

4. RESULTADOS

4.1. Condição de pós-laminação

4.1.1. Caracterização metalográfica na condição de pós-laminação

Os aços Nb-Cr, Nb-Cr-Mo e Nb-Cr-Mo-V que foram observados na direção longitudinal de laminação apresentaram microestrutura complexa, heterogênea e refinada, onde os aumentos em microscopia óptica da ordem de 500X a 1000X não foram suficientes para resolver a microestrutura de forma inequívoca.

As Figuras 18, 20 e 22 mostram micrografias dos aços Nb-Cr, Nb-Cr-Mo e Nb-Cr-Mo-V pós-laminados em MO e as Figuras 19, 21 e 23 mostram as micrografias em MEV.

As microestruturas encontradas para os aços pós-laminados foi basicamente ferrita, havendo uma heterogeneidade quanto ao tamanho dos grãos de ferrita devido as etapas do seu processamento termo-mecânico, e bainita. Faixas de grãos grandes se intercalam com faixas de grãos pequenos de ferrita poligonal que acompanham “outras fases”. A nomenclatura “outras fases” foi inicialmente utilizada pois não era possível distinguir com precisão as fases que apareciam em relevo nas micrografias realizadas no MO. Posteriormente observações feitas em MEV e MET possibilitaram a identificação da fase como constituinte AM.

Os grãos grandes de ferrita provavelmente são grãos de ferrita primária provenientes da primeira recristalização da austenita, uma recristalização estática a temperaturas acima de 1000°C, que ocorre na chapa durante a etapa de desbaste. Essa ferrita primária se transformou antes de entrar na fase de acabamento da laminação portanto sofre crescimento de grão e deformação subsequente na laminação de acabamento.

Os grãos pequenos de ferrita, bainita e AM são formados durante a laminação de acabamento, onde o aço é laminado na região bifásica (austenita + ferrita).

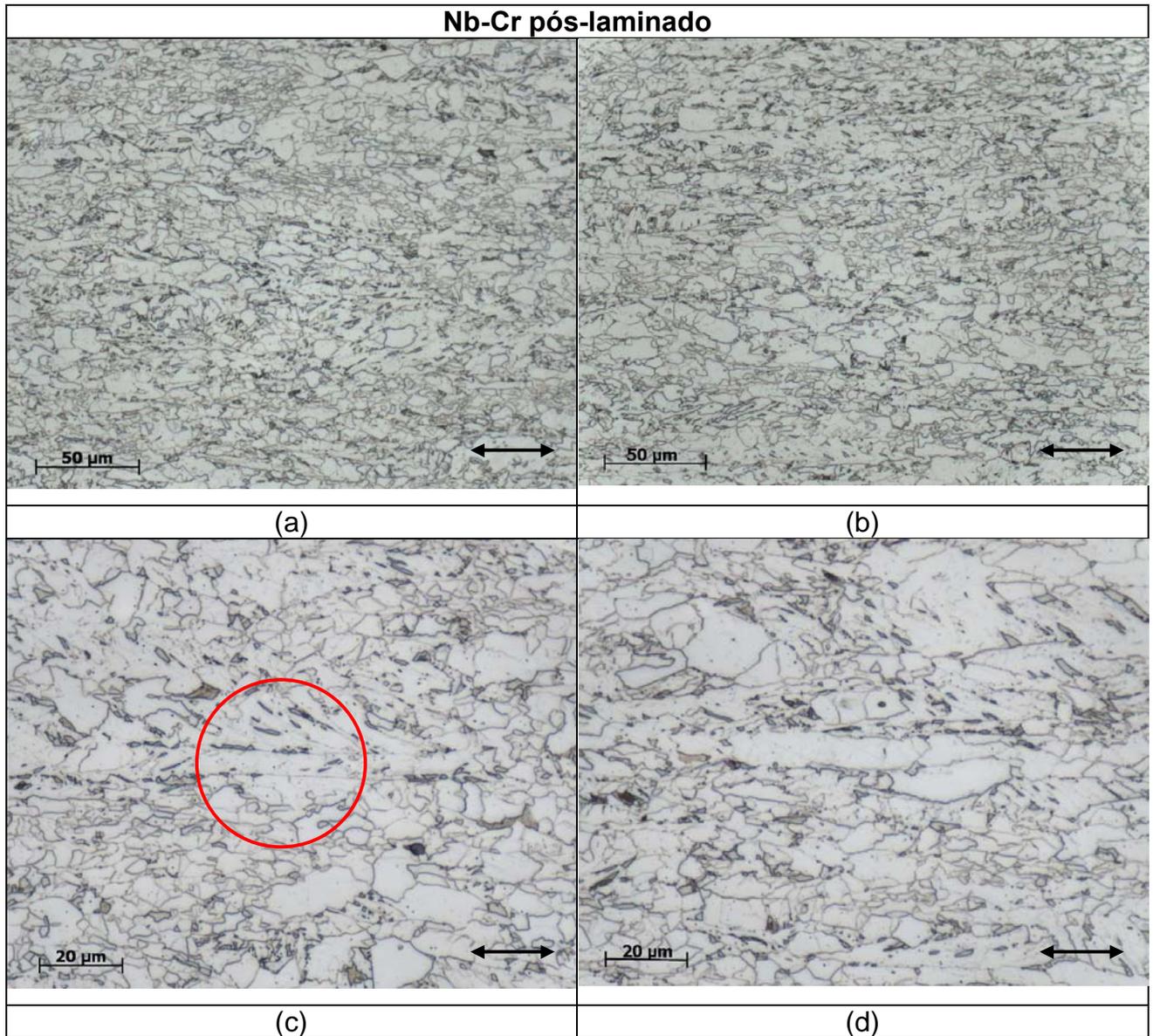


Figura 18. Micrografias do aço Nb-Cr pós-laminado em MO. Verificam-se grãos de ferrita poligonal sendo que alguns alongados, com uma distribuição de tamanho heterogênea, alguns contornos de grãos pouco visíveis como na Figura 18(c) (área circundada), bainita e o constituinte AM nas amostras (c) e (d) com aumento maior. O sentido de laminação está indicado nas micrografias pela seta. Ataque Nital 2%.

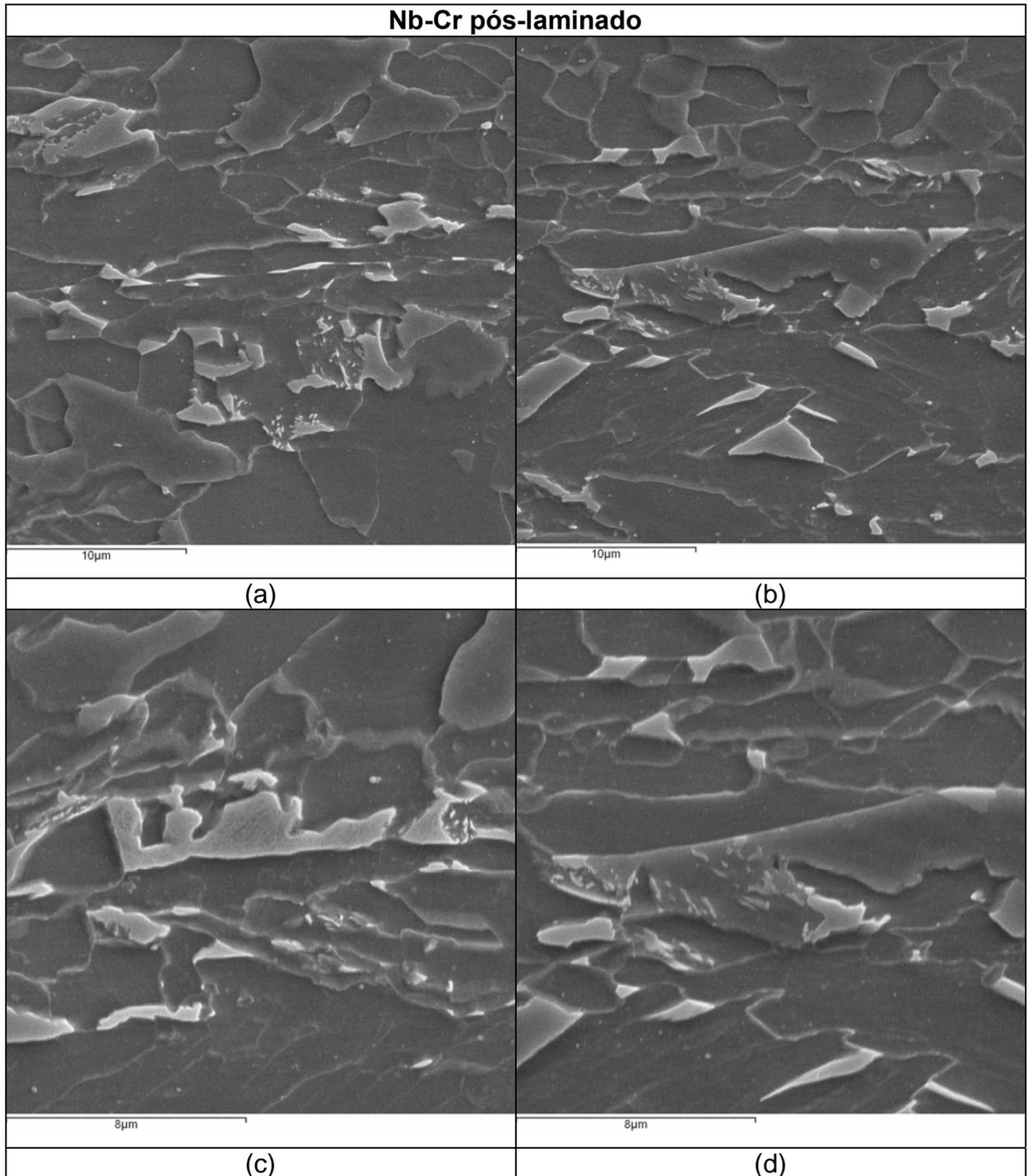


Figura 19. Micrografias do aço Nb-Cr pós-laminado em MEV. Verificam-se fases como a bainita, constituinte AM massivo e grãos de ferrita poligonal. Alguns contornos de grãos são pouco visíveis mas podem ser melhor observados no MEV e apresentam AM alongado ajudando a visualização dos contornos. Ataque Nital 2%.

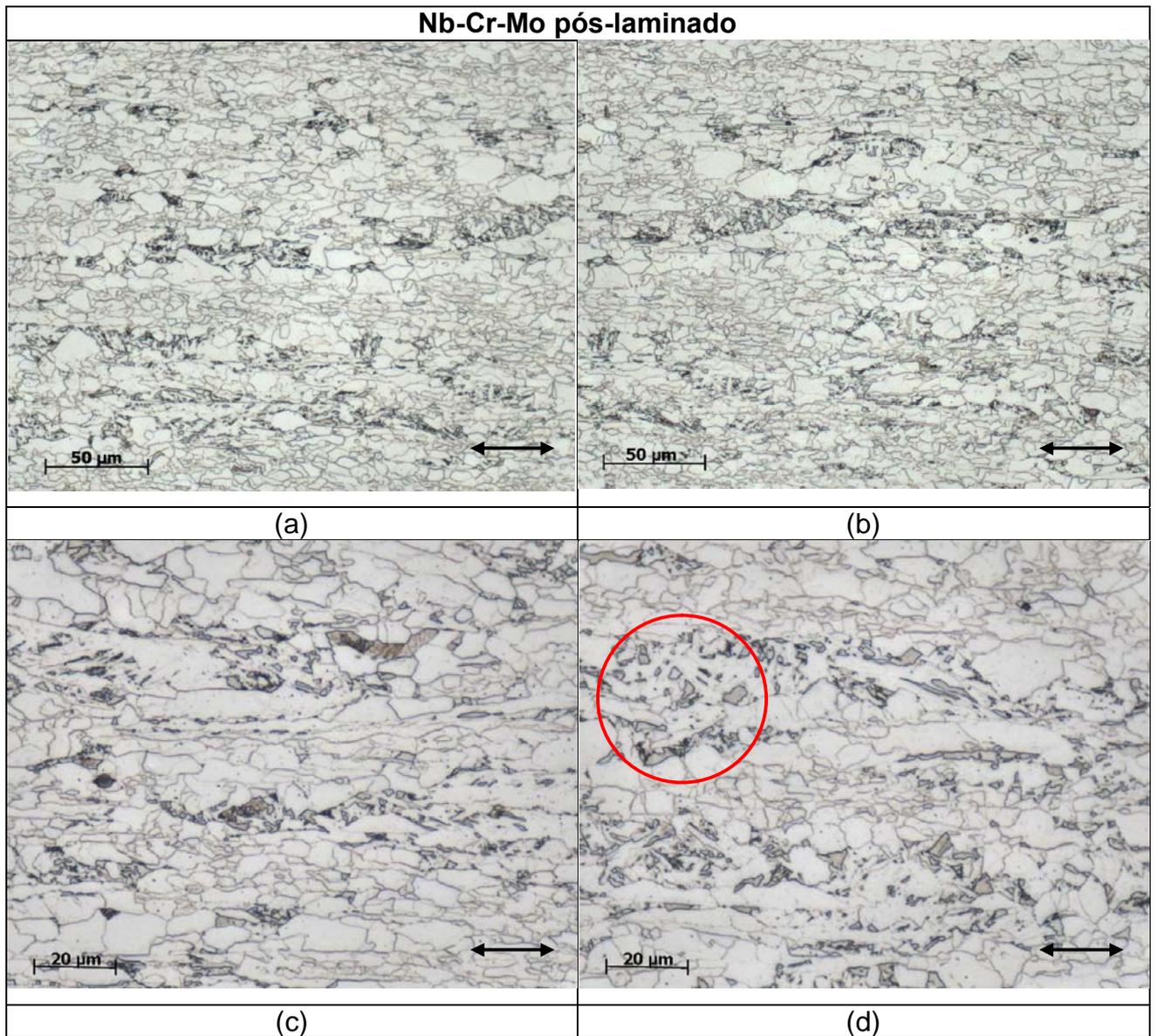


Figura 20. Micrografias do aço Nb-Cr-Mo pós-laminado em MO. Verificam-se grãos de ferrita poligonal sendo que alguns alongados, com uma distribuição de tamanho heterogênea, alguns contornos de grãos pouco visíveis como na Figura 20(d) (área circundada), bainita e o constituinte AM nas amostras (c) e (d) com aumento maior. O sentido de laminação está indicado nas micrografias pela seta. Ataque Nital 2%.

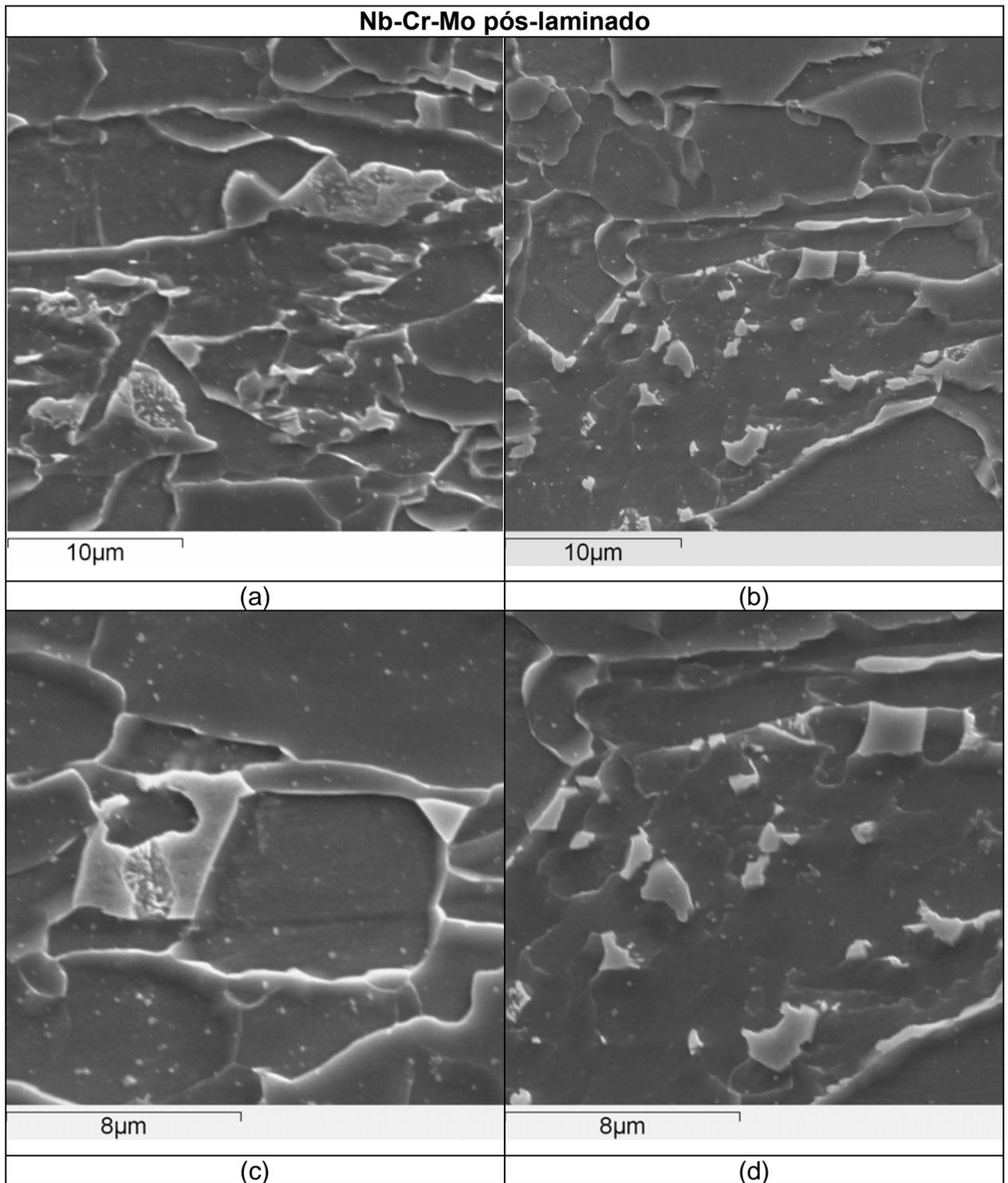


Figura 21. Micrografias do aço Nb-Cr-Mo pós-laminado em MEV. Verificam-se fases como a bainita envolta a AM, constituinte AM massivo e grãos de ferrita poligonal com precipitados no seu interior. Alguns contornos de grãos são pouco visíveis mas podem ser melhor observados no MEV pois algumas vezes o AM encontra-se nos contornos facilitando a visualização. Ataque Nital 2%.

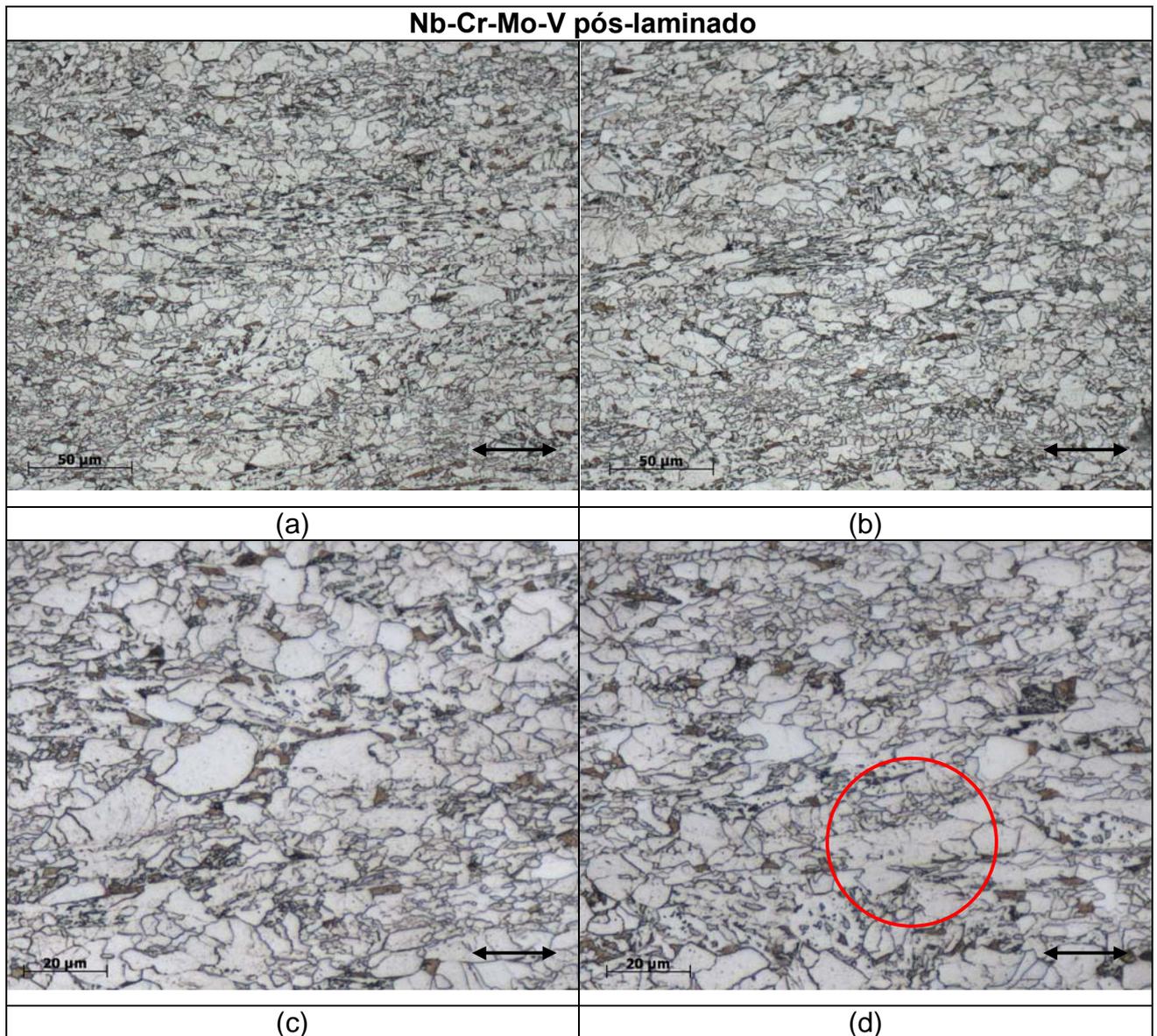


Figura 22. Micrografias do aço Nb-Cr-Mo-V pós-laminado em MO. Verificam-se grãos de ferrita poligonal sendo que alguns alongados, com uma distribuição de tamanho heterogênea, alguns contornos de grãos pouco visíveis como na Figura 22(d) (área circundada), bainita e o constituinte AM nas amostras (c) e (d) com aumento maior. O sentido de laminação está indicado nas micrografias pela seta. Ataque Nital 2%.

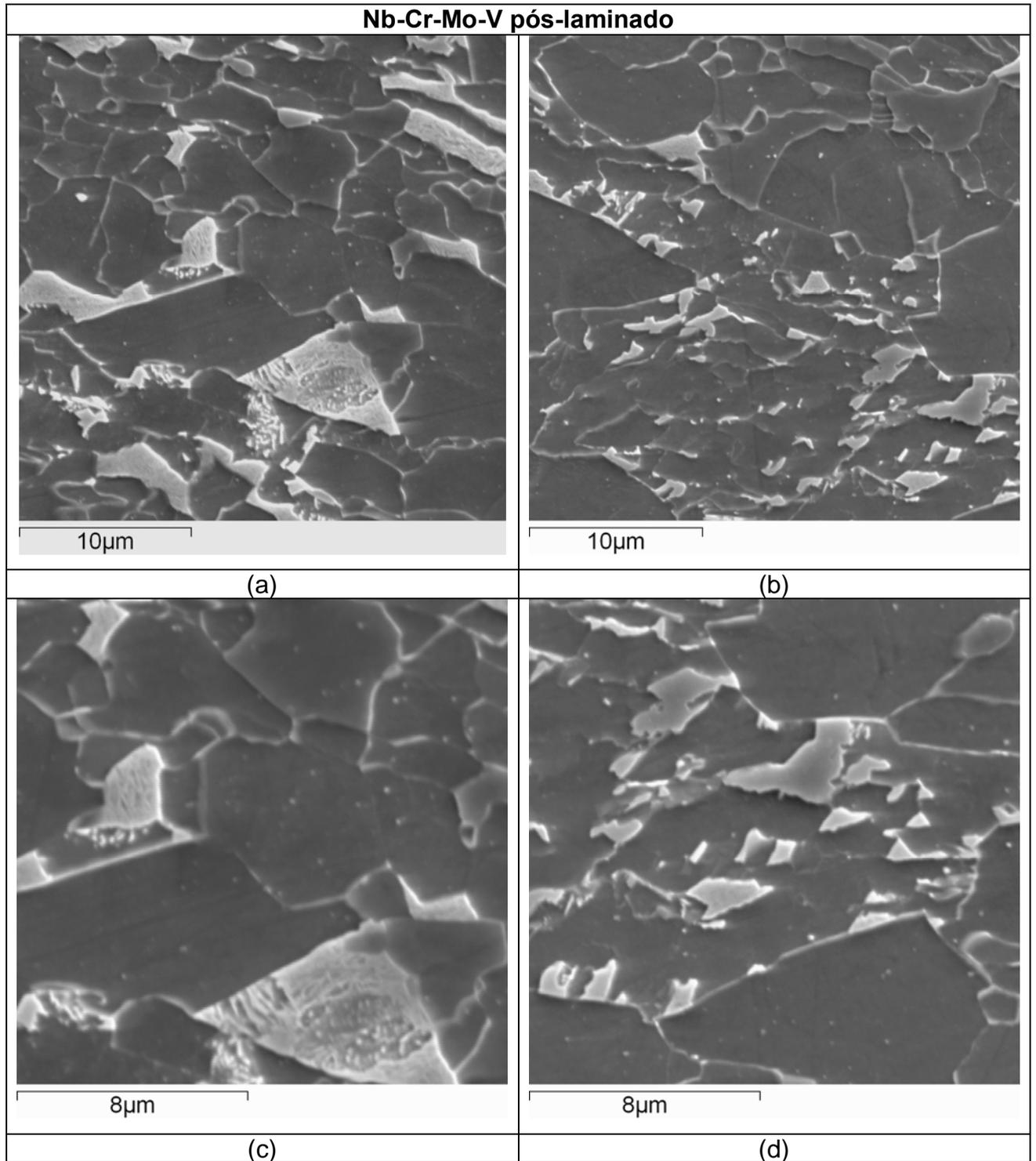


Figura 23. Micrografias do aço Nb-Cr-Mo-V pós-laminado em MEV. Verificam-se fases como a bainita, constituinte AM massivo e grãos de ferrita poligonal com precipitados no seu interior. Alguns contornos de grãos são pouco visíveis mas podem ser melhor observados no MEV pois partículas de AM encontram-se nos contornos facilitando a visualização. Ataque Nital 2%.

Os três aços, Nb-Cr, Nb-Cr-Mo e Nb-Cr-Mo-V apresentam as mesmas microestruturas: ferrita poligonal, bainita e constituinte AM (Figuras 18-23). O constituinte AM ora aparece como AM massivo, ora como AM alongado nos contornos de grão. Os grãos de ferrita poligonal apresentam precipitados no seu interior e isso é mais aparente nos aços Nb-Cr-Mo e Nb-Cr-Mo-V. Alguns contornos de grãos são pouco visíveis, mesmos nos maiores aumentos feitos em MEV, entretanto eles podem ser melhor observados no MEV do que no MO pois partículas de AM que encontram-se nos contornos facilitam a sua visualização (Figuras 18(c), 20(d), 22(d)).

Muitas vezes o grão de bainita apresenta-se associado ao AM, contornando a fase, o que pode ser visto nas figuras do MEV (Figuras 19, 21, 23).

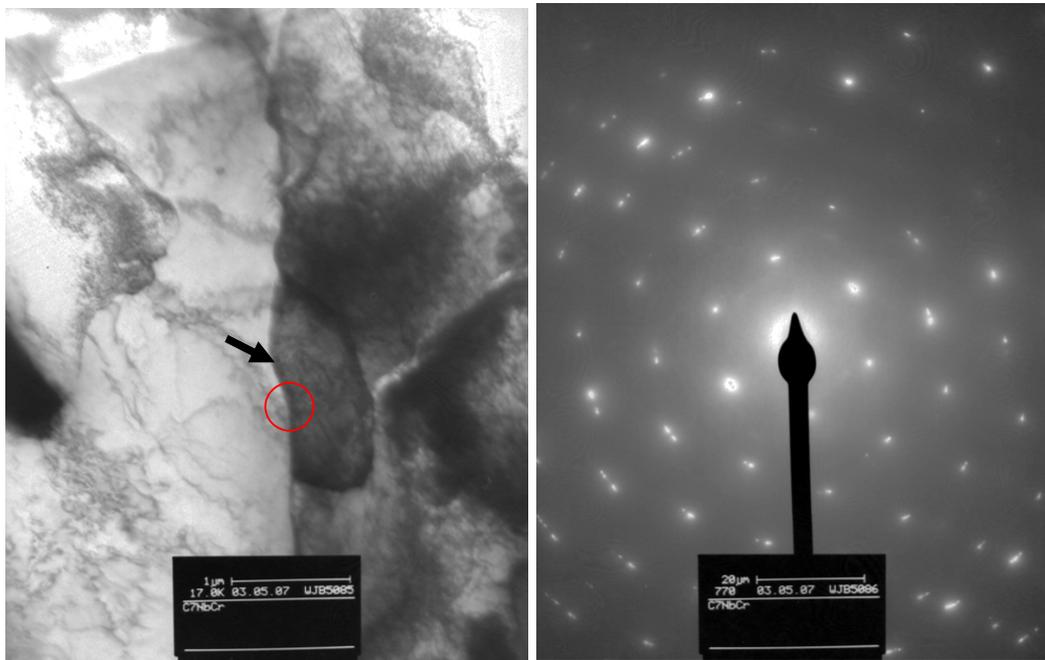
Apesar dos 3 tipos de aço apresentarem composição química diferente, nas investigações em microscopia óptica e de varredura eles parecem não ter diferenças significativas quanto a microestrutura. Nota-se que o aço Nb-Cr-Mo-V parece apresentar um menor tamanho de grão e mais bainita na sua microestrutura, fato que será verificado nas medições de tamanho de grão e fração volumétrica nos itens a seguir.

A princípio como foi verificado que alguns contornos de grão não eram facilmente atacados resolveu-se utilizar um tempo de ataque mais longo. Ao invés de utilizar de 15 a 20s foi aplicado um ataque com 25 a 30s. Este recurso não ofereceu uma boa definição dos contornos de grão para o MO e atacou demasiado a bainita. No trabalho realizado K. Poorhaydari, B.M. Patchett comenta-se que alguns contornos de grãos também foram difíceis de serem atacados e por isso a medição do tamanho de grão foi feita por MET. A dificuldade de visualização dos contornos foi atribuída a textura do aço [20].

Neste trabalho também foi verificado que os aços estudados apresentavam forte textura. A partir de observações por microscopia eletrônica de transmissão (MET) foi possível verificar que padrões de difração obtidos entre grãos vizinhos estavam bastante próximos e também foi observado uma subdivisão de alguns grãos alongados das amostras pós-laminadas em grãos menores, ou seja, sub-grãos (Figura 24). A textura forte foi verificada em todos os 3 tipos de aço mas os sub-grãos só foram verificados nas amostras dos aços Nb-Cr-Mo e Nb-Cr-Mo-V.

O aço Nb-Cr-Mo-V foi o que apresentou a maior quantidade de sub-grãos que subdividiam os grãos de ferrita mais alongados.

A Figura 24(a) a seguir, mostra um sub-grão entre dois grãos maiores no aço Nb-Cr. Na Figura 24(b) observamos figuras de difração bem próximas sendo que esta figura de difração foi feita com a abertura da objetiva colocada no contorno entre o grão e o sub-grão. A ocorrência de padrões de difração próximos indica que estes grãos possuem a mesma cristalografia e apresenta orientações bem próximas.



(a)

(b)

Figura 24. Sub-grão na amostra do aço Nb-Cr. Figura de difração abrangendo o sub-grão e o grão adjacente. A área circundada mostra o local onde a abertura foi colocada, ou seja, no contorno entre grão e o sub-grão. As figuras de difração são muito próximas.

A Figura 25 apresenta um grão de bainita alongada no aço Nb-Cr-Mo pós-laminado.

A Figura 26 apresenta uma fase escura, com uma subestrutura interna de discordâncias, localizada entre grãos de ferrita do aço Nb-Cr-Mo pós-laminado.

Observa-se uma grande densidade de discordâncias dentro da partícula, a qual verifica-se ser um constituinte AM massivo.

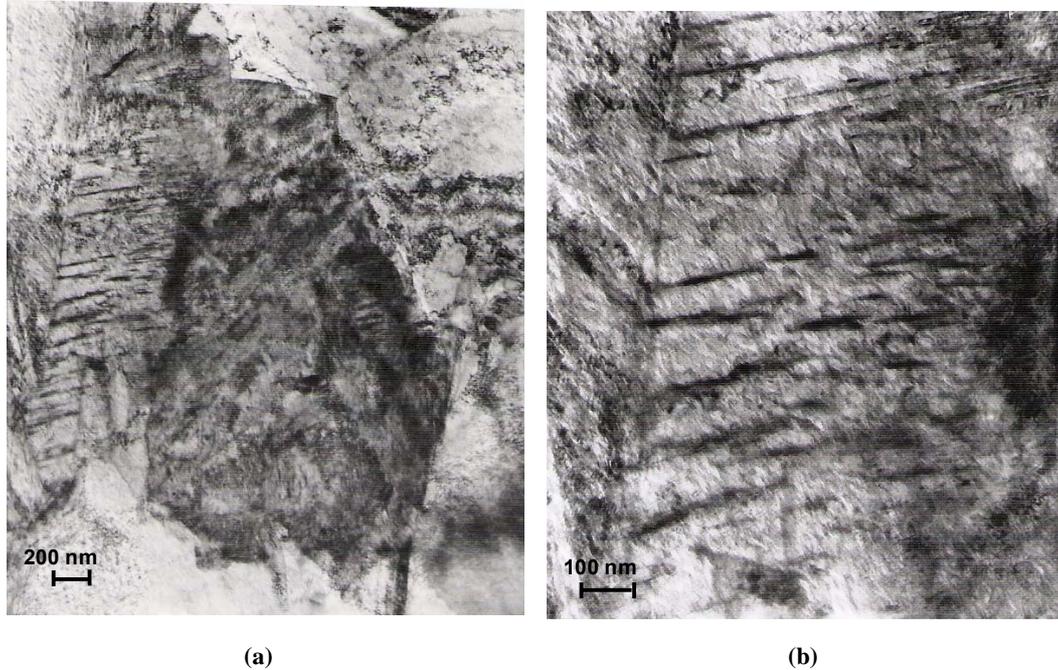


Figura 25. Imagens em MET da microestrutura do aço Nb-Cr-Mo (a) Grão de bainita alongado (b) Aumento do grão de bainita mostrando os carbonetos.

Através de observações dos precipitados, que foram feitas no aço Nb-Cr-Mo utilizando-se da técnica de difração para obtenção de um maior contraste e microanálise, foram encontrados precipitados localizados tanto nos contornos de grão como na matriz de ferrita. Os precipitados encontrados apresentaram dimensões entre 50 a 100nm de comprimento e 20 a 50nm de largura e sempre encontravam-se associados a discordâncias ou contornos de dobramento. Os precipitados que tinham a forma facetada apresentaram a presença de titânio e os que tinham a borda arredondada apresentavam picos de Nb no espectro do EDS. A maioria dos precipitados observados no aço Nb-Cr-Mo apresentou ambos os picos de Ti e Nb no espectro de EDS (carbo-nitretos de Nb-Ti) (Figura 27).



Figura 26. Imagem em MET de uma fase escura localizada entre grãos de ferrita poligonal, na amostra de aço Nb-Cr-Mo pós-laminado. A fase escura é um constituinte AM.

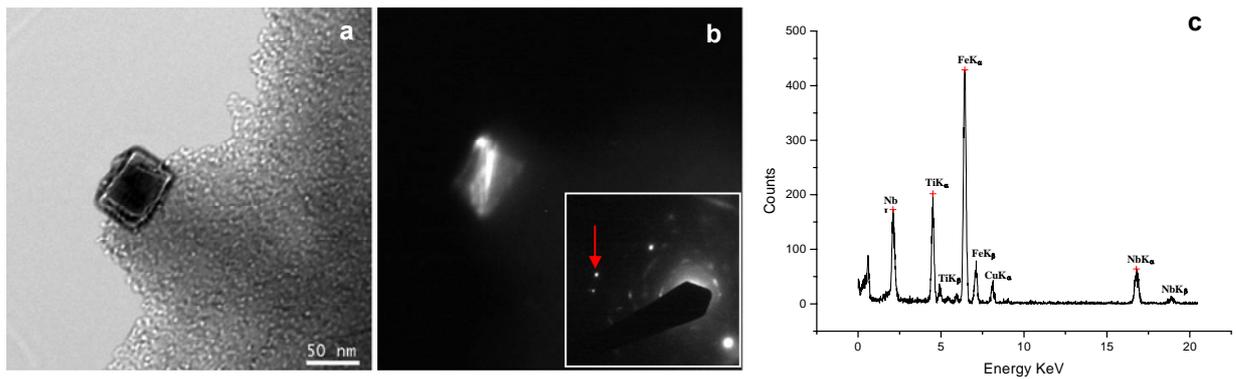


Figura 27. (a) Imagem em campo claro de um grande precipitado na matriz do aço Nb-Cr-Mo (b) Imagem em campo escuro centrado do ponto no padrão de difração (c) Espectro de EDS.

Foi observada evidência de nucleação de um precipitado em outro e muitas vezes os precipitados encontravam-se aglomerados em colônias (Figura 28).

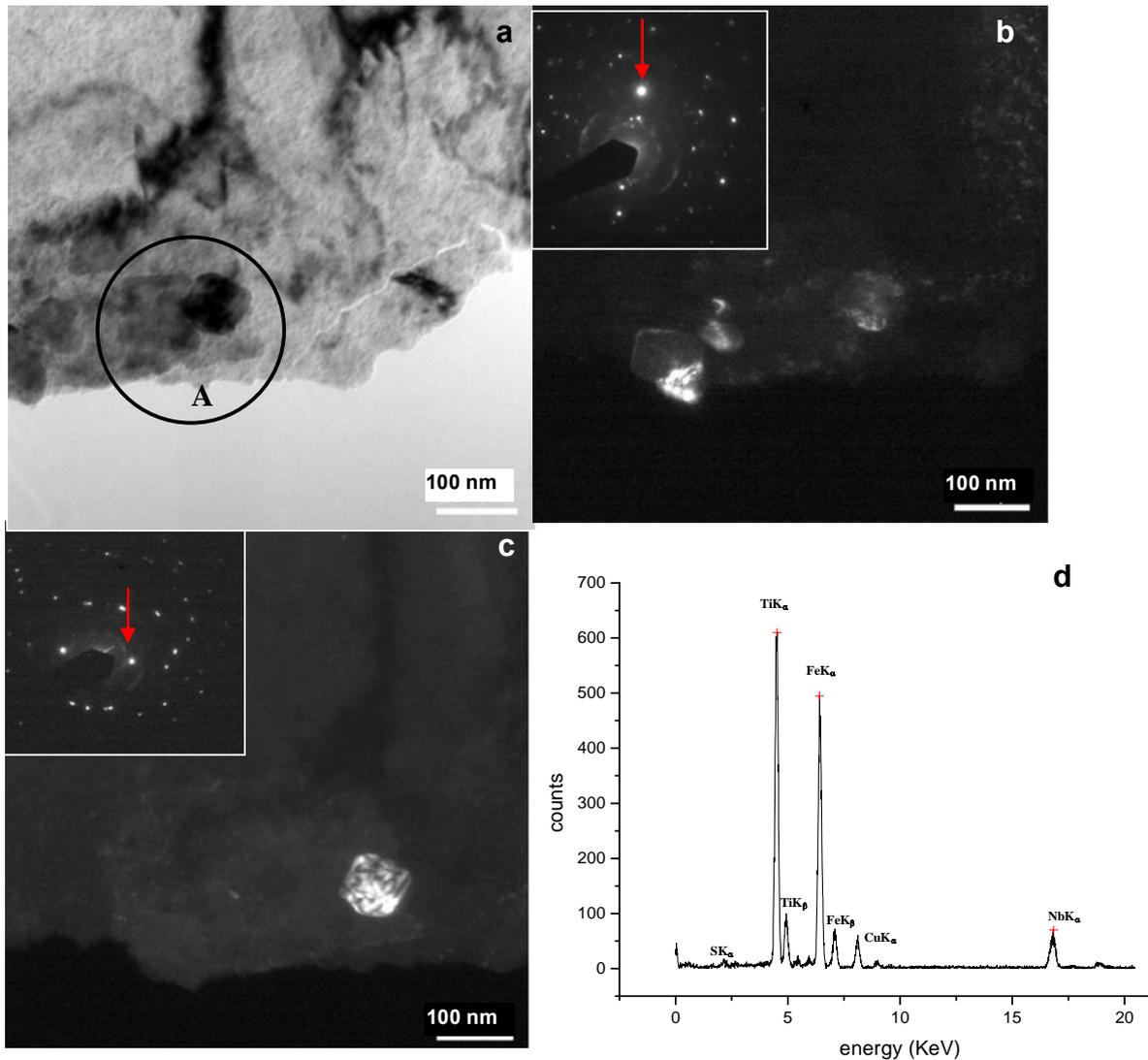


Figura 28. (a) Imagem em campo claro de uma colônia de carbo-nitretos (área circundada A) no aço Nb-Cr-Mo pós-laminado (b) e (c) Imagens em campo escuro centrado de diferentes precipitados e anexados aos padrões de difração respectivos (d) Microanálise do precipitado mostrado na figura 5(c) mostrando picos de Nb e Ti.

Também foram encontrados precipitados finos nas dimensões de 2 a 4 nm dispersos na matriz do aço Nb-Cr-Mo (Figura 29).

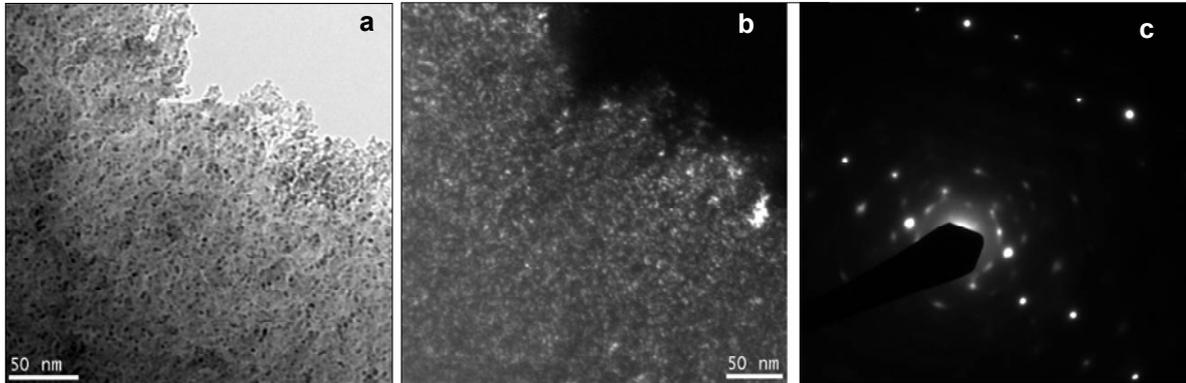
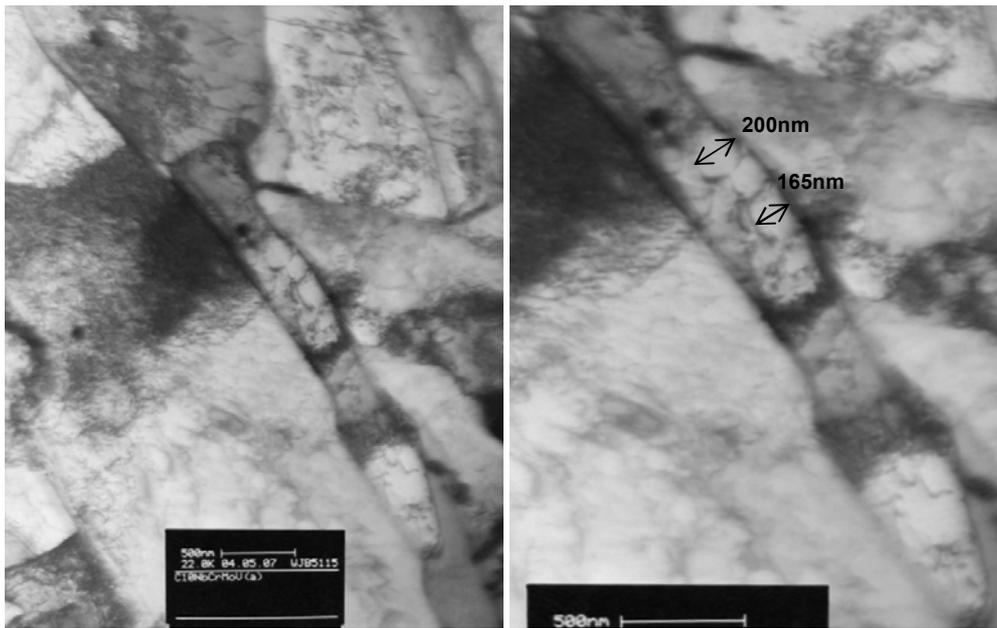


Figura 29. (a) Imagem em campo claro de precipitados finos no aço Nb-Cr-Mo (b) Imagem em campo escuro dos precipitados (c) Padrão de difração de área selecionada

A Figura 30(a) obtida do aço Nb-Cr-Mo-V, mostra grãos alongados com o que aparenta ser uma subestrutura de células internamente (Figura 30b). As células possuem diâmetros na faixa de 200nm.

No aço Nb-Cr-Mo-V também foi observada precipitação fina de carbeto em regiões do grão ferrítico onde continham grande densidade de discordâncias (Figura 31).

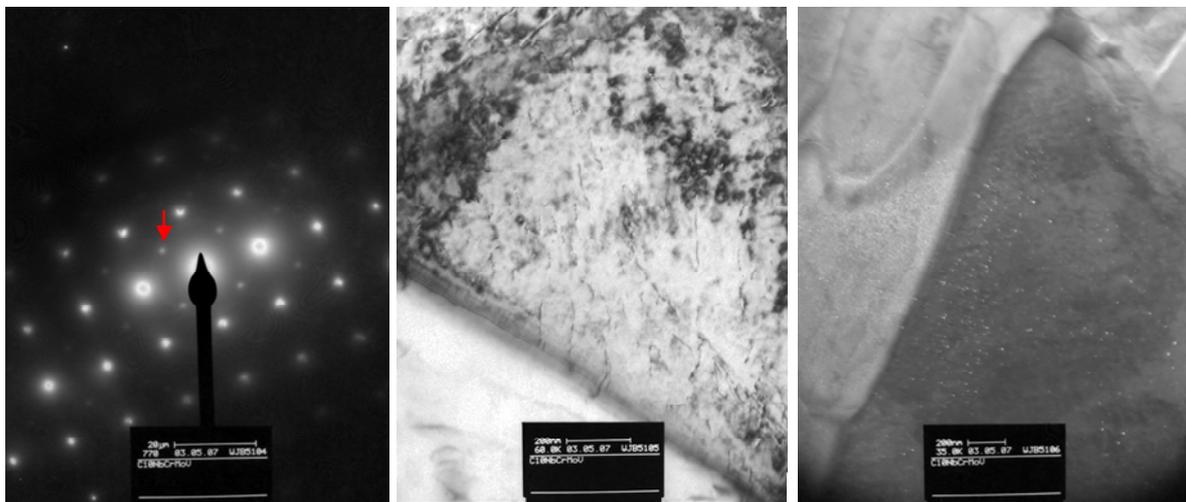
Fases escuras foram verificadas na microestrutura dos três aços estudados neste trabalho. Não foi possível obter grandes informações sobre sua subestrutura ou seus padrões de difração mas pelas características morfológicas apresentadas em MEV e MET verifica-se que se tratam do constituinte AM. Elas apresentam-se tanto na forma alongada, e neste caso estão associadas ao contorno de grão, como na forma massiva, posicionada em pontos triplos. Na maior parte das vezes os constituintes AM (austenita retida-martensita) estavam associadas aos grãos bainíticos como pôde também ser verificado nas micrografias feitas em MEV (Figura 32).



(a)

(b)

Figura 30. (a) Subestrutura de células na amostra do aço Nb-Cr-Mo-V. (b) Ampliação do grão alongado apresentando medidas das células do seu interior.



(a)

(b)

(c)

Figura 31. (a) Figura de difração em grão de ferrita do aço Nb-Cr-Mo-V que apresenta concentração de discordâncias. (b) Campo claro do grão ferrítico mostrando as discordâncias. (c) Campo escuro da mesma região mostrando os precipitados, obtido após seleção de área do padrão de difração.

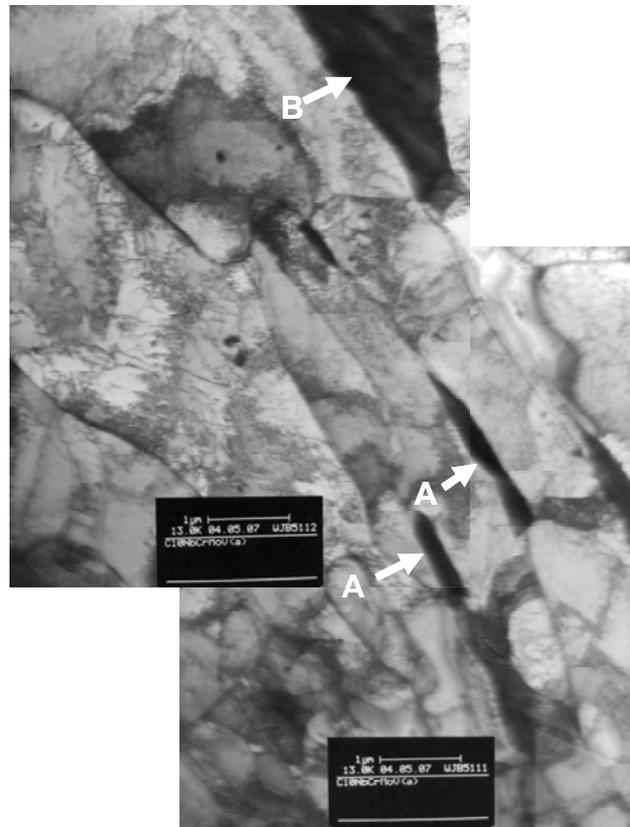


Figura 32. Imagem em campo claro da microestrutura do aço Nb-Cr-Mo-V. AM (fases escuras) alongados (A) e massivos (B).

4.1.2. Fração volumétrica das fases na condição de pós-laminação

A quantificação de fases para as amostras pós-laminadas, foram realizadas a partir de imagens obtidas em MO. Os resultados da contagem estão apresentados na Figura 33.

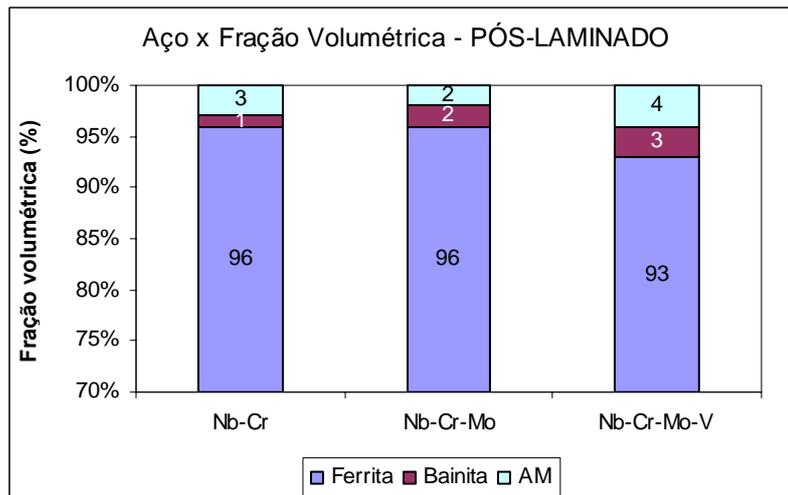


Figura 33. Fração volumétrica das fases para os três tipos de aço Nb-Cr, Nb-Cr-Mo e Nb-Cr-Mo-V.

As amostras dos aços Nb-Cr, Nb-Cr-Mo e Nb-Cr-Mo-V pós-laminadas apresentaram basicamente a mesma quantidade das fases de ferrita, bainita e constituinte AM.

4.1.3. Dureza na condição de pós-laminação

Foi realizada a dureza Rockwell B (HR_B) das amostras pós-laminadas e seus valores estão apresentados na Tabela 8.

Tabela 8. Dureza Rockwell (HR_B) dos aços Nb-Cr, Nb-Cr-Mo e Nb-Cr-Mo-V pós-laminação

AÇO	Dureza (HR_B)
Nb-Cr pós-laminado	89 ± 2
Nb-Cr-Mo pós-laminado	89 ± 3
Nb-Cr-Mo-V pós-laminado	90 ± 2

Os valores de dureza médios, considerando os erros, foram os mesmos para os aços Nb-Cr, Nb-Cr-Mo e Nb-Cr-Mo-V.

4.1.4. Microdureza na condição de pós-laminação

Foi realizada a microdureza Vickers das amostras pós-laminadas e seus valores estão apresentados na Tabela 9.

Tabela 9. Microdureza Vickers (HV_{100}) dos aços Nb-Cr, Nb-Cr-Mo e Nb-Cr-Mo-V pós-laminação

AÇO	Microdureza (HV_{100})
Nb-Cr pós-laminado	233±8
Nb-Cr-Mo pós-laminado	220±9
Nb-Cr-Mo-V pós-laminado	245±12

O valor de microdureza médio foi mais alto para o aço Nb-Cr-MoV, e similar para os aços Nb-Cr e Nb-Cr-Mo, entretanto se considerarmos o erro os três valores de microdureza não apresentam diferenças significativas.

4.1.5. Tamanho de grão na condição de pós-laminação

Os resultados apresentados na Tabela 10 obtidos para as medidas de tamanho de grão foram realizados em MEV.

Tabela 10. Tamanho de grão dos aços Nb-Cr, Nb-Cr-Mo e Nb-Cr-Mo-V pós-laminado

Amostras pós-laminadas retirada na direção transversal		
Aço	TG (μm)	TG ASTM
Nb-Cr pós-laminado	4,0	13
Nb-Cr-Mo pós-laminado	3,8	13
Nb-Cr-Mo-V pós-laminado	3,7	13

Todos os aços apresentaram tamanho de grão similar, ASTM 13.

4.2. Condição após aplicação dos ciclos térmicos

4.2.1. Determinação da taxa de resfriamento

As taxas de resfriamento foram obtidas através do coeficiente angular da reta ajustada a curva de resfriamento, no intervalo de temperatura entre 400°C e 700°C, das amostras que foram realizados o monitoramento de temperatura x tempo. As 3 condições foram feitas: resfriamento ao ar calmo, ao óleo e a água.

A Figura 34 mostra o registro das curvas de resfriamento e as taxas médias calculadas para cada ciclo térmico aplicado.

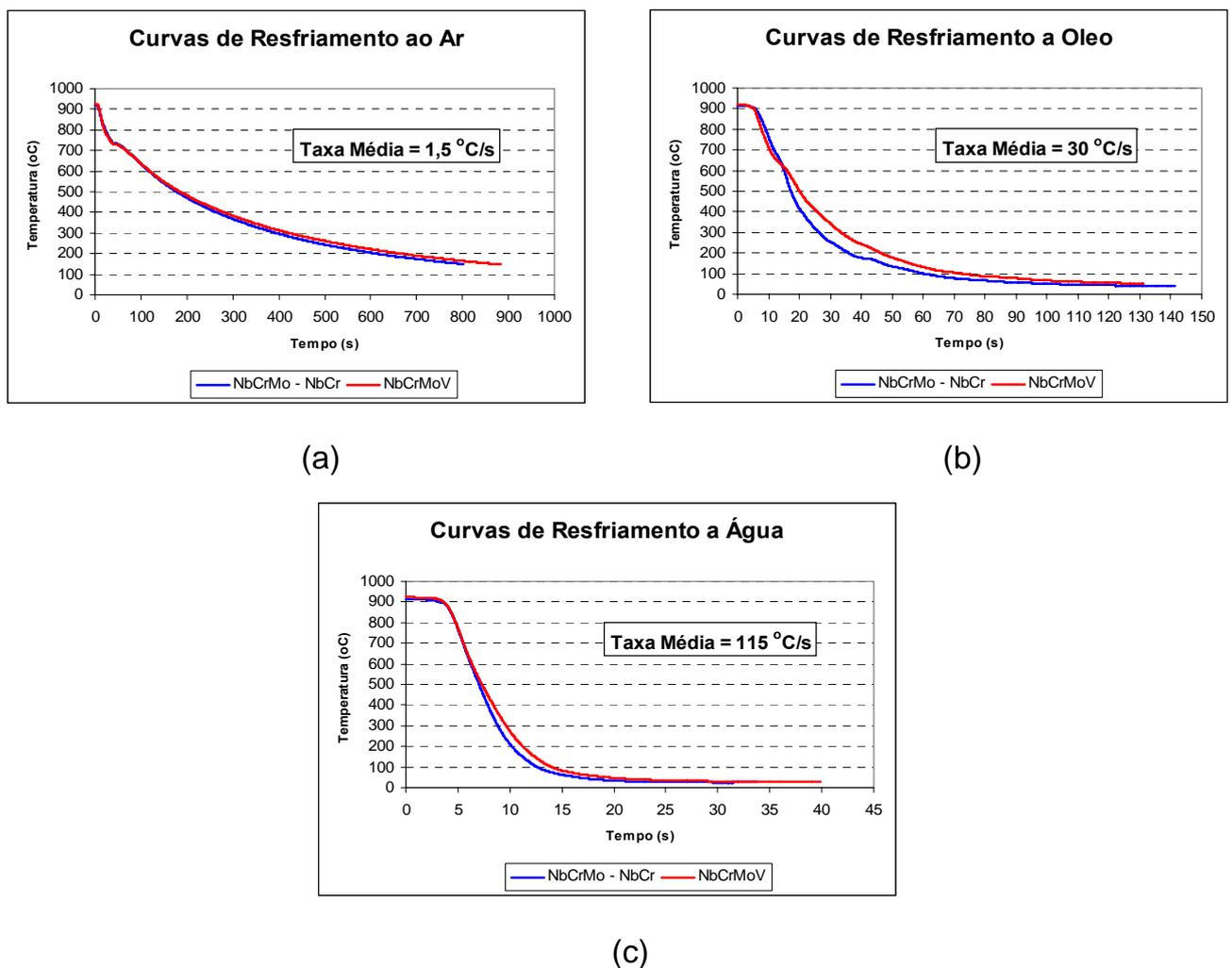


Figura 34. Curvas de resfriamento e taxas médias de resfriamento para os aços Nb-Cr, Nb-Cr-Mo e Nb-Cr-Mo-V resfriado (a) ao ar, (b) ao óleo e (c) a água.

A Tabela 11 apresenta as taxas de resfriamento obtidas para os ensaios realizados nas amostras dos aços estudados nesse trabalho.

Tabela 11. Média das taxas de resfriamento obtidas para os ensaios realizados nas amostras de aço APIX80 em três meios diferentes: ar, óleo e água.

Modo de resfriamento	Taxa de resfriamento média (°C/s)
Ar calmo	1,5
Óleo	30
Água	115

4.2.2. Caracterização metalográfica após aplicação dos ciclos térmicos

Após realização dos ciclos térmicos de resfriamento ao ar (1,5°C/s), ao óleo (30°C/s) e a água (115°C/s), as amostras dos aços Nb-Cr, Nb-Cr-Mo e Nb-Cr-Mo-V foram inicialmente observadas em MO (Figuras 35, 37, 39) e em MEV (Figuras 36, 38, 40).

Através da observação das micrografias nas Figuras 35 e 36 verificamos que para os aços Nb-Cr e Nb-Cr-Mo, o resfriamento ao ar (1,5°C/s) apresentou microestruturas bastante similares entre si mas diferentes daquelas apresentadas pelo aço Nb-Cr-Mo-V (Figuras 35 e 36). O mesmo padrão de comportamento se repete para o ciclo de resfriamento ao óleo (30°C/s) (Figuras 37 e 38), ou seja, o aço Nb-Cr-Mo-V apresentou microestrutura diferenciada também nesta taxa de resfriamento. Já para a taxa de resfriamento mais alta, ou seja, o resfriamento a água (115°C/s), os três aços apresentaram microestrutura diferenciada entre si (Figuras 39 e 40).

As microestruturas encontradas para os aços Nb-Cr e Nb-Cr-Mo e Nb-Cr-Mo-V resfriados ao ar foram a ferrita poligonal onde por ser visto alguma precipitação interna, bainita e o constituinte AM que pôde ser mais bem identificado com auxílio do MEV e que muitas vezes encontrava-se associado aos grãos de bainita (Figura 36).

Há uma heterogeneidade no tamanho de grão (TG) das amostras resfriadas ao ar que foi mantida mesmo com a aplicação deste ciclo térmico de resfriamento a partir das amostras pós-laminadas. Entretanto essa heterogeneidade de TG apresenta uma uniformidade: os grãos grandes de ferrita se misturam uniformemente com grãos pequenos de ferrita ao longo da microestrutura, diferente da microestrutura dos aços pós-laminados, que apresenta faixas com grãos grandes de ferrita intercaladas com faixas de grãos pequenos de ferrita, bainita e AM. Observa-se um tamanho de grão menor no aço Nb-Cr-Mo-V resfriado ao ar quando comparado aos aços Nb-Cr e Nb-Cr-Mo resfriados ao ar.

Nas observações em MO para as amostras resfriadas ao ar ($1,5^{\circ}\text{C/s}$) também foram encontrados contornos de grãos que foram difíceis de serem revelados, como nas amostras de aço pós-laminado. Novamente verificamos que alguns dos contornos de grão, que não foram possíveis de observar no MO, podem ser distinguidos no MEV. Portanto a medição do tamanho de grão para amostras que sofreram os ciclos térmicos também foi feita através das imagens do MEV.

As amostras resfriadas ao óleo (Figuras 37 e 38) apresentaram grãos de ferrita poligonais, bainita e AM, para os aços Nb-Cr e Nb-Cr-Mo. Para o aço Nb-Cr-Mo-V, as amostras resfriadas ao óleo (30°C/s), apresentaram também uma pequena quantidade de martensita além da bainita.

As amostras resfriadas a água (115°C/s) (Figuras 39 e 40) apresentaram ferrita poligonal, bainita, martensita e AM alongado e massivo, sendo que a medida que caminhamos do aço Nb-Cr para o Nb-Cr-Mo e deste para o Nb-Cr-Mo-V maior quantidade de martensita é encontrada. Uma quantificação das fases presentes, para cada ciclo aplicado, é verificada no item 3.2.4.

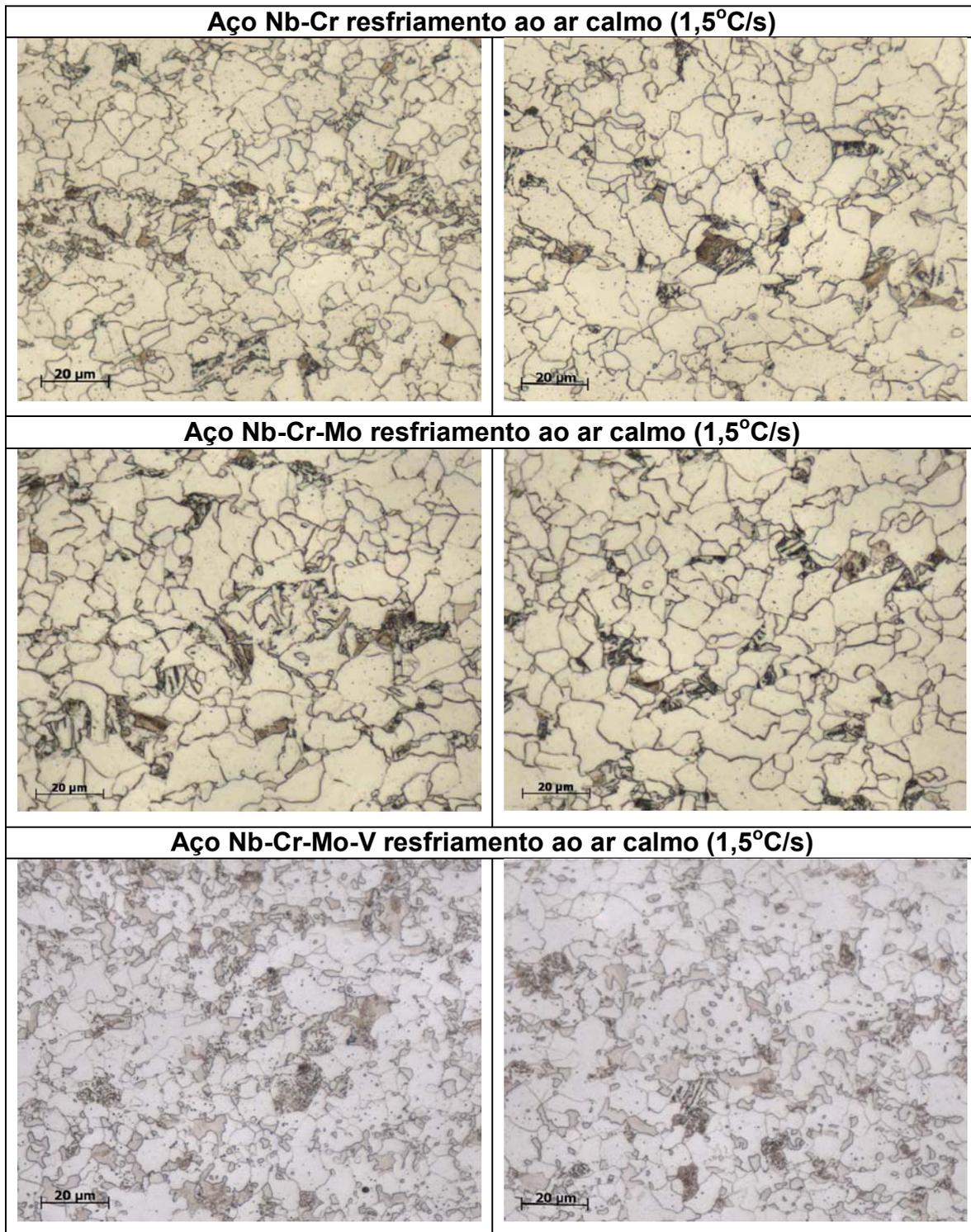


Figura 35. Micrografias em MO dos aços Nb-Cr, Nb-Cr-Mo, Nb-Cr-Mo-V após resfriamento ao ar calmo (1,5°C/s). Verificam-se as fases de ferrita poligonal, sendo que alguns grãos de ferrita apresentam precipitação interna, bainita e o constituinte AM é identificado com o auxílio do MEV (Figura 35). Ataque Nital 2%.

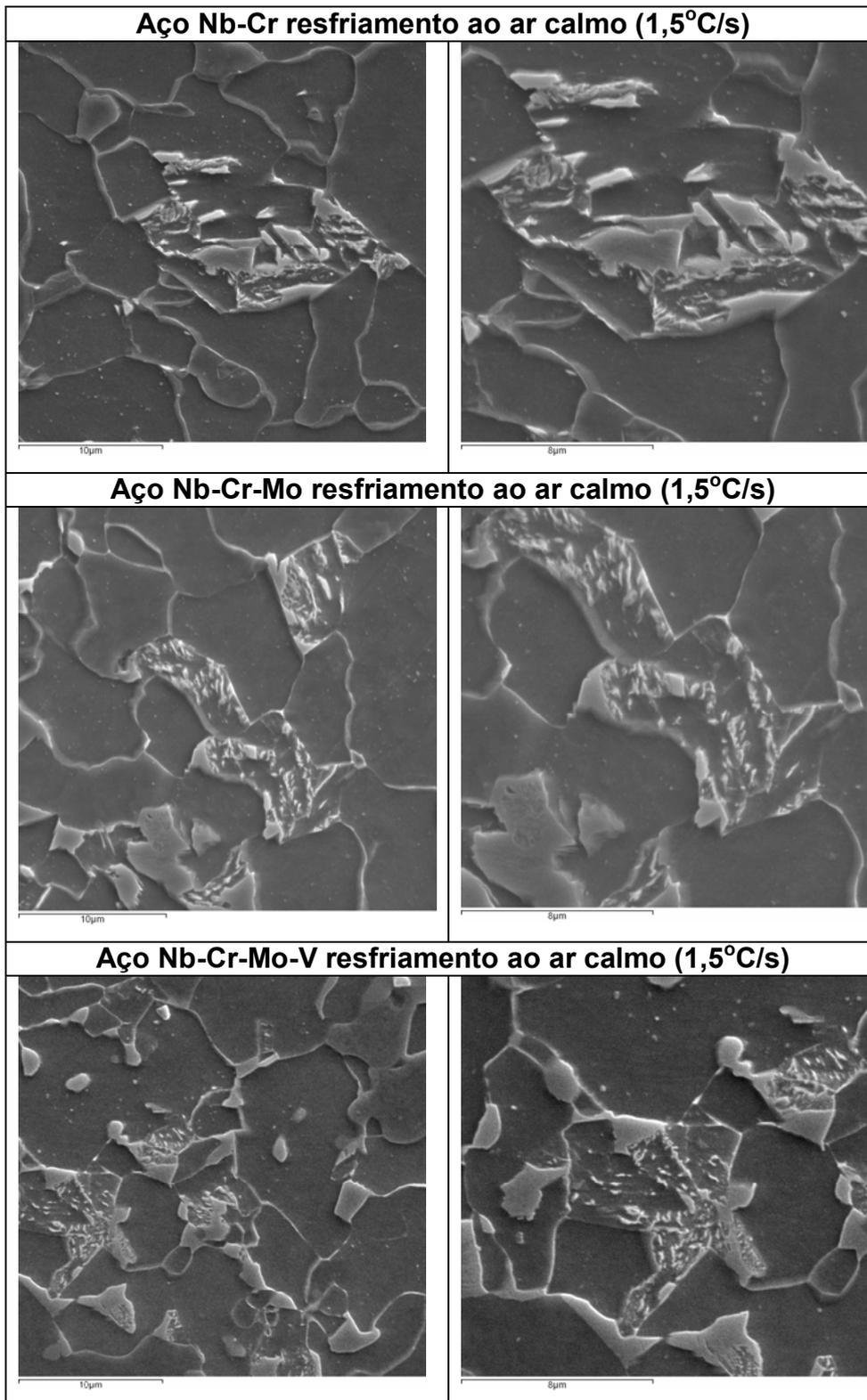


Figura 36. Micrografias em MEV dos aços Nb-Cr, Nb-Cr-Mo, Nb-Cr-Mo-V após resfriamento ao ar calmo (1,5°C/s). Verificam-se grãos de ferrita poligonal, bainita e AM basicamente massivo e muitas vezes associado a grãos de bainita. Ataque Nital 2%.

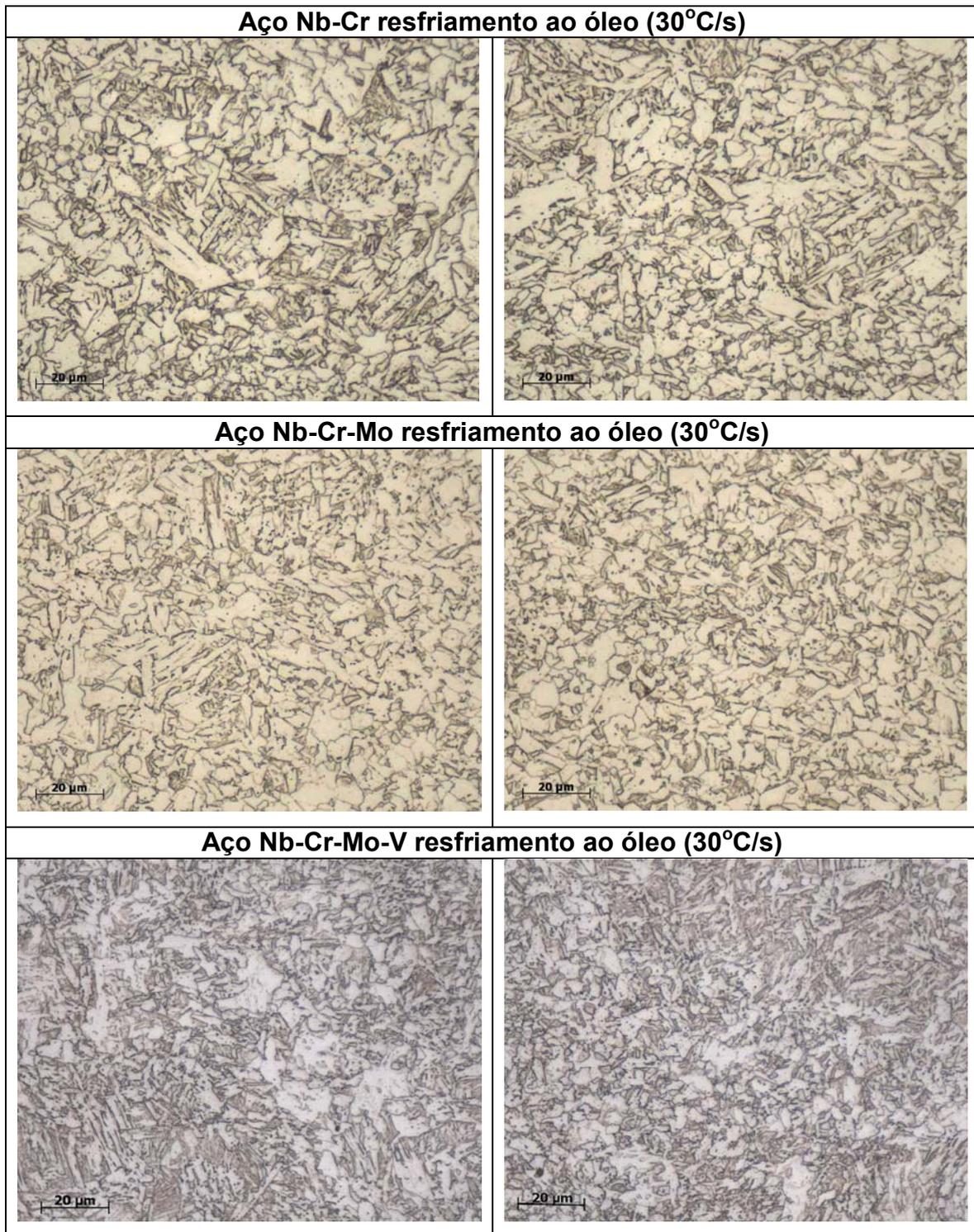


Figura 37. Micrografias em MO dos aços Nb-Cr, Nb-Cr-Mo, Nb-Cr-Mo-V após resfriamento ao óleo (30°C/s). Verificam-se as fases de ferrita poligonal, bainita e o AM é identificado com o auxílio do MEV (Figura 37). O aço Nb-Cr-Mo-V apresenta também martensita em sua microestrutura. Ataque Nital 2%.

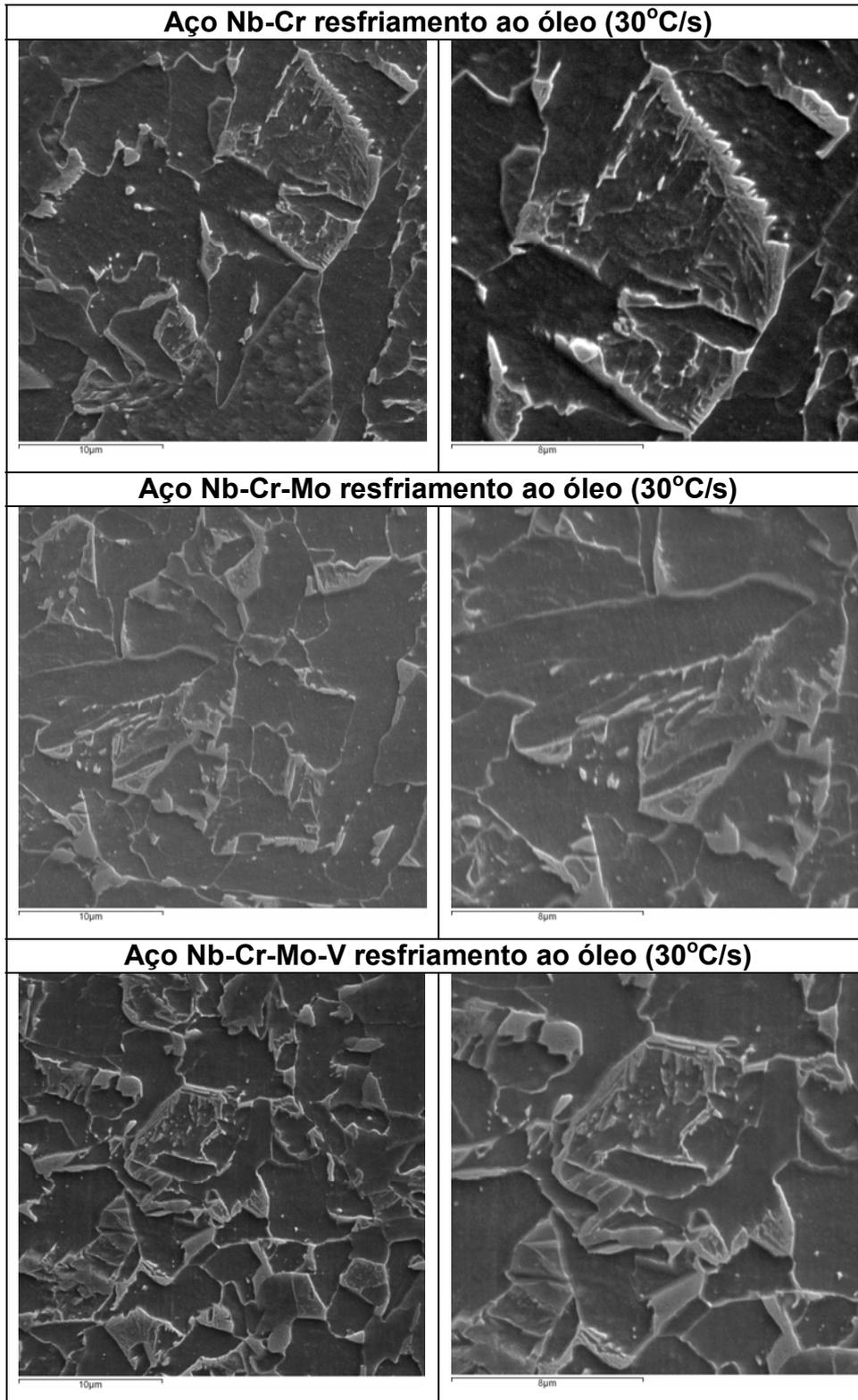


Figura 38. Micrografias em MEV dos aços Nb-Cr, Nb-Cr-Mo, Nb-Cr-Mo-V após resfriamento ao óleo (30°C/s). Verificam-se grãos de ferrita poligonal, bainita e AM alongado e massivo e muitas vezes associado a grãos de bainita. Ataque Nital 2%.

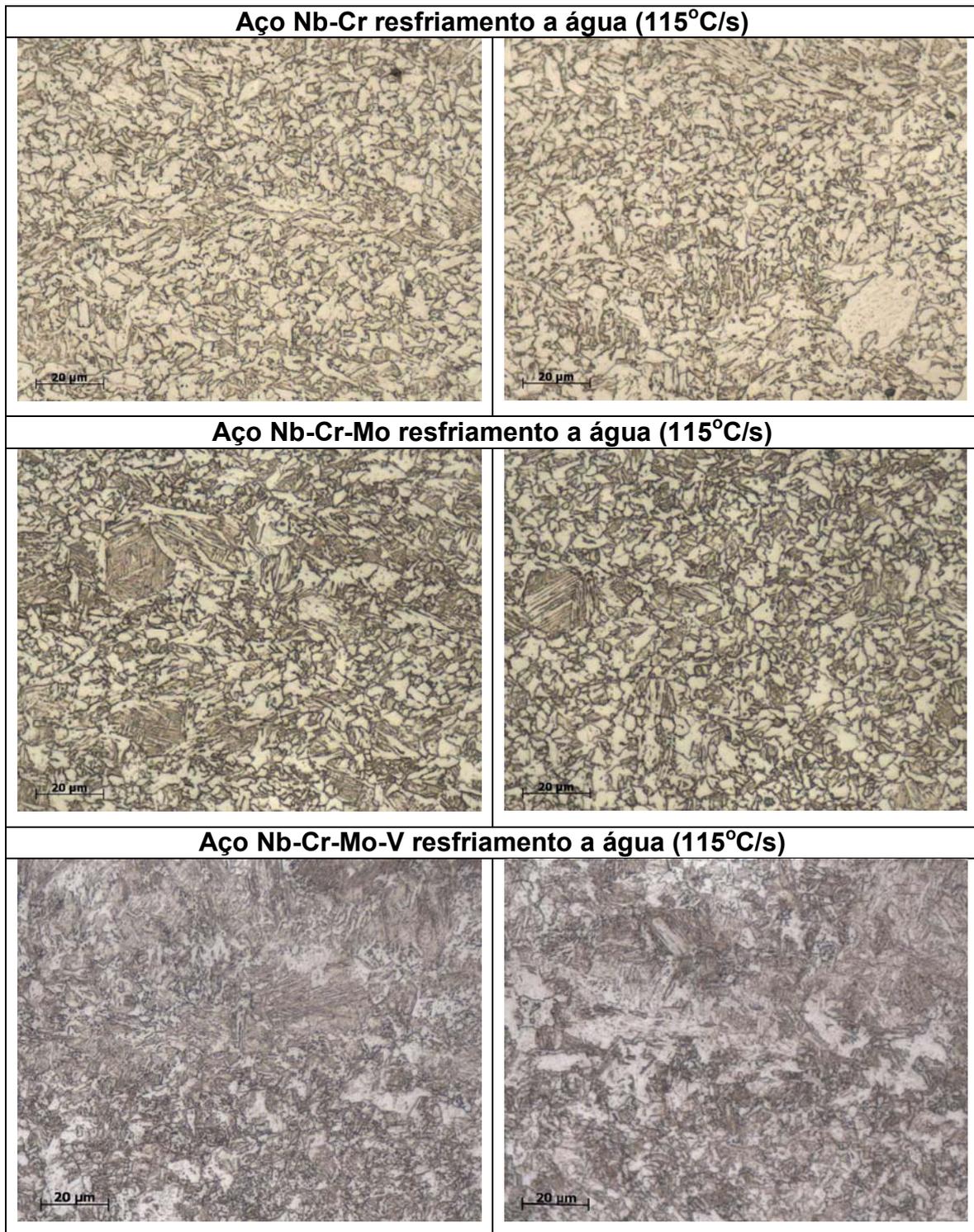


Figura 39. Micrografias em MO dos aços Nb-Cr, Nb-Cr-Mo, Nb-Cr-Mo-V após resfriamento a água (115°C/s). Verificam-se as fases de ferrita, bainita, martensita e o AM é identificado com o auxílio do MEV (Figura 39). Ataque Nital 2%.

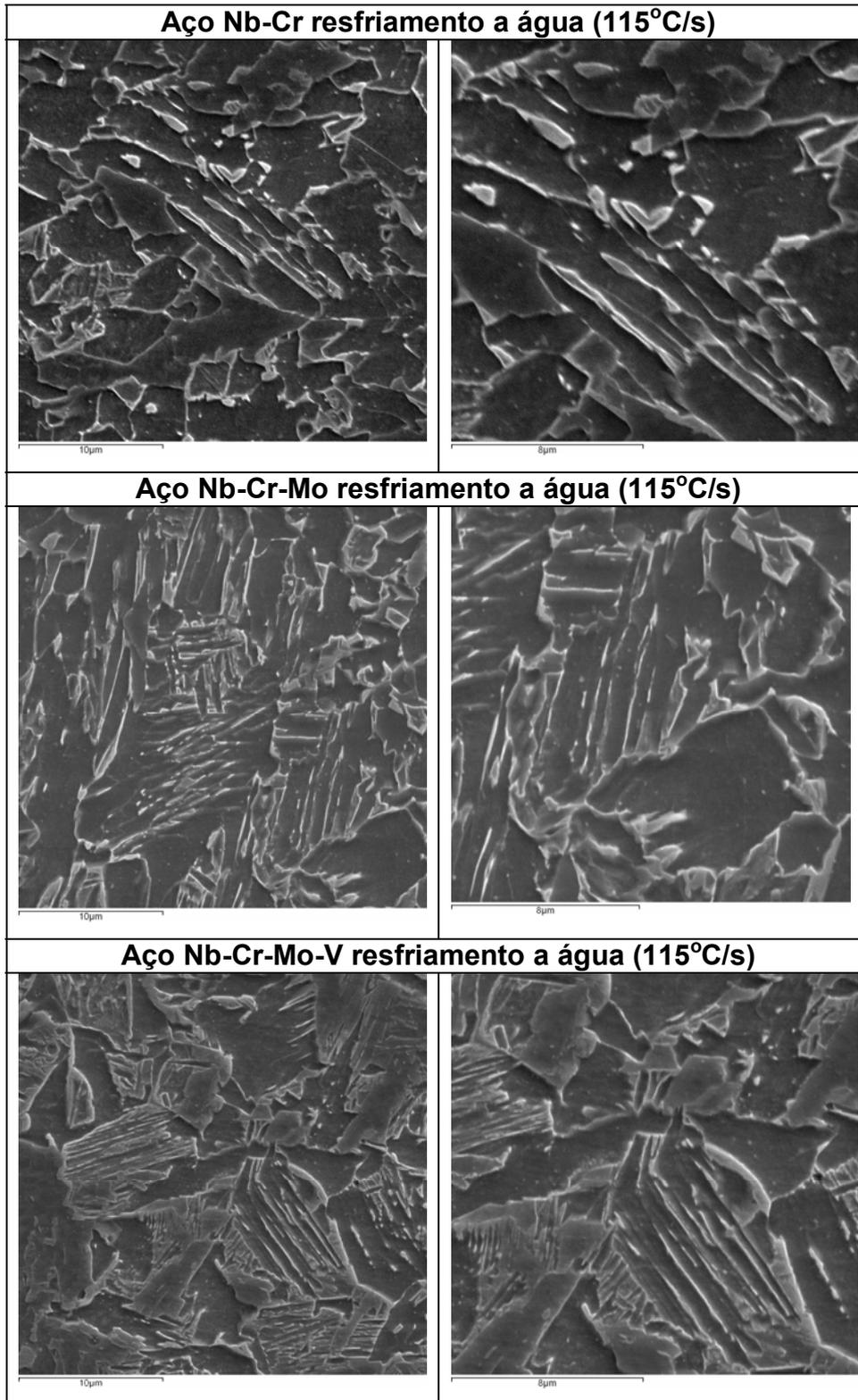


Figura 40. Micrografias em MEV dos aços Nb-Cr, Nb-Cr-Mo, Nb-Cr-Mo-V após resfriamento a água (115°C/s). Verificam-se grãos de ferrita, bainita, martensita e AM alongado e massivo. Ataque Nital 2%.

Observações em microscópio eletrônico de transmissão (MET) da microestrutura dos aços após aplicação dos ciclos térmicos são mostradas a seguir.

A Figura 41 apresenta a microestrutura do aço Nb-Cr-Mo resfriado ao ar (1,5°C/s). Observam-se grãos grandes de ferrita poligonal, grãos pequenos de bainita e as fases escuras conforme já mencionadas no capítulo dos aços pós-laminados tratam-se do constituinte AM.

Também verifica-se na Figura 41, um grão de bainita associado ao AM localizado no contorno do grão e uma partícula de AM massivo. Podem ser vistos precipitados mais grosseiros dentro de alguns grãos.

A Figura 42 a seguir apresenta o mesmo grão de bainita, associado com o constituinte AM, com maior aumento.

A Figura 43 apresenta um grão de bainita no aço Nb-Cr-Mo resfriado ao ar (1,5°C/s). Nota-se que o grão de ferrita ao lado possui várias discordâncias e a ponta do grão de bainita apresenta uma partícula de AM alongado, sugerindo uma possível decomposição do constituinte AM.

A Figura 44(a) apresenta um constituinte AM massivo e o grão adjacente de ferrita com várias discordâncias associadas a precipitados no aço Nb-Cr-Mo resfriado ao ar. A Figura 44(b) apresenta outro grão de ferrita com precipitados associados a discordâncias no aço Nb-Cr-Mo resfriado ao ar. Podem ser vistos precipitados finos e grosseiros na ferrita.

A Figura 45 apresenta a microestrutura observada em MET do aço Nb-Cr-Mo resfriado ao óleo (30°C/s). Observam-se grãos poligonais com constituintes AM massivos e geométricos entre os grãos. Às vezes é possível observar uma subestrutura interna nestas fases escuras pois ora elas apresentam uma subestrutura de discordâncias dentro delas, ora verifica-se que as discordâncias são da própria matriz.

Na Figura 46 verificamos duas fases escuras com subestruturas internas diferentes no aço Nb-Cr-Mo resfriado ao óleo (30°C/s). Uma delas apresenta-se parcialmente decomposta internamente (A), já a outra parece apresentar martensita maclada no seu interior (B). A martensita maclada também foi encontrada no trabalho de A. Ghosh et al. na microestrutura dos aços na região entre as ripas de ferrita acicular para amostras resfriadas a água (Figura 8) [25].



Figura 41. Observação no MET da microestrutura do aço Nb-Cr-Mo resfriado ao ar ($1,5^{\circ}\text{C/s}$) : AM - constituinte austenita retida-martensita, B - bainita, F – ferrita

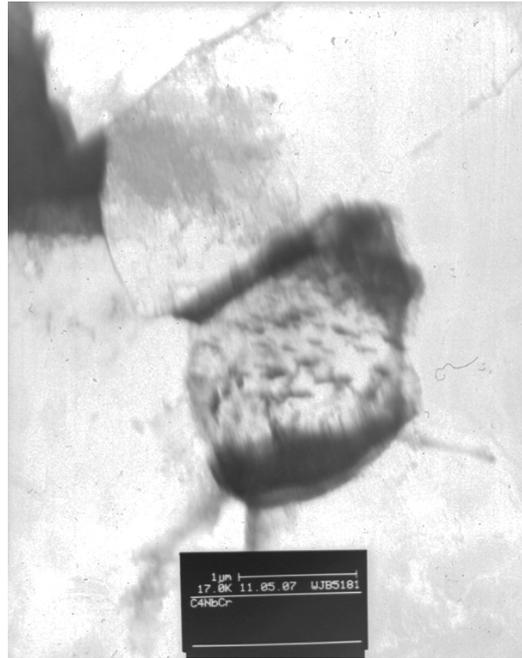


Figura 42. Grão de bainita com fases escuras, que aparentam ser o constituinte AM, no contorno de grão do aço Nb-Cr-Mo resfriado ao ar ($1,5^{\circ}\text{C/s}$).



Figura 43. (a) Grão de bainita no aço Nb-Cr-Mo resfriado ao ar ($1,5^{\circ}\text{C/s}$). O grão de ferrita adjacente possui várias discordâncias e a ponta do grão de bainita apresenta uma partícula de AM alongado.

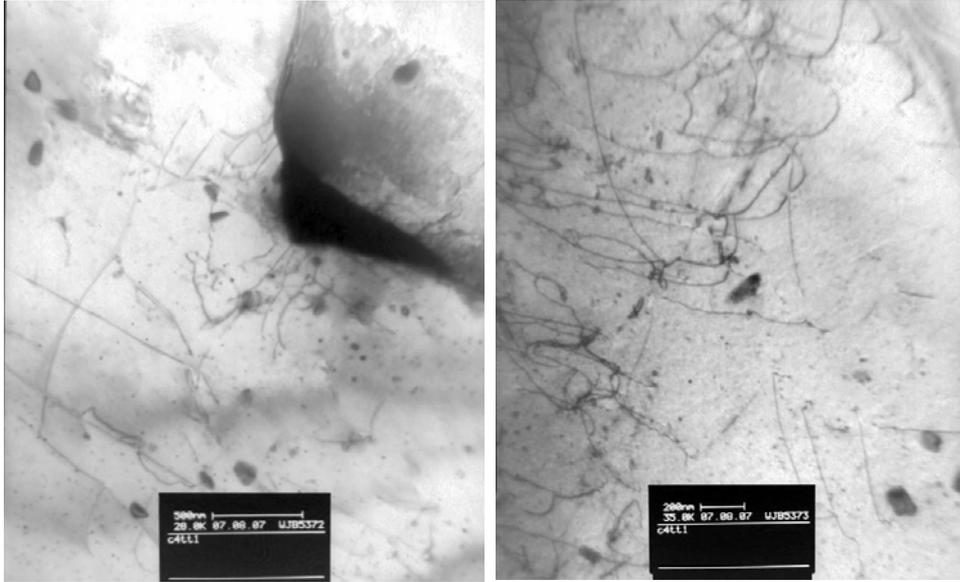


Figura 44. Imagem em campo claro mostrando (a) constituinte AM massivo (b) região de grão de ferrita com precipitados associados a discordâncias no aço Nb-Cr-Mo resfriado ao ar.

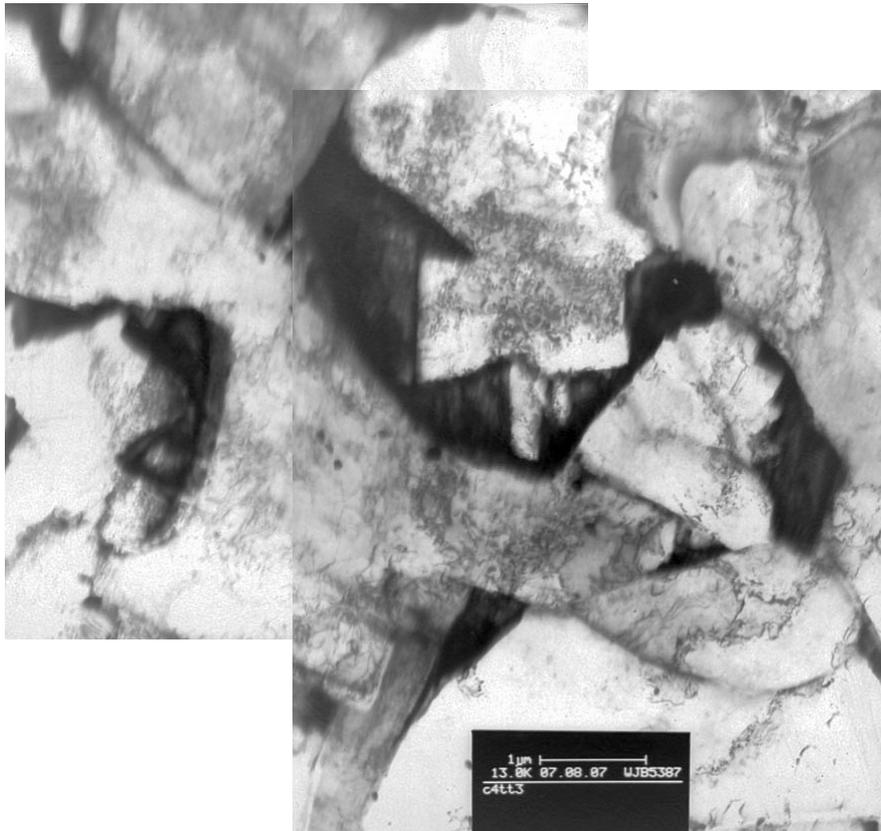


Figura 45. Microestrutura vista em MET do aço Nb-Cr-Mo resfriado ao óleo (30°C/s). Grãos envolvidos a constituintes AM com características geométricas.

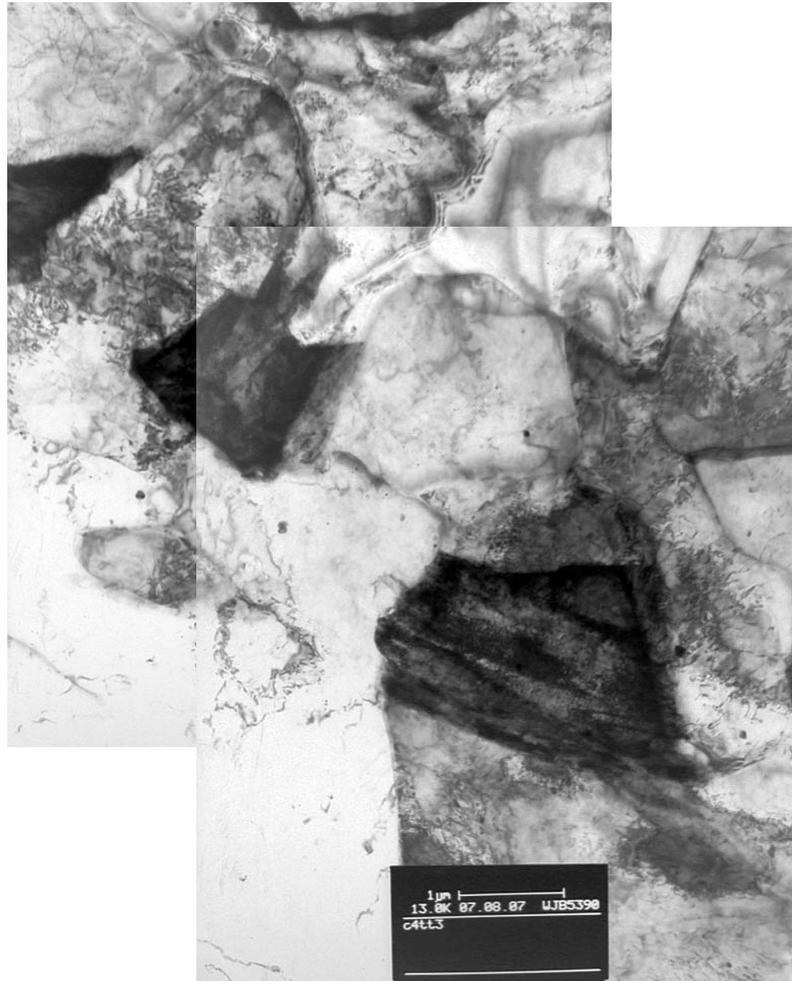


Figura 46. Microestrutura vista em MET do aço Nb-Cr-Mo resfriado ao óleo (30°C/s) com subestruturas diferentes no interior do AM. Uma delas apresenta-se parcialmente decomposta internamente (A), já a outra parece apresentar martensita maclada no seu interior (B).

A Figura 47 apresenta outra região da microestrutura do aço Nb-Cr-Mo resfriado a água (115°C/s). Verifica-se a presença de ferrita acicular.

A Figura 48 mostra uma microestrutura na forma de agulhas em várias direções, onde pode ser caracterizada como grãos de martensita.

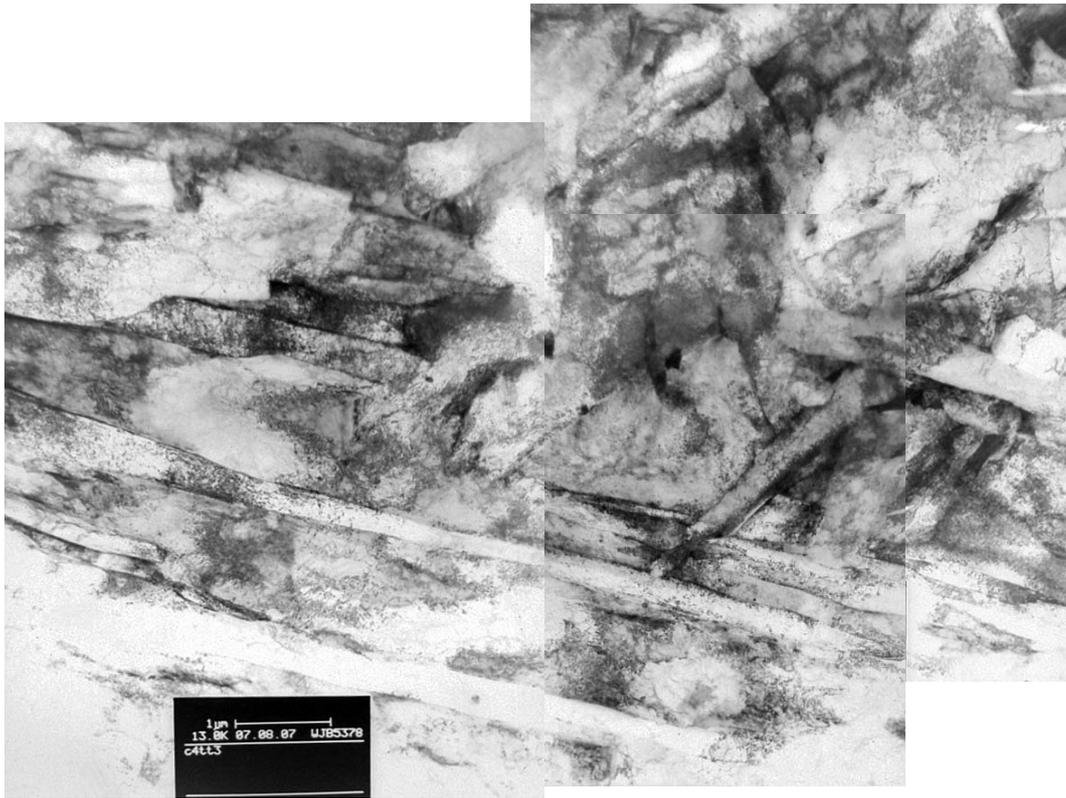


Figura 47. Microestrutura vista em MET do aço Nb-Cr-Mo resfriado a água (115°C/s). Observa-se ferrita acicular.

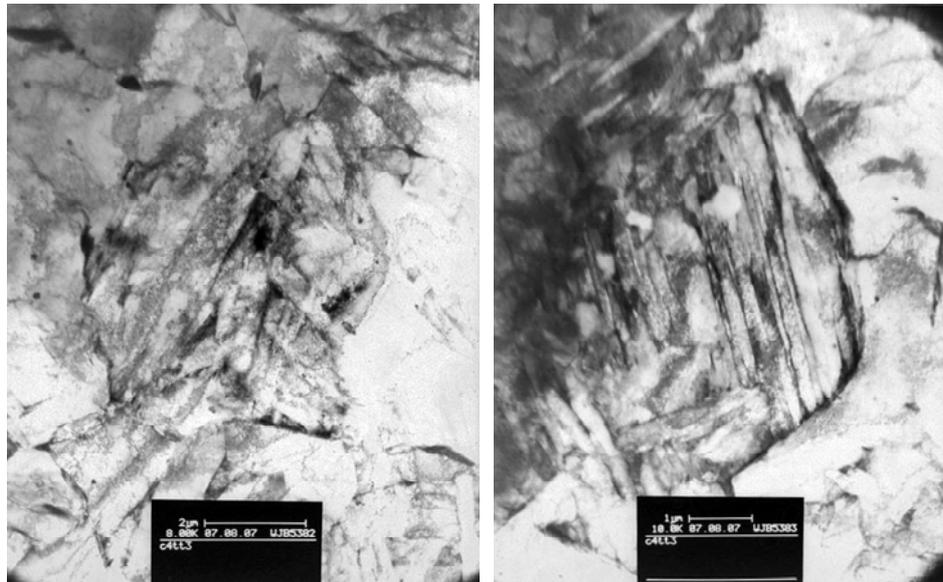


Figura 48. Microestrutura vista em MET do aço Nb-Cr-Mo resfriado a água (115°C/s). Podem ser vistos grãos de martensita.

A Figura 49 mostra a microestrutura do aço Nb-Cr-Mo-V resfriado ao ar. Observam-se grãos poligonais e o constituinte AM massivo em pontos triplos de contornos de grão.

A Figura 50(a) apresenta contornos de grão duplos no aço Nb-Cr-Mo-V resfriado ao ar, que se trata de contornos de grãos isócrinos, ou seja, um grão está sobreposto ao outro (setas). Em pontos triplos verifica-se a presença de AM massivos. A figura 50(b) mostra um constituinte AM no interior do grão e precipitados associados a discordâncias e Figura 50(c) apresenta o espectro de EDS mostrando que os precipitados se tratam de carbo-nitretos de Nb e Ti.

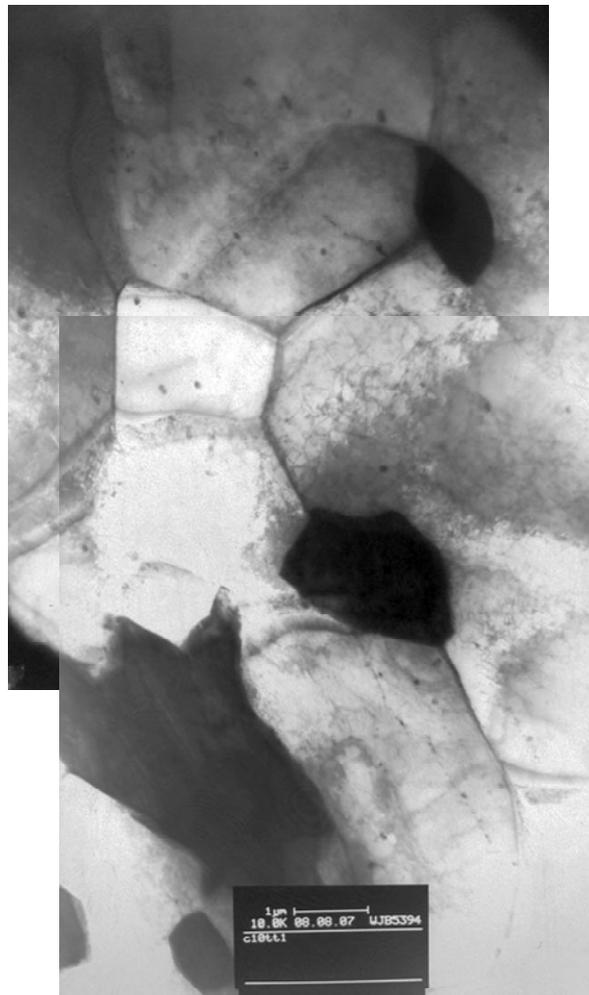


Figura 49. Microestrutura vista em MET do aço Nb-Cr-Mo-V resfriado ao ar (1,5°C/s). Observam-se grãos poligonais e constituintes AM massivos em pontos triplos de contorno de grão.

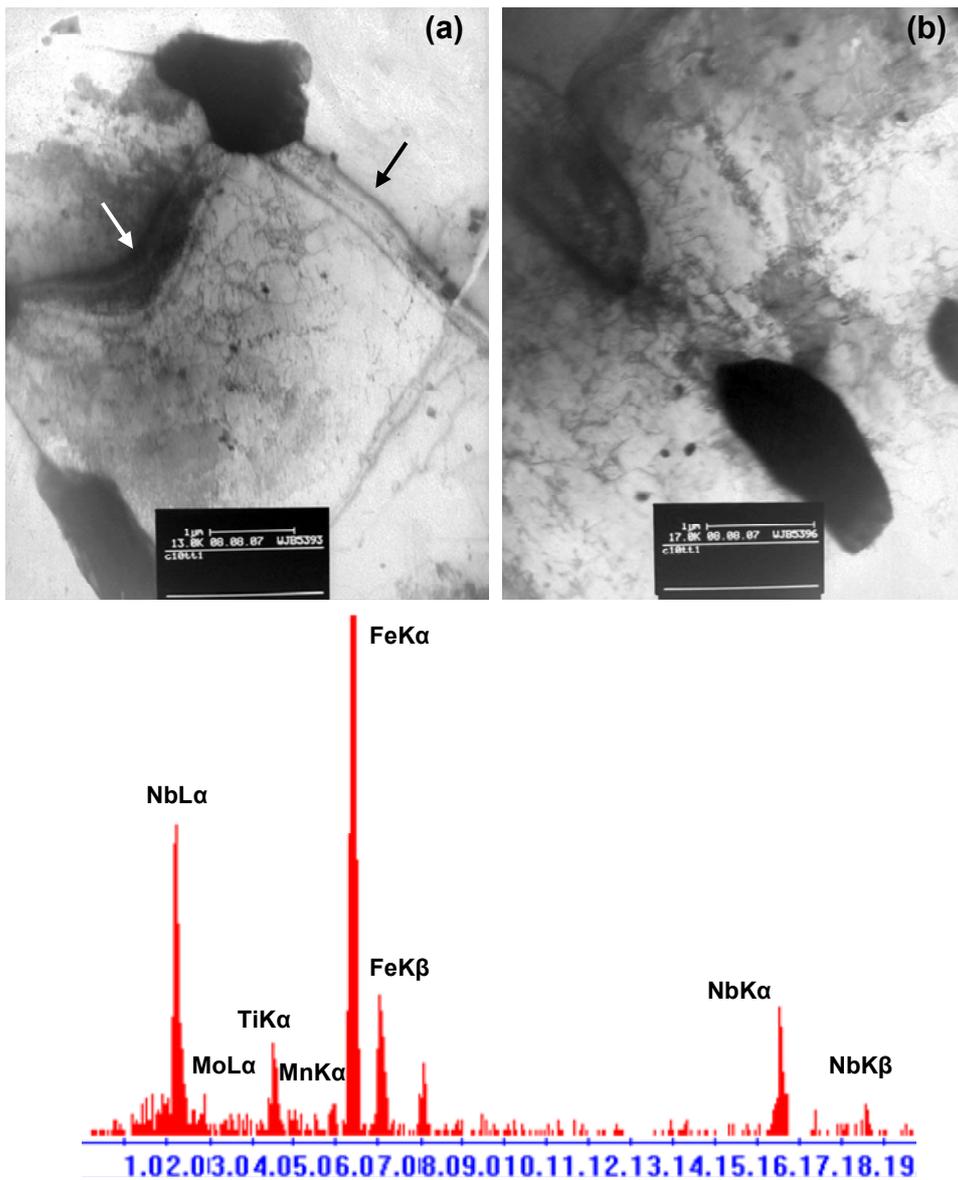


Figura 50. (a) Contornos de grão isócrinos (setas) e AM localizado em ponto triplo de grão no aço Nb-Cr-Mo-V resfriado ao ar, (b) AM no interior do grão e precipitados e associados a discordâncias e (c) EDS de precipitado.

A Figura 51 apresenta o constituinte AM com uma subestrutura interna visível para o aço Nb-Cr-Mo-V resfriado ao ar. Este constituinte parece ser um AM em fase de decomposição.



Figura 51. Fase escura com uma subestrutura interna visível no aço Nb-Cr-Mo-V resfriado ao ar. A fase parece ser um AM em fase de decomposição.

4.2.3. Fração volumétrica das fases após aplicação dos ciclos térmicos

As Figuras 52 a 54 apresentam as frações volumétricas das fases para cada tipo de aço dependendo do ciclo térmico aplicado.

A Figura 55 apresenta uma junção de todos os gráficos, para que fosse feita uma comparação das frações volumétricas dos três tipos de aço resfriados nos meios diferentes.

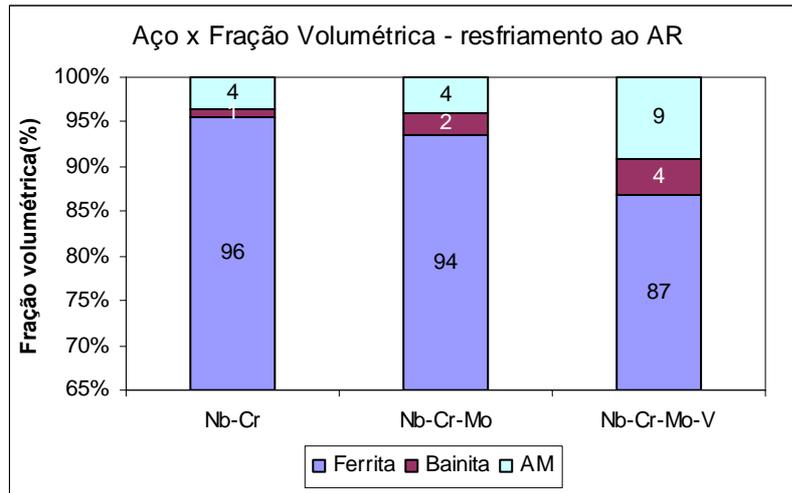


Figura 52. Comparação entre as frações volumétricas das fases para cada tipo de aço resfriado ao ar ($1,5^{\circ}\text{C/s}$).

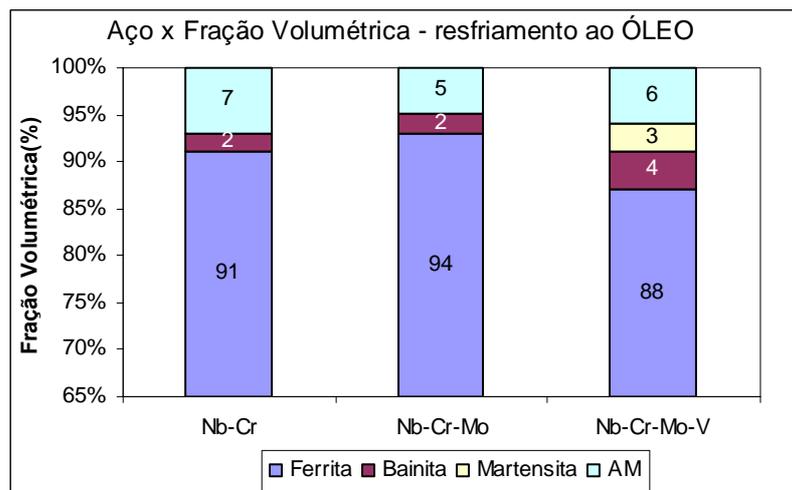


Figura 53. Comparação entre as frações volumétricas das fases para cada tipo de aço resfriado ao óleo (30°C/s).

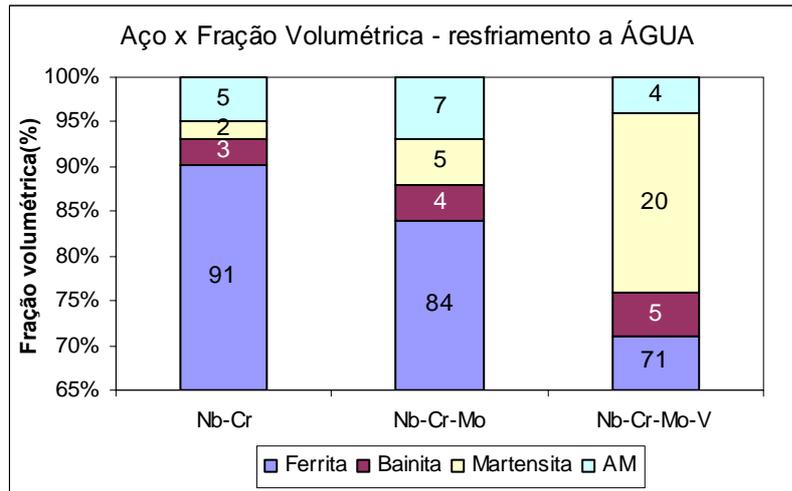


Figura 54. Comparação entre as frações volumétricas das fases para cada tipo de aço resfriado a água (115°C/s).

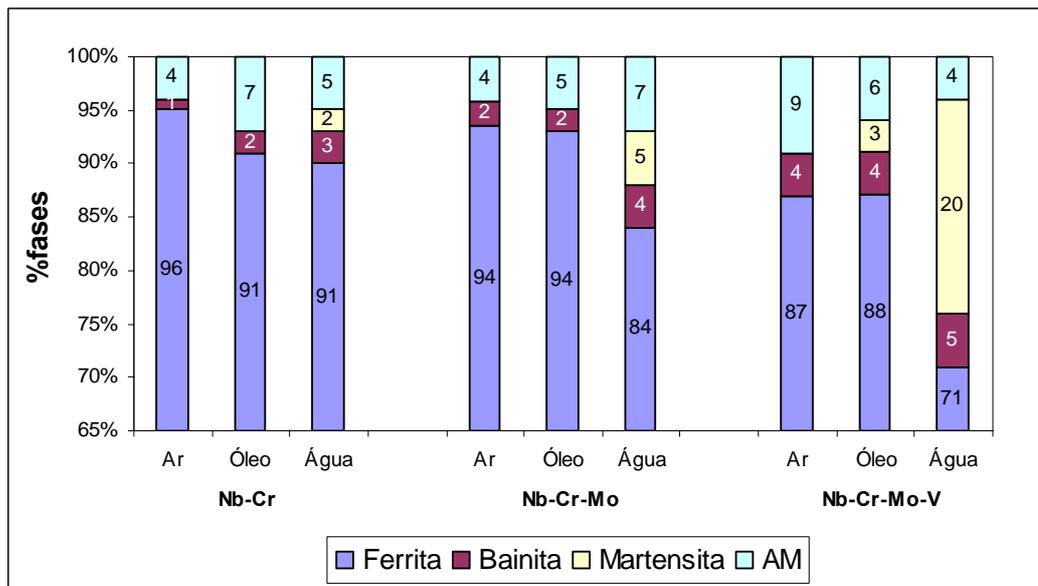


Figura 55. Mapeamento das frações volumétricas das fases obtidas em cada ciclo térmico para os três aços: Nb-Cr, Nb-Cr-Mo e Nb-Cr-Mo-V.

As Figuras 52 a 55 mostram a distribuição quantitativa entre as fases obtido para cada um dos aços estudados.

Observa-se que para o resfriamento ao ar, os aços Nb-Cr e Nb-Cr-Mo

apresentam majoritária a fase ferrita, indicando que somente a adição de Mo não influenciou na distribuição quantitativa das fases para um resfriamento lento como ao ar calmo ($1,5^{\circ}\text{C/s}$). No entanto com maior quantidade de Mo e a presença de V e (Tabela 4) no aço Nb-Cr-Mo-V leva a uma distribuição quantitativa onde a percentagem de AM praticamente dobra, passando de 4% para 9%.

Para taxas de resfriamento intermediárias como resfriamento ao óleo (30°C/s), os aços Nb-Cr e Nb-Cr-Mo apresentam a mesma distribuição entre fases com pequenas diferenças. Já o aço Nb-Cr-Mo-V apresenta uma fase a mais com a formação de martensita.

Uma taxa de resfriamento mais rápida, obtida com o resfriamento a água (115°C/s), é gerada uma distribuição quantitativa que progride com a adição de Mo e V. A martensita apresenta-se em ordem crescente de percentagem, com aumento para 5% quando comparamos o aço Nb-Cr com o Nb-Cr-Mo e para 20% quando comparamos o aço Nb-Cr com o Nb-Cr-Mo-V. A fase bainítica, apesar de apresentar pequeno aumento, não foi tão marcante quanto a fase martensítica. A fase ferrítica em função da maior distribuição entre fases é progressivamente reduzida com a adição de Mo e de V, sendo a redução para 84% para o aço Nb-Cr-Mo e para 71% para o aço Nb-Cr-Mo-V. O percentual de AM é maior para o aço Nb-Cr-Mo.

4.2.4. Dureza após a aplicação dos ciclos térmicos

A Tabela 12 e os gráficos apresentados na Figura 56 e 57 apresentam os resultados obtidos na medição dos valores de dureza Rockwell B (HR_B) dos aços Nb-Cr, Nb-Cr-Mo e Nb-Cr-Mo-V após aplicação dos ciclos térmicos.

Observa-se que os valores de dureza das amostras aumentaram à medida que passamos do resfriamento ao ar para o resfriamento ao óleo ou água. Entretanto os valores dureza dos aços Nb-Cr, Nb-Cr-Mo e Nb-Cr-Mo-V para as taxas de resfriamento intermediária (ao óleo 30°C/s) e alta (a água 115°C/s) foram praticamente os mesmos em ambas as taxas.

Quando a comparação é feita entre os aços, verificamos que a dureza dos aços Nb-Cr e Nb-Cr-Mo apresentaram valores similares e o aço Nb-Cr-Mo-V

apresentou maior dureza para as taxas de resfriamento ao ar ($1,5^{\circ}\text{C/s}$) e ao óleo (30°C/s) e valor similar de dureza para o resfriamento a água (115°C/s).

Tabela 12. Dureza Rockwell B (HR_B) dos aços Nb-Cr, Nb-Cr-Mo e Nb-Cr-Mo-V aplicação dos ciclos térmicos.

Aço/Ciclo Térmico	Ar ($1,5^{\circ}\text{C/s}$) (HR_B)	Óleo (30°C/s) (HR_B)	Água (115°C/s) (HR_B)
Nb-Cr	73 ± 3	86 ± 5	91 ± 4
Nb-Cr-Mo	71 ± 1	85 ± 2	87 ± 1
Nb-Cr-Mo-V	79 ± 2	93 ± 2	94 ± 2

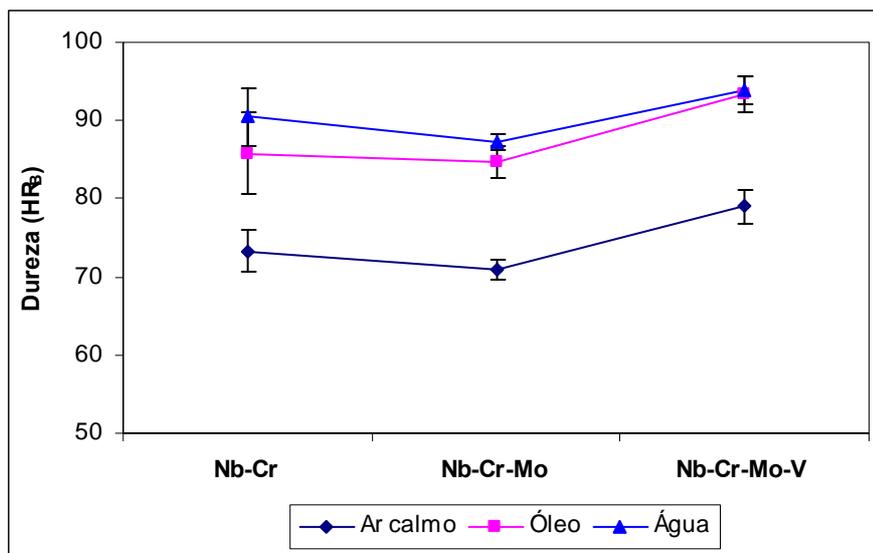


Figura 56. Comparação entre os valores de Dureza Rockwell B (HR_B) dos aços Nb-Cr, Nb-Cr-Mo e Nb-Cr-Mo-V os após aplicação dos ciclos térmicos ao ar calmo ($1,5^{\circ}\text{C}$), ao óleo (30°C/s) e a água (115°C/s).

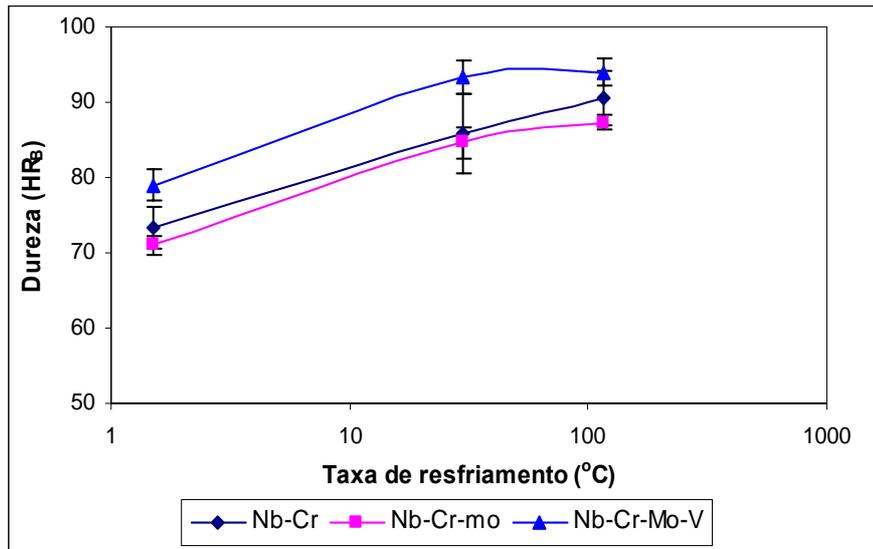


Figura 57. Dureza Rockwell (HR_B) dos aços Nb-Cr, Nb-Cr-Mo e Nb-Cr-Mo-V após aplicação dos ciclos térmicos ao ar calmo ($1,5^\circ\text{C/s}$) ao óleo (30°C/s) e a água (115°C/s).

4.2.5. Microdureza após aplicação dos ciclos térmicos

A Tabela 13 e os gráficos apresentados na Figura 58 e 59 mostram os resultados obtidos na medição dos valores de microdureza Vickers (HV_{100}) dos aços Nb-Cr, Nb-Cr-Mo e Nb-Cr-Mo-V após aplicação dos ciclos térmicos.

Com relação a microdureza pode ser dito que todos valores aumentaram a medida que aumentou a taxa de resfriamento aplicada nas amostras dos aços Nb-Cr, Nb-Cr-Mo e Nb-Cr-Mo-V.

Os aços Nb-Cr e Nb-Cr-Mo apresentaram valores de microdureza similares para todas as taxas de resfriamento quando consideramos suas barras de erro. Entretanto a microdureza do aço Nb-Cr-Mo-V foi a mais alta para todos as taxas de resfriamento.

Quando comparada aos valores de microdureza do aço Nb-Cr, o aço Nb-Cr-Mo-V apresentou um ganho de 10% para o resfriamento ao ar ($1,5^\circ\text{C/s}$), 18% para o resfriamento ao óleo (30°C/s) e 24% para o resfriamento a água (115°C/s).

Tabela 13 - Microdureza Vickers dos aços Nb-Cr, Nb-Cr-Mo e Nb-Cr-Mo-V aplicação dos ciclos térmicos.

Aço/ Ciclo Térmico	Ar (1,5°C/s) (HV ₁₀₀)	Óleo (30°C/s) (HV ₁₀₀)	Água (115°C/s) (HV ₁₀₀)
Nb-Cr	161±4	217±11	243±10
Nb-Cr-Mo	158±7	227±7	253±10
Nb-Cr-Mo-V	177±8	256±10	302±15

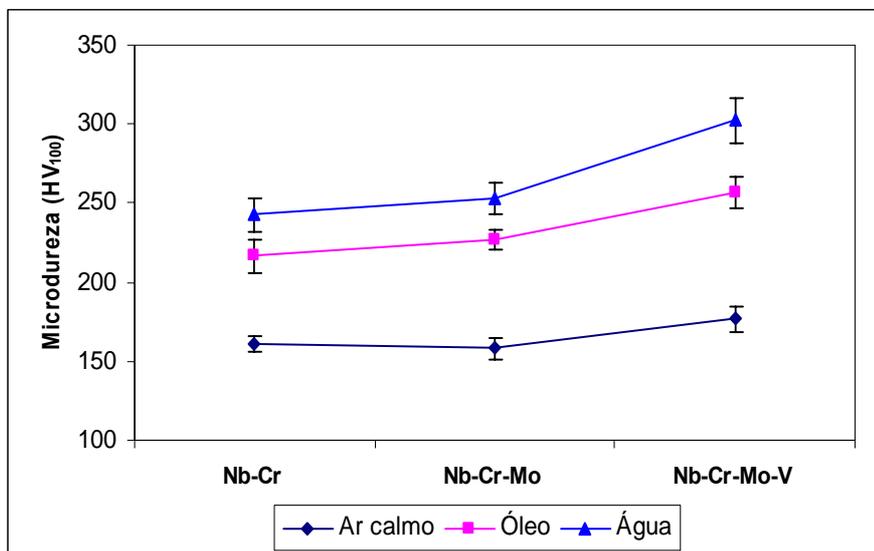


Figura 58. Microdureza (HV₁₀₀) para os aços Nb-Cr, Nb-Cr-Mo e Nb-Cr-Mo-V separado para cada taxa de resfriamento aplicada: ao ar (1,5°C/s), ao óleo (30°C/s) e a água (115°C/s).

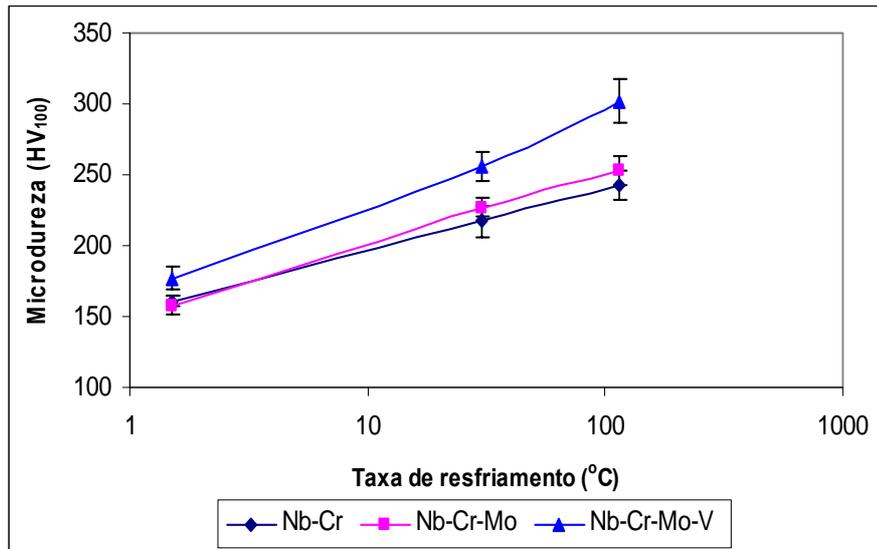


Figura 59. Microdureza (HV₁₀₀) para os aços Nb-Cr, Nb-Cr-Mo e Nb-Cr-Mo-V separado para cada taxa de resfriamento aplicada: ao ar (1,5°C/s), ao óleo (30°C/s) e a água (115°C/s).

4.2.6. Tamanho de grão após aplicação dos ciclos térmicos

O tamanho de grão médio obtido para os aços Nb-Cr, Nb-Cr-Mo e Nb-Cr-Mo-V para cada ciclo térmico aplicado está apresentado na Tabela 14 e Figura 60, onde observa-se que o aço Nb-Cr resfriado ao ar (1,5°C/s) apresenta o maior tamanho de grão e o aço Nb-Cr-Mo-V o menor tamanho de grão. A diminuição no tamanho de grão foi verificada em todos os ciclos de resfriamento.

Tabela 14. Tamanho de grão (μm) dos aços Nb-Cr, Nb-Cr-Mo e Nb-Cr-Mo-V após aplicação dos ciclos térmicos

Aço/Ciclo térmico	TG (μm)	TG (ASTM)
Nb-Cr ao ar calmo	4,5	12
Nb-Cr-Mo ao ar calmo	3,9	13
Nb-Cr-Mo-V ao ar calmo	3,4	13
Nb-Cr ao óleo	3,9	13
Nb-Cr-Mo ao óleo	3,0	13
Nb-Cr-Mo-V ao óleo	3,0	13
Nb-Cr a água	3,0	13
Nb-Cr-Mo a água	2,7	14
Nb-Cr-Mo-V a água	2,3	14

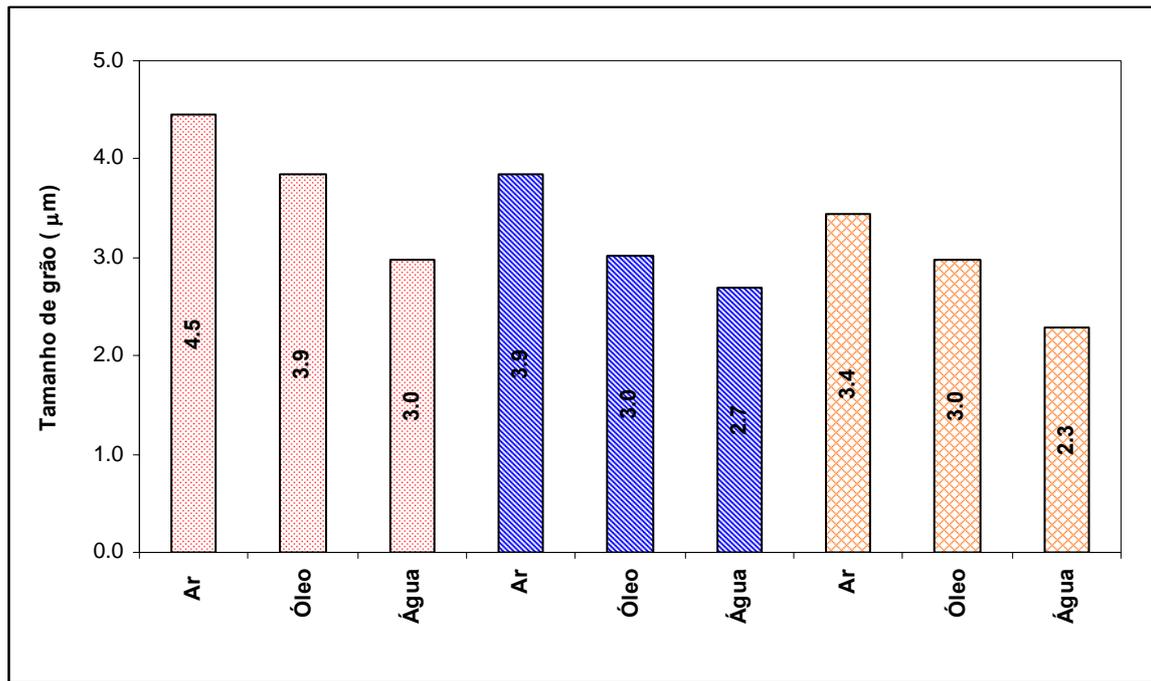


Figura 60. Tamanho de grão(μm) dos aços Nb-Cr, Nb-Cr-Mo e Nb-Cr-Mo-V para cada ciclo térmico aplicado.