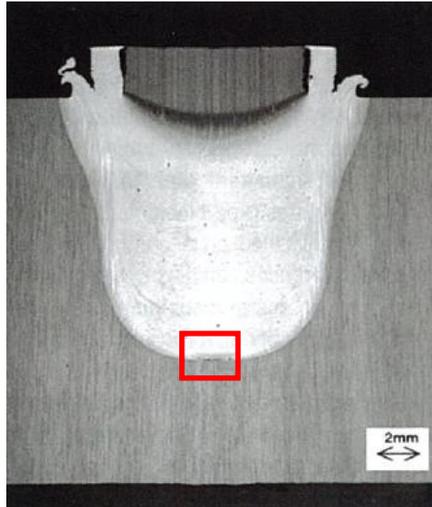


Figura 10: Defeito de falta de adesão na posição central da interface inferior, indicado em vermelho (DOUBELL, 2009).



Figura 11: Defeito de falta de preenchimento (PIRES , 2007).

O defeito de falta de adesão, ou “*cold weld*”, ocorre quando duas superfícies estão sob pressão mas sem união metalúrgica. Esse tipo de defeito recebe maior influência de parâmetros de soldagem como tempo de aquecimento (NAGY e ADLER, 1992).

O defeito de falta de preenchimento ocorre no aparecimento de vazios decorrentes do fluxo inadequado de material plastificado, insuficiente no preenchimento do furo. Esse tipo de defeito recebe maior influência da geometria do furo e do pino adotada (PIRES, 2007).

Além disso, em escala microscópica, podem ocorrer microtrincas na interface de união e concentração de inclusões como o sulfeto de manganês.

Microtrincas podem aparecer na interface de união devido a esforços provocados por força externa, variação volumétrica durante o resfriamento e tensões residuais em regiões onde há a presença de concentradores de tensão como precipitados e inclusões (ASM INTERNATIONAL, 1990).

Inclusões de sulfeto de manganês ocorrem nos materiais durante a fabricação do aço. O elemento enxofre, quando não adicionado propositalmente, provém do carvão mineral e do minério de ferro, matérias-primas na fabricação do aço. Para evitar a formação de sulfetos de ferro, que possuem efeitos deletérios nas propriedades do aço, é adicionado o elemento manganês, formando o sulfeto de manganês, menos prejudicial (NARDI, 2009). As inclusões de sulfeto de manganês mudam de forma ao longo dos processos de fabricação e são pontos de concentração de tensões e de precipitação de compostos, podendo gerar trincas e comprometer as propriedades da junta soldada.

### **2.3 Ensaios não destrutivos e ultrassom**

Através de ensaios não-destrutivos é possível inspecionar materiais em busca de defeitos que possam causar falhas em determinadas aplicações sem comprometer o material ensaiado. Entre eles as técnicas de ultrassom estão entre as mais utilizadas.

#### **- Ensaio de Ultrassom**

Ondas de ultrassom são ondas mecânicas que podem propagar através de sólidos, líquidos e gases e podem ser representadas matematicamente. Elas vibram em frequências maiores do que 20kHz, frequência máxima das ondas que o ouvido humano consegue captar. Ao propagarem, as ondas interagem com o meio, fornecendo informações a respeito de suas propriedades. É possível caracterizar materiais quanto a composição, propriedades elásticas, densidade e geometria, além de detectar falhas e discontinuidades no material (SCHULL, 2002).

Uma onda ultrassônica, ao propagar pelo material, pode se deparar com uma discontinuidade ou inclusão. Esses defeitos no material causam espalhamento das ondas ultrassônicas, detectadas como um eco. Com a análise do eco é possível determinar a posição, tamanho e forma de um defeito.

Ondas acústicas podem ser classificadas em: ondas volumétricas, ondas superficiais e ondas guiadas. Entre as ondas volumétricas, que se propagam no interior do material, temos ondas longitudinais e ondas transversais. Nas ondas longitudinais as partículas oscilam paralelamente a direção de propagação enquanto que nas ondas transversais as partículas oscilam perpendicularmente a direção de propagação.

A velocidade de propagação das ondas volumétricas varia para cada material e modo de vibração (transversal ou longitudinal), mas não varia com a frequência. Já o comprimento de onda define o tamanho do menor defeito capaz de ser encontrado no material, da ordem de metade do seu valor.

As ondas acústicas sofrem atenuação ao percorrer um material. Isso ocorre pela dispersão (provocado pela heterogeneidade dos materiais) e pela absorção (energia cedida na transmissão de vibrações ao longo do material). Meios onde a atenuação sônica é muito grande dificultam o ensaio (ANDREUCCI, 2008).

Para gerar uma onda ultrassônica é utilizado um transdutor piezelétrico que transforma um pulso elétrico em uma onda mecânica. A onda mecânica transmitida é captada e novamente transformada em um pulso elétrico, gerando o ecograma do ensaio.

#### - Transdutores Piezelétricos

O efeito piezelétrico é o aparecimento de cargas superficiais em cristais submetidos a uma força mecânica. Já o inverso, deformação do cristal na presença de um campo elétrico, é chamado de efeito piezelétrico reverso (APC INTERNATIONAL, 2002).

A maioria dos cristais piezelétricos são sólidos cristalinos. Estes podem ser monocristais naturais ou sintéticos, ou policristais como os cerâmicos ferroelétricos e piezelétricos. O efeito piezelétrico pode aparecer em cristais formados por apenas um elemento, pela distorção de sua distribuição eletrônica, e em certos polímeros, pelo alongamento na presença de um campo elétrico.

Muitos cerâmicos piezelétricos exibem estrutura cristalina de perovskita. Cada cristal é composto de um pequeno íon metálico tetravalente inserido em uma rede maior de íons metálicos divalentes e O<sub>2</sub>.

Propriedades de um elemento cerâmico piezelétrico polarizado são explicados na Figura 12. Compressão ou tensão muda o momento dipolar do elemento. Compressão ao longo da direção de polarização gera voltagem de mesma polarização que o elemento possui (Figura 12 (b)). Se a mesma voltagem é aplicada no elemento, na direção de polarização, o elemento irá alongar-se (Figura 12 (d)).

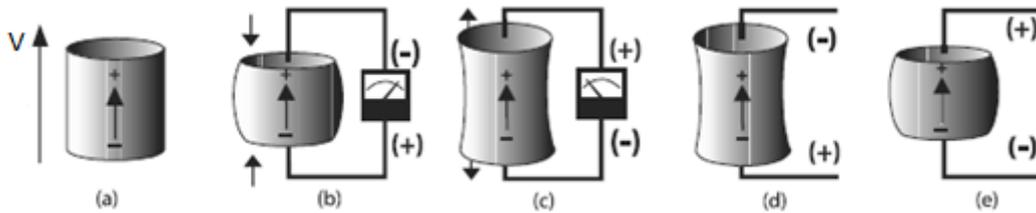


Figura 12: Resposta do elemento piezelétrico a deformação e a um campo elétrico.

- Frequência de Ressonância: quando exposto a um campo elétrico alternado o material piezelétrico deforma-se ciclicamente, na mesma frequência do campo. A frequência de ressonância é aquela em que o material converte energia elétrica em energia mecânica mais eficientemente. Na frequência de ressonância a impedância é mínima. Na frequência de anti-ressonância a impedância é máxima. A composição do material piezelétrico, sua forma e volume determinam a sua frequência de ressonância. Normalmente elementos maiores possuem frequências de ressonância mais baixas (PIEFORT, 2001).

Transdutores piezelétricos são capazes de transformar sinais elétricos em vibrações mecânicas e vice-versa. As vibrações são normalmente geradas em forma de som e ultrassom. Transdutores ultrassônicos são utilizados na medida de distâncias, taxas de fluxo, nível de fluidos, limpeza, atomização de líquidos, perfuração e moagem de cerâmicos, solda de plásticos, diagnósticos médicos e ensaios não destrutivos.

Transdutores ultrassônicos convencionais são acoplados ao material a ser inspecionado utilizando um meio que promova a transmissão das ondas ao material. Quanto menor for a impedância acústica entre os meios, maior é a fração de energia transmitida.

Também é possível fazer a simulação de propagação de ondas utilizando programas computacionais (CLARKE, 2009). É possível simular diversas situações, abrangendo diversos setores da indústria.

A Figura 13 mostra uma simulação por elementos finitos de um ensaio de ultrassom aplicado em uma solda do tipo FHPP. A linha da interface entre o pino e a chapa simula a fronteira de dois materiais com diferente impedância acústica. Pode-se verificar o efeito da reflexão da onda ao atingir a interface, produzindo um sinal no ecograma do ensaio (Figura 14).

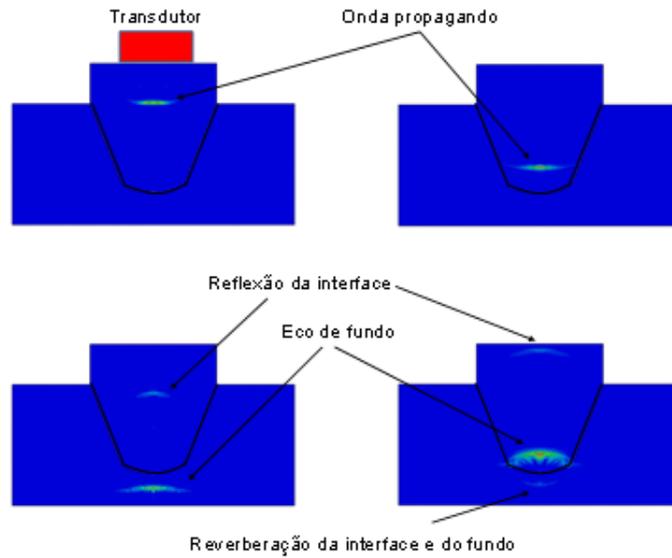


Figura 13: Representação da reflexão sofrida pela onda de ultrassom ao atingir interface de material com diferente impedância acústica por elementos finitos.

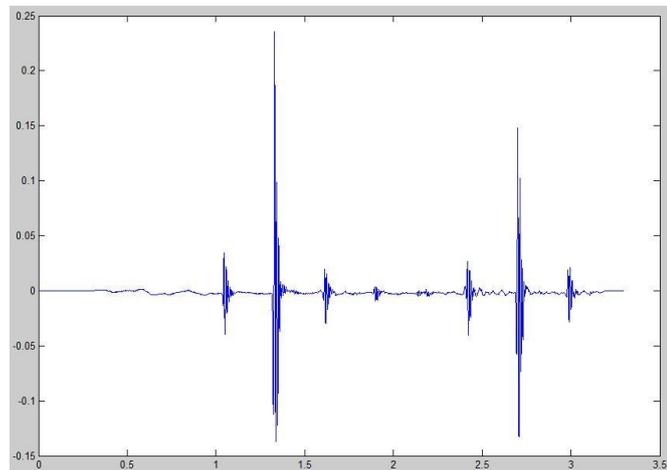


Figura 14: Representação de um ecograma correspondente a simulação por elementos finitos da Figura 14.

### 3.0 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

As soldas foram obtidas com chapas ASTM A36 e pinos utilizando os aços ASTM A36 e SAE 8620. O aço ASTM A36 foi escolhido por ser muito utilizado em aplicações industriais e o aço SAE 8620 por ter melhor controle de inclusões. As composições químicas desses materiais estão presentes na Tabela 1. As chapas foram cortadas e usinadas a partir de chapas laminadas à quente com 2½” de espessura. Os pinos foram cortados e usinados a partir de barras redondas laminadas a quente com diâmetro de 1½”. A geometria da chapa e do pino adotados está ilustrada na Figura 15.

Tabela 1. Análise química da chapa e dos pino, porcentagem em peso.

Material	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo
Chapa A36	0,196	0,107	0,554	0,0183	0,0226	0,0415	0,0437	<0,005
Pino A36	0,188	0,097	0,540	0,0199	0,0313	0,0386	0,0542	<0,005
Pino 8620	0,219	0,268	0,852	0,0268	0,0302	0,441	0,501	0,171

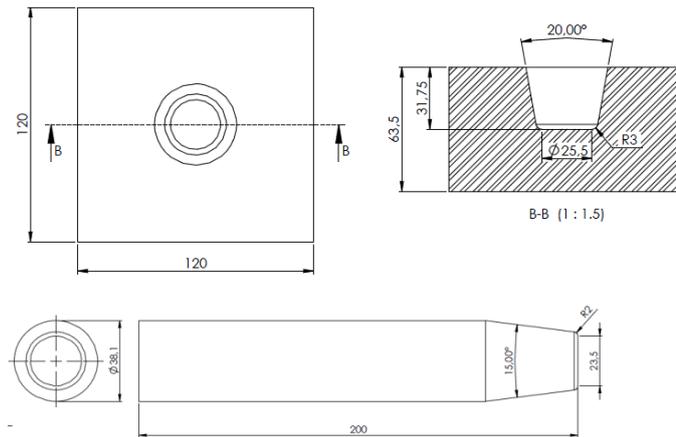


Figura 15. Desenho da geometria das chapas e pinos utilizados.

Com a geometria adotada buscou-se produzir uma interface plana no fundo do furo tendo em vista a reflexão das ondas mecânicas durante o ensaio de ultrassom e também buscou-se atingir uma região com maior concentração de inclusões (o centro da chapa), resultado dos processos de fabricação dos materiais.

O pino do material A36 eventualmente apresenta linhas de inclusões devido ao baixo controle durante a fabricação do aço e aos processos de conformação (Figura 16).

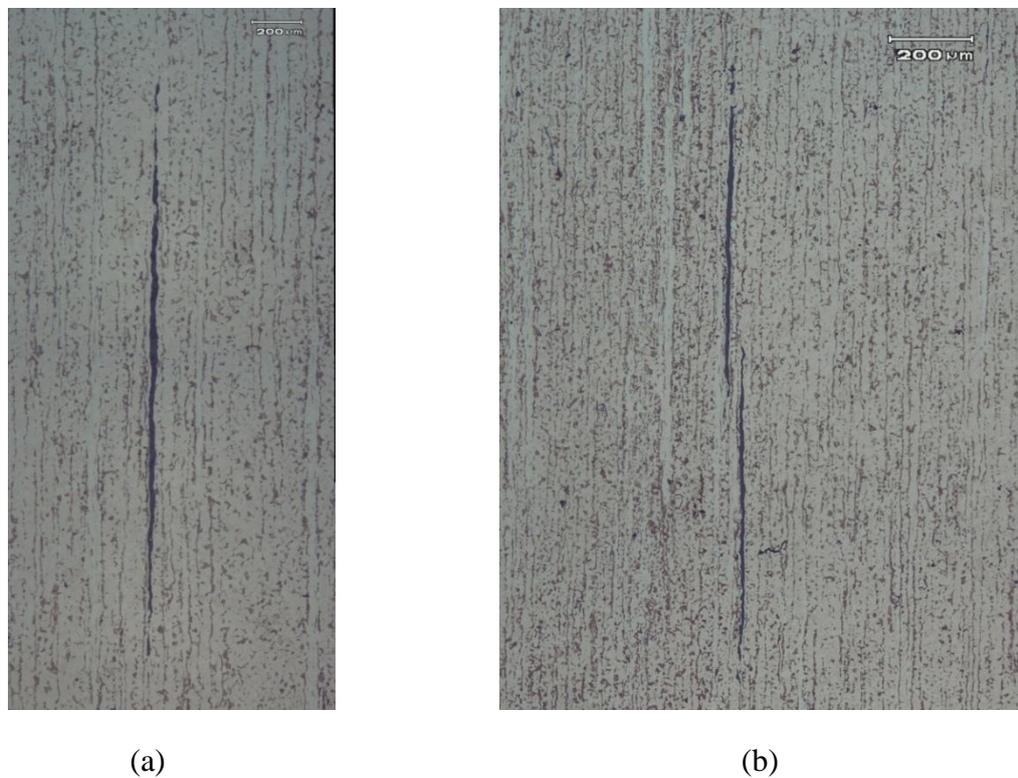


Figura 16. (a) e (b) Inclusões encontradas na região do pino do material A36

Por outro lado, o pino do material 8620 possui um controle maior de inclusões durante a sua fabricação. A escolha desses dois materiais teve como objetivo verificar a influência do material quanto a presença de inclusões na junta soldada.

A variação da força axial exerce grande influencia nas demais características de soldagem como tempo de aquecimento ou tempo total do processo e tamanho e microestrutura da zona afetada pelo calor (ELLIS, 1972). Por esse motivo nesse trabalho optou-se por variar, além do material do pino, as forças axiais utilizadas durante o processo de soldagem. As forças axiais utilizadas foram 200kN, 250kN, 300kN e 350kN. A rotação do pino foi mantida constante em 1000 rotações por minuto e a força axial de forjamento, aplicada após o processo de soldagem, foi definida em 600kN. Por fim o comprimento de queima programado foi definido em 10mm para todas as soldas. No total foram feitas 2 amostras para cada condição. A Tabela 2 resume as condições de soldagem utilizadas.

Tabela 2: Condições utilizadas nas soldagens.

Força axial	200kN	250kN	300kN	350kN
Número de amostras	2	2	2	2
Força de forjamento	600kN	600kN	600kN	600kN
Comprimento de queima	10mm	10mm	10mm	10mm

Para o processamento dos materiais foi utilizada a MPF 1000, máquina de processamento por fricção desenvolvida no Laboratório de Metalurgia Física da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (LAMEF/UFRGS). Este equipamento utiliza carga máxima de 1000kN e frequência máxima de rotação de 1500rpm, controlado por um programa de automação.

O processo de soldagem utilizado seguiu as seguintes etapas: primeiramente o pino é acionado até atingir a rotação programada. Em seguida o pino entra em contato com a chapa e aplica-se uma força de 4kN, a uma taxa de 0,75kN/s. Com essa força inicial baixa buscou-se fazer um pré-aquecimento entre os materiais. Após atingida a força de 4kN, aplica-se a força axial programada, que neste estudo foram de 200, 250, 300 e 350kN, a uma taxa de 80kN/s. Após o pino atingir o comprimento de queima programado, a rotação é freada e aplica-se a força de forjamento de 600kN, a uma taxa de 200kN/s. Por fim, a força de forjamento é mantida durante 5 segundos.

As análises de ultrassom foram feitas após o corte do pino restante. Foi feito o lixamento da superfície buscando-se diminuir o ruído do sinal. A região inspecionada corresponde a toda região do pino restante após o corte do mesmo. Assim foi feito um mapeamento dos defeitos e inclusões e definido um plano de corte central com a maior incidência dos mesmos.

Na inspeção com o ultrassom foi utilizado um elemento piezelétrico de 10MHz e 6,35mm de diâmetro da marca Olympus (Panametrics UT Transducers) no modo pulso-eco, com tamanho de descontinuidade mínimo calculado em 0,29mm. Na aquisição de sinais foi utilizado um software e um equipamento de 16 canais desenvolvidos pela equipe da CPTi/PUC-Rio, trabalhando apenas com um canal no modo pulso-eco. Os ecogramas gerados pelo software são do tipo A-scan, mostrando a amplitude das ondas ultrassônicas (eixo y) pelo tempo (eixo x).

Com o ultrassom foi feito o mapeamento na face superior do reparo após o corte do pino restante, buscando-se inspecionar a interface central, o raio de curvatura inferior e parte da interface lateral da solda, tendo em vista que o sinal refletido pelas descontinuidades e inclusões sofre influências da orientação das mesmas. Após a inspeção com o ultrassom, o plano que apresentou maior incidência de reflexões do feixe ultrassônico foi definido como plano de corte para as análises micrográficas, para cada amostra. Os corpos de prova para as análises metalográficas foram cortados com 45mm de largura e 10mm de comprimento através de eletroerosão (Figura 17), passando pelo ponto central do pino.



Figura 17: Vista superior da chapa após a retirada do corpo de prova por eletroerosão.

Posteriormente os corpos de prova foram lixados obedecendo a seguinte seqüência de granulometrias: 80, 120, 220, 320, 400, 600 e 1200, seguido de polimento com pasta de diamante de 4 $\mu$ m e 1 $\mu$ m. Para ataque químico foi utilizado Nital 2% para análise da microestrutura e Nital 10% para análise macrográfica.

## 4.0 RESULTADOS

### 4.1 Macrografias

A Figura 18 mostra as macrografias das 8 soldas com pino de aço ASTM A36 e a Figura 19 mostra as macrografias das 8 soldas com pino de aço SAE 8620. A partir desses cortes foram feitas as análises micrográficas.

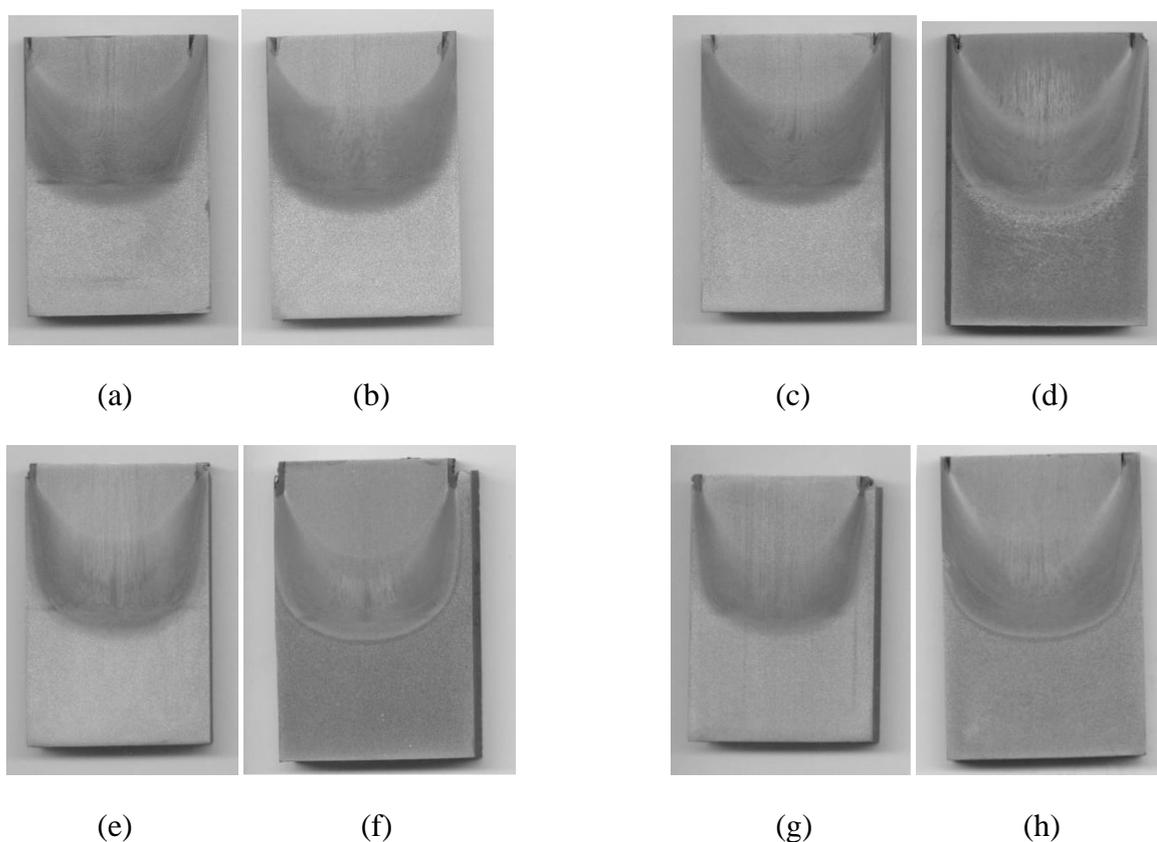


Figura 18. Resultados das macrografias das soldas com pinos A36 avaliadas com Nital 10%, 200kN, amostra 1(a) e 2(b), 250kN, amostra 1(c) e 2(d), 300kN, amostra 1(e) e 2 (f) e 350kN, amostra 1(g) e 2 (h).

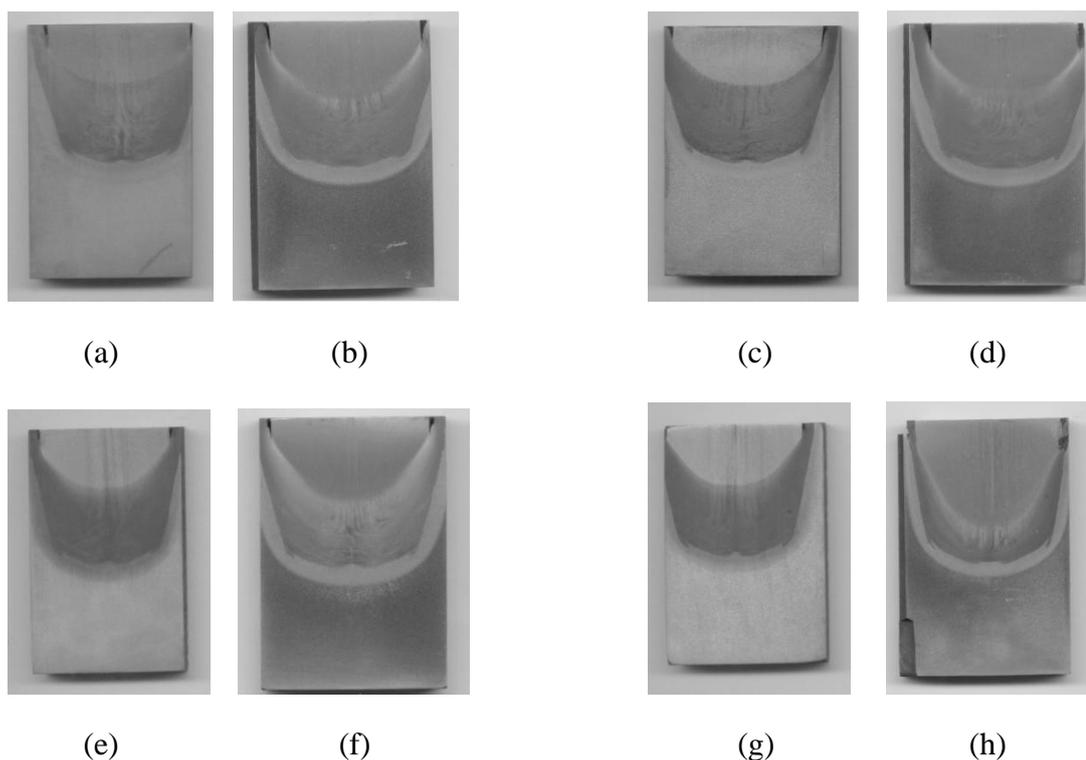


Figura 19. Resultados das macrografias das soldas com pinos SAE 8620 avaliadas com Nital 10%, 200kN, amostra 1(a) e 2(b), 250kN, amostra 1(c) e 2(d), 300kN, amostra 1(e) e 2 (f) e 350kN, amostra 1(g) e 2 (h).

Analisando as macrografias de todos os corpos-de-prova vemos que, mesmo com a variação da força axial de soldagem, nenhuma solda apresentou macro-defeitos como vazios ou falta de preenchimento para a geometria adotada.

## 4.2 Soldas com pino de aço ASTM A36

### 4.2.1 Junta soldada com força axial de 200kN, aço ASTM A36, amostra 1:

A Figura 20 ilustra as regiões da solda com força axial de 200kN, amostra 1, analisadas.

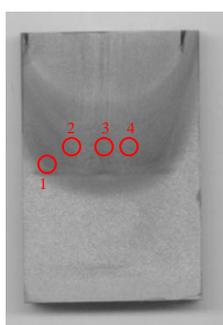


Figura 20: Regiões analisadas da solda com força axial de 200kN, amostra 1, em vermelho.

Pelas análises de ultrassom foram obtidos sinais com grandes amplitudes formados por vários picos próximos, conforme demonstram ecogramas das Figura 21.(b), Figura 22.(b) e Figura 23.(b), respectivamente as regiões “2”, “3” e “4” da Figura 20. Esses sinais correspondem a aglomerados de inclusões de até aproximadamente 300 $\mu$ m. As inclusões apresentaram morfologia achatada (Figura 21.(a), Figura 22.(a) e Figura 23.(a)).

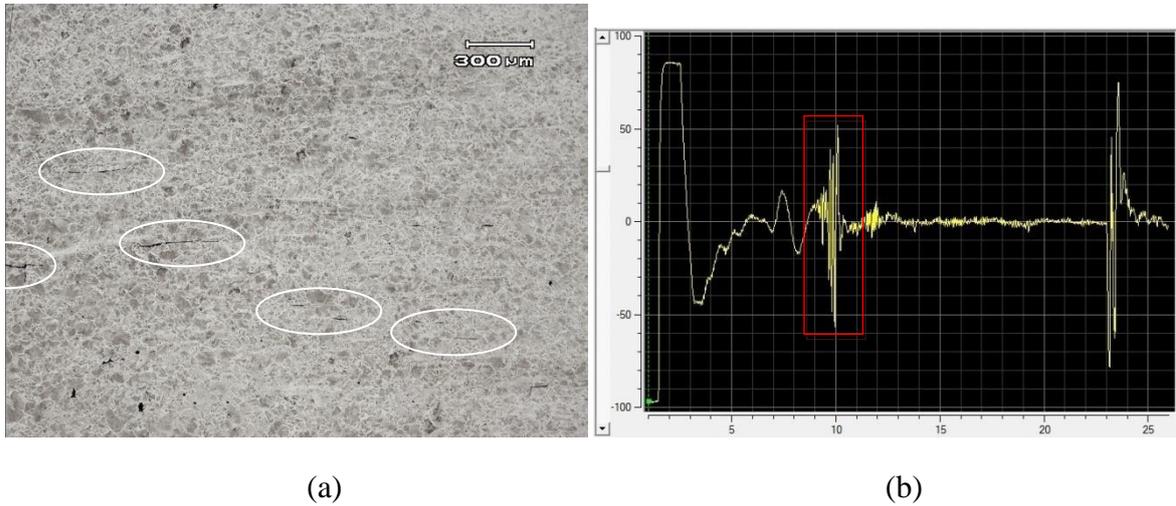


Figura 21. (a) Região com várias inclusões achatadas e (b) ecograma do ensaio de ultrassom com sinais de grande amplitude e picos próximos (eixo das abscissas corresponde à amplitude do sinal ultrassônico em Volts e o das ordenadas ao tempo em microsegundos). Destacado em vermelho o sinal correspondente a micrografia.

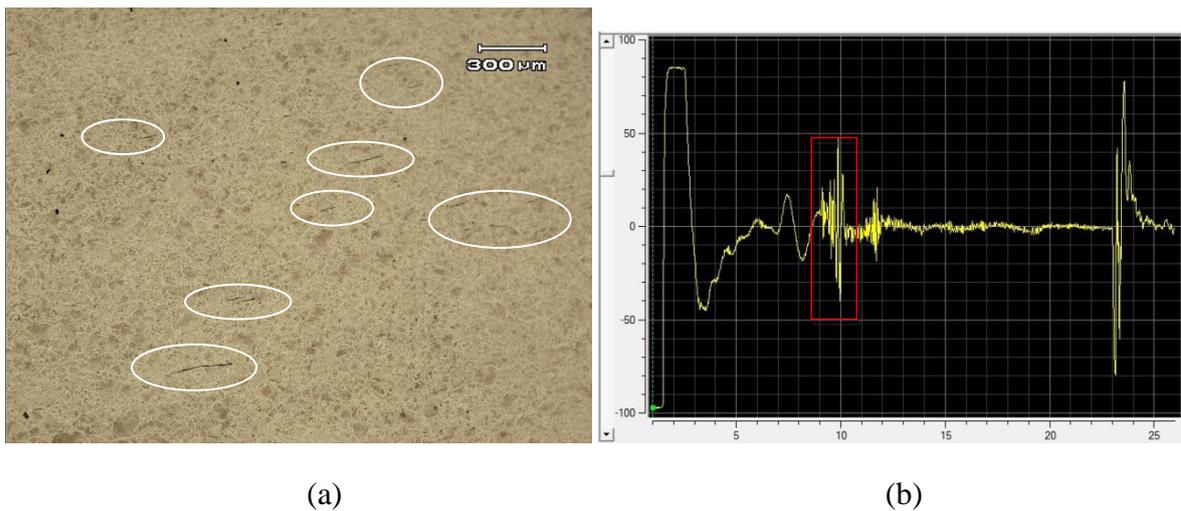


Figura 22. (a) Região com várias inclusões achatadas de diversos tamanhos e (b) ecograma do ensaio de ultrassom com sinais de grande amplitude e picos próximos (eixo das abscissas corresponde à amplitude do sinal ultrassônico em Volts e o das ordenadas ao tempo em microsegundos). Destacado em vermelho o sinal correspondente a micrografia.

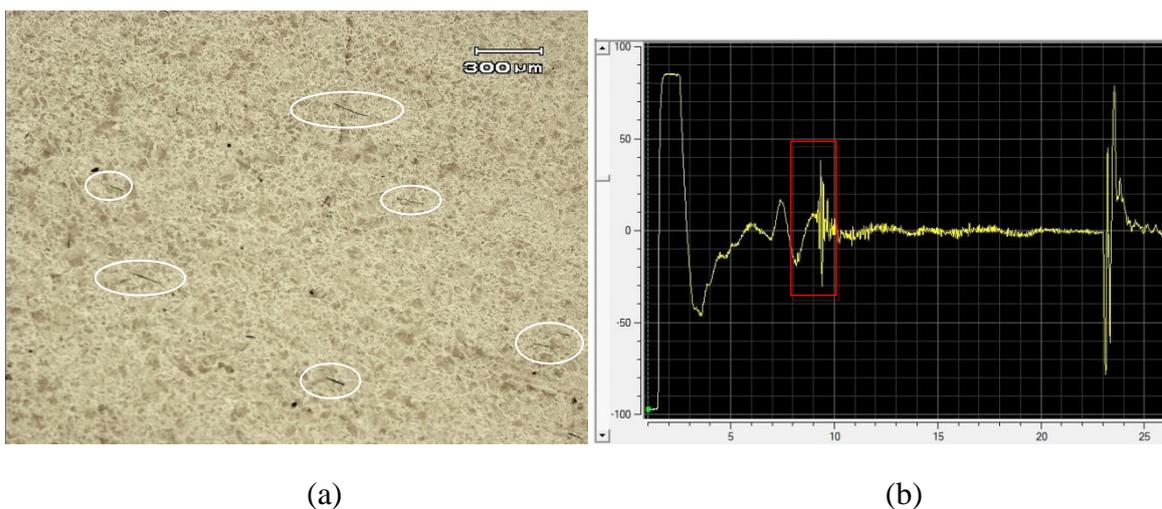


Figura 23. (a) Outra região com algumas inclusões achatadas e (b) ecograma do ensaio de ultrassom com picos próximos (eixo das abscissas corresponde à amplitude do sinal ultrassônico em Volts e o das ordenadas ao tempo em microsegundos). Destacado em vermelho o sinal correspondente a micrografia.

Na região periférica da solda (região “1” da Figura 20) foi encontrado falta de adesão justamente ao redor da interface do material que fluiu plasticamente. Esse defeito resultou em um sinal amplo no ensaio de ultrassom devido a profundidade do mesmo (Figura 24.(b)).

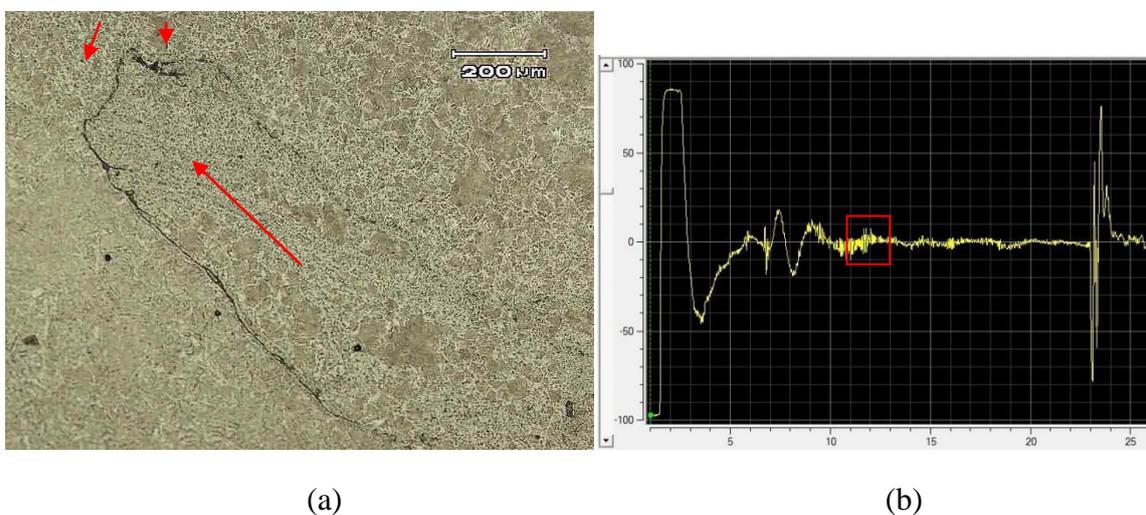


Figura 24. (a) Micro-vazios em volta da região de fluxo plástico de material, indicado pelas setas vermelhas e (b) ecograma do ensaio de ultrassom apresentando um sinal mais disperso (eixo das abscissas corresponde à amplitude do sinal ultrassônico em Volts e o das ordenadas ao tempo em microsegundos). Destacado em vermelho o sinal correspondente a micrografia.

A amostra 1 da solda utilizando força axial de 200kN ficou caracterizada por apresentar muitas inclusões na região central da solda e falta de adesão na região periférica do pino. Esses aglomerados de inclusões achatadas podem ter origem em inclusões oriundas do pino, como as da Figura 16.

- Amostra 2:

A Figura 25 ilustra as regiões da solda com força axial de 200kN, amostra 2, analisadas.

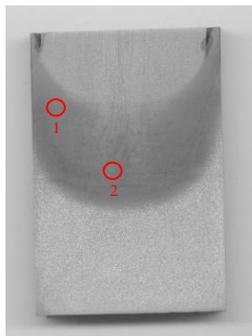
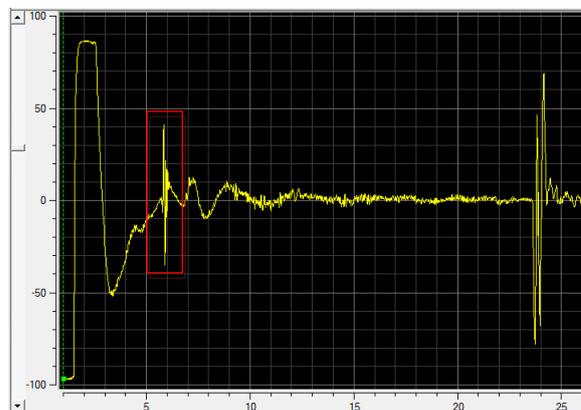


Figura 25: Regiões analisadas da solda com força axial de 200kN, amostra 2, em vermelho.

A Figura 26.(b) ilustra o ecograma obtido na região “1” da Figura 25, onde há um fluxo ascendente na junta soldada. O sinal com um pico bem definido corresponde a uma inclusão isolada, mostrada na Figura 26.(a).



(a)



(b)

Figura 26. (a) Inclusão isolada e (b) ecograma do ensaio de ultrassom (eixo das abscissas corresponde à amplitude do sinal ultrassônico em Volts e o das ordenadas ao tempo em microsegundos). Destacado em vermelho, o sinal correspondente a micrografia.

A Figura 27.(b) ilustra o ecograma obtido na região “2” da Figura 25, mais central na junta soldada. O sinal correspondente um pouco disperso corresponde a algumas inclusões isoladas, mostrada na Figura 27.(a).

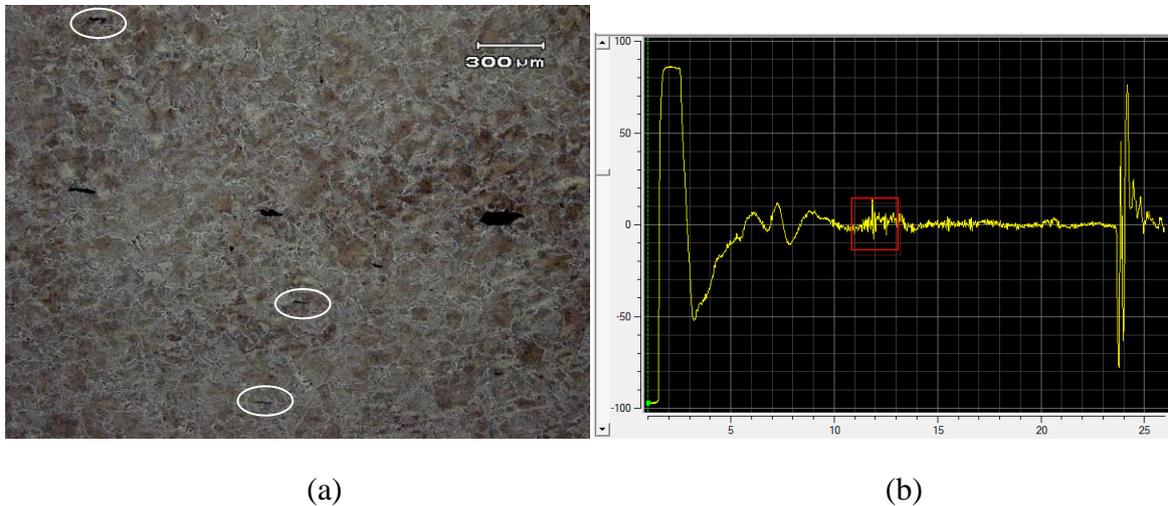


Figura 27. (a) Inclusões adjacentes (algumas destacadas com a elipse branca) encontradas perto da região central da solda e (b) ecograma do ensaio de ultrassom (eixo das abscissas corresponde à amplitude do sinal ultrassônico em Volts e o das ordenadas ao tempo em microsegundos). Destacado em vermelho, o sinal correspondente a micrografia.

A amostra 2 da solda utilizando força axial de 200kN apresentou algumas inclusões alongadas na direção do fluxo plástico de material além de algumas inclusões dispersas ao redor da região central da junta soldada.

#### 4.2.2 Junta soldada com força axial de 250kN, aço ASTM A36, amostra 1:

A Figura 28 ilustra as regiões da solda com força axial de 250kN, amostra 1, analisadas.

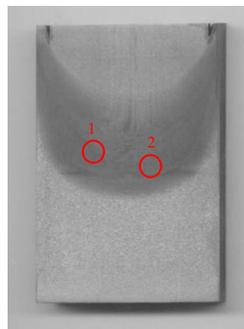


Figura 28: Regiões analisadas da solda com força axial de 250kN, amostra 1, em vermelho.

Novamente várias inclusões achatadas foram encontradas em torno da região central da junta (Figura 29(a)). O sinal correspondente (Figura 29.(b)) apresentou grande amplitude e vários picos próximos. Foram encontradas inclusões de até 300 $\mu\text{m}$ .

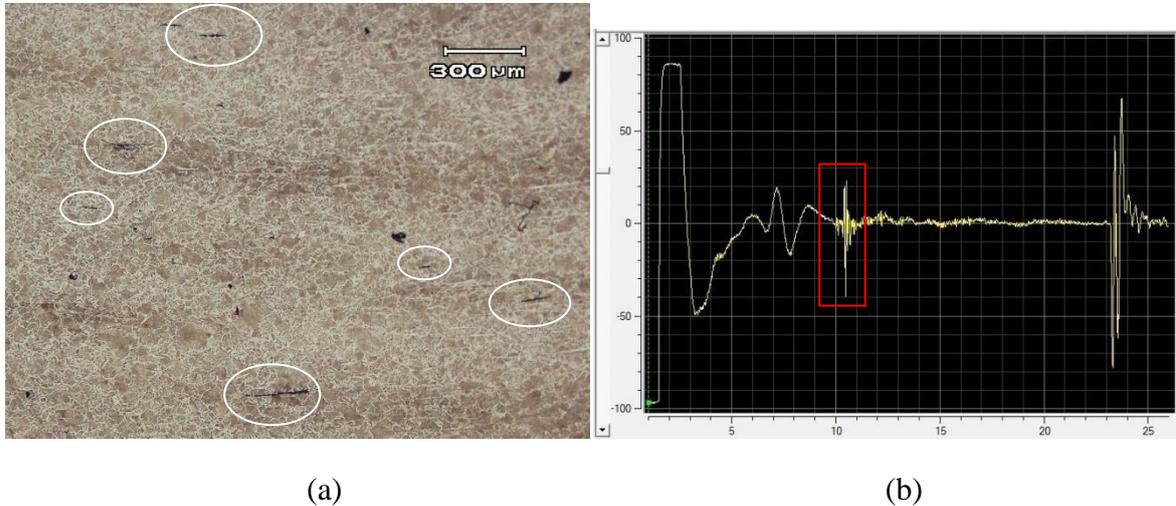


Figura 29. (a) Região com algumas inclusões achatadas de até 300 $\mu\text{m}$  e (b) ecograma do ensaio de ultrassom com vários picos próximos (eixo das abscissas corresponde à amplitude do sinal ultrassônico em Volts e o das ordenadas ao tempo em microsegundos). Destacado em vermelho o sinal correspondente a micrografia.

Na região “2” da Figura 28 foram encontradas duas inclusões próximas de até aproximadamente 200 $\mu\text{m}$  (Figura 30.(a)). Devido a pequena diferença em distância entre as duas inclusões os picos no sinal correspondente ao ensaio de ultrassom se aproximam muito, como ilustra a Figura 30.(b)).

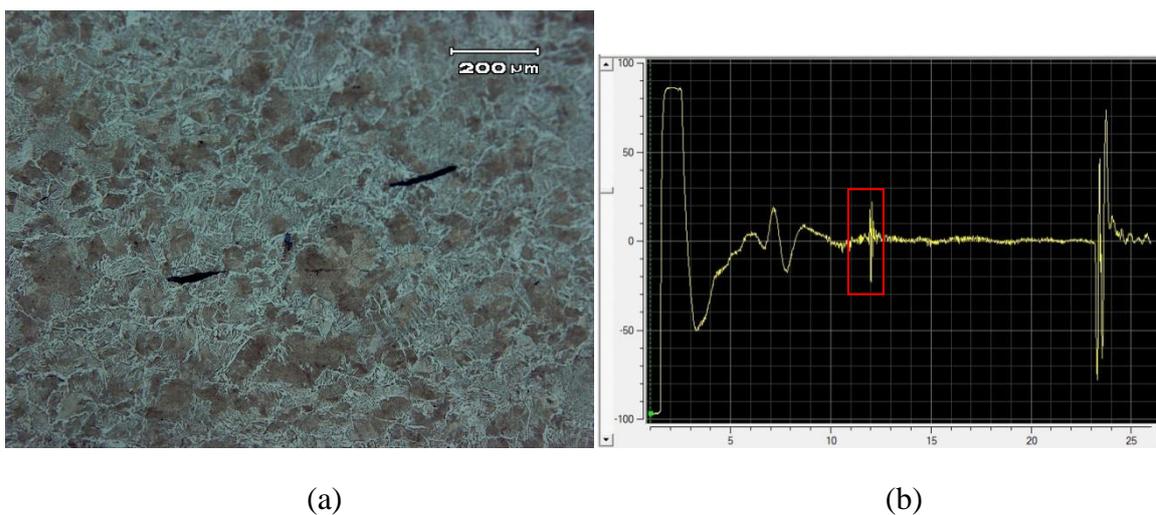


Figura 30. (a) Região com duas inclusões isoladas e (b) ecograma do ensaio de ultrassom (eixo das abscissas corresponde à amplitude do sinal ultrassônico em Volts e o das ordenadas ao tempo em microsegundos). Destacado em vermelho o sinal correspondente a micrografia.

A amostra 1 da solda utilizando força axial de 250kN também apresentou um número elevado de inclusões na região central da solda. As inclusões encontram-se achatadas e alongadas na direção do fluxo de material.

- Amostra 2:

A Figura 31 ilustra as regiões da solda com força axial de 250kN, amostra 2, analisadas.

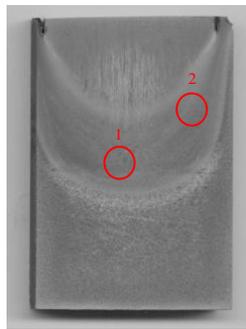
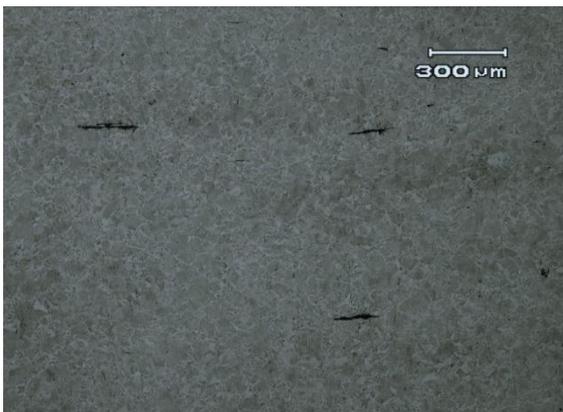


Figura 31: Regiões analisadas da solda com força axial de 200kN, amostra 2, em vermelho.

As Figura 32.(a) e Figura 32.(b) ilustram duas regiões adjacentes com inclusões alongadas de até aproximadamente 300 $\mu$ m, localizadas aproximadamente na região 1 da Figura 31. O ecograma do ensaio de ultrassom correspondente a essa região é ilustrada na Figura 17, onde é mostrado um sinal com picos próximos.



(a)



(b)

Figuras 32.(a) e (b) Regiões adjacentes com inclusões achatadas de aproximadamente 0,3mm.

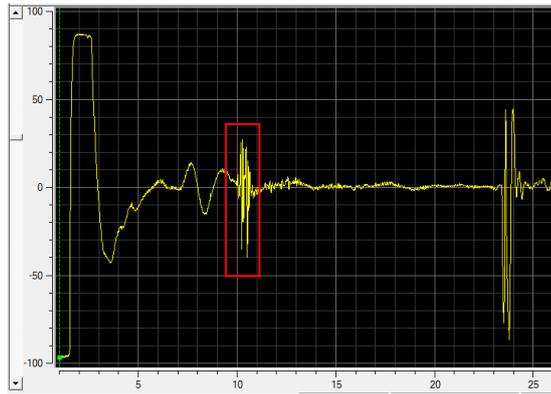
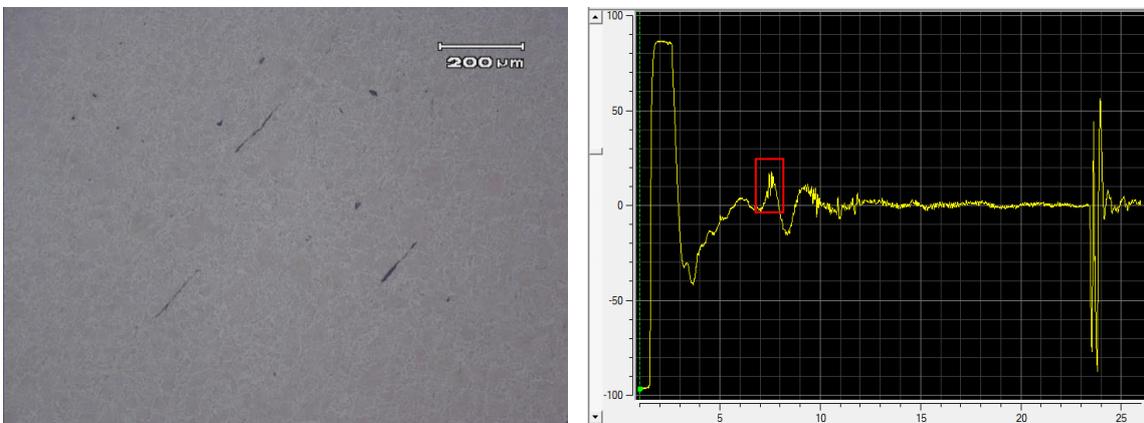


Figura 33. Ecograma do ensaio de ultrassom apresentando picos com grande amplitude (eixo das abscissas corresponde à amplitude do sinal ultrassônico em Volts e o das ordenadas ao tempo em microsegundos). Destacado em vermelho, o sinal correspondente as Figuras 29.(a) e 29.(b).

Na região de fluxo ascendente de material (região “2” na Figura 31) foram encontradas 3 inclusões alongadas na direção do fluxo (Figura 34.(a)). O ecograma correspondente apresenta sinais bem próximos, devido a pouca diferença de altura entre as inclusões (Figura 34.(b)). A orientação das inclusões e a proximidade com o transdutor acabaram gerando uma amplitude pequena.



(a)

(b)

Figura 34. (a) Região com três inclusões alongadas na direção do fluxo de material e (b) ecograma do ensaio de ultrassom apresentando picos bem próximos (eixo das abscissas corresponde à amplitude do sinal ultrassônico em Volts e o das ordenadas ao tempo em microsegundos). Destacado em vermelho o sinal correspondente a micrografia.

A amostra 2 da solda utilizando força axial de 250kN se assemelhou a amostra 1, apresentando inclusões alongadas na direção do fluxo plástico de material além de algumas inclusões achatadas dispersas ao redor da região central da junta soldada, porém não apresenta falta de adesão.

#### 4.2.3 Junta soldada com força axial de 300kN, aço ASTM A36, amostra 1:

A Figura 35 ilustra as regiões da solda com força axial de 300kN, amostra 1, analisadas.

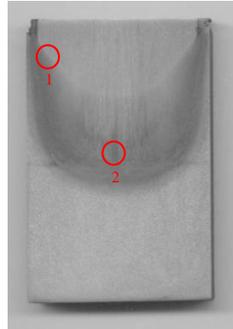
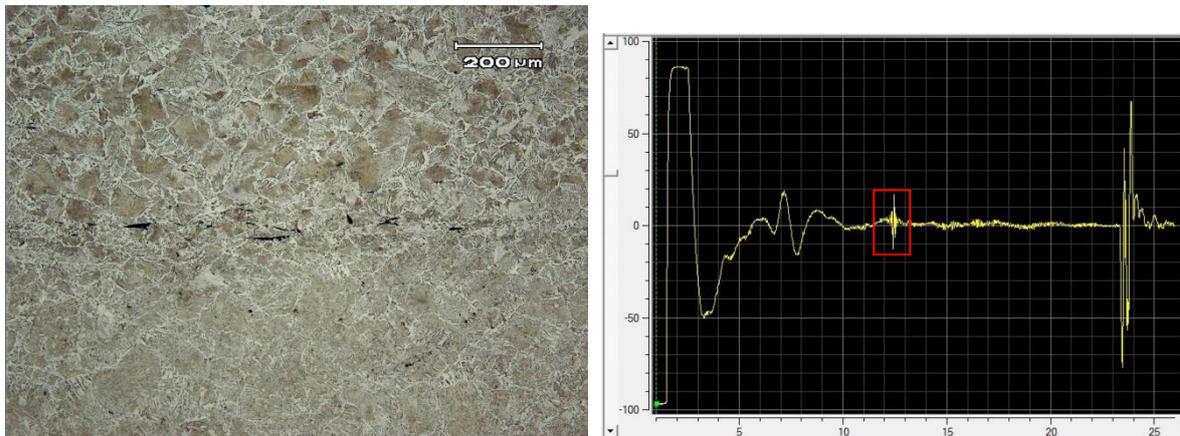


Figura 35: Regiões analisadas da solda com força axial de 300kN, amostra 1, em vermelho.

Na região “2” da Figura 35, junto a interface de ligação entre os dois materiais da solda foram encontradas pequenas inclusões de aproximadamente  $60\mu\text{m}$ , resultando em um sinal com baixa amplitude na altura da interface (Figura 36.(b)).



(a)

(b)

Figura 36. (a) Inclusões próximas a região de interface entre o pino e a chapa e (b) ecograma do ensaio de ultrassom (eixo das abscissas corresponde à amplitude do sinal ultrassônico em Volts e o das ordenadas ao tempo em microsegundos). Destacado em vermelho o sinal correspondente a micrografia.

Uma inclusão alongada na direção do fluxo de material também foi encontrada na região “1” da Figura 35, entretanto elas não foram detectadas pelo ensaio de ultrassom (Figura 37). A interface inclinada e as inclusões orientadas nesse sentido são de difícil inspeção com ondas de incidência axial.



Figura 37. (a) Inclusão encontrada junto a interface lateral da solda e próxima ao plano de incidência das ondas de ultrassom.

A amostra 1 da solda utilizando força axial de 300kN exibiu um número menor de inclusões. As inclusões encontradas se concentram perto da interface central da solda, além de alongadas na direção do fluxo de material na região da interface lateral da solda.

- Amostra 2:

A Figura 38 ilustra as regiões da solda com força axial de 300kN, amostra 2, analisadas.

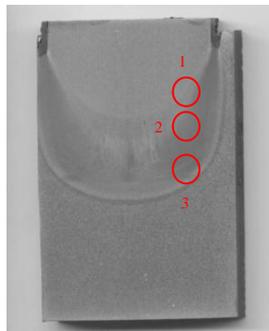


Figura 38: Regiões analisadas da solda com força axial de 300kN, amostra 2, em vermelho.

Em uma mesma análise com o ultrassom foram encontrados 3 sinais indicando defeitos em 3 alturas distintas. A Figura 39.(a) ilustra duas inclusões de até aproximadamente 200μm encontradas na região 1 da Figura 38. Essa região corresponde ao primeiro pico do ecograma (Figura 39.(b)).

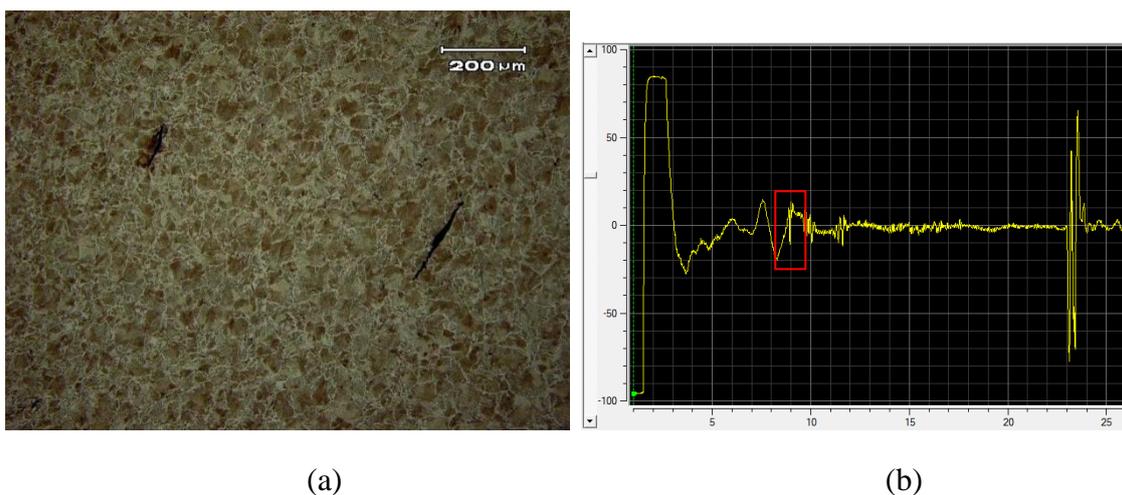


Figura 39. (a) Inclusões de até aproximadamente 200 $\mu$ m e (b) ecograma do ensaio de ultrassom (eixo das abscissas corresponde à amplitude do sinal ultrassônico em Volts e o das ordenadas ao tempo em microsegundos). Destacado em vermelho o sinal correspondente a micrografia.

Logo abaixo (região 2 da Figura 38) foram encontradas outras duas inclusões (Figura 40.(a)) junto a interface de união, de aproximadamente pouco mais de 200 $\mu$ m, alongadas na direção do fluxo de material. A diferença de altura entre elas resultou em um sinal um pouco disperso no ensaio de ultrassom (Figura 40(b)).

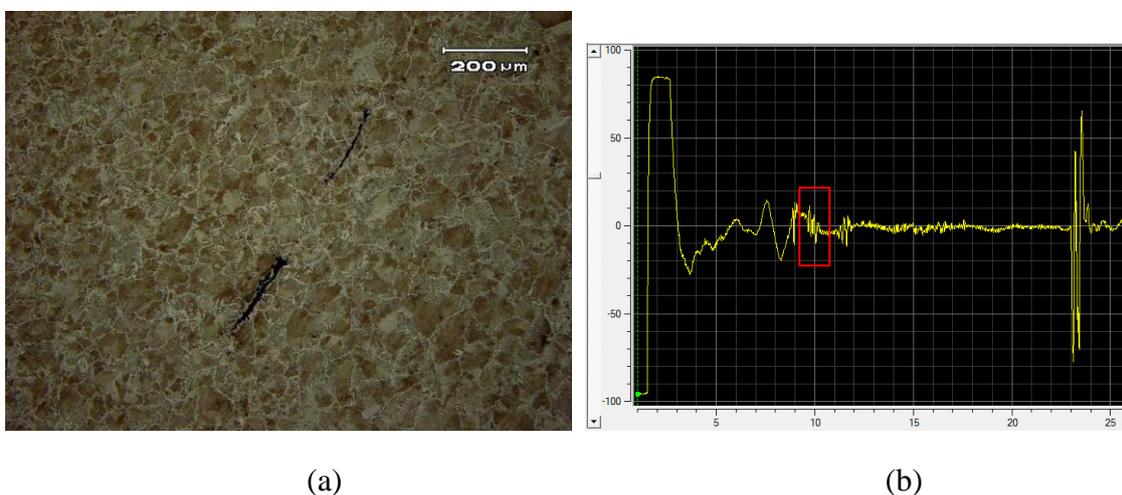


Figura 40. (a) Duas inclusões de até aproximadamente 200 $\mu$ m alongadas na direção do fluxo de material e (b) ecograma do ensaio de ultrassom (eixo das abscissas corresponde à amplitude do sinal ultrassônico em Volts e o das ordenadas ao tempo em microsegundos). Destacado em vermelho o sinal correspondente a micrografia.

As Figuras 41.(a) e (b) ilustram duas regiões adjacentes com defeito de falta de adesão na interface entre o material do pino e da chapa, localizadas na região “3” da Figura 38. Os micro-vazios da Figura 41.(b) contorna exatamente a interface do material que flui

plasticamente. O ecograma do ensaio de ultrassom correspondente a essa região é ilustrada na Figura 42. No ecograma é mostrado um sinal disperso devido a diferença de altura entre os defeitos.

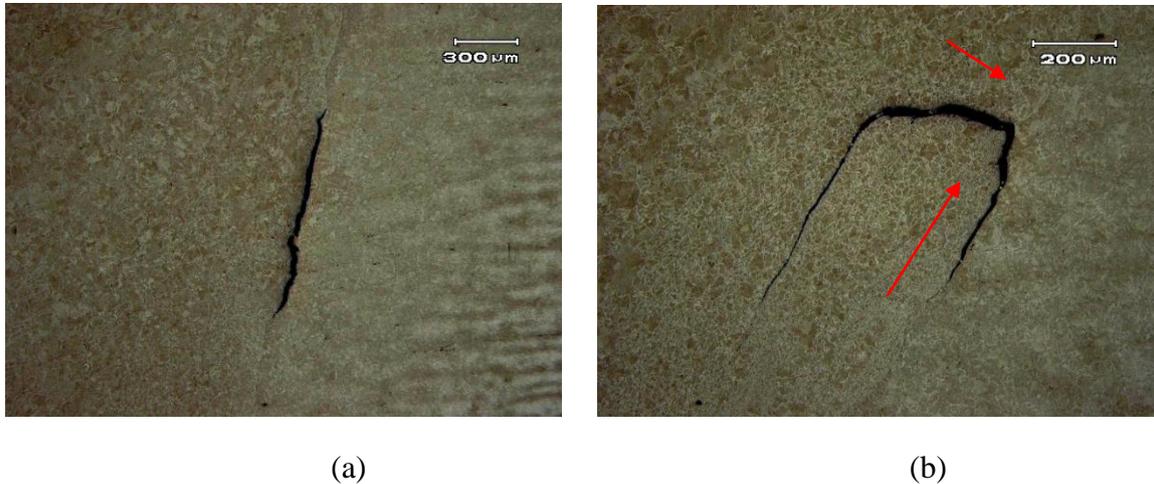


Figura 41.(a) e (b) Regiões adjacentes na interface entre o material do pino e da chapa com defeito de falta de adesão. As setas em vermelho indicam a direção do fluxo de material.

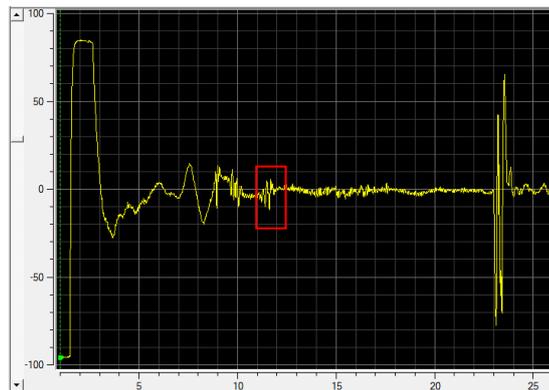


Figura 42. Ecograma do ensaio de ultrassom (eixo das abscissas corresponde à amplitude do sinal ultrassônico em Volts e o das ordenadas ao tempo em microsegundos). Destacado em vermelho, o sinal correspondente as Figuras 41.(a) e 41.(b).

A amostra 2 da solda utilizando força axial de 300kN mostrou poucas inclusões dispersas, porém algumas delas segregadas e alongadas na interface lateral de união. Também se verificou microtrincas no contorno do fluxo de material, na periferia da solda, caracterizando falta de adesão.

#### 4.2.4 Junta soldada com força axial de 350kN, aço ASTM A36, amostra 1:

A Figura 43 ilustra as regiões da solda com força axial de 350kN, amostra 1, analisadas.

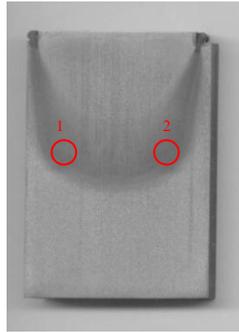


Figura 43: Regiões analisadas da solda com força axial de 350kN, amostra 1, em vermelho.

Na amostra 1 da solda feita com força axial de 350kN e pino de aço A36 foi encontrado micro-trincas com morfologia ramificada na região “1” da Figura 43, zona de fluxo plástico de material (Figura 44.(a)), resultando em um sinal de ultrassom espalhado (Figura 44.(b)).

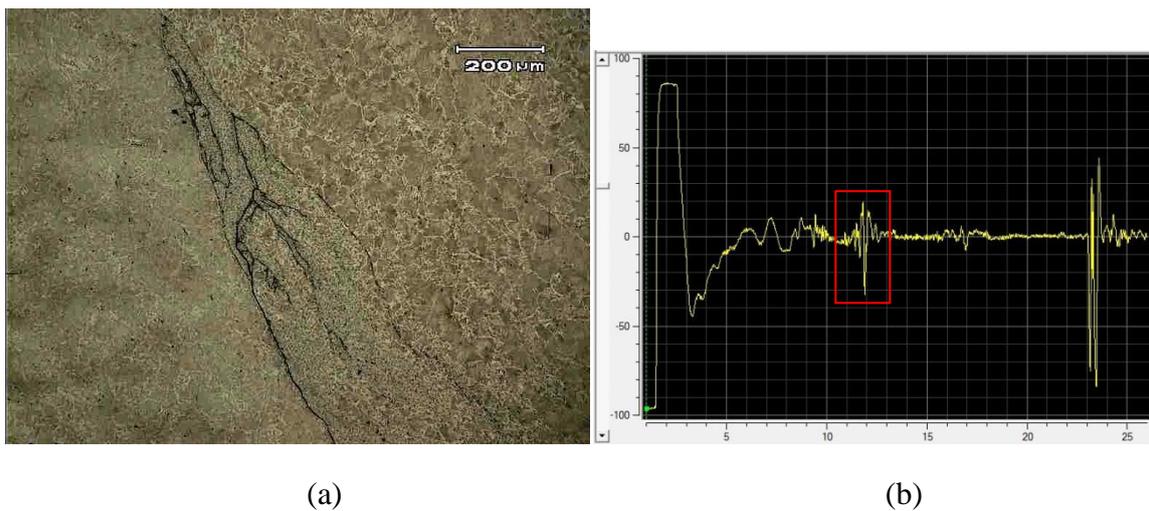


Figura 44. (a) Microtrincas com morfologia ramificada na região de fluxo plástico do material e (b) ecograma com sinal espalhado do ensaio de ultrassom (eixo das abscissas corresponde à amplitude do sinal ultrassônico em Volts e o das ordenadas ao tempo em microsegundos). Destacado em vermelho o sinal correspondente a micrografia.

Na outra extremidade periférica da solda (região “2” da Figura 43) também foi identificado o defeito de falta de adesão (Figura 45.(a)). O ecograma do ensaio de ultrassom correspondente também apresentou um sinal disperso (Figura 45.(b)).

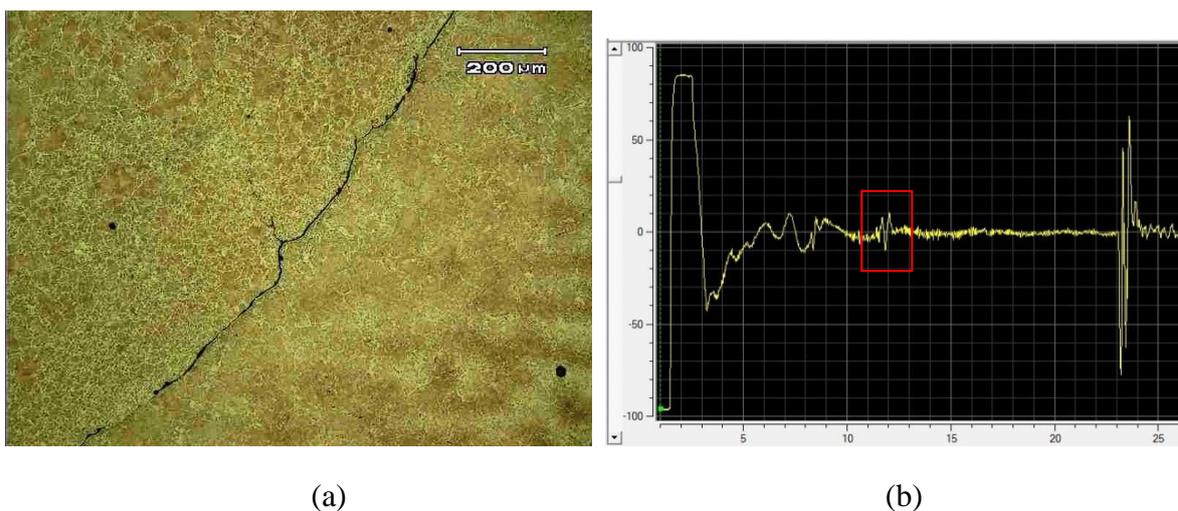


Figura 45. (a) Defeito de falta de adesão provocado por micro-vazios na interface de união entre os materiais e (b) ecograma do ensaio de ultrassom (eixo das abscissas corresponde à amplitude do sinal ultrassônico em Volts e o das ordenadas ao tempo em microsegundos). Destacado em vermelho o sinal correspondente a micrografia.

A amostra 1 da solda feita com força axial de 350kN e pino de aço ASTM A36 revelou falta de adesão coincidentemente em lados opostos do corpo de prova, visto que esse é um defeito pontual e pode se dar em qualquer região periférica ao longo de toda a circunferência da solda.

- Amostra 2:

A Figura 20 ilustra as regiões da solda com força axial de 350kN, amostra 2, analisadas.

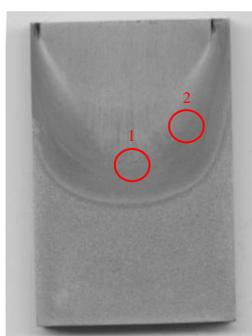


Figura 46: Regiões analisadas da solda com força axial de 350kN, amostra 2, em vermelho.

Na solda feita com força axial de 350kN e aço ASTM A36, amostra 2, foi encontrado uma inclusão alongada de aproximadamente 360μm (Figura 47.(a)) na região “2” da Figura 46. Devido ao seu tamanho o sinal de ultrassom correspondente apresentou grande amplitude (Figura 47.(b)).

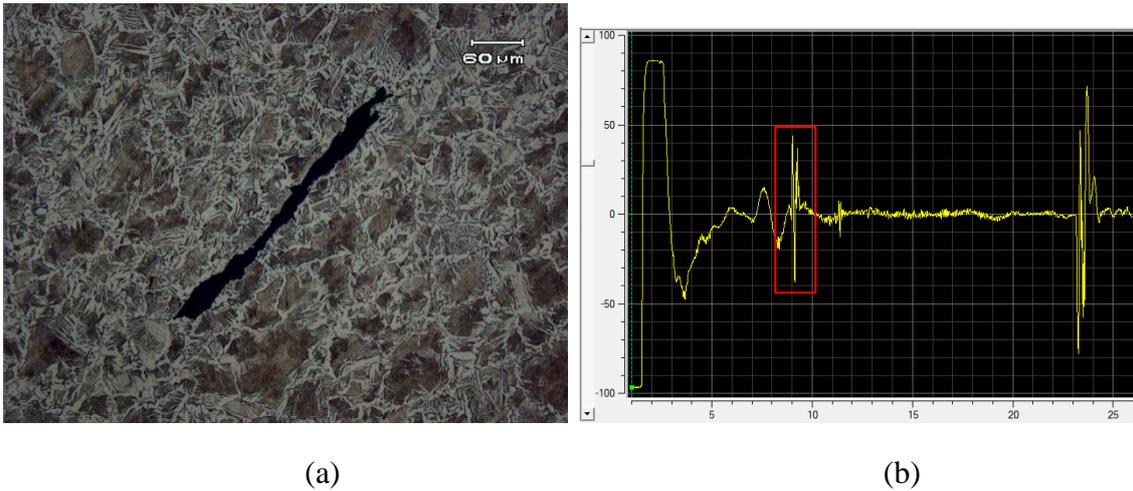


Figura 47. (a) Inclusão alongada de aproximadamente 360 $\mu$ m e (b) ecograma do ensaio de ultrassom (eixo das abscissas corresponde à amplitude do sinal ultrassônico em Volts e o das ordenadas ao tempo em microsegundos). Destacado em vermelho o sinal correspondente a micrografia, apresentando sinal com grande amplitude.

A Figura 48 ilustra o ecograma obtido na região “1” da Figura 46. Pode se observar um sinal disperso com vários picos bem definidos. Esse sinal abrange uma pequena região com diferentes alturas. Esses picos correspondem a diversas inclusões achatadas próximas entre si, mostradas na Figura 49 e Figura 50.

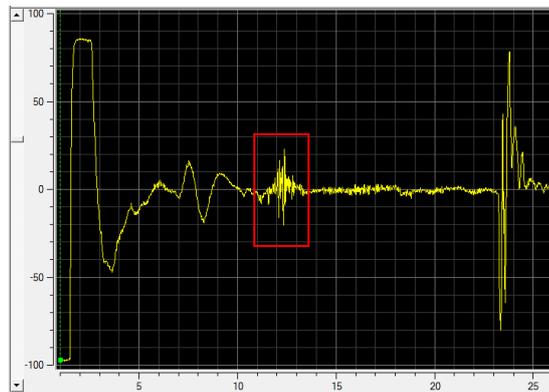


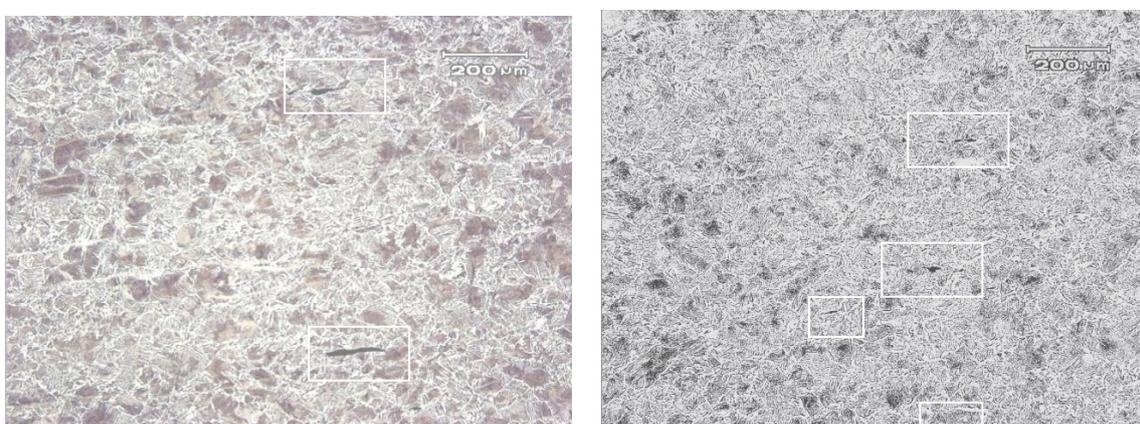
Figura 48. Ecograma do ensaio de ultrassom da região central (eixo das abscissas corresponde à amplitude do sinal ultrassônico em Volts e o das ordenadas ao tempo em microsegundos). Destacado em vermelho, o sinal correspondente as Figuras 46.(a) e 46.(b) e Figuras 47.(a) e 47.(b).



(a)

(b)

Figura 49. (a) e (b) Inclusões adjacentes encontradas na região central da solda, algumas delas destacadas em vermelho.



(a)

(b)

Figura 50. (a) e (b) Inclusões achatadas adjacentes encontradas na região central da solda, destacadas em branco.

A amostra 2 da solda feita com força axial de 350kN e aço ASTM A36 não apresentou microtrincas na interface de união. Houve a presença de diversas inclusões ao redor da região central da solda a diferentes alturas.

### 4.3 Soldas realizadas com pino de aço SAE 8620

#### 4.3.1 Junta soldada com força axial de 200kN, pino de aço SAE 8620, amostra 1:

A Figura 51 ilustra as regiões da solda com força axial de 200kN, amostra 1, analisadas.

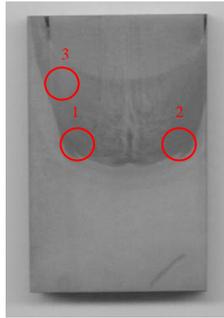


Figura 51: Regiões analisadas da solda com força axial de 200kN, amostra 1, em vermelho.

A amostra 1 da solda feita com força axial de 200kN e pino de aço SAE 8620 apresentou duas inclusões grandes, uma de aproximadamente 500 $\mu$ m, na região “2” da Figura 51, alongada na direção do fluxo de material (Figura 52.(a)) e a outra, na região “1” da Figura 51, de aproximadamente 250 $\mu$ m (Figura 53.(a)). Para essas inclusões verificou-se um sinal com um pico simples no ensaio de ultrassom (Figura 52.(b) e 53.(b)).

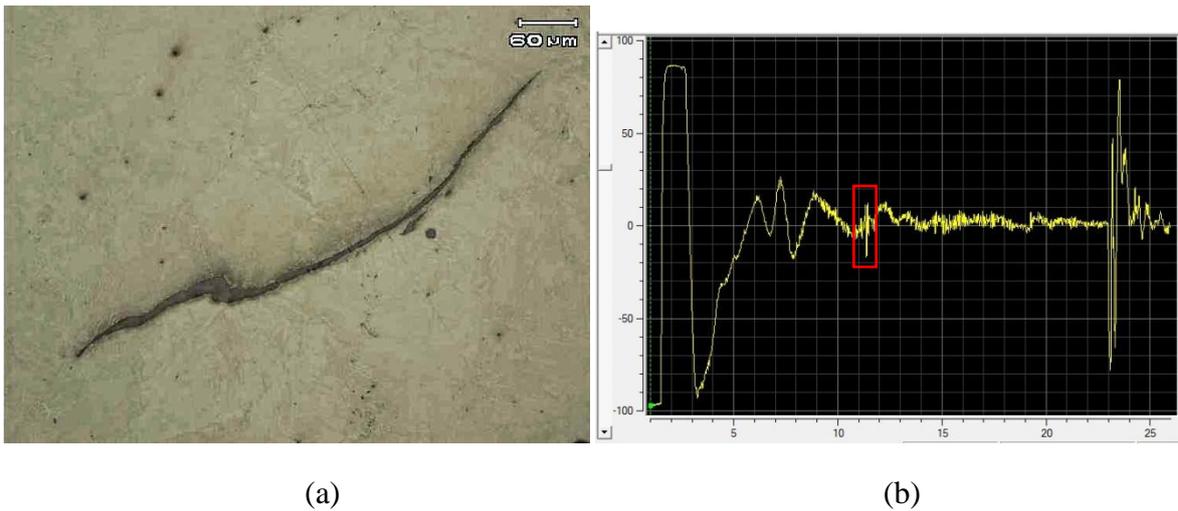


Figura 52. (a) Inclusão alongada de aproximadamente 500 $\mu$ m na direção do fluxo de material e (b) ecograma do ensaio de ultrassom (eixo das abscissas corresponde à amplitude do sinal ultrassônico em Volts e o das ordenadas ao tempo em microsegundos). Destacado em vermelho o sinal correspondente a micrografia.

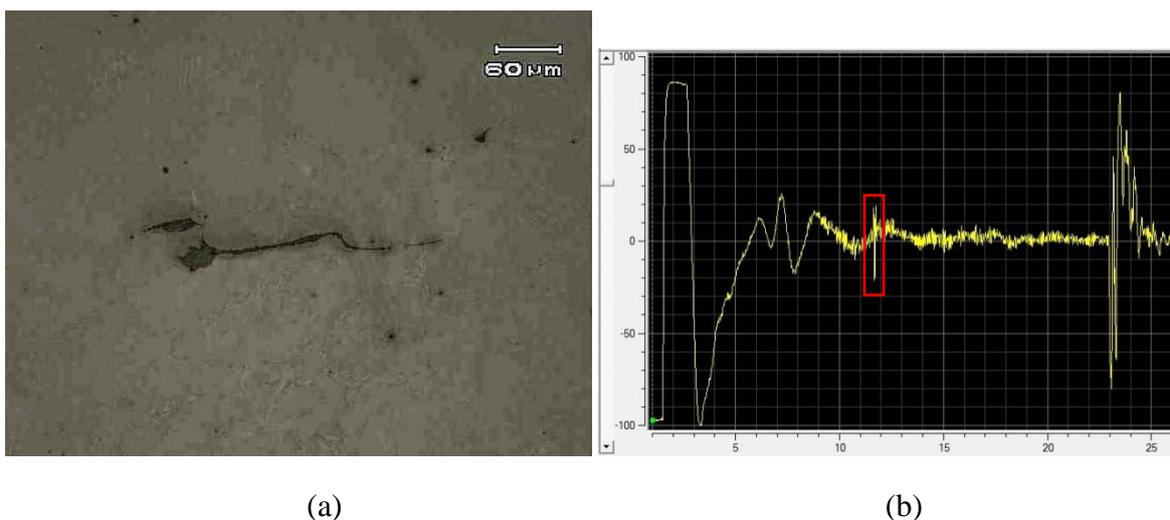


Figura 53. (a) Inclusão alongada de aproximadamente 250μm e (b) ecograma do ensaio de ultrassom (eixo das abscissas corresponde à amplitude do sinal ultrassônico em Volts e o das ordenadas ao tempo em microsegundos). Destacado em vermelho o sinal correspondente a micrografia.

Alguns micro-vazios foram encontrados contornando a interface do material que fluiu, na região “3” da Figura 51. Entretanto elas não foram distinguíveis pelo ensaio de ultrassom (Figura 54).



Figura 54. (a) Micro-vazios de até aproximadamente 20μm. As setas vermelhas indicam a direção do fluxo de material.

A amostra 1 da solda feita com força axial de 200kN e pino de aço SAE 8620 revelou algumas inclusões grandes de até 500μm e o defeito de falta de adesão. De um modo geral poucas inclusões foram encontradas.

- Amostra 2:

A Figura 55 ilustra as regiões da solda com força axial de 200kN, amostra 2, analisadas.

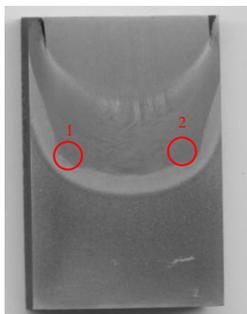


Figura 55: Regiões analisadas da solda com força axial de 200kN, amostra 2, em vermelho.

Na região “2” da Figura 55 foi encontrado uma inclusão espessa de até aproximadamente 60 $\mu$ m de altura e comprimento no plano de corte (Figura 56.(a)). O sinal do ensaio de ultrassom apresentou um pico com grande amplitude (Figura 56.(b)).

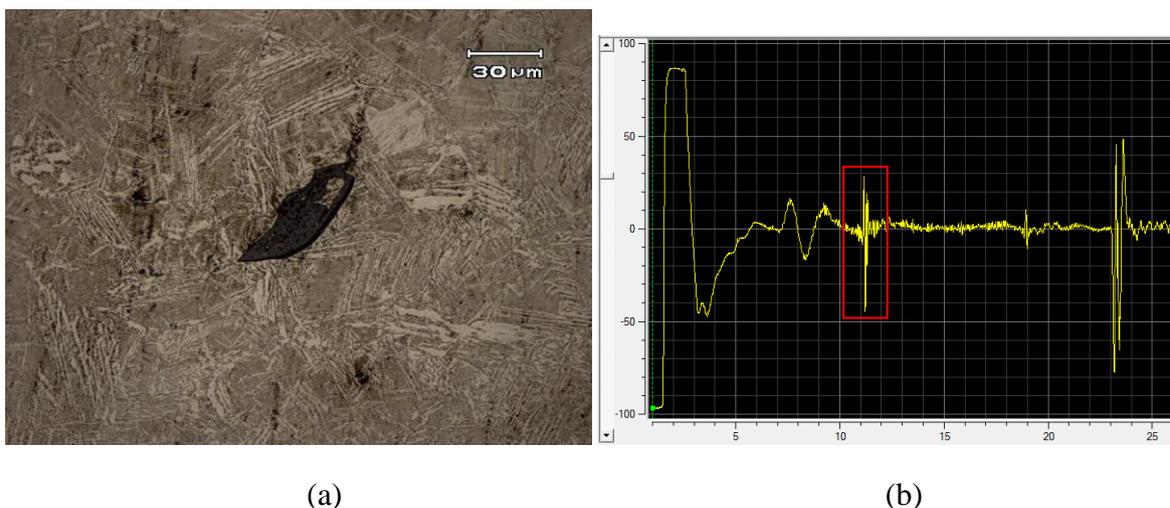


Figura 56. (a) Inclusão espessa de aproximadamente 60 $\mu$ m e (b) ecograma do ensaio de ultrassom (eixo das abscissas corresponde à amplitude do sinal ultrassônico em Volts e o das ordenadas ao tempo em microssegundos). Destacado em vermelho o sinal correspondente a micrografia.

Na região “1” da Figura 55 também foi encontradas algumas discontinuidades de até aproximadamente 20 $\mu$ m contornando a interface de união entre os materiais (Figura 57.(a)). O sinal do ensaio de ultrassom correspondente apresentou um sinal um pouco disperso devido a diferença de altura entre os defeitos (Figura 57.(b)).

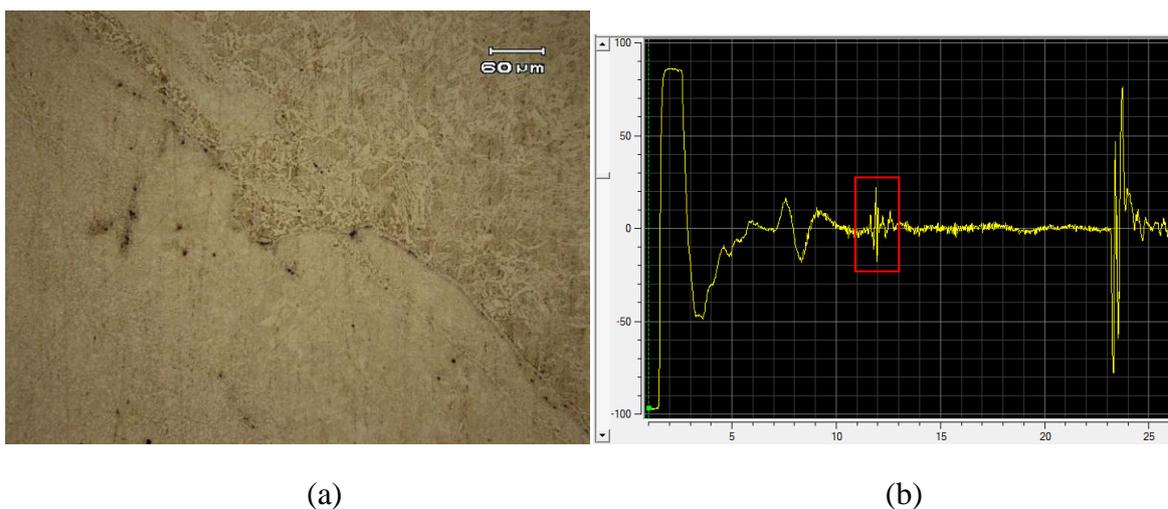


Figura 57. (a) Descontinuidades de aproximadamente 60μm e (b) ecograma do ensaio de ultrassom (eixo das abscissas corresponde à amplitude do sinal ultrassônico em Volts e o das ordenadas ao tempo em microsegundos). Destacado em vermelho o sinal correspondente a micrografia.

A amostra 2 da solda feita com força axial de 200kN e pino de aço SAE 8620 ficou caracterizada por pouca ocorrência de inclusões e pelo aparecimento de micro-vazios na interface de união, como na amostra 1.

#### 4.3.2 Junta soldada com força axial de 250kN, pino de aço SAE 8620, amostra 1:

A Figura 58 ilustra as regiões da solda com força axial de 250kN, amostra 1, analisadas.

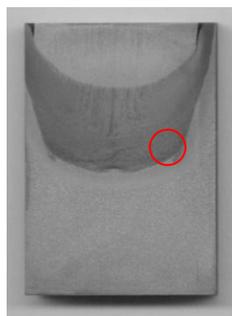


Figura 58: Região analisada da solda com força axial de 250kN, amostra 1, em vermelho.

Na amostra 1 foi encontrada uma inclusão espessa de aproximadamente 150μm de comprimento, orientada na direção do fluxo de material (Figura 59.(a)). O ensaio de ultrassom correspondente apresentou um pico bem definido (Figura 59.(b)).

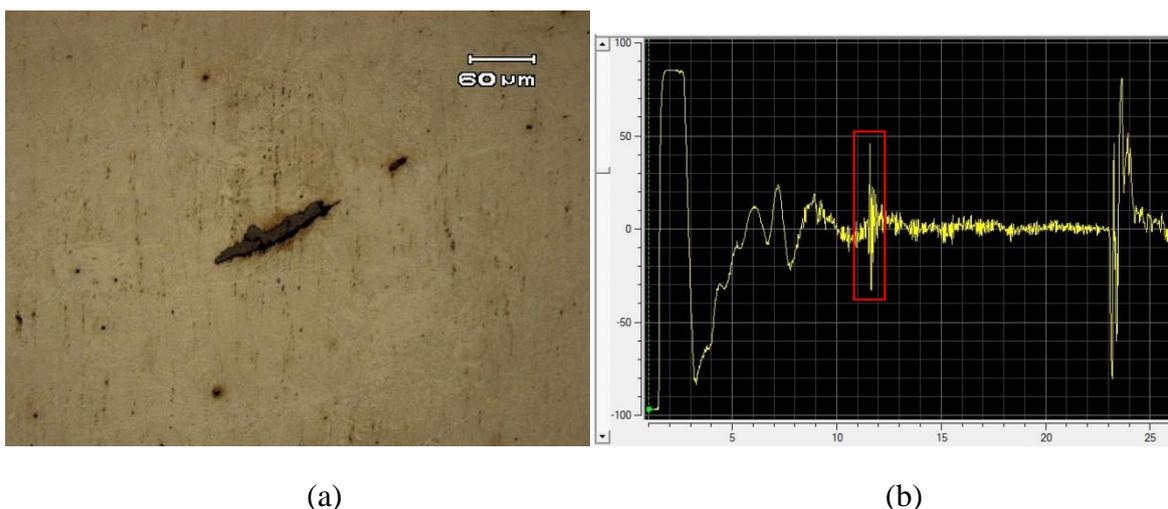


Figura 59. (a) Inclusão espessa de aproximadamente 150μm e (b) ecograma do ensaio de ultrassom (eixo das abscissas corresponde à amplitude do sinal ultrassônico em Volts e o das ordenadas ao tempo em microsegundos). Destacado em vermelho o sinal correspondente a micrografia.

A amostra 1 da solda feita com força axial de 250kN e pino de aço SAE 8620 apresentou poucas inclusões dispersas.

- Amostra 2:

A Figura 60 ilustra as regiões da solda com força axial de 250kN, amostra 2, analisadas.

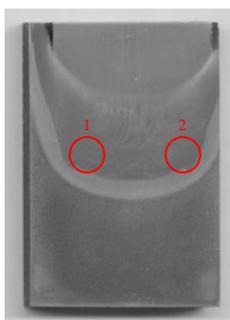


Figura 60: Regiões analisadas da solda com força axial de 250kN, amostra 2, em vermelho.

Na região “1” da Figura 60 na amostra 2 foi encontrada uma inclusão achatada de aproximadamente 300μm (Figura 61.(a)). O sinal do ensaio de ultrassom correspondente apresentou um pico isolado bem definido (Figura 61.(b)).

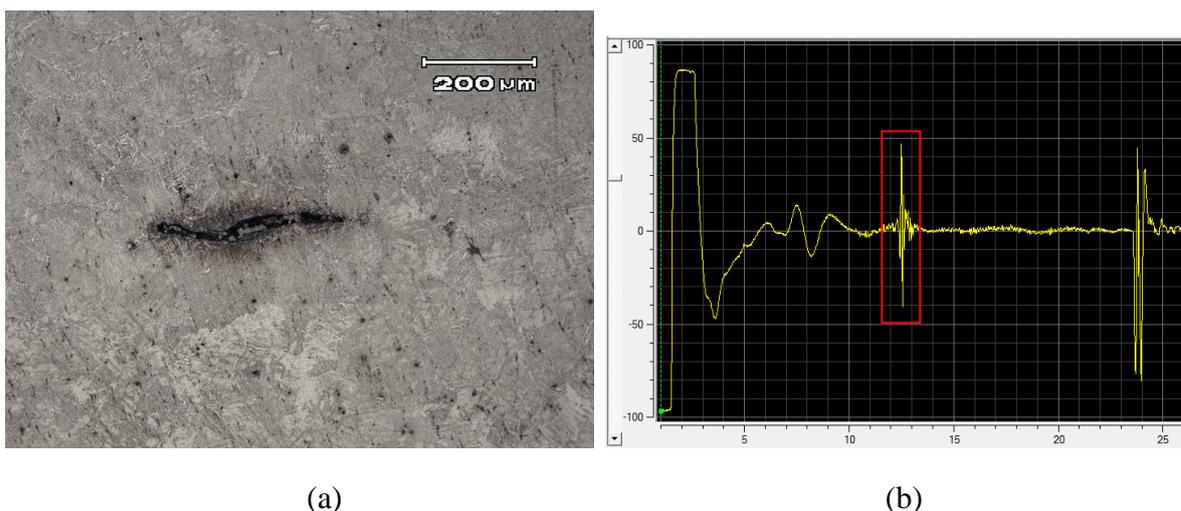


Figura 61. (a) Inclusão achatada de aproximadamente 300μm e (b) ecograma do ensaio de ultrassom (eixo das abscissas corresponde à amplitude do sinal ultrassônico em Volts e o das ordenadas ao tempo em microsegundos). Destacado em vermelho o sinal correspondente a micrografia.

Na região da Figura 60 também foi verificada inclusões achatadas orientadas na direção do fluxo de material (Figura 62.(a)). O sinal do ensaio de ultrassom correspondente apresentou dois picos muito próximos devido a pequena diferença de altura entre as inclusões (Figura 62.(b)).

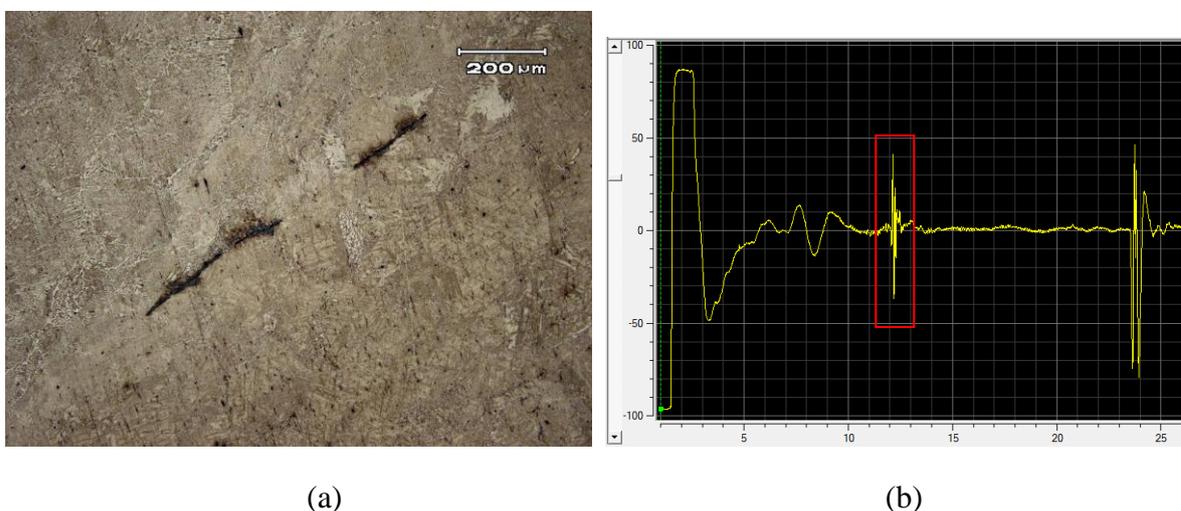


Figura 62. (a) Inclusões achatadas orientadas na direção do fluxo de material e (b) ecograma do ensaio de ultrassom apresentando dois picos muito próximos (eixo das abscissas corresponde à amplitude do sinal ultrassônico em Volts e o das ordenadas ao tempo em microsegundos). Destacado em vermelho o sinal correspondente a micrografia.

A amostra 2 da solda feita com força axial de 300kN e pino de aço SAE 8620 não apresentou micro-vazios na interface de união, assim como a amostra 1, porém houve a ocorrência de inclusões achatadas de até aproximadamente 300μm.

### 4.3.3 Junta soldada com força axial de 300kN, pino de aço SAE 8620, amostra 1:

A Figura 63 ilustra as regiões da solda com força axial de 300kN, amostra 1, analisadas.

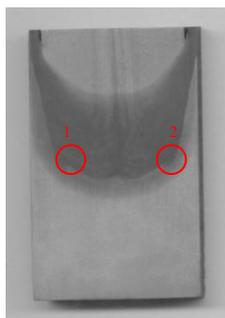
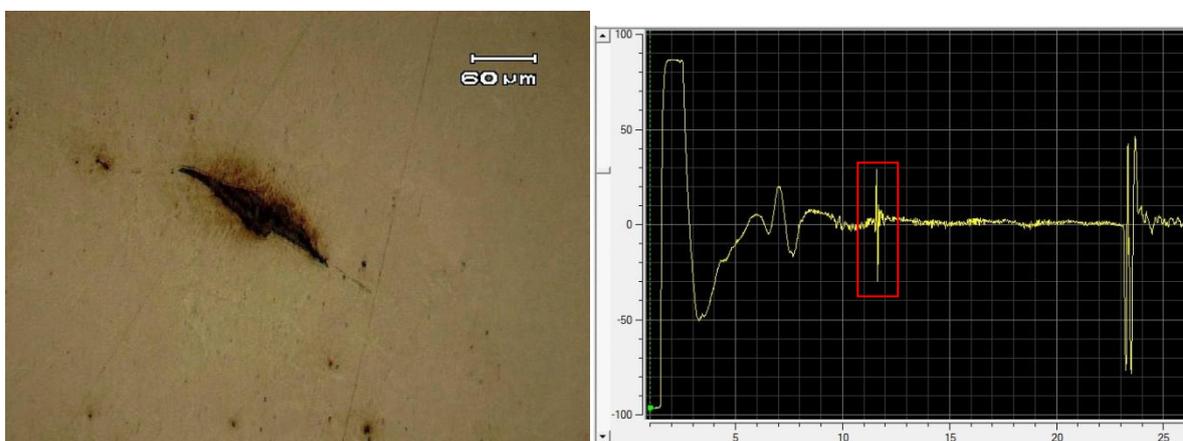


Figura 63: Regiões analisadas da solda com força axial de 300kN, amostra 1, em vermelho.

Na região “1” da Figura 63, amostra 1, foi encontrada inclusão espessa de aproximadamente  $200\mu\text{m}$ , orientada na direção do fluxo de material (Figura 64.(a)). O ensaio de ultrassom apresentou um pico bem definido nessa região (Figura 64.(b)).



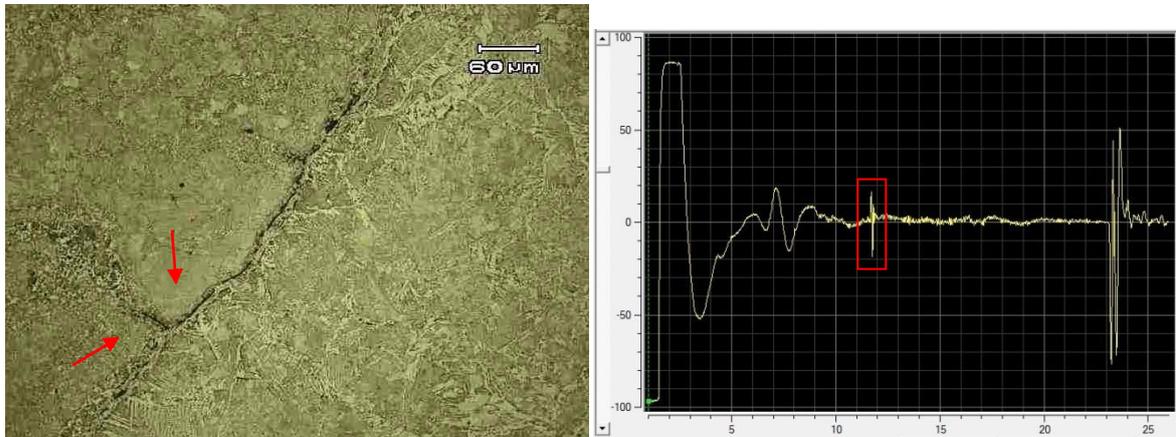
(a)

(b)

Figura 64. (a) Inclusões espessa de aproximadamente  $200\mu\text{m}$  orientada na direção do fluxo de material e (b) ecograma do ensaio de ultrassom apresentando um pico bem definido (eixo das abscissas corresponde à amplitude do sinal ultrassônico em Volts e o das ordenadas ao tempo em microssegundos). Destacado em vermelho o sinal correspondente a micrografia.

Já na região “2” da Figura 63, ainda na amostra 1, houve a ocorrência de micro-vazios no contorno da interface de união do material que fluiu. Esses vazios chegam a ter

aproximadamente  $60\mu\text{m}$  de comprimento (Figura 65.(a)). O sinal do ensaio de ultrassom característico apresentou um pequeno sinal (Figura 65.(b)).



(a)

(b)

Figura 65. (a) Micro-vazios de aproximadamente  $60\mu\text{m}$  contornando a interface entre os materiais. As setas em vermelho indicam o fluxo de material. (b) ecograma do ensaio de ultrassom (eixo das abscissas corresponde à amplitude do sinal ultrassônico em Volts e o das ordenadas ao tempo em microsegundos). Destacado em vermelho o sinal correspondente a micrografia.

A amostra 1 da solda feita com força axial de  $350\text{kN}$  e pino de aço SAE 8620 apresentou poucas inclusões, entretanto foi detectado micro-vazios na periferia da junta soldada.

- Amostra 2:

A Figura 66 ilustra a região da solda com força axial de  $300\text{kN}$ , amostra 2, analisada.

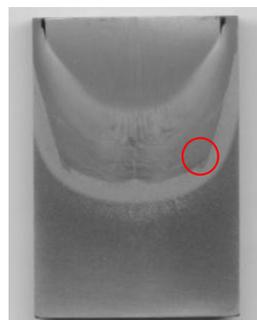


Figura 66: Região analisada da solda com força axial de  $300\text{kN}$ , amostra 2, em vermelho.

Na amostra 1 foram encontrados discontinuidades de até aproximadamente  $60\mu\text{m}$  contornando a interface de união dos materiais (Figura 68.(a)). Esses defeitos originaram um pequeno sinal no ensaio de ultrassom (Figura 68.(b)).

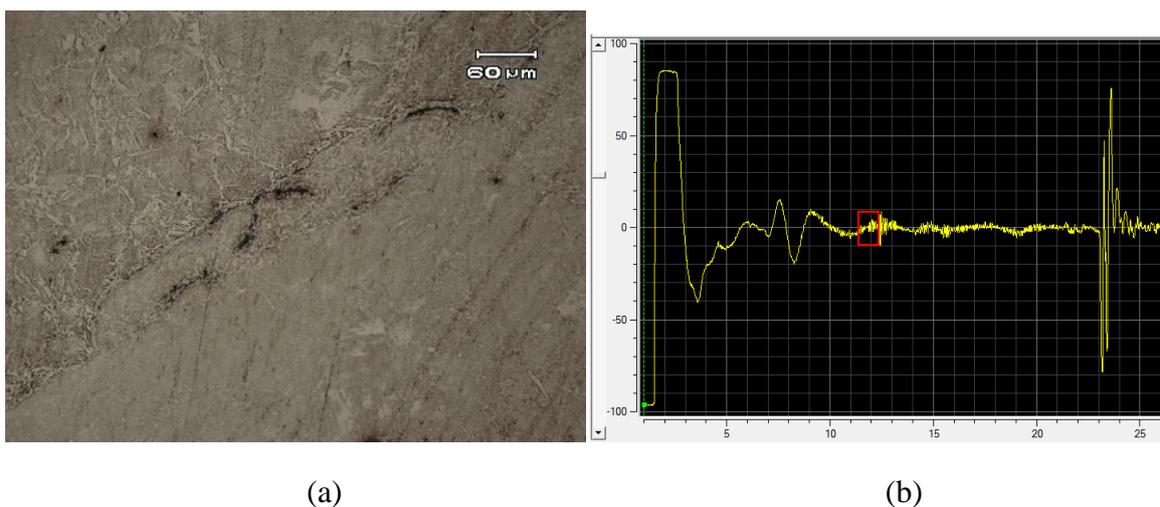


Figura 67. (a) Descontinuidades de aproximadamente 60µm contornando a interface entre os materiais e (b) ecograma do ensaio de ultrassom (eixo das abscissas corresponde à amplitude do sinal ultrassônico em Volts e o das ordenadas ao tempo em microsegundos). Destacado em vermelho o sinal correspondente a micrografia.

A amostra 2 da solda feita com força axial de 300kN e pino de aço SAE 8620 apresentou poucas incidência de inclusões. Foi encontrado micro-vazios contornando a interface de união dos materiais.

#### 4.3.4 Junta soldada com força axial de 350kN, pino de aço SAE 8620, amostra 1:

A Figura 68 ilustra a região da solda com força axial de 350kN, amostra 1, analisada.

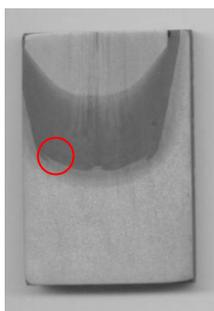


Figura 68: Região analisada da solda com força axial de 350kN, amostra 1, em vermelho.

A amostra 1 apresentou dois picos no ensaio de ultrassom (Figura 69.(b)), sendo um deles referente a uma inclusão de aproximadamente 500µm encontrada na região do ensaio (Figura 69.(a)).

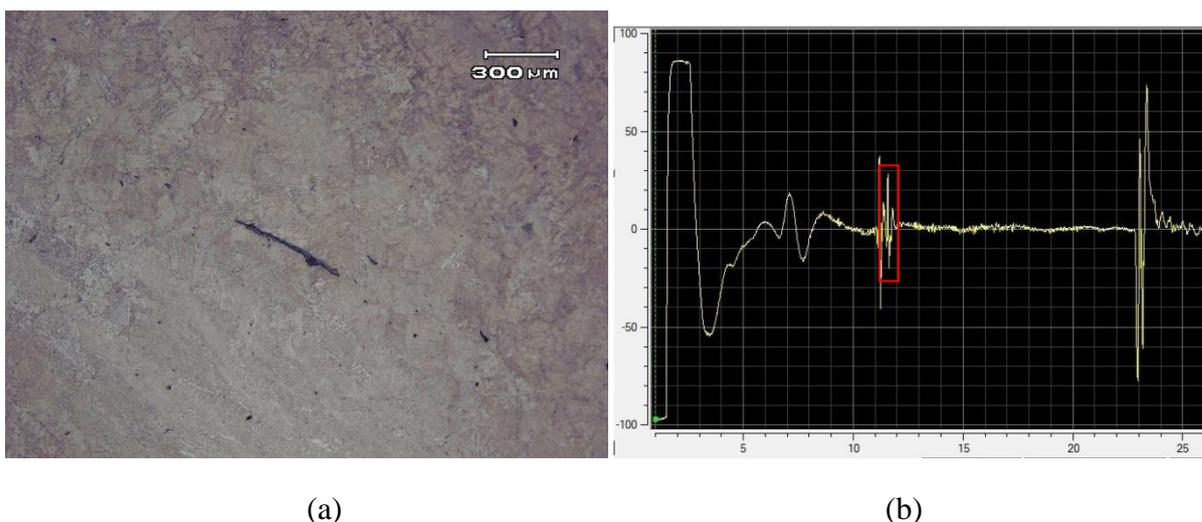


Figura 69. (a) Inclusão isolada de aproximadamente 500μm com formato achatado e (b) ecograma do ensaio de ultrassom (eixo das abscissas corresponde à amplitude do sinal ultrassônico em Volts e o das ordenadas ao tempo em microsegundos). Destacado em vermelho o sinal correspondente a micrografia.

A amostra 1 da solda feita com força axial de 350kN e pino de aço SAE 8620 apresentou poucas incidência de inclusões e nenhum defeito associado a vazios.

- Amostra 2:

A Figura 70 ilustra a região da solda com força axial de 350kN, amostra 2, analisada.

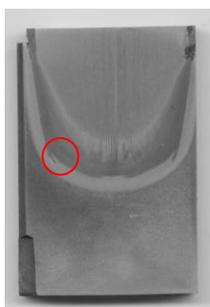
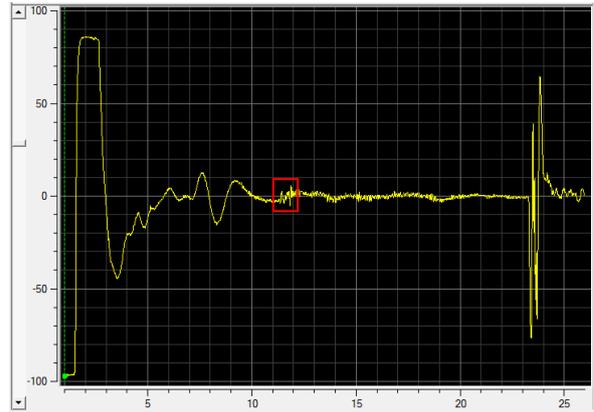


Figura 70: Região analisada da solda com força axial de 350kN, amostra 2, em vermelho.

A amostra 2 apresentou micro-trincas na interface dos materiais (Figura 71.(a)). O ensaio de ultrassom apresentou um sinal um pouco disperso correspondente a extensão do defeito (Figura 71.(b)).



(a)



(b)

Figura 71. (a) Micro-trincas na interface entre os materiais e (b) ecograma do ensaio de ultrassom, apresentando um sinal um pouco disperso (eixo das abscissas corresponde à amplitude do sinal ultrassônico em Volts e o das ordenadas ao tempo em microsegundos). Destacado em vermelho o sinal correspondente a micrografia.

## 5.0 DISCUSSÃO

Nas soldas produzidas pôde se verificar 3 regiões com características distintas com relação aos eventuais defeitos e inclusões.

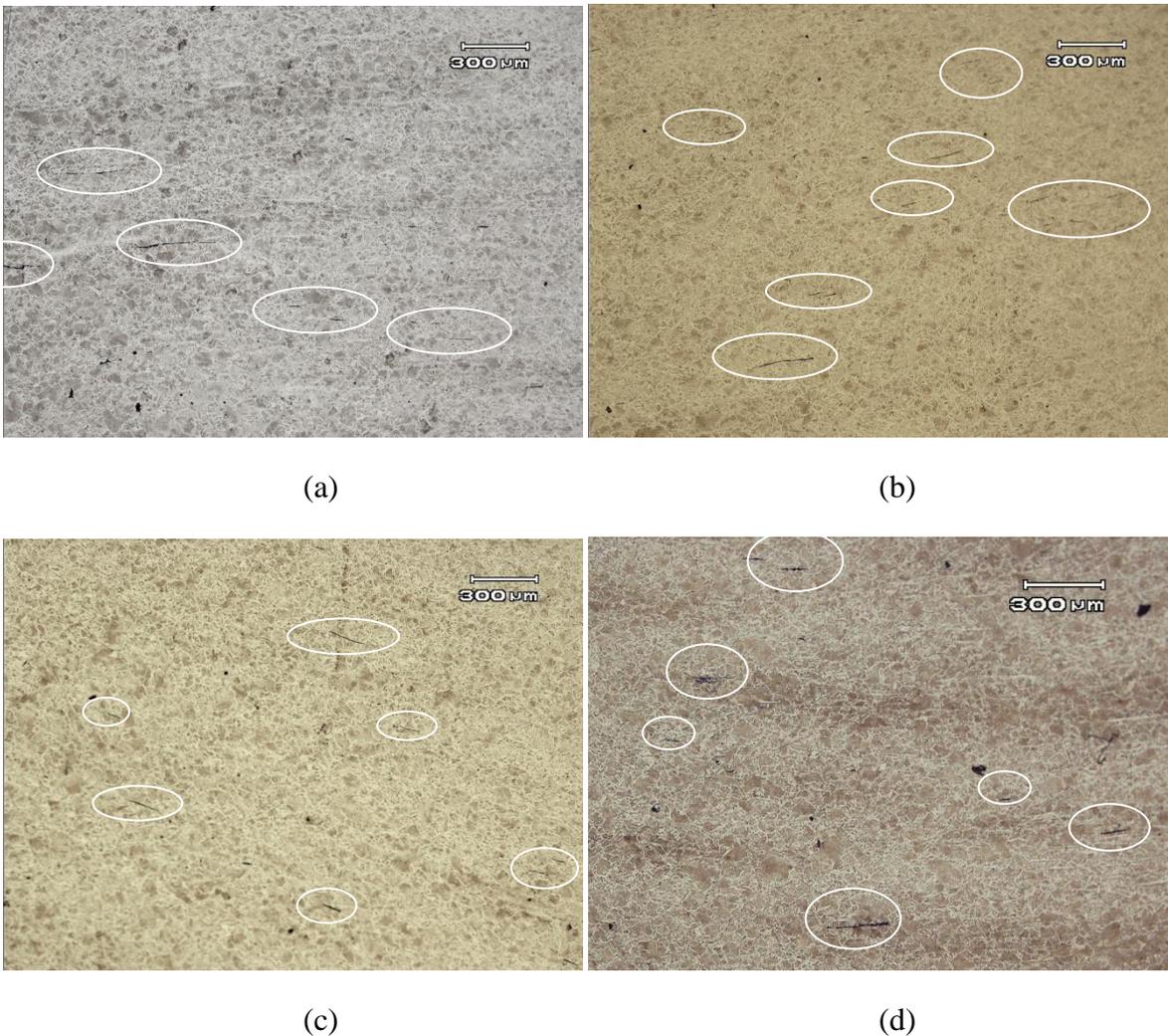
- Região central, junto à interface de união entre os materiais: nessa região verificou-se maior incidência de inclusões achatadas. Esse fato pode ser explicado pelo fato de que as inclusões provenientes do pino se concentram na região central devido aos processos de fabricação e a limpeza do aço. O sinal do ensaio de ultrassom se caracteriza por apresentar picos bem definidos, correspondentes as inclusões nesses casos.

- Região do raio de curvatura do furo: região caracterizada pela eventual presença de micro-vazios e micro-trincas, constituindo o defeito de falta de adesão. Nessa região ocorre uma mudança na direção do fluxo de material mais acentuada. O defeito de falta de adesão ocorreu eventualmente e aleatoriamente ao longo do raio de curvatura de todo o furo. O sinal do ensaio de ultrassom nesse caso se caracteriza por apresentar um sinal mais disperso devido a abrangência do defeito. Também nessa região foram encontradas eventuais inclusões.

- Região junto a interface lateral da solda: região caracterizada pela eventual ocorrência de inclusões alongadas na direção do fluxo plástico de material. O sinal do ensaio de ultrassom se caracteriza por apresentar picos com menor amplitude devido a orientação das inclusões e pela maior distância do foco do transdutor.

## 5.1 Modificação de inclusões

Em diversas amostras de soldas produzidas com o pino de aço ASTM A36 foram encontrados aglomerados de inclusões achatadas nas redondezas da região central da junta soldada, além de algumas inclusões alongadas na direção do fluxo de material junto as interfaces laterais da solda. Essas inclusões se originam na eventual presença de linhas de inclusões alongadas nos pinos de aço ASTM A36, conforme Figura 16. Devido a uma deformação rotacional essas inclusões adquirem forma espiral, similarmente aos marcadores da Figura 5, mostrado em [12], demonstrando que o material interno do pino sofre alta deformação rotacional ao invés de produzir uma série de planos cisalhantes. As micrografias dos cortes planares do pino ilustram essas inclusões.



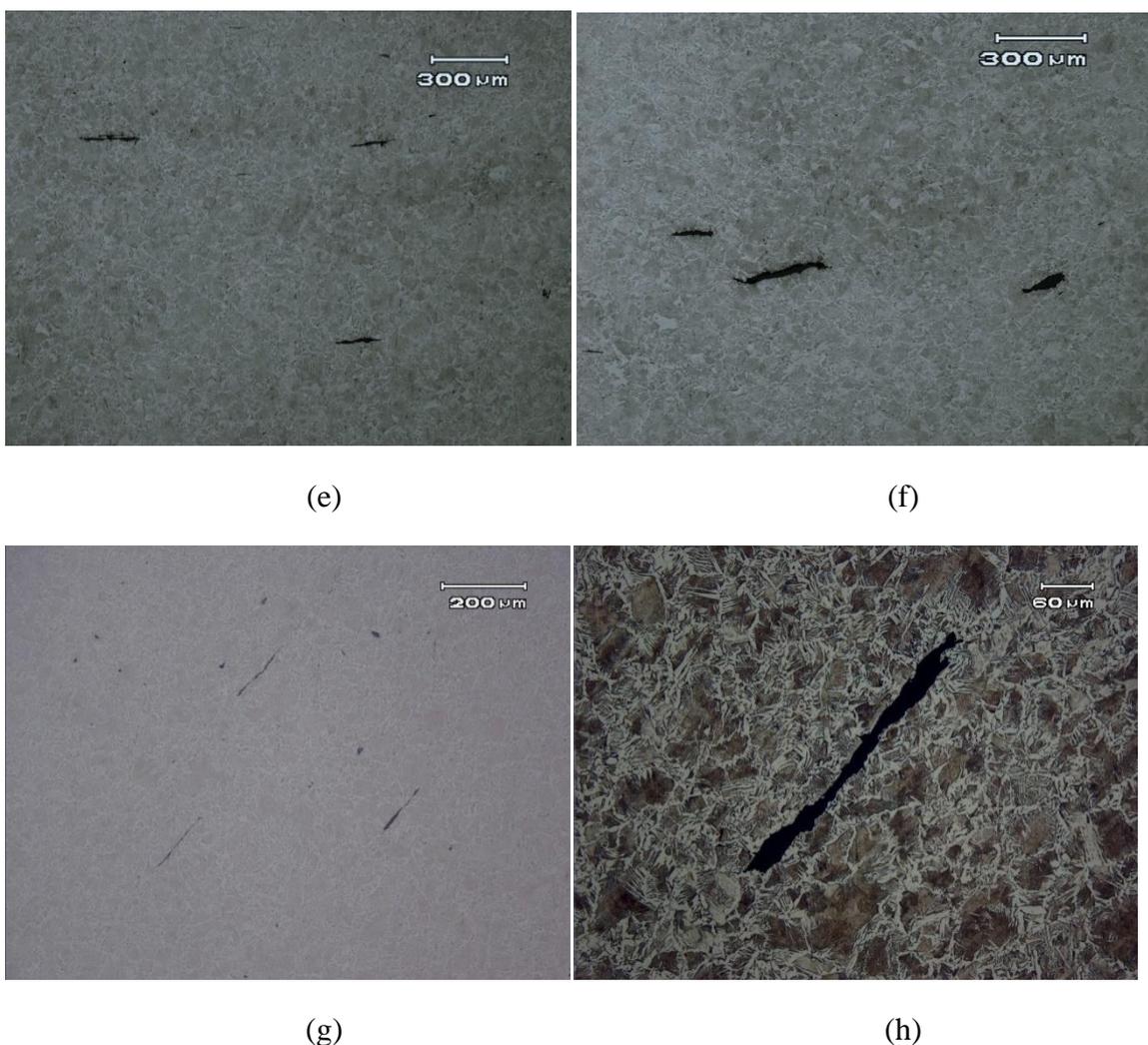
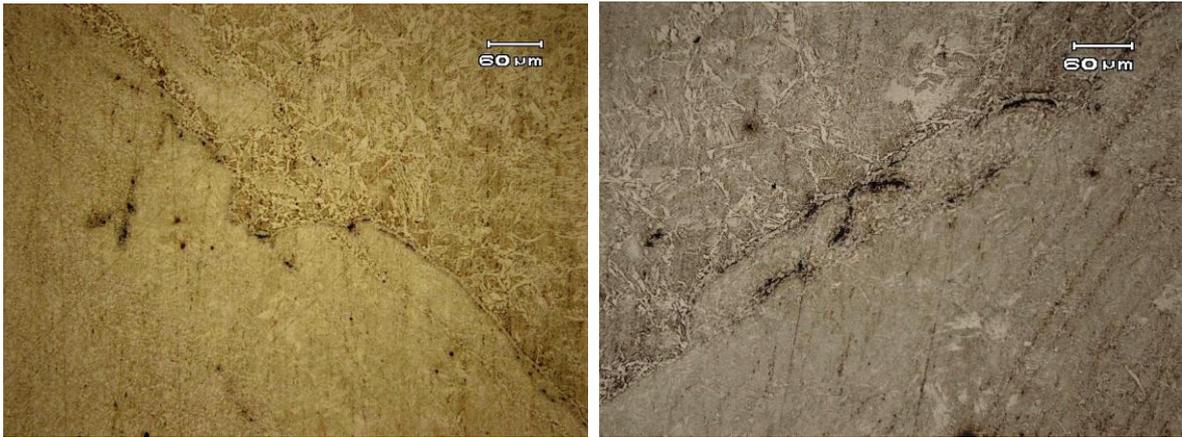


Figura 72. (a-f) Amostras com segregação de inclusões achatadas no entorno da região central da solda. Soldas realizadas com: (a-c) 200kN e pino de aço A36; (d-f) 250kN e pino de aço A36; (g,h) 250kN e 350kN, respectivamente, ambas com pino de aço A36 com inclusões alongadas no sentido do fluxo de material junto a interface lateral da solda.

Esses aglomerados de inclusões achatadas foram encontradas apenas em pinos de aço ASTM A36 como era de se esperar, por ter um controle baixo de inclusões além das linhas de inclusões observadas na Figura 16.

## 5.2 Descontinuidades na região do raio de curvatura inferior

Em algumas amostras foi verificada a presença de descontinuidades justamente ao redor da interface do material que fluiu plasticamente. Esse fato pôde ser observado em menores e maiores escalas. A Figura 73.(a) mostra descontinuidades não maiores do que 20μm em comprimento ao redor da interface de união. Na Figura 73.(b) já é possível observar descontinuidades de até 60μm acompanhando a linha da interface de união.

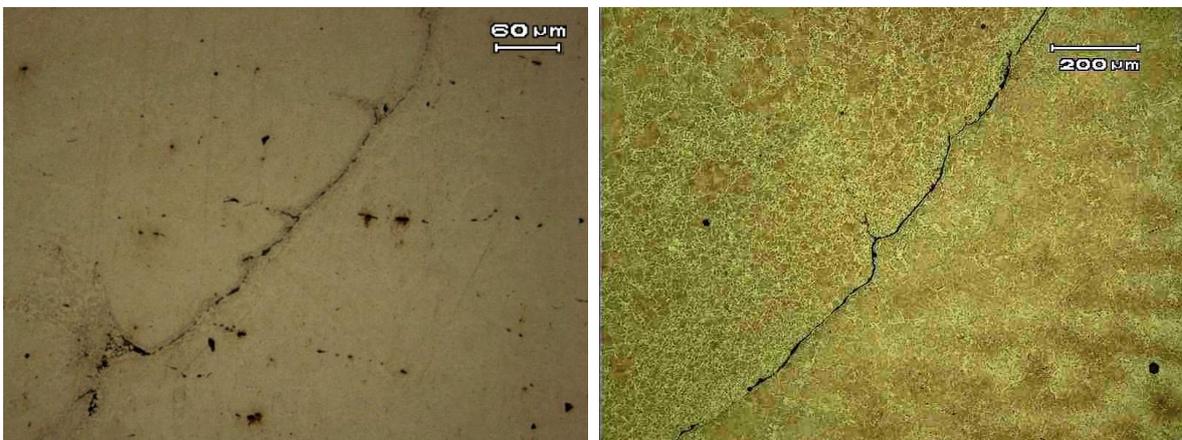


(a)

(b)

Figura 73. (a) Amostra com presença de descontinuidades do que 20 $\mu$ m em comprimento ao redor da interface de união e (b) amostra descontinuidades de até 60 $\mu$ m acompanhando a linha da interface de união.

Nas Figuras 73.(a) já é possível notar descontinuidades preenchendo quase que toda a linha da interface, e na Figura e 74.(a) e 75.(a) descontinuidades contornando exatamente o material que fluiu.



(a)

(b)

Figura 74 (a) Amostra com descontinuidades não maiores do que 50  $\mu$ m isoladamente, mas contornando quase que totalmente a linha da interface de união e (b) amostra com microtrincas na interface de união.



Figura 75. (a) Amostra com descontinuidades pontuais não maiores do que 30 $\mu$ m contornando a interface do material que fluiu, indicado pelas setas vermelhas e (b) amostra com microtrincas na interface de união com aspecto ramificado.



Figura 76. (a) Amostra com vazios lineares com tamanho superior a 200 $\mu$ m contornando a interface do material que fluiu, indicado pelas setas vermelhas e (b) amostra com microtrincas na interface de união.

Devido as tensões envolvidas no processo de soldagem (força axial, dilatação e contração térmica, tensões internas residuais) as descontinuidades, por atuarem como concentradores de tensões (efeito mais ou menos acentuado de acordo com a morfologia), podem estar nucleando micro trincas no seu entorno, como as encontradas nas Figuras 74.(b), 75.(b) e 76.(b), caracterizando falta de união na interface.

Finalmente essas micro trincas podem propagar e gerar maior falta de união, como encontrado na Figura 77.



Figura 77. (a) Amostra com trinca com extensão superior a 1mm contornando a interface do material que fluiu.

As discontinuidades encontradas nessa região não afetam toda a circunferência do raio de curvatura inferior. Ocorreram pontualmente e de forma aleatória, apesar da simetria radial do processo. Entretanto a união feita com força axial de 250kN não apresentou essa discontinuidade. Como a geração de calor e tempo de processamento são maiores utilizando forças menores, com forças maiores o calor gerado e o tempo para a difusão podem não ser suficientes para uma união completa entre os materiais, enquanto que com forças menores o fluxo de material na interface pode ser excessivo dentro do reparo. Forças muito baixas e muito altas têm probabilidade maior de produzir falta de união localmente.

## 6.0 CONCLUSÕES

- As geometrias da chapa e do pino testadas nas soldas, juntamente com a programação de soldagem adotada, não apresentaram macro defeitos como vazios e falta de preenchimento para todas as forças axiais testadas.

- A análise dos padrões dos sinais de ultrassom e as micrografias permitiram localizar e diferenciar inclusões deformadas e falta de união na interface entre o pino e a chapa nos reparos FHPP. Inclusões aparecem achatadas, isoladas ou aglomeradas e em algumas regiões orientadas na direção do fluxo de material. Falta de união na região do raio de curvatura inferior ocorre pontualmente e aleatoriamente ao longo da circunferência do furo, por esse motivo ensaios mecânicos para avaliar o reparo devem abranger toda a união. O reparo feito com força axial de 250kN não apresentou esse defeito.

- O ensaio de ultrassom mostrou grande potencial de aplicação em FHPP, detectando diversas descontinuidades em regiões críticas da junta soldada. Foi visto que aglomerados de inclusões achatadas produzem reflexões ultrassônicas caracterizadas por sucessivos picos; falta de união na região do raio de curvatura inferior apresenta sinais dispersos de reflexão; inclusões isoladas apresentam uma reflexão caracterizada por um pico isolado no ecograma.

- Eventuais linhas de inclusões oriundas dos pinos de aço ASTM A36 deformam em espiral durante a soldagem, assim como o material interno do pino em vez de produzir uma série de planos cisalhantes.

- Nas soldas utilizando o pino de aço SAE 8620 também foram encontradas inclusões segregadas, porém em menor número comparado ao pino de aço ASTM A36. Nelas não foram encontradas aglomerados de inclusões.

## **7.0 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

- Aumentar a amostragem para o estudo de defeitos e inclusões;
- Avaliar a influência do comprimento de queima na segregação de inclusões;
- Projetar ensaios mecânicos que avaliem a qualidade da solda tendo em vista os possíveis defeitos e inclusões que podem ocorrer;
- Realizar ensaios com transdutores angulares a fim de detectar descontinuidades com orientação desfavorável para o transdutor normal utilizado.

## 8.0 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] NICHOLAS, E. D. “Friction processing technologies”. *Welding in the World*, v. 47, n. 11-12, p. 2-9, Nov./Dec. 2003.
- [2] MEYER, A. Friction Hydro Pillar Processing. Dr.-Ing. Thesis an der Technischen Universität Braunschweig, Hamburg, 2002
- [3] TWI, Leading Edge, “Friction Hydro Pillar Processing”, Connect, Jun 1992.
- [4] JARDIM, M. P.; GONÇALVES, R. A.; PAES, M. T. P.; PIRES, R. R.; FRANCO, V. L. D. S.; FRANCO, S. D. “*Efeito da geometria do pino e do furo no reparo por atrito – resultados preliminares*”, *Tecnologia em Metalurgia e Materiais, São Paulo*, v.4, n.2, p. 27-32, out.-dez. 2007 27
- [5] PIRES, R. R. “Efeito da geometria, da força axial e da rotação no reparo por atrito”, 2007, 150p., Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.
- [6] Nagy, P. B.; Adler, L. “*Ultrasonic evaluation of solid state bonds*”, *Materials Evaluation*, p. 1328-1337, November, 1992
- [7] Nagy, P. “*Ultrasonic Classification of imperfect interfaces*”, *Journal of Non Destructive Evaluation*, vol. 11, Nos. 3/4, 1992
- [8] Thomas, G.; Chinn, D. “*Signal Analysis approach to ultrasonic evaluation of diffusion bond quality*”, *American institute of physics conf. proc.*, volume 497, p. 536-542, December, 1999
- [9] THOMPSON, R. B.; BUCK, O.; REBHEIN, D. K.; MARGETAN, F. J.; GRAY, T. A. *Ultrasonic nondestructive evaluation of solid-solid bonds*, *Ultrasonics Symposium*, p. 1117-1123, 1989
- [10] Paes, M. T. P; “Características fundamentais de soldas por atrito tipo FHPP”. Exame de qualificação para doutorado. UFRJ, 2009, 56 páginas

- [11] Thomas, W. M.; Nicholas, E. D., “Emerging friction joining technology for stainless steel and aluminium applications”, ‘Productivity beyond 2000’: IIW Asian Pacific Welding Congress, Auckland, New Zealand, February 1996
- [12] Shinoda T.; Fujikawa T., “Optimization of Friction Hydro Pillar Processing (FHPP) conditions”, p.307-308, 2004.
- [13] VOINOV, V.G., "*Mechanism of Joint Formation in Friction Welding*". In *Welding Production*, 1968. 15: p. 8-13.
- [14] LUCAS, W., "*Process Parameters and Friction Welds*". in *Metal Construction and British Welding Journal*, 1973. 5(8): p. 293-297.
- [15] DOUBELL, P. “Friction welding repair techniques for power plant” – *African Fusion*, p. 16-24, Mar. 2009.
- [16] MATTEI, F. Desenvolvimento de equipamento para estudo de soldagem, dissertação de mestrado, UFRGS, 2010, 166p.
- [17] PIRES, R. R. “Efeito da geometria, da força axial e da rotação no reparo por atrito”, 2007, 150p., Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia
- [18] NARDI, K. C. “Detecção de inclusões tipo sulfeto de manganês em linha de inspeção automática via ultrassom”, Dissertação de mestrado, 2009, 94p., Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- [19] ASM International, *Welding, Brazing, and Soldering*, OH, 1990.
- [20] SHULL, P. J.; *Nondestructive Evaluation Theory, Techniques, and Application*. 1.ed. CRC Press, 2002. 848 p.
- [21] ANDREUCCI, R.; *Ensaio por Ultrassom – Aplicação Industrial*, 2008, 98p.
- [22] APC Internacional Ltd. *Piezoelectric Ceramics: Principles and Applications*, 2002, 112p.
- [23] PIEFORT, V. *Finite Element Modelling of Piezoelectric Active Structures*, 2001, 154p. Thesis in Applied Sciences.
- [24] Clarke, T. "Thesis - Guided Wave Health Monitoring of Complex Structures" Imperial College London (2009)
- [25] ELLIS, C. R. G. *Continuous Drive Friction Welding of Mild Steel*. *Welding Journal*, 1972(April): p. 183s-197s