

## 4- Resultados Experimentais

### 4.1. Ensaio de Microdureza

As Figuras 22 e 23 mostram a variação dos valores de microdurezas medidos ao longo da junta soldada de acordo com o esquema apresentado na Figura 15 da seção materiais e métodos. Foram realizadas três medidas por região.

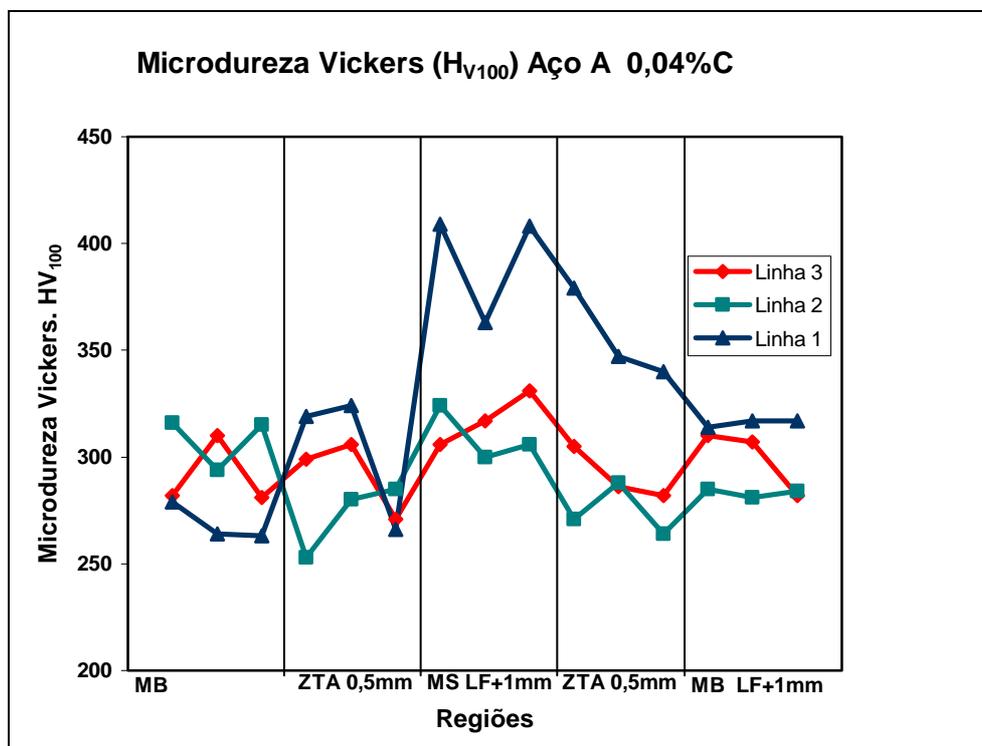


Figura 22 – Gráfico da Microdureza Vickers ( $H_V$ ) para o aço A

Os gráficos das Figuras 22 e 23 mostram que a microdureza média para a junta soldada em ambos os aços foram em torno de 300 Vickers. Observa-se também um pico de dureza em torno de 400 Vickers próximo a linha de fusão, e que a faixa de dureza para o material A está entre 250 e 325  $H_{V100}$  (Figura 22), enquanto que para o material B (Figura 23) entre 250 e 350  $H_{V100}$ .

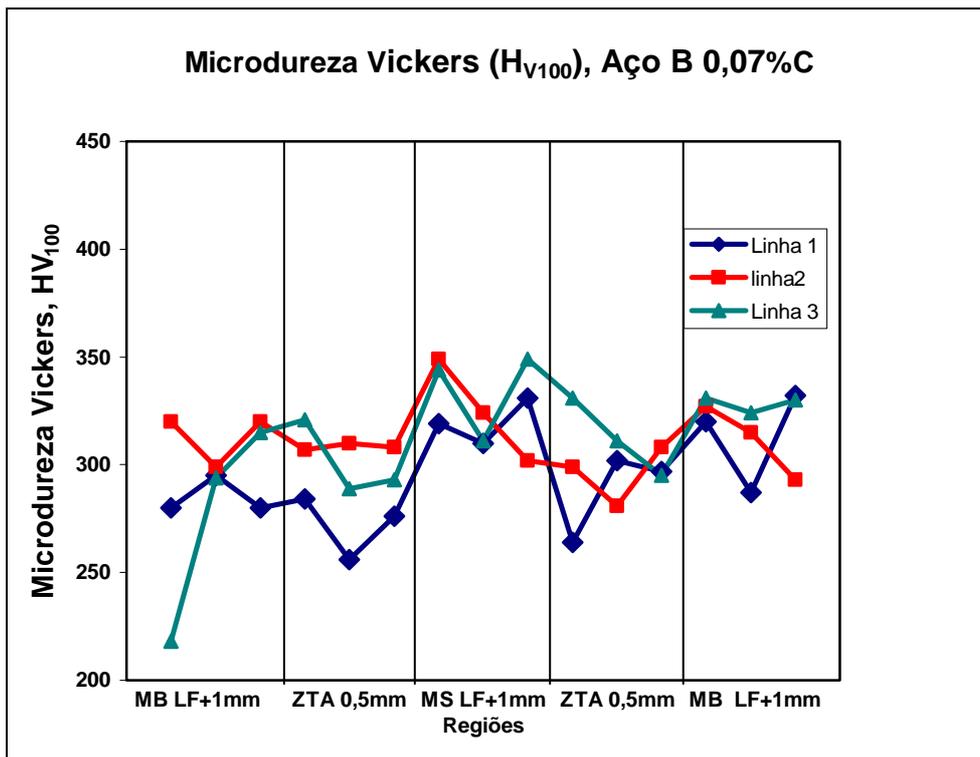


Figura 23 – Gráfico da microdureza Vickers ( $H_V$ ) para o aço B

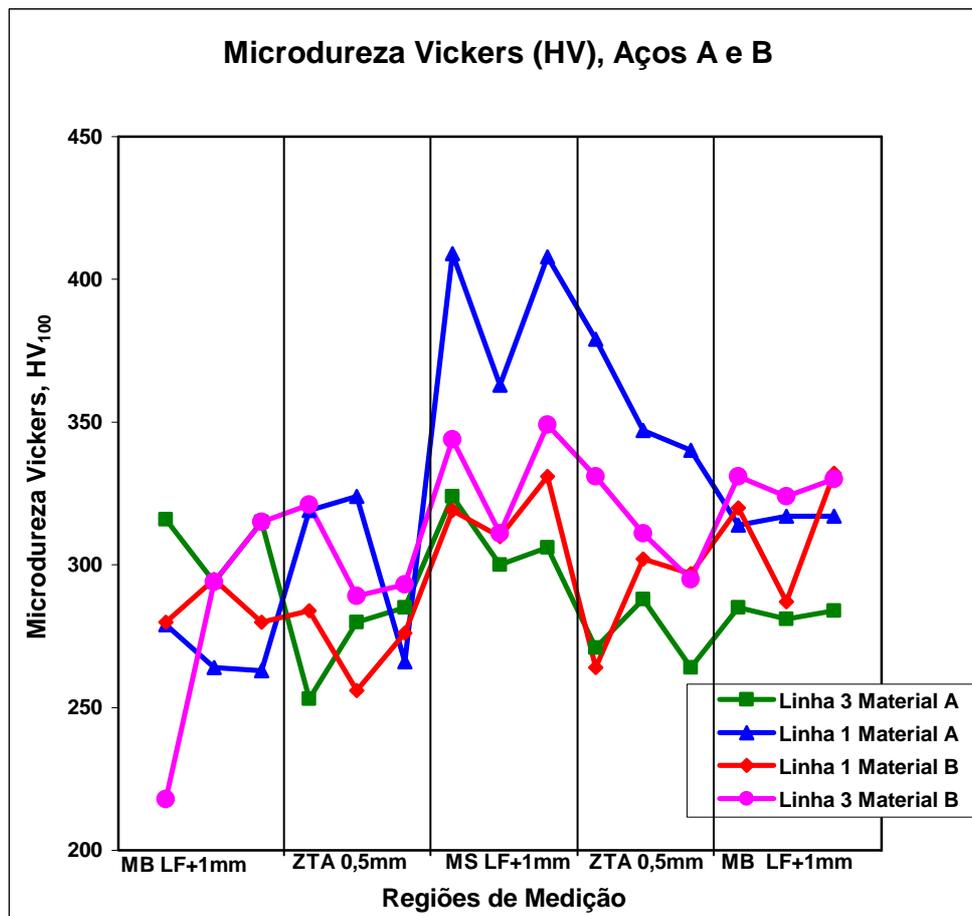


Figura 24 – Gráfico da microdureza Vickers ( $H_V$ ) para os aços A e B

## 4.2. Resultados do Ensaio para a caracterização da Integral J

### 4.2.1. Pré-Trincamento por fadiga

Os pré-trincamentos por fadiga foram realizados em corpos de prova tipo SE[B] e os valores das cargas máximas para se obter uma pré-trinca, atendem o critério recomendado pela norma ASTM E-1820. A tabela 4 mostra os valores obtidos das cargas e de K.

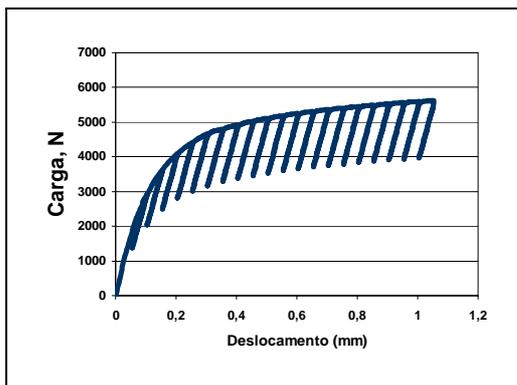
Pré-Trincamento	Carga Máxima ( Pf ) Kgf				Valores de $\Delta K$ (Mpa $\sqrt{m}$ )	
	Calculada segundo a Norma ASTM E-1820		Utilizada no Ensaio			
	P <sub>f max</sub> Kgf	P <sub>f min</sub> Kgf	P <sub>f max</sub> (média)Kgf	P <sub>f min</sub> (média)Kgf	Kmax	Kmin
<b>Aço A</b>						
Início	167,35	16,74	190,2	35	25,15	2,52
Final	-	-	142,3	33	-	-
<b>Aço B</b>						
Início	174,62	17,46	195,6	40	26,24	2,62
Final	-	-	146,7	36	-	-

Tabela 4 – Valores de cargas máximas e mínimas obtidas para o pré-trincamento

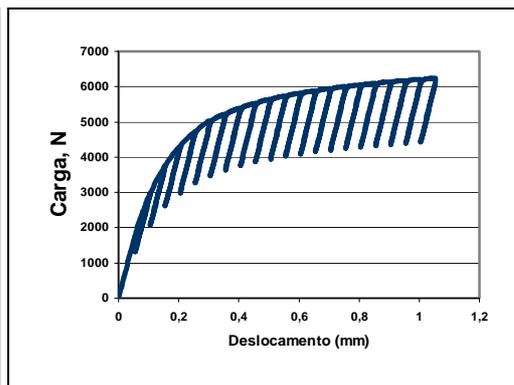
### 4.2.2. Curvas Carga-Deslocamento

Nas Figuras 25 e 26 são apresentadas às curvas cargas-deslocamento, obtidas durante o ensaio de integral J, com os diversos carregamentos e descarregamentos parciais dos corpos de prova dos materiais A e B, estando o deslocamento limitado a 1,1mm no equipamento MTS onde os materiais foram ensaiados, porém, isto não interferiu nos resultados.

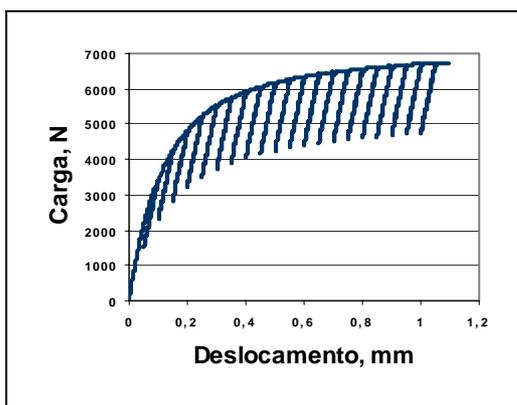
A alta ductilidade do material não permitiu crescimento de trinca suficiente para validar uma curva J-R de acordo com a norma ASTM E-1820. As Figuras de 25 e 26 mostram comportamentos similares para os dois aços estudados, onde se pode observar curvas características de materiais dúcteis.



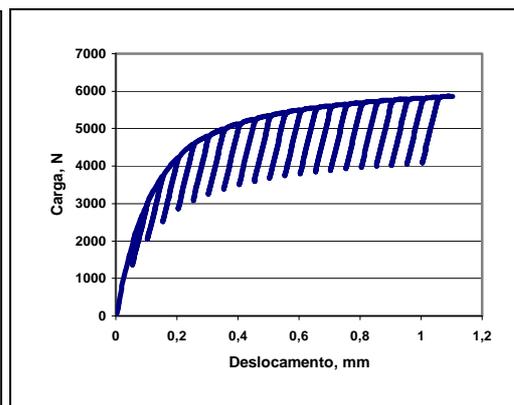
( CP A1 )



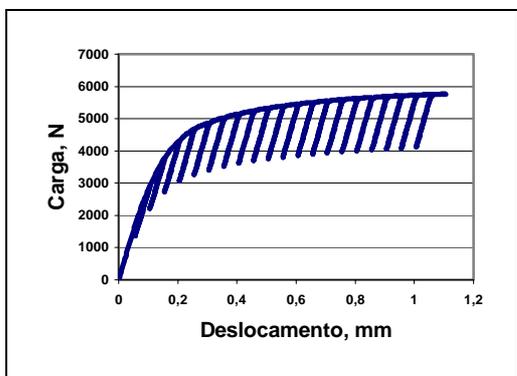
( CP A2 )



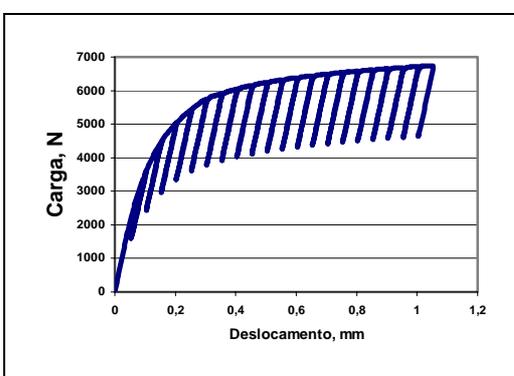
( CP A3 )



( CP A4 )



( CP A5 )



( CP A6 )

Figura 25- Diagramas de carga (P) - deslocamento da abertura do extensômetro (V) para o aço A

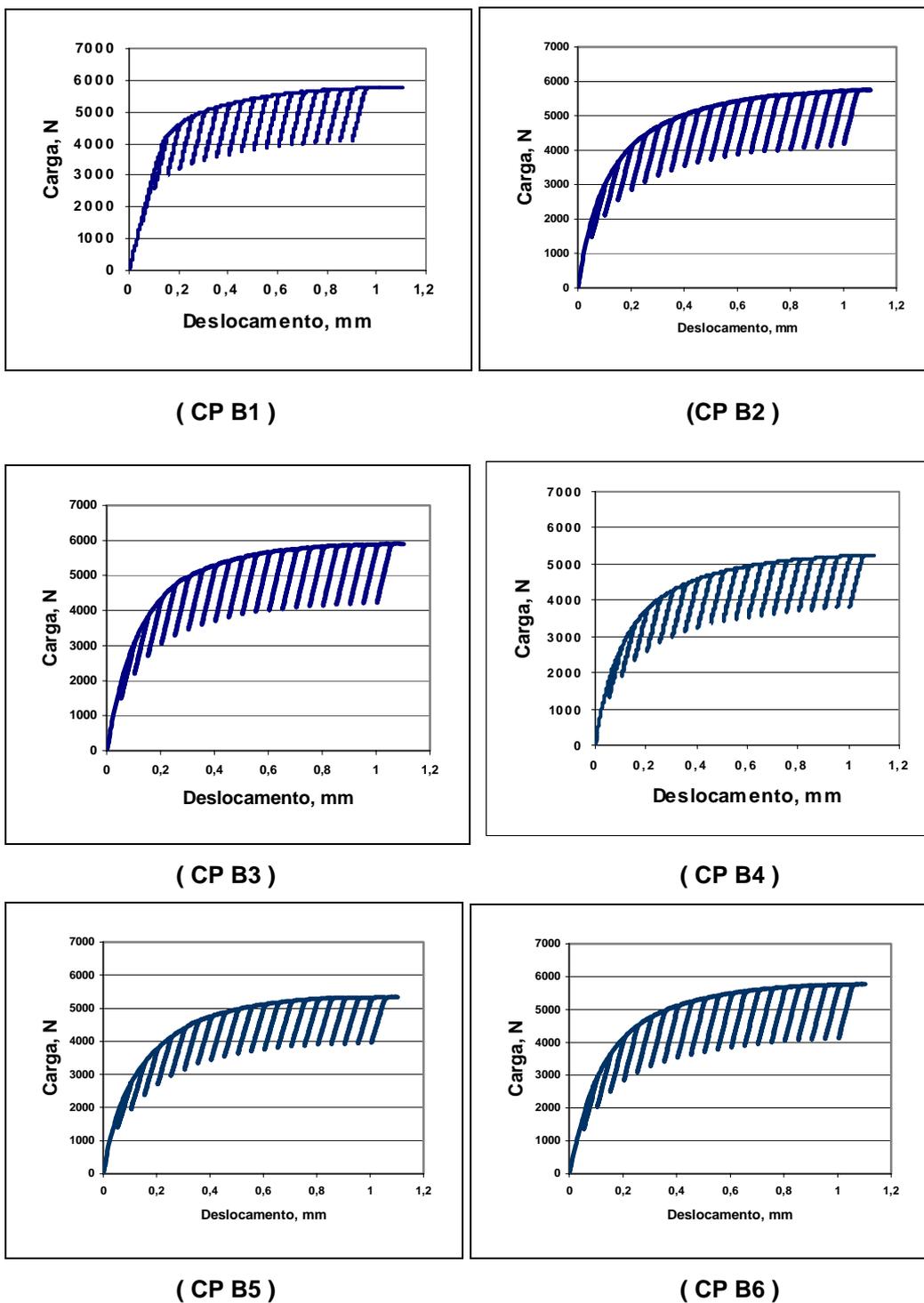
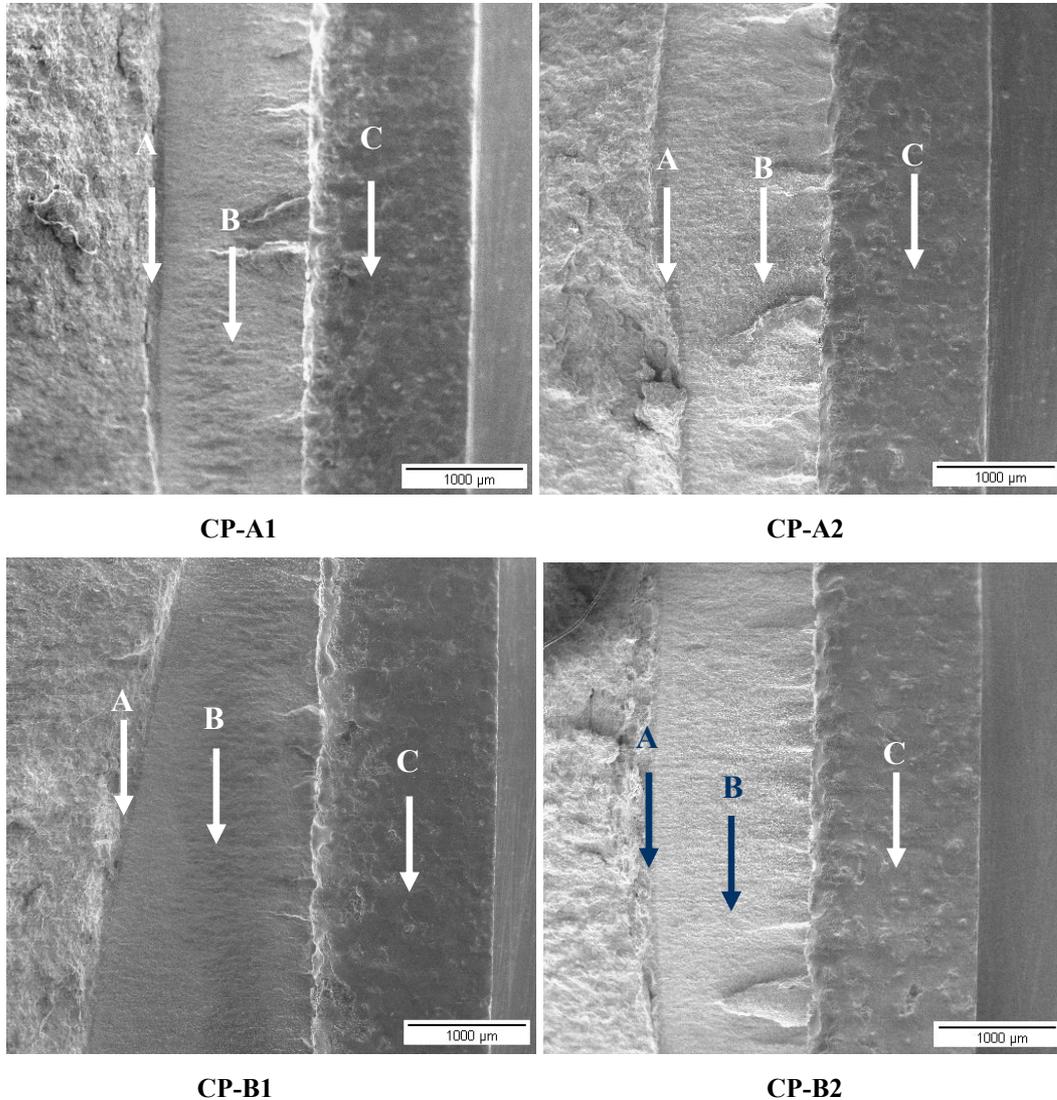


Figura 26 - Diagrama de carga (P) - deslocamento da abertura do extensômetro (V) para o aço B

#### 4.2.3. Fractografias

As superfícies de fraturas dos corpos de prova ensaiados foram analisadas por meio de microscopia eletrônica de varredura. A Figura 27 mostra o aspecto

das superfícies de fratura dos corpos de prova que foram fraturados após o ensaio de integral J. As regiões estão indicadas na Figura, onde A representa a “propagação” da trinca do ensaio de integral J, B o pré-trincamento por fadiga e C a região onde foi realizado o entalhe mecânico.



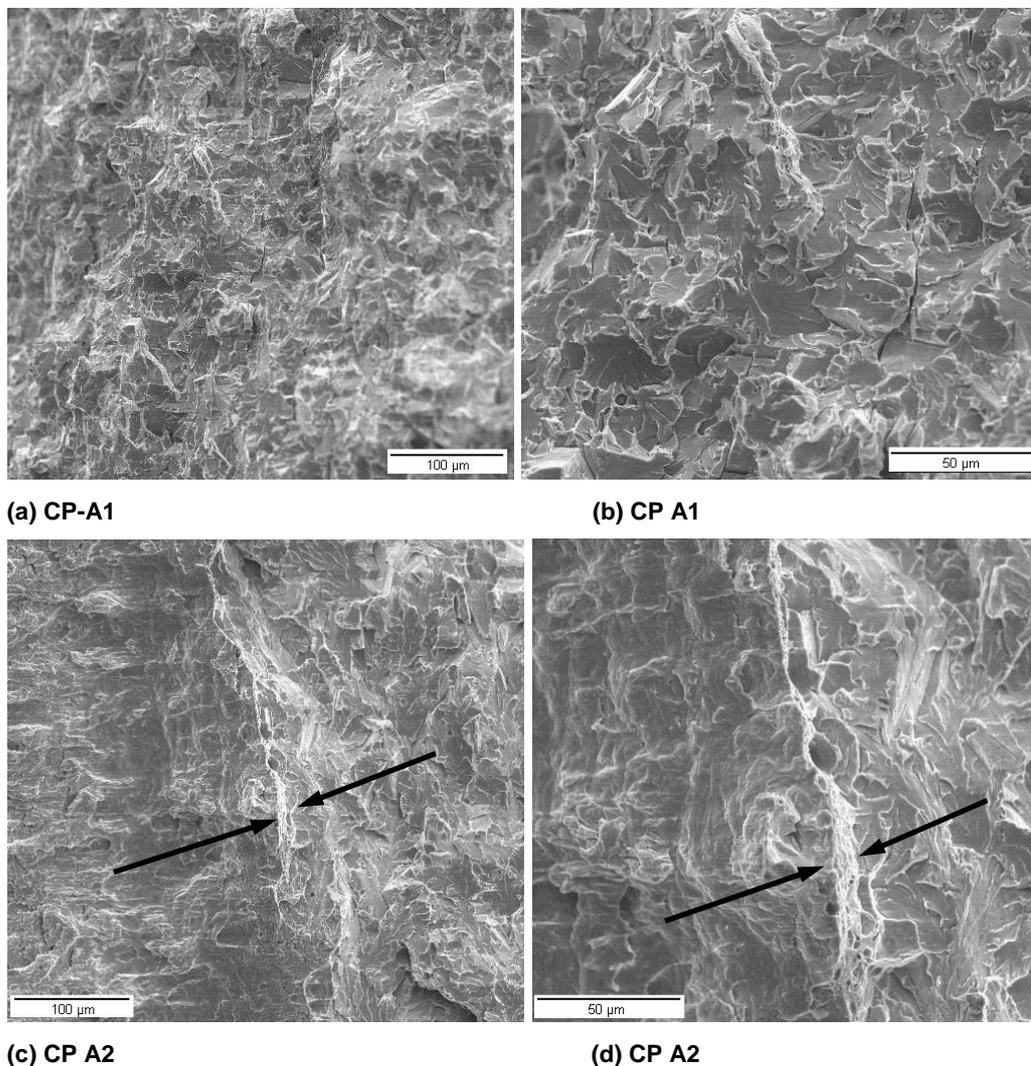
**Figura 27- Imagens dos aspectos das superfícies fraturadas dos Corpos de prova A1, A2, B1 e B2 dos aços A e B**

Como pode ser observado nas setas A da Figura 27, os corpos de prova A e B, não apresentaram significativo crescimento de trinca após o ensaio de integral J. Maiores detalhes das superfícies de fratura são mostradas nas seqüências de Figuras a seguir (Figuras 28 a 30), onde poderão ser visto com maiores detalhes, as regiões da interface entre o pré-trincamento por fadiga e a regiões das superfícies fraturadas após o ensaio de integral J.

As imagens das Figuras 28 a 30 mostram as superfícies de fratura da interface entre a pré-trinca por fadiga e a provável região de propagação da trinca, para os aços estudados, representados pelos corpos de prova A1 e A2 para o aço A e B1 e B2 para o aço B.

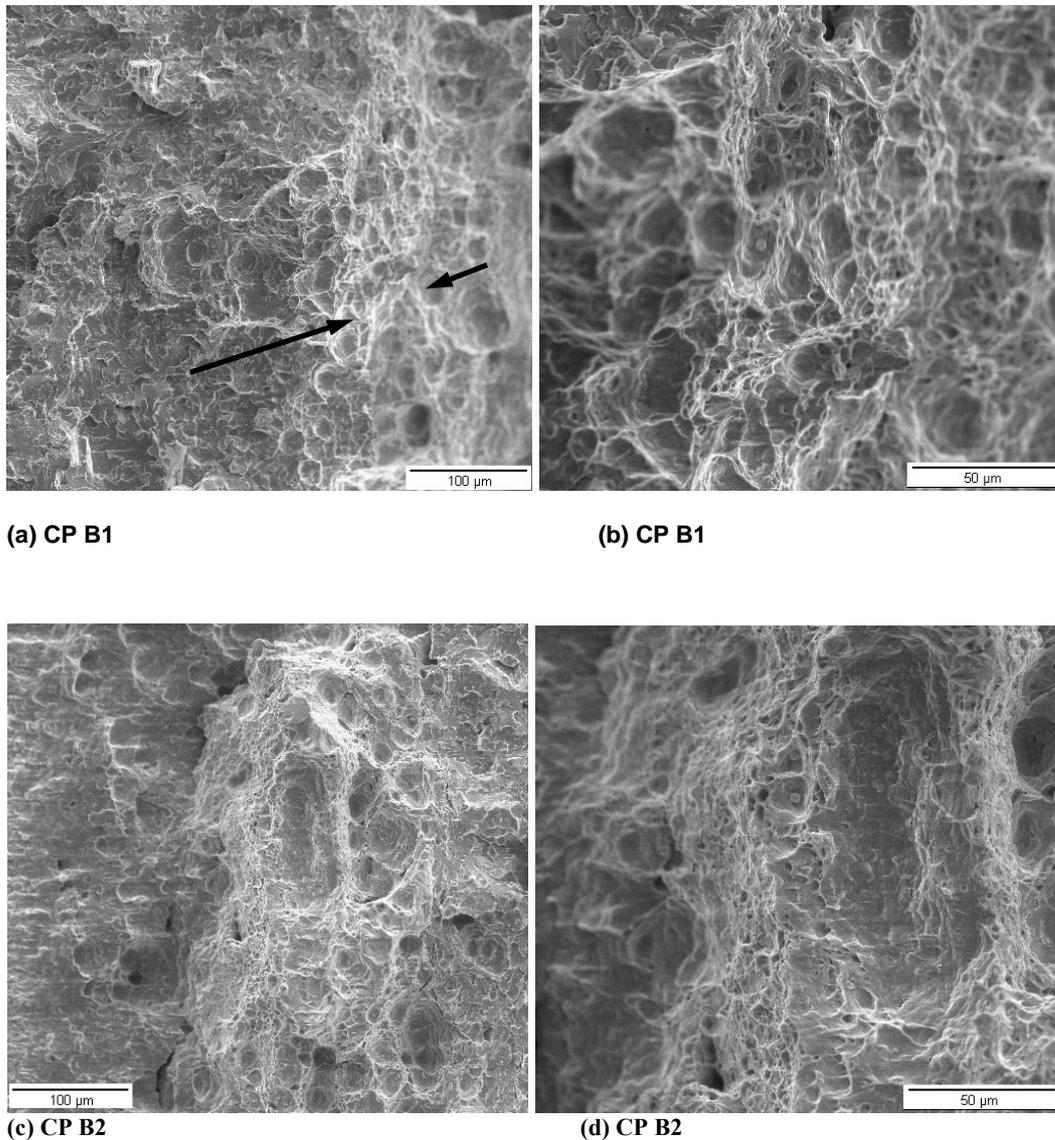
A região da provável propagação dúctil foi muito estreita, havendo dificuldades para separar das regiões em que foram fraturadas com nitrogênio após o ensaio de integral J.

Na Figura 28, em (a) e (b), observa-se que praticamente não houve propagação da trinca no corpo de prova A1, e em (c) e (d) no corpo de prova A2, a região de propagação da trinca assinalada entre as setas foi muito estreita, apresentando comportamento dúctil.



**Figura 28-** Imagens do aço A, corpo de prova A1, A2. Observa-se os aspectos gerais da superfície de fratura nas regiões de interface entre a pré-trinca por fadiga e a “propagação” estável da trinca.

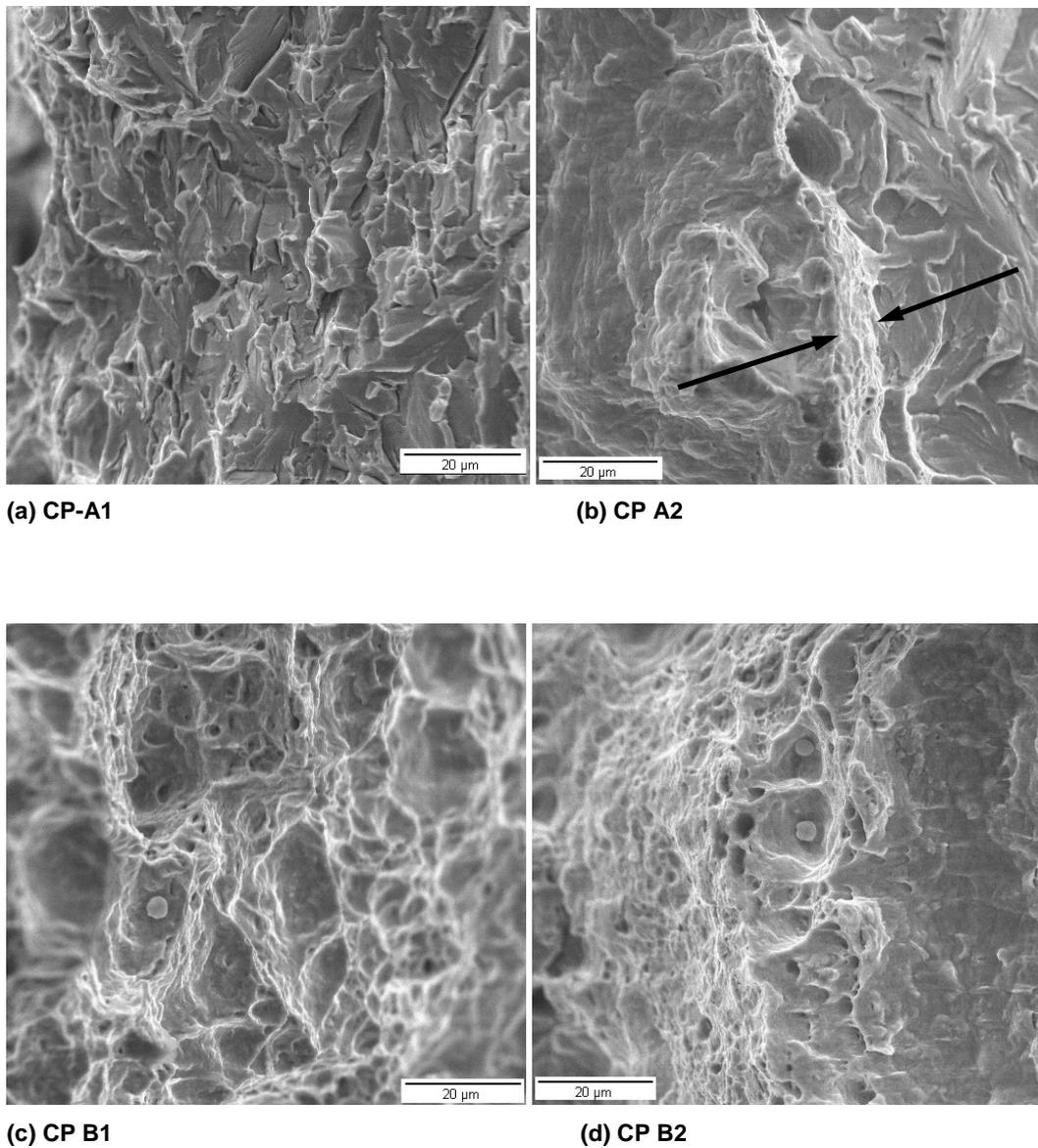
Nas imagens da Figura 29, pode-se observar um comportamento dúctil da trinca. Assim como no aço A, a região de “propagação” da trinca foi muito estreita e totalmente dúctil.



**Figura 29 – Imagens do aço B, corpo de prova B1 e B2, mostrando os aspectos gerais da superfície de fratura na interface entre a pré-trinca por fadiga e a “propagação” estável da trinca.**

A Figura 30 mostra maiores detalhes das superfícies de fratura dos corpos de prova dos aços A e B, sendo observado que a propagação foi dúctil para ambos os aços. Em (a), como observado anteriormente não se observa propagação estável da trinca, e em (b) a trinca assinalada entre as setas apresenta comportamento dúctil. As imagens (c) e (d) mostram aspecto dúctil da superfície de fratura do aço, com formação de alvéolos (“dimples”) e presença de partículas de segunda fase (inclusões) retidas em seu interior. A morfologia de alvéolos

profundos, de geometria semi-esférica está bem definida, com extensiva deformação plástica, observando-se grande ductilidade.



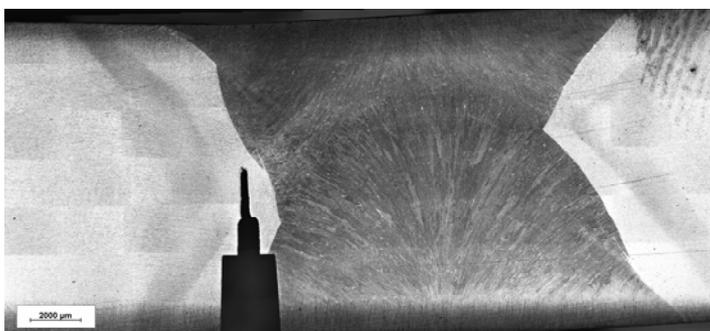
**Figura 30-** Imagens dos aços A e B, corpos de prova A1, A2, B1 e B2, mostrando os aspectos gerais da superfície de fratura na interface entre a pré-trinca por fadiga e a “propagação” estável da trinca e detalhes da formação de microvazios durante a propagação da trinca

#### 4.2.4. Análises Metalográficas

A caracterização microestrutural foi realizada por microscopia ótica e por microscopia eletrônica de varredura (MEV), nos corpos de prova após o ensaio de integral J.

As análises foram realizadas na região central dos corpos de prova, sempre buscando focalizar as regiões do em torno das trincas e feitas após o seccionamento dos corpos de prova conforme mostrado na Figura 14 da seção materiais e métodos.

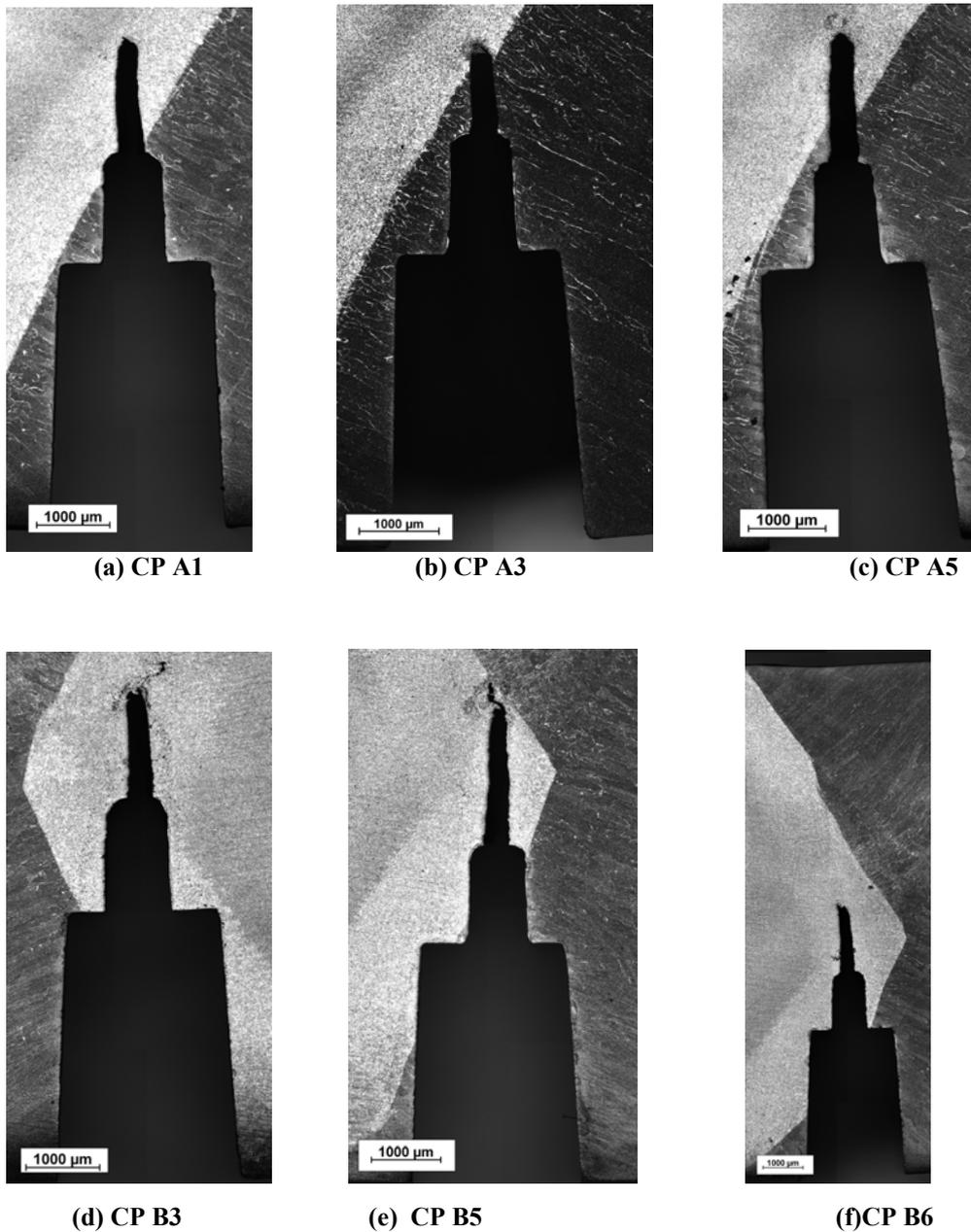
A Figura 31 mostra um panorama da junta soldada, onde pode se visualizar o posicionamento da trinca na ZTA.



**Figura 31- Panorama da junta soldada mostrando o posicionamento da trinca.**

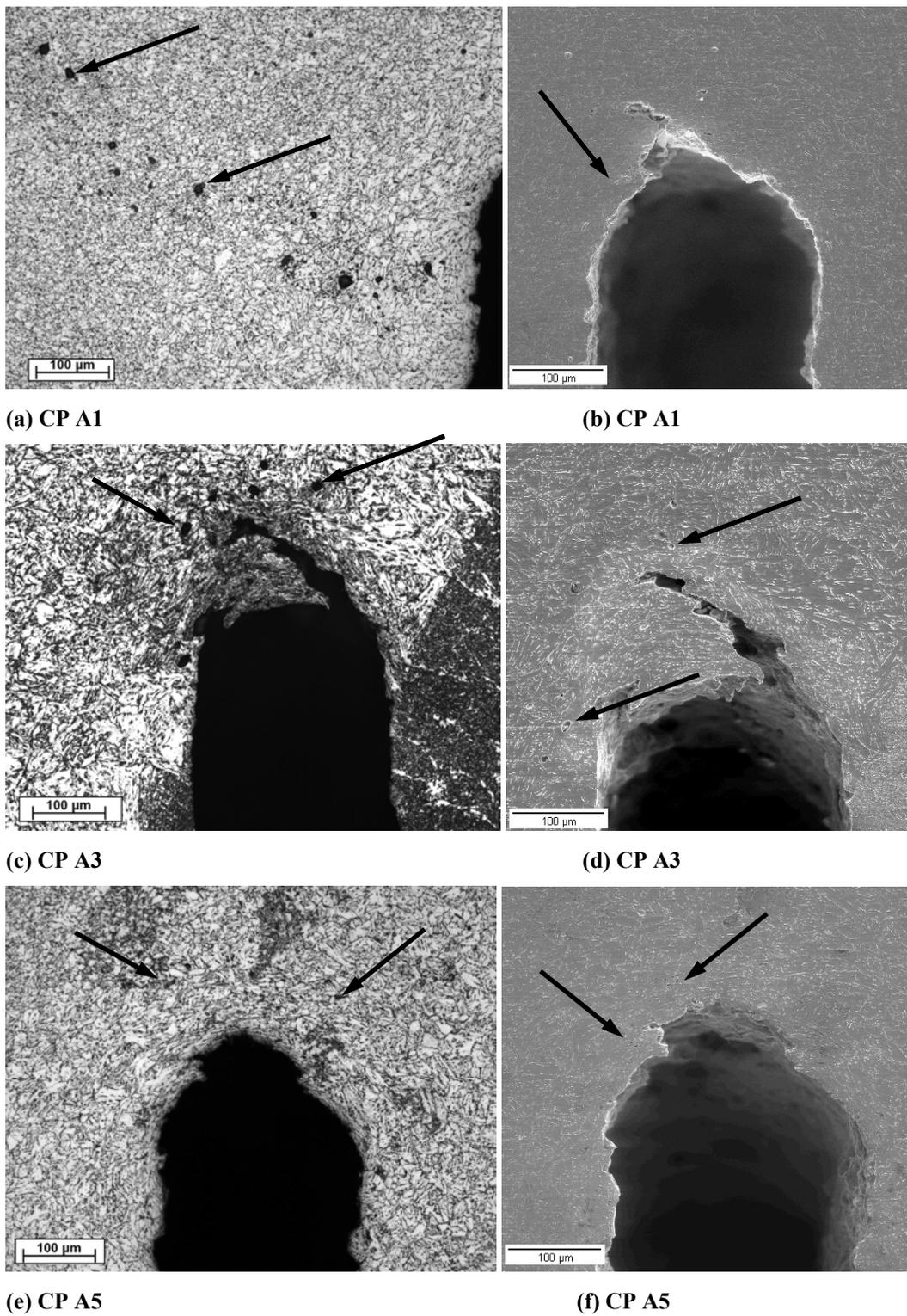
Similarmente, é mostrado para os demais corpos de prova, que o posicionamento da trinca ficou na região da ZTA, garantindo assim que esta propagação deveria ter ocorrido na ZTA.

O corpo de prova A3, Figura 32 (b) ficou ligeiramente fora da região, no entanto, isto está dentro do erro experimental, pois os resultados mostram que a propagação ocorreu dentro da ZTA.

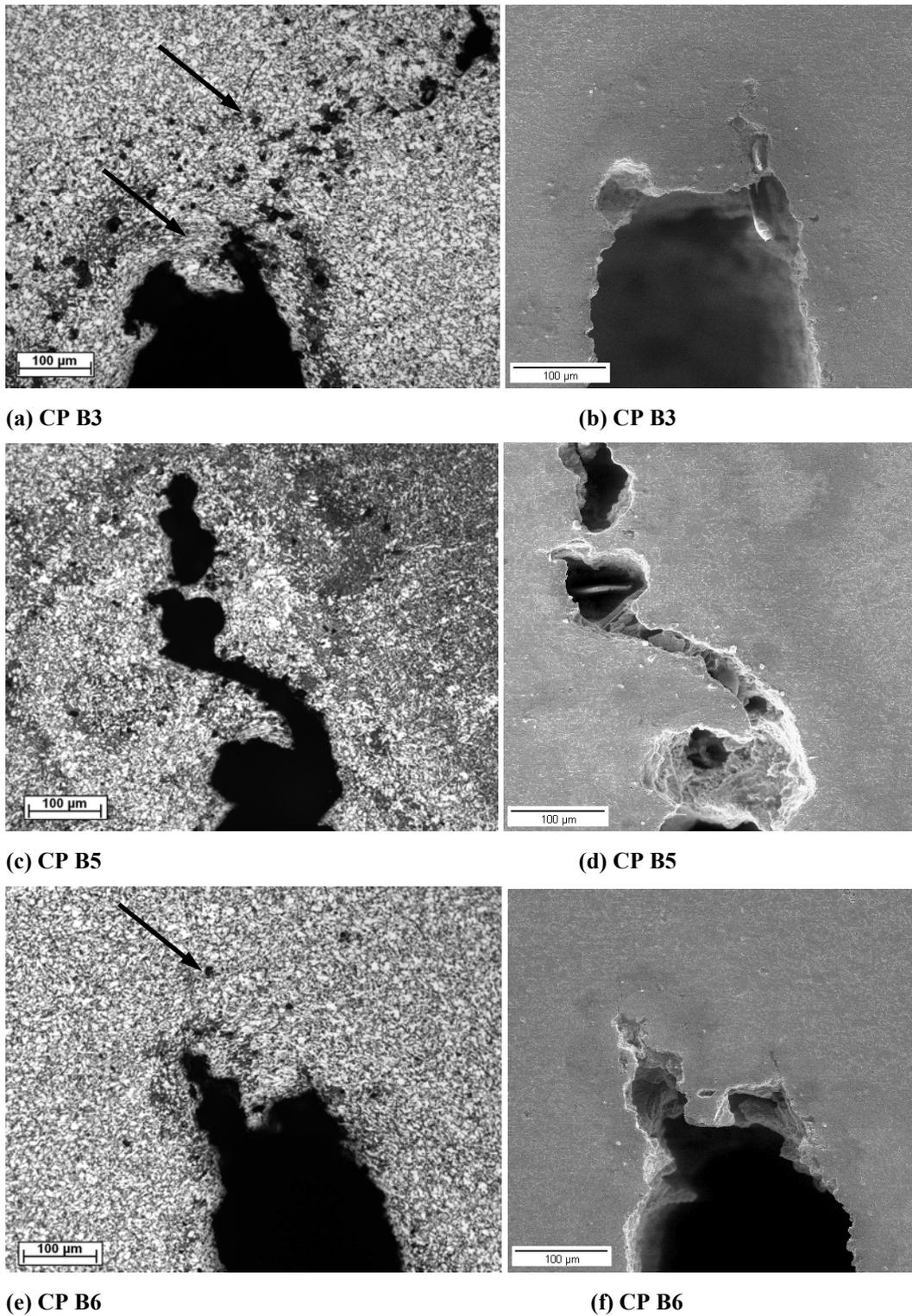


**Figura 32– Imagens mostrando os perfis de trinca dos corpos de prova dos aços A e B, seccionados após o ensaio de integral J**

As imagens das Figuras 33 e 34 foram obtidas no microscópio ótico e no microscópio eletrônico de varredura, onde são mostradas as regiões das pontas das trincas dos aços A e B.



**Figura 33-**Imagens do microscópio óptico e do microscópio eletrônico de varredura, caracterizando as regiões em torno das trincas dos corpos de prova do aço A. Observa-se a presença de vazios e muitas deformações em torno das trincas.

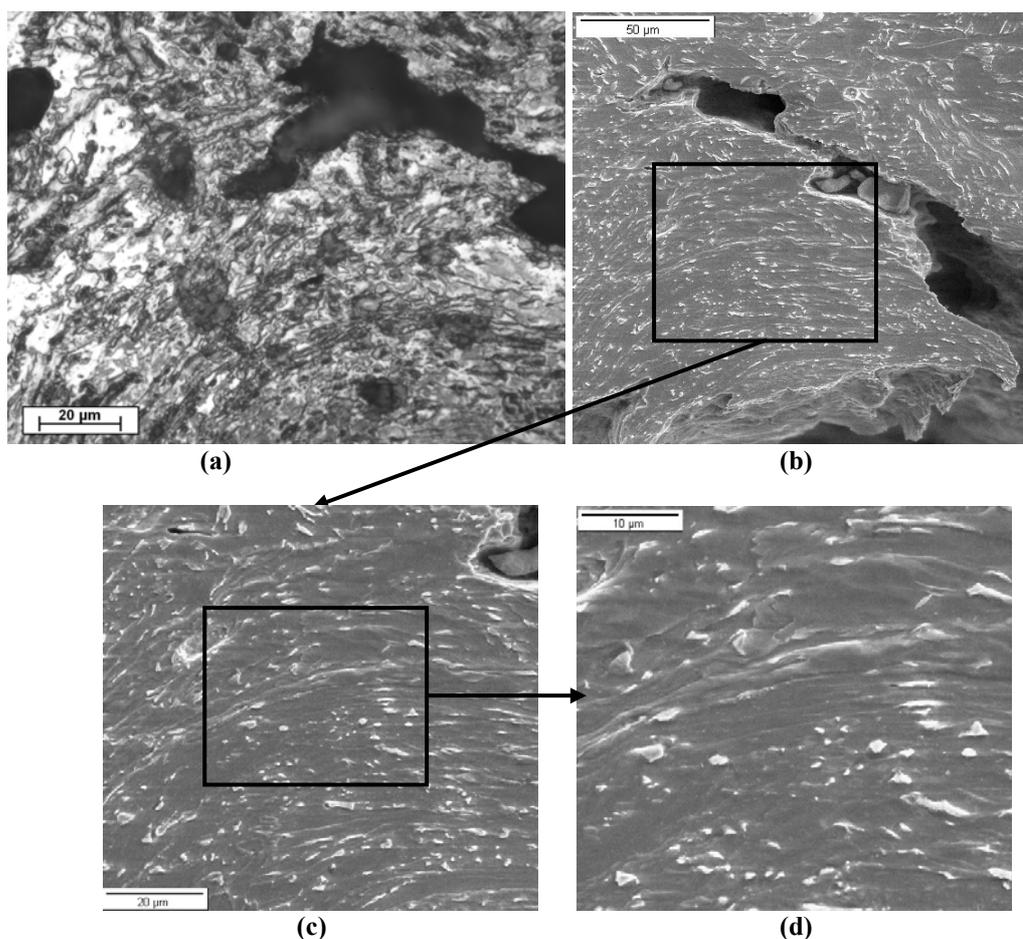


**Figura 34 –** Imagens do microscópio ótico e do microscópio eletrônico de varredura caracterizando as regiões em torno das trincas dos corpos de prova do aço B. Observa-se a presença de vazios e muitas deformações em torno das trincas.

São observadas nas imagens nas Figuras 33 e 34, muitas deformações plásticas em torno das trincas, com a ocorrência de microvazios, conforme pode

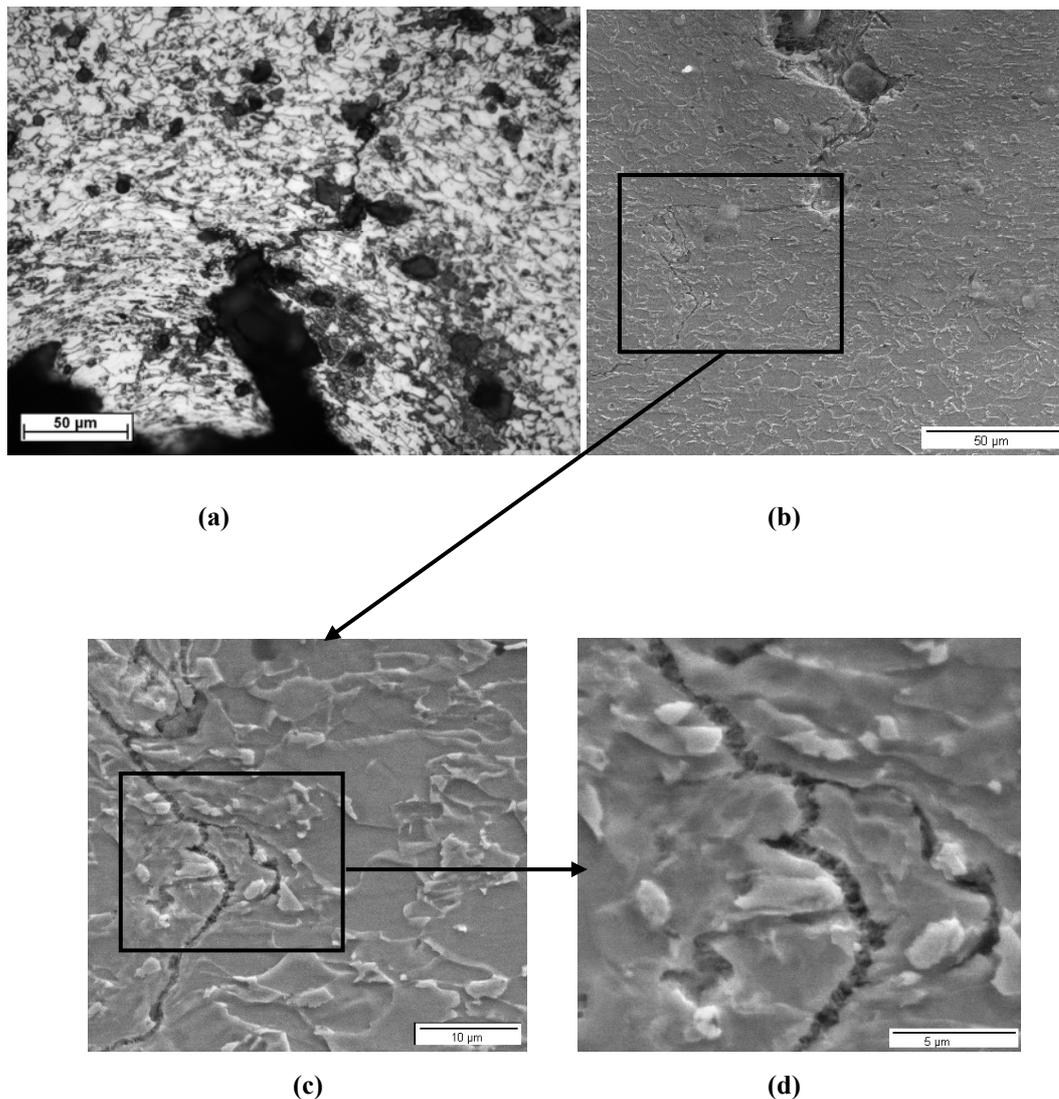
ser observado nas indicações feitas pelas setas. Os microvazios são característicos de materiais dúcteis onde através de suas nucleações e crescimento as trincas propagam. Contudo, não houve propagação suficiente das trincas de modo que pudesse realmente validar os ensaios de integral J. Em alguns casos, como podem ser visto na Figura 33, imagens (e) e (f) e na Figura 34, imagens (a), (b), (e) e (f), não houve crescimento efetivo de trinca e sim muitas deformações plásticas. Com a formação de microvazios, um princípio de coalescimento destes também é observado nas demais imagens.

Severas deformações e a geração de microvazios são observados nas imagens da Figura 35, onde em (a) podemos observar uma região com bastante deformação com a formação de vazios e o coalescimento. Na região analisada em (b) e detalhada em aumentos maiores em (c) e (d) são observadas muitas deformações, onde podem ser vistos os alongamentos dos grãos e dos constituintes AM provocados pelas deformações, demonstrando grande ductilidade do aço estudado.



**Figura 35-** Imagens do corpo de prova A3 do aço A, onde é observado muitas deformações e a formação de microvazios.

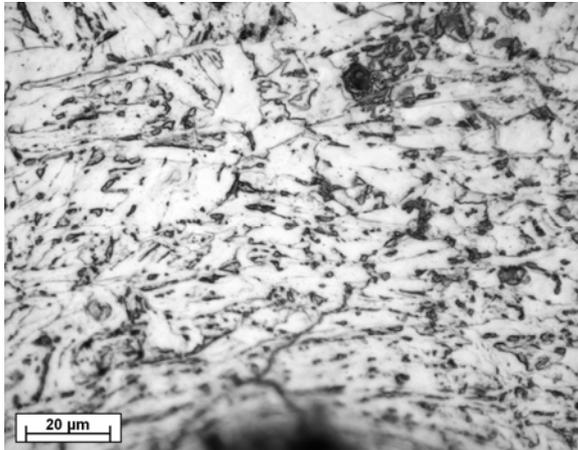
Na Figura 36 (a) foi analisado o corpo de prova B3 do aço B, sugerindo o crescimento de trinca através do coalescimento dos microvazios. Na Figura 36 (b) analisou-se por microscópio eletrônico de varredura a imagem da Figura 36 (a) e detalhadas em aumentos maiores em (c) e (d), onde é mostrada a propagação dúctil da trinca. Em ambas imagens observa-se muitas deformações na microestrutura que é composta de ferrita e de constituinte AM.



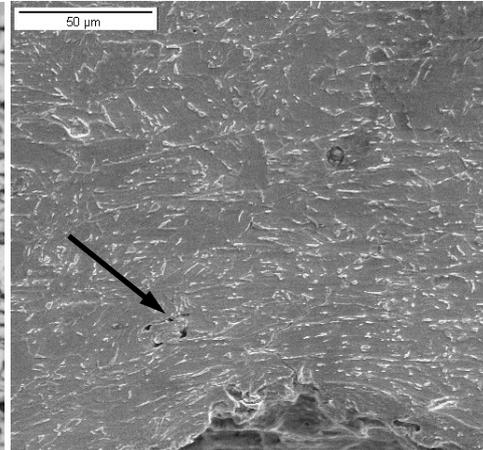
**Figura 36- Aço B, corpo de prova B3. Detalhes da propagação dúctil da trinca**

As imagens da Figura 37 completam as seqüências de imagens que foram realizadas para a caracterização das regiões em torno das trincas. Na Figura são mostradas imagens dos aço A, corpo de prova A5, e do aço B, corpo de prova B6, onde também pode ser observada a presença de microvazios indicados pelas setas

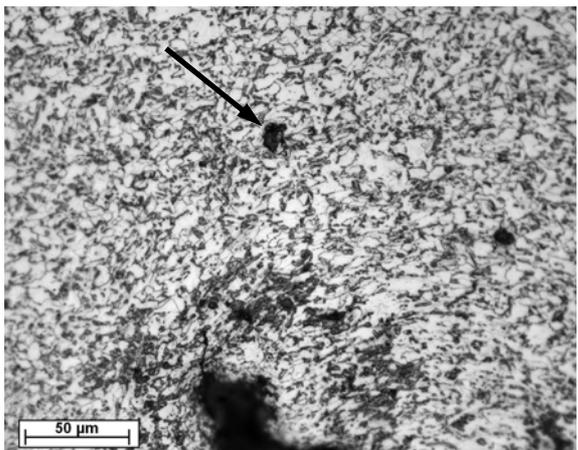
e as deformações ocorridas na microestrutura local que é composta de ferrita e de constituinte AM.



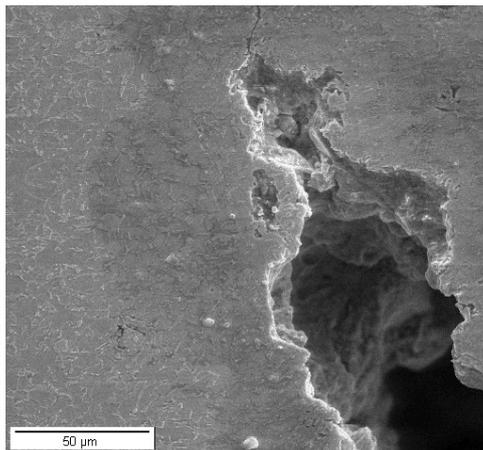
(a) CP A5



(b) CP A5



(c) CP B6



(d) CP B6

Figura 37-Imagens dos aços A e B, corpos de prova A5 e B6. Observam-se muitas deformações da microestrutura e a formação de vazios.