

## 6 JUNTA SOLDADA

*“A lógica é inútil, a menos que venha acompanhada com os dados essenciais”*

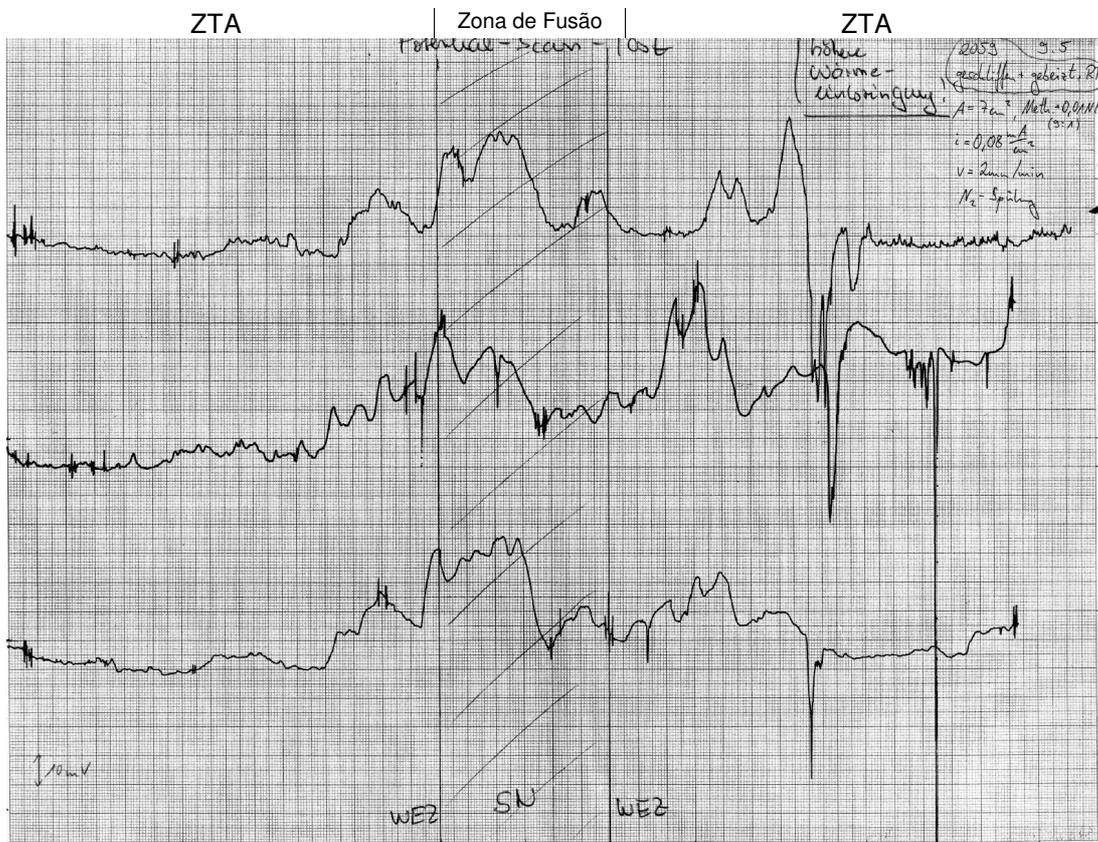
*Frank Herbet*

O material submetido ao processo de soldagem especificado no item 2.1 foi analisado em relação ao seu comportamento em termos de resistividade elétrica e variações micro e nanoestruturais. Os resultados obtidos serão apresentados no decorrer desse capítulo, de acordo com a técnica empregada: resistividade elétrica, microscopia ótica e eletrônica de varredura para os aspectos microestruturais e microscopia eletrônica de transmissão para a caracterização nanoestrutural.

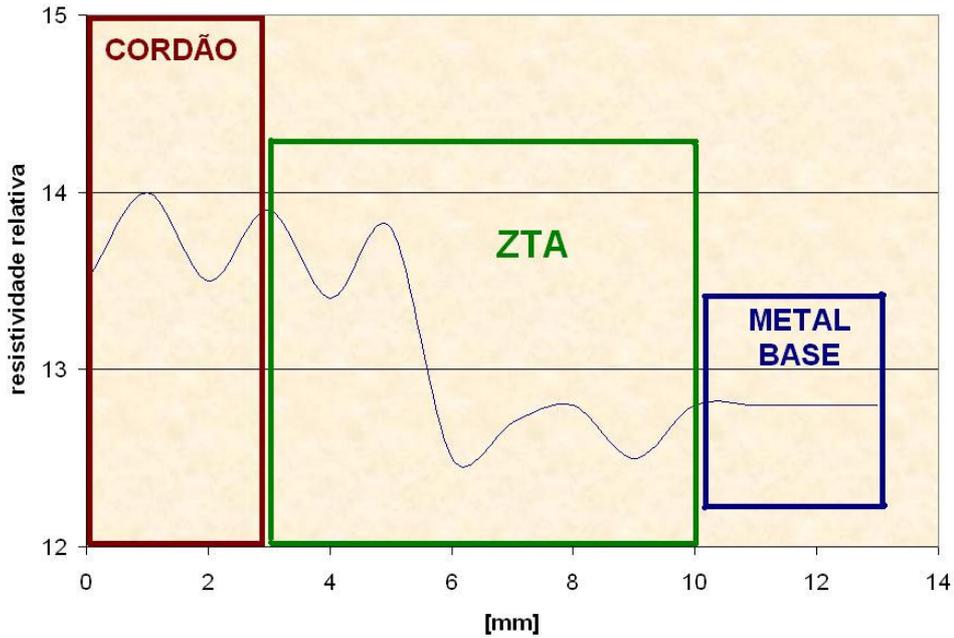
### 6.1 RESISTIVIDADE ELÉTRICA

Variações de resistividade elétrica em materiais susceptíveis à ocorrência de reações de ordem tem sido, historicamente, associadas à presença de um estado de ordenação de curto alcance (SRO). De fato, Brooks, Spruiel e Stanbury [40] conferem ao SRO o *status* de fator predominante entre as diversas contribuições para a resistividade, dentre as quais, podem ser citadas: estado de ordenação de longo alcance (LRO), *clustering*, reações de precipitação, transferências de elétrons de camadas incompletas em elementos de transição. Os mesmos autores[40], citando o estudo realizado por Lei, em sua dissertação de doutorado, fornecem os seguintes valores de resistividade para uma liga Ni-20%Mo à 250°C: LRO = 45  $\mu\Omega\text{cm}$  e SRO = 146  $\mu\Omega\text{cm}$ . O estado de ordenação de longo alcance é caracterizado por valores de  $\rho$  muito baixos, o que pode ser justificado pelo fato de que este estado oferece menos barreiras à movimentação de elétrons do que uma matriz desordenada, constituída de uma rede elasticamente deformada, a fim de acomodar os elementos de liga presentes ou, ainda, uma matriz com pequenas regiões ordenadas (SRO) com todas as interfaces inerentes.

O primeiro perfil de resistividade elétrica da junta foi levantado pelo próprio fornecedor do material, sendo apresentado na Fig. 6.1. Entretanto, devido à grande quantidade de ruído, provavelmente inerente ao processo de aquisição de dados (contatos móveis/registrador), optou-se por refazer esta etapa, segundo a metodologia apresentada no item 2.3.1, com contatos fixos (solda fria e tinta de prata) executados a intervalos regulares. Os resultados obtidos estão apresentados na Fig. 6.2, onde se pode observar que os valores máximos são encontrados nas proximidades do cordão, ocorrendo uma abrupta transição na ZTA, antes de se estabilizar.

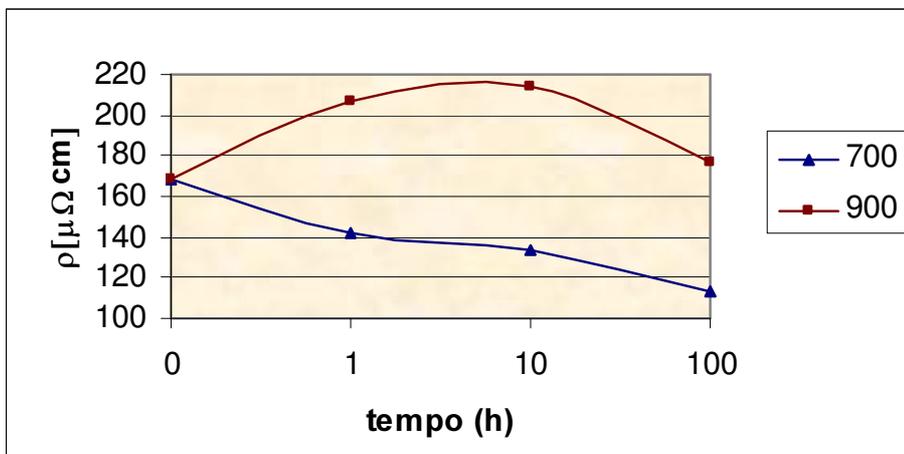


**Figura 6.1:** Registro gráfico de ensaio de resistividade efetuado em três linhas transversais ao cordão de solda.



**Figura 6.2:** Gráfico do comportamento da resistividade elétrica em relação à distância do cordão de solda.

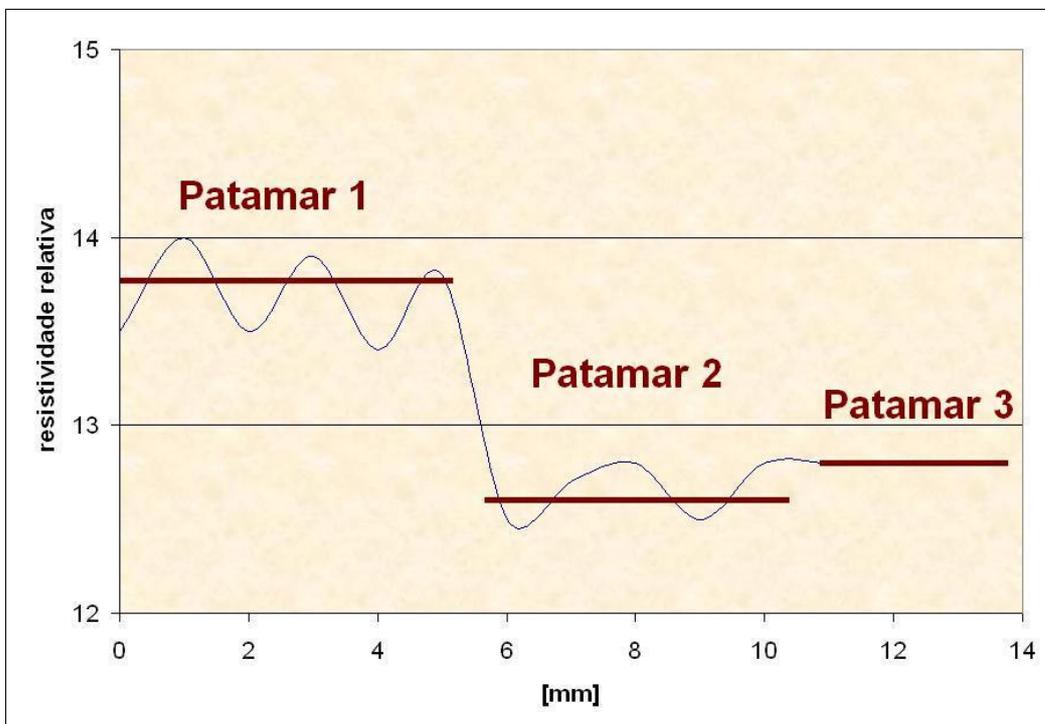
Este comportamento está, provavelmente, associado às alterações do estado de ordem provocadas pelo aporte térmico durante o processo de soldagem. De fato, quando medidas absolutas foram tomadas nas amostras envelhecidas, verificou-se que maiores valores foram obtidos para as amostras envelhecidas à temperatura de 900°C, como se pode observar no gráfico apresentado na Fig. 6.3. Nas amostras envelhecidas a 700°C foram observados valores menores, o que condiz com o perfil de resistividade encontrado na junta soldada: valores maiores que os obtidos para o material no estado de como recebido na zona fundida, e menores na zona termicamente afetada.



**Figura 6.3:** Gráfico do comportamento da resistividade elétrica em relação aos tratamentos de envelhecimento executados.

As variações de resistividade registradas, tanto ao longo da junta soldada quanto com o decorrer dos tratamentos podem, segundo a literatura [40], estar associadas à transformação SRO  $\rightarrow$  LRO. Entretanto, o estudo de caracterização desenvolvido no presente trabalho não contemplou a quantificação do estado SRO nas condições analisadas mas, uma avaliação preliminar do gráfico apresentado na Fig. 6.2 indica que o perfil de resistividade da junta soldada pode ser dividido em três regiões distintas (vide Fig. 6.4):

- **Região 1:** composta pela zona fundida e proximidades, onde são encontrados os maiores valores de  $\rho$ , provavelmente decorrentes do aumento de SRO ocasionado pela transformação LRO $\rightarrow$ SRO;
- **Região 2:** engloba a região que não sofreu alterações em relação à condição de como recebida da liga, e apresenta baixos valores de  $\rho$ ;
- **Região 3:** constituída da zona termicamente afetada pelo processo de soldagem, e é onde surgem os menores valores de  $\rho$  registrados na junta soldada. Em relação à condição de como recebida, a redução de  $\rho$  reflete, possivelmente, a redução do estado SRO induzida pela realização de trabalho a frio, durante o processo de fabricação do material.

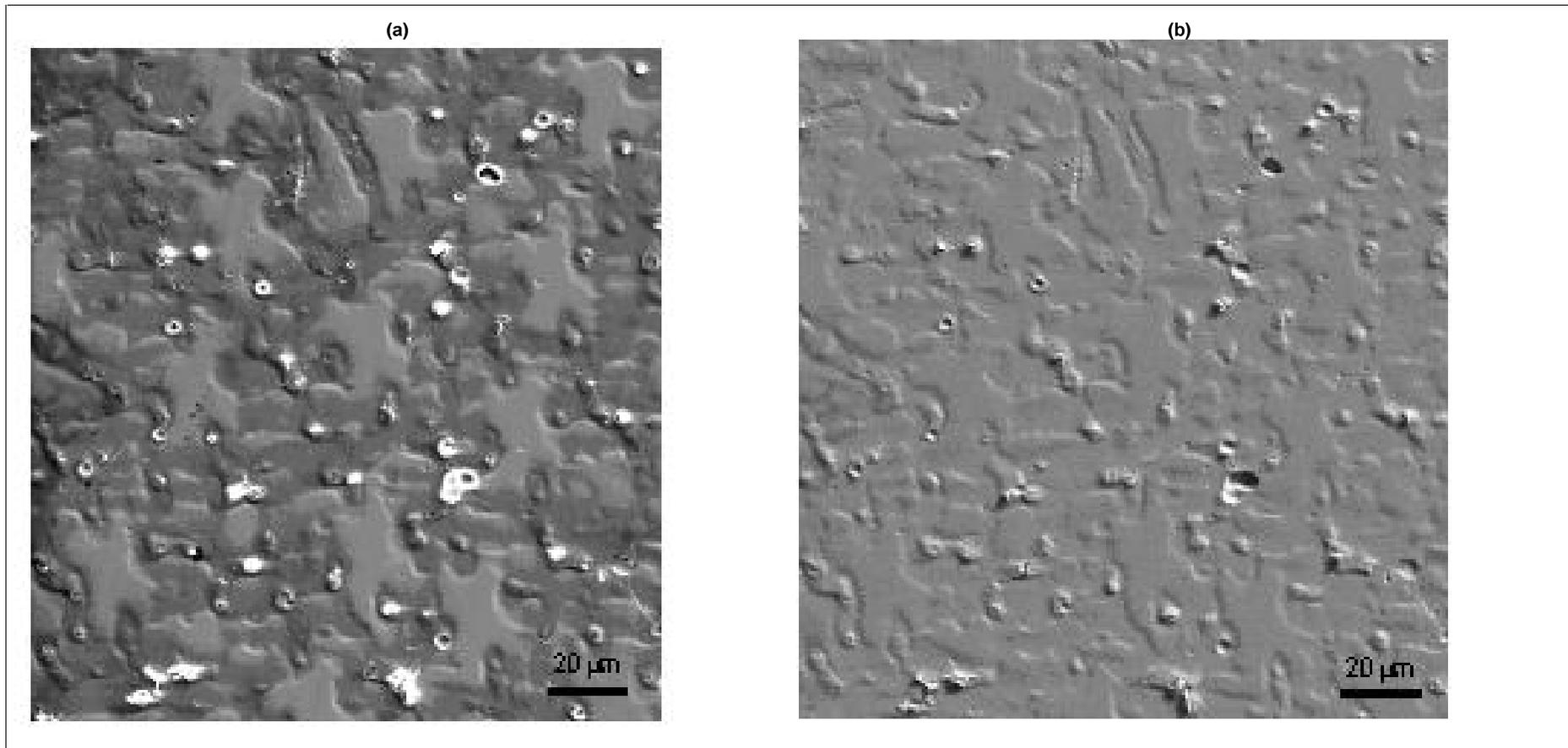


**Figura 6.4:** Gráfico que evidencia a subdivisão da junta soldada em três regiões distintas de resistividade elétrica.

Obviamente, as áreas de transição entre as regiões mencionadas estarão mais sujeitas a processos de corrosão localizada, uma vez que favorecerão a formação de pilhas eletrolíticas. Caberia a confirmação dessa hipótese em trabalhos futuros, através de comparações entre a localização dos *pits* de corrosão, com a localização das regiões de transição detectadas. Também seria interessante quantificar o estado SRO ao longo das regiões apresentadas. Entretanto tal estudo é praticamente inviabilizado por dificuldades de ordem técnicas, que envolveriam detectar variações de intensidade das reflexões  $\{1,1/2,0\}$ , da ordem de apenas 6%, o que seria extremamente improvável no estado da arte atual da microscopia eletrônica de transmissão.

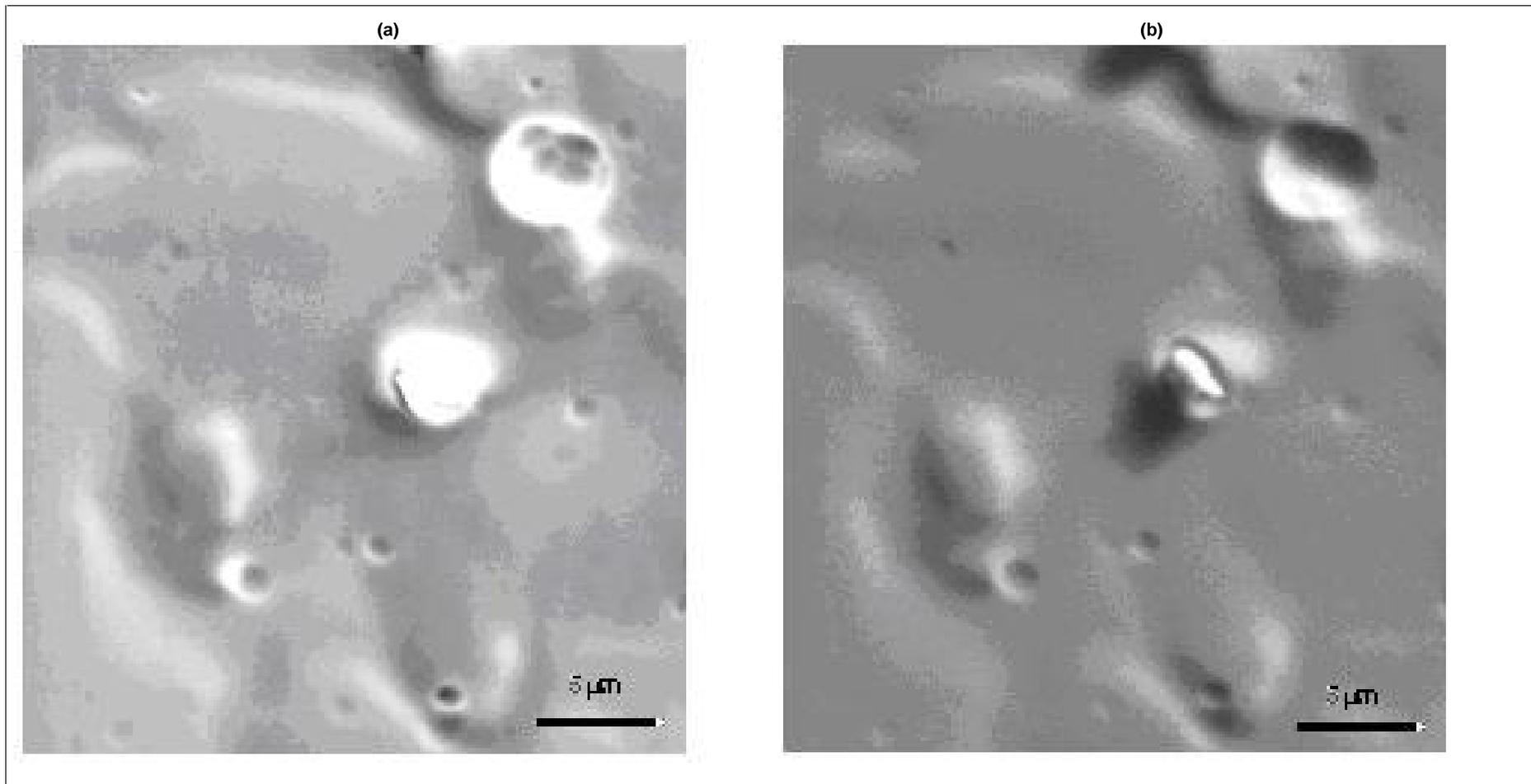
## 6.2 CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL

A caracterização microestrutural da zona fundida revelou estruturas dendríticas de crescimento radial em direção ao centro do cordão, conforme esperado para essas condições. As Figuras 6.5 a 6.11 apresentam detalhes desta região, obtidos através de microscopia ótica e eletrônica de varredura.

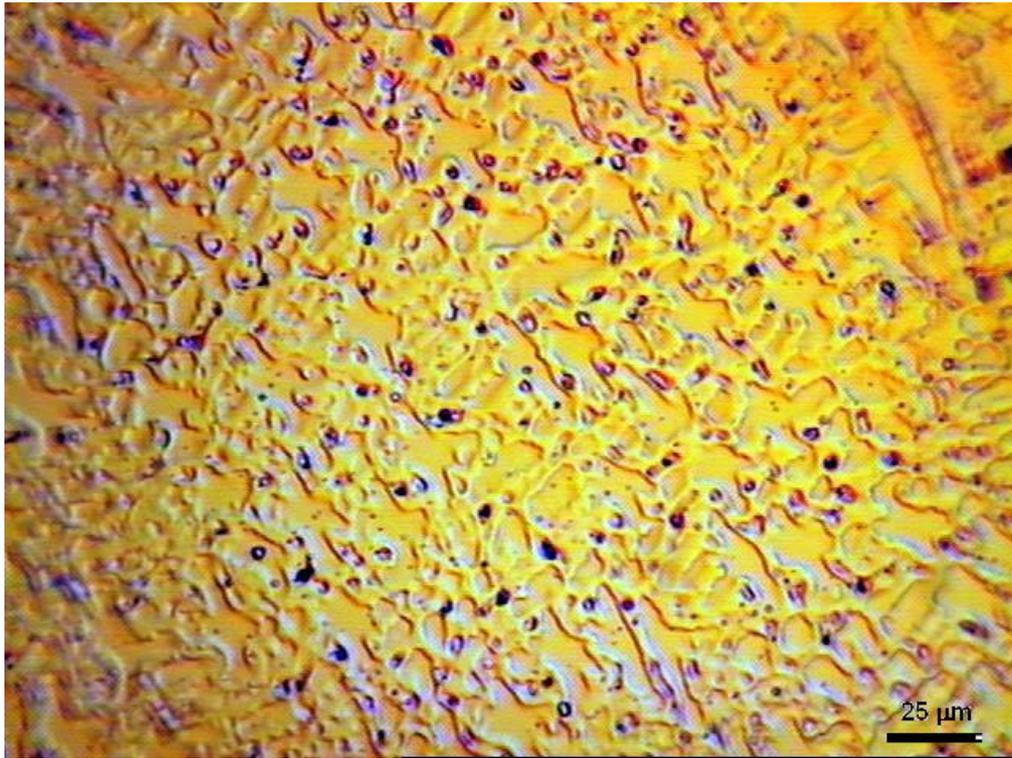


**Figura 6.5:** Microscopia eletrônica de varredura efetuada na região central do cordão: (a) elétrons secundários, (b) elétrons retroespalhados.

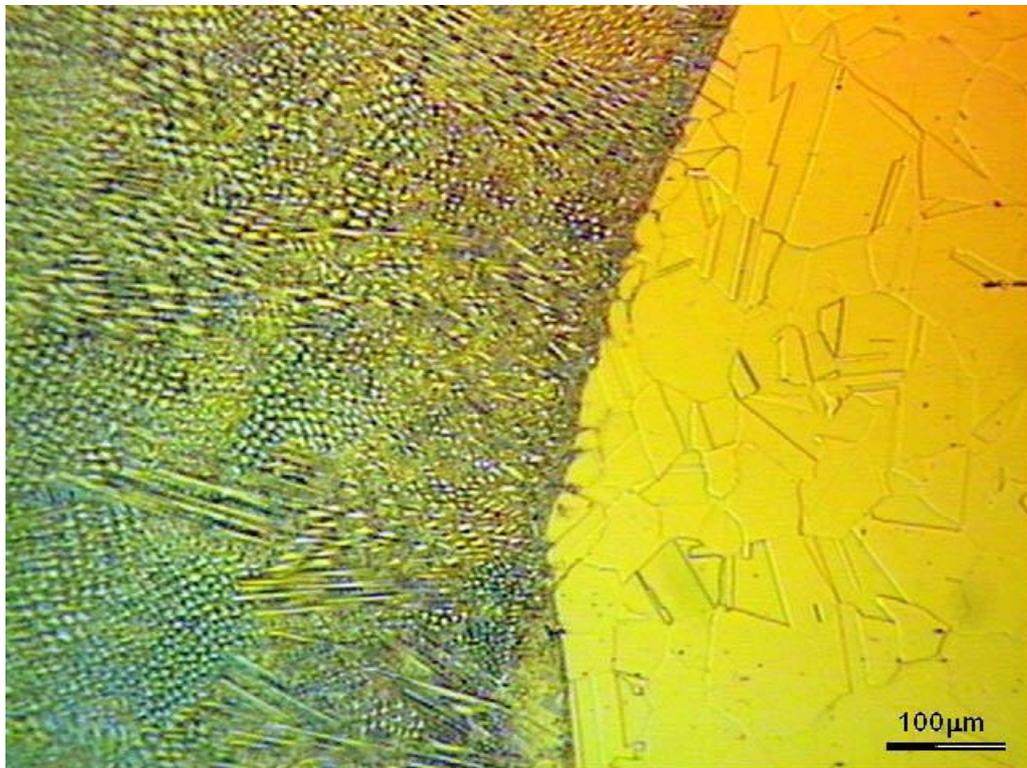
JUNTA SOLDADA \_\_\_\_\_



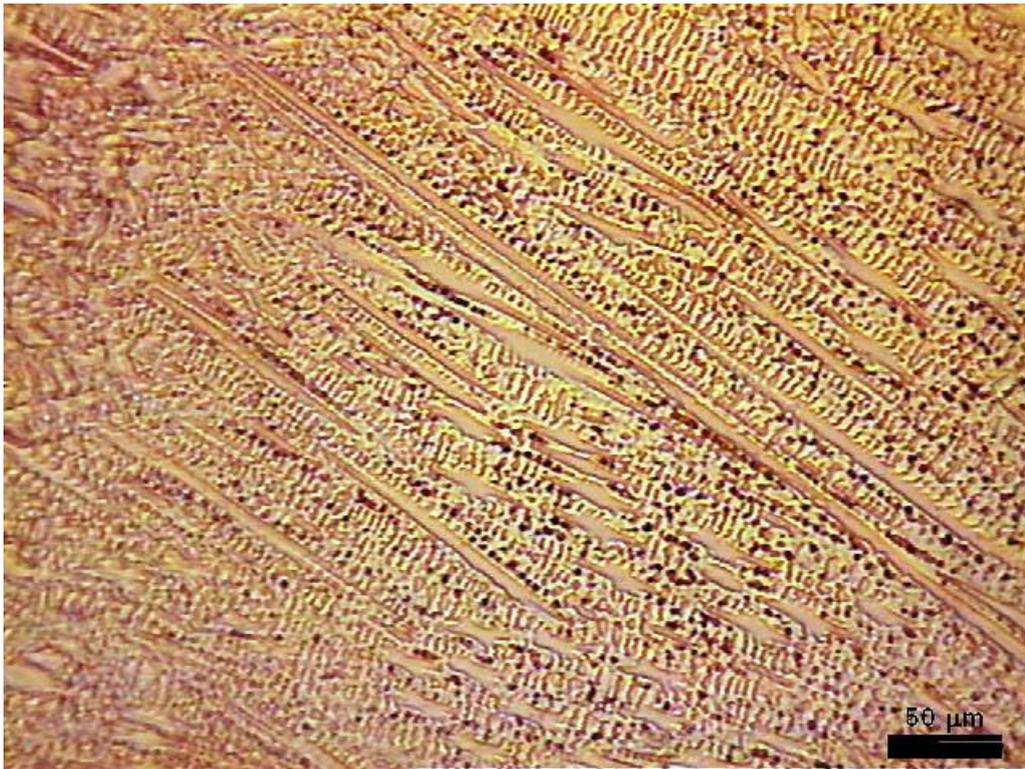
**Figura 6.6:** Microscopia eletrônica de varredura efetuada na região central do cordão: (a) elétrons secundários, (b) elétrons retroespalhados.)



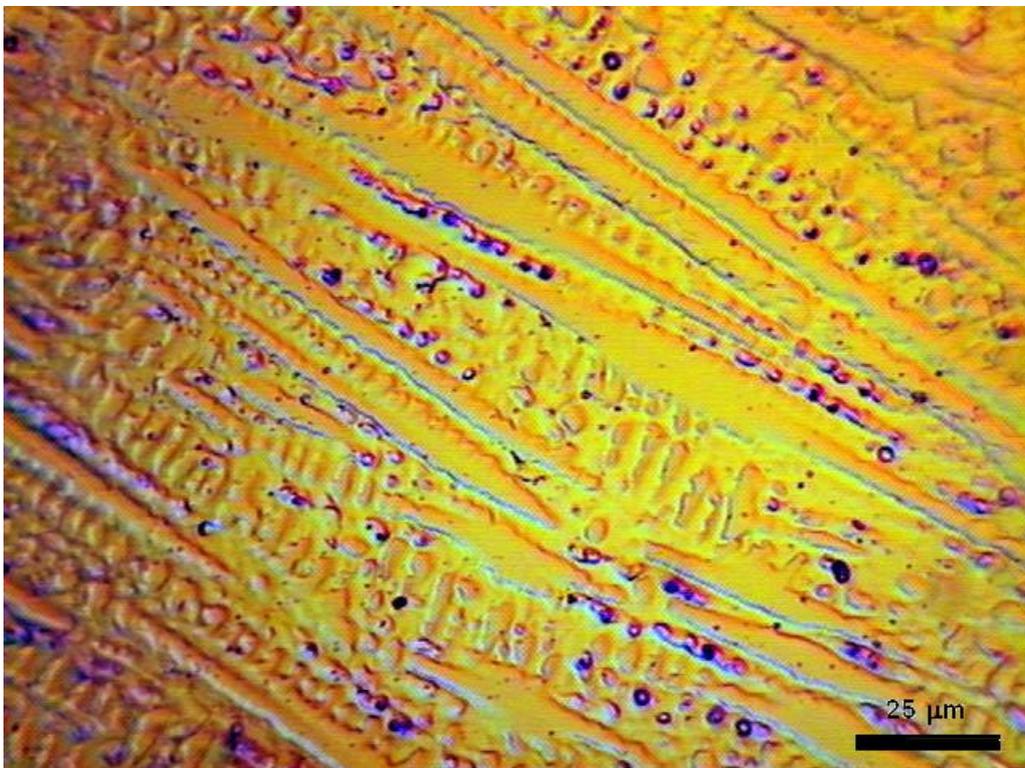
**Figura 6.7:** Microscopia ótica da região central do cordão de solda. Ataque em solução aquosa de ácido oxálico.



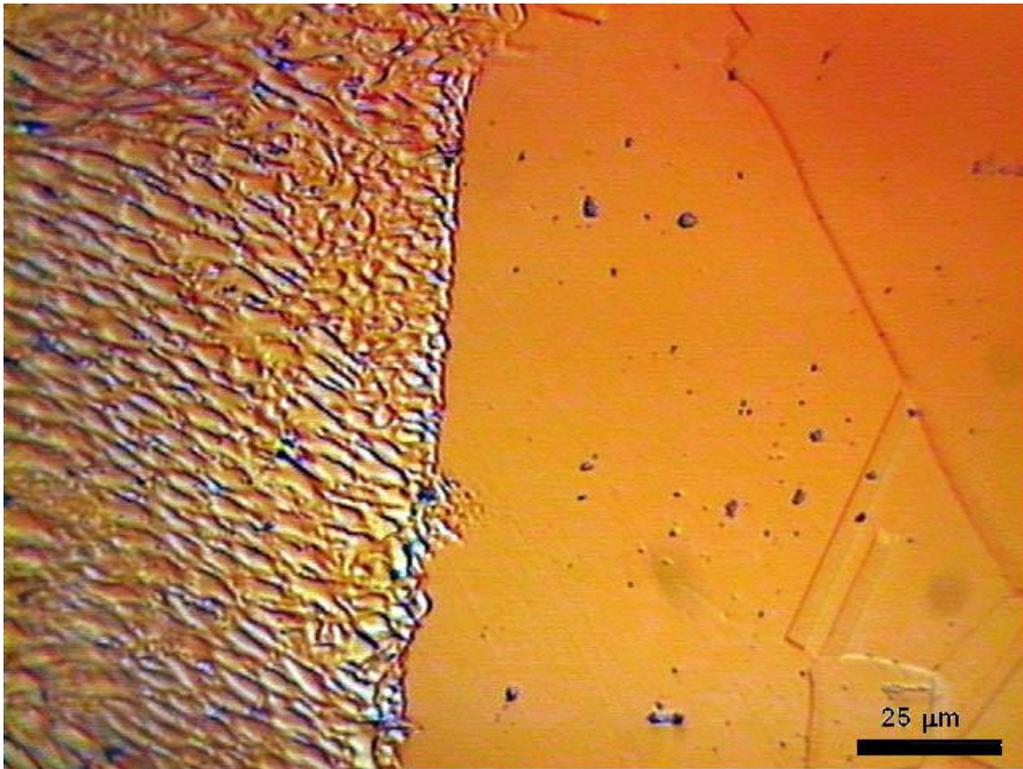
**Figura 6.8:** Microscopia ótica na região de transição da zona fundida para a zona termicamente afetada. Ataque em solução aquosa de ácido oxálico.



**Figura 6.9:** Microscopia ótica nas estruturas dendríticas radiais formadas no limiar da zona fundida com a zona termicamente afetada. Ataque em solução aquosa de ácido oxálico.

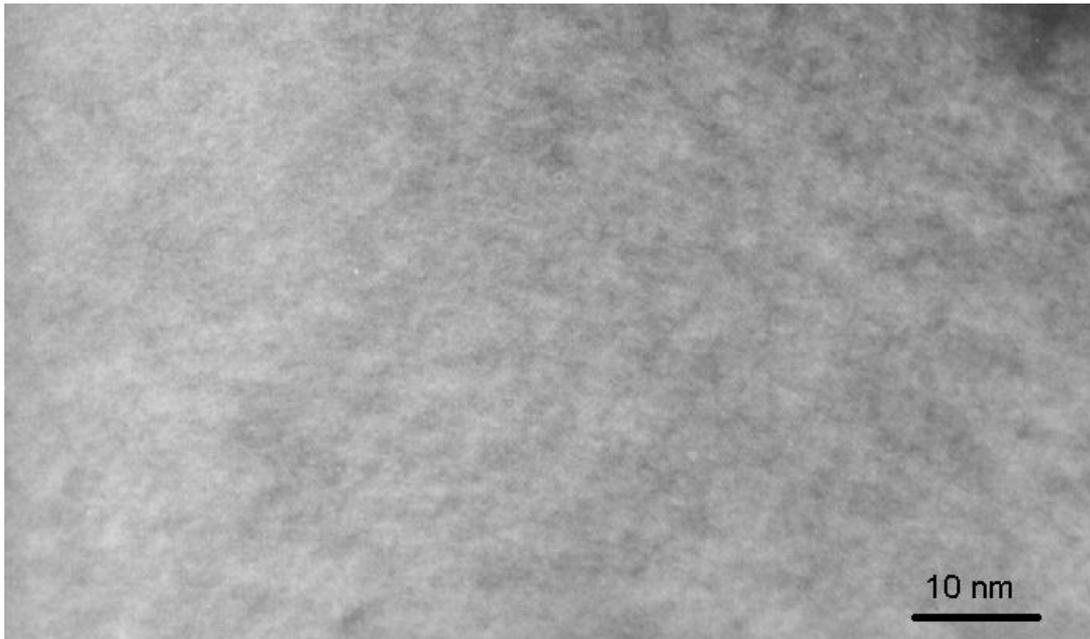


**Figura 6.10:** Microscopia ótica nas estruturas dendríticas radiais formadas no limiar da zona fundida com a zona termicamente afetada. Ataque em solução aquosa de ácido oxálico.



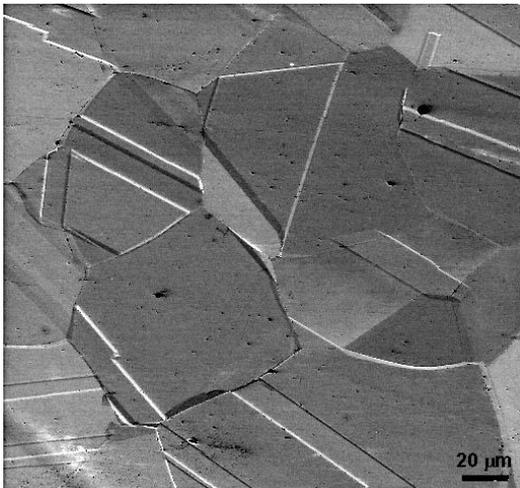
**Figura 6.11:** Microscopia ótica na zona de transição entre o cordão de solda e o metal base. Ataque em solução aquosa de ácido oxálico.

Em relação à condição nanoestrutural, análises conduzidas por meio de microscopia eletrônica de transmissão revelaram que, na área do cordão, ocorreu uma dissolução dos nanoprecipitados encontrados no material tanto na condição de como recebido como em todas as demais. Este fato é condizente com os resultados obtidos através das medidas de resistividade, as quais indicaram valores mais elevados nessa região. Portanto, a ausência de nanoprecipitados reforça a hipótese de ocorrência de uma reação  $LRO \rightarrow SRO$ , conforme discutido no item anterior.

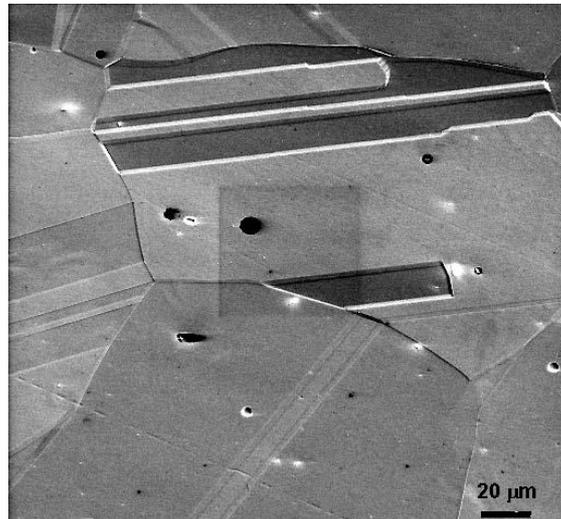


**Figura 6.12:** Figura em campo claro por microscopia eletrônica de transmissão numa região da zona fundida, demonstrando a ausência de nanoprecipitados.

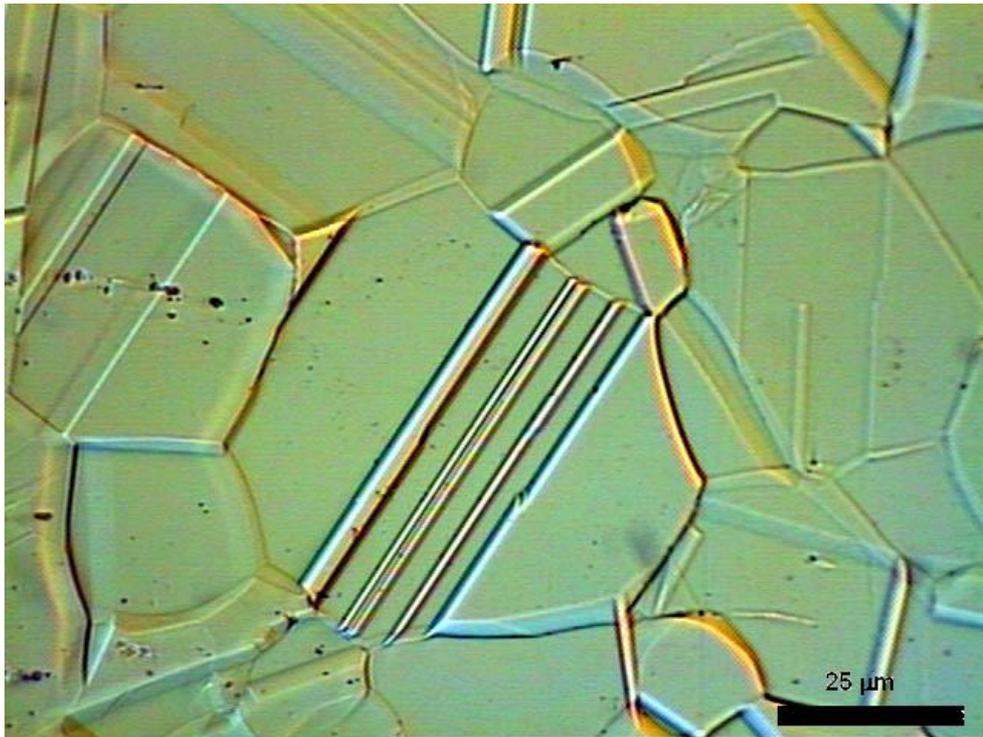
A zona termicamente afetada não apresentou variações microestruturais relevantes, em relação à condição da liga de como recebida, sendo também caracterizada pela grande quantidade de maclas, como pode ser observado nas Figuras 6.13 a 6.15.



**Figura 6.13:** Microscopia eletrônica de varredura, por elétrons secundários, na ZTA próxima ao cordão.

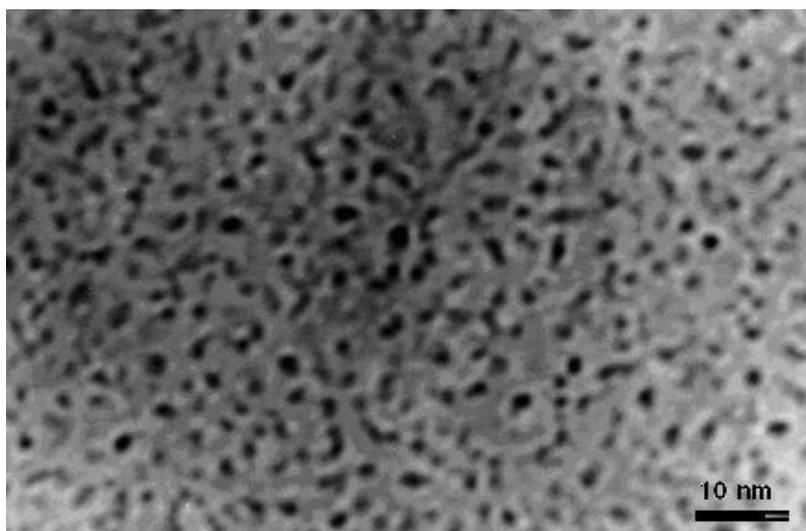


**Figura 6.14:** Microscopia eletrônica de varredura, por elétrons secundários, no interior da ZTA.

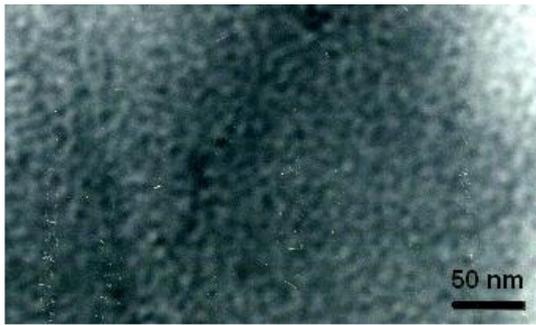


**Figura 6.15:** Microscopia Ótica, DIC, na ZTA nas proximidades do cordão. Ataque em solução aquosa de ácido oxálico.

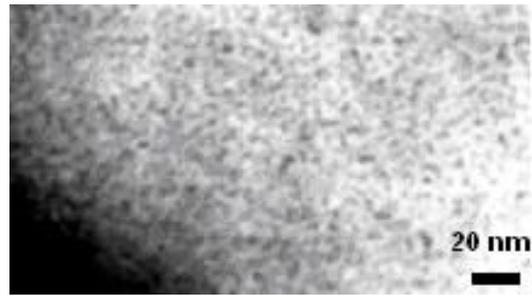
A estrutura em escala nanométrica teve suas características estudadas através de amostras retiradas ao longo da junta soldada a partir de seções longitudinais paralelas ao cordão, retiradas em várias regiões. O estudo dessas amostras, através de microscopia eletrônica de transmissão, revelou uma estrutura rica em nanoprecipitados, sendo que o estado SRO foi detectado na maioria delas. As Figuras 16 a 18 ilustram esta condição.



**Figura 6.16:** Imagem de microscopia eletrônica de transmissão em campo claro, na região da ZTA à 1,2 cm do cordão de solda.



**Figura 6.17:** Campo claro em seção transversal à ZTA, a 1,6 cm do cordão



**Figura 6.18:** Campo claro em seção transversal à ZTA, a 0,6 cm do cordão.