

5 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Este trabalho foi realizado para verificar quais as diferenças microestruturais existentes entre os 3 tipos de aços Nb-Cr, Nb-Cr-Mo, Nb-Cr-Mo-V em duas condições: na condição de pós-laminado e após a aplicação de 3 ciclos térmicos (ar calmo, óleo e água)

Apesar dos 3 aços na condição de pós-laminado apresentarem valores de LE, LR e tenacidade ao impacto diferentes (Tabela 6), sendo que as variáveis de processamento aplicada nos 3 aços são as mesmas, eles não apresentaram diferenças no TG, dureza, microdureza e na quantificação de fases medida (Figura 12). Os tamanhos de grão de todos os aços na condição pós-laminado não apresentaram diferença. O valor de ASTM 13 foi medido para os 3 aços (Tabela 6). Entretanto foi verificado, nos aços pós-laminados, uma diferença em sua subestrutura observada em MET. Observou-se a presença de sub-grãos e subestrutura de células quando observados em microscopia eletrônica de transmissão (Figuras 24 e 30). Essa contribuição, embora não medida, talvez devesse ser considerada no aumento da resistência mecânica do material. A subestrutura de células só foi observada no aço Nb-Cr-Mo-V e é este aço que apresenta maiores valores de LE, LR e tenacidade, com 575MPa de limite de escoamento (Tabela 6).

Entre os vários fatores que contribuem para o aumento da resistência mecânica dos aços ARBL, o refino de grão representa talvez, a maior contribuição nos aços Nb-Cr, Nb-Cr-Mo e Nb-Cr-Mo-V pós-laminados estudados nesse trabalho. Este fato também já foi abordado em outras referências [1,13,20,34] para aços ARBL microligados.

No trabalho de Poorhaydari et al., as medições de tamanho de grão foram realizadas por microscopia eletrônica de transmissão (MET) pois os grãos do aço ARBL laminado estudado em seu trabalho apresentaram orientações bastante próximas, de modo similar aos deste estudo [20]. A medição do tamanho de grão, realizada pelo MET, permitiu verificar que a contribuição ao limite de escoamento

do material foi responsável por 70% da contribuição total de aumento de resistência mecânica do material.

Também nos aços Nb-Cr, Nb-Cr-Mo e Nb-Cr-Mo-V pós-laminados, verificou-se que os valores médios de dureza Rockwell (HR_B), microdureza Vickers (HV_{100}) e a distribuição de fases, ferrita, bainita e AM, não apresentaram diferenças de valores entre os 3 tipos de aços.

Outro fato observado em MET foi a precipitação fina nos aços Nb-Cr-Mo e Nb-Cr-Mo-V pós-laminados. A literatura menciona que os aços que contém Mo e V apresentaram muito maior potencial para precipitação de carbeto fino [20]. No entanto, isso não pareceu influenciar a dureza e microdureza do material.

A caracterização do constituinte AM pôde ser feita através de sua morfologia após as observações em MEV porque este constituinte apresenta um aspecto superficial marmorizado com contornos bem delineados, bem geométricos em relevo quando observada por microscopia eletrônica de varredura, e apresentam-se em relevo quando observadas em microscopia eletrônica de varredura. Quando esta fase foi observada em MET ela apresentava-se escura mas algumas vezes era possível observar uma subestrutura interna. Quanto vista em MET, os constituintes apresentam-se tanto na forma alongada, localizadas no contorno de grão, como na forma massiva, posicionada em pontos triplos de contorno de grão. Muitas vezes estas fases estavam associadas aos grãos bainíticos (Figuras 26 e 32).

Vários trabalhos encontraram evidência da presença do constituinte AM na microestrutura dos aços ARBL microligados após conformação mecânica e aplicação de diferentes taxas de resfriamento. Portanto, para aços desta classe o constituinte AM mostrou-se presente independentemente da condição de resfriamento posterior ao processo de conformação [11,20,24,25].

Conclui-se, portanto, que no caso dos aços pós-laminados a inclusão de Mo e V no aço Nb-Cr não influenciou no TG, distribuição de fases (ferrita, bainita e AM), dureza e microdureza nos aços, ou seja, não houve influência a nível microestrutural entretanto foram encontradas diferenças a nível subestrutural verificadas em MET.

Os diferentes ciclos de resfriamento utilizados buscaram evidenciar as

mudanças microestruturais dos aços Nb-Cr, Nb-Cr-Mo e Nb-Cr-Mo-V e com isso averiguar a influência da introdução do Mo e V na microestrutura.

Nos aços que sofreram os ciclos térmicos, onde a austenitização do material a 900°C por 1 hora eliminou completamente a subestrutura de sub-grãos, verificamos a diminuição do tamanho de grão com o aumento da taxa de resfriamento (Figura 61).

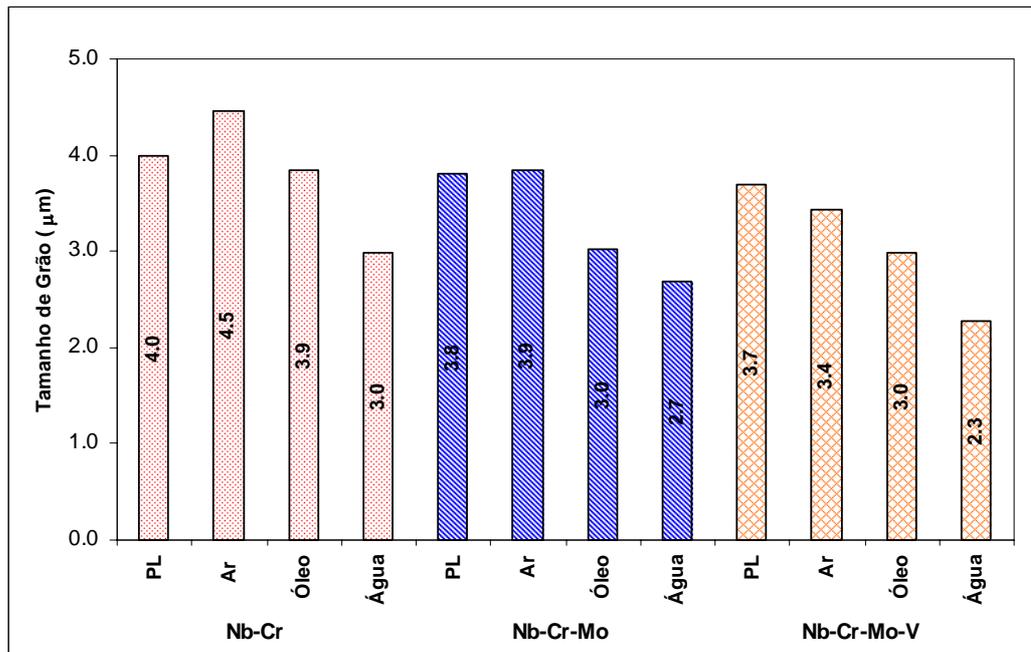


Figura 61. Comparação geral entre tamanhos de grão(µm) dos aços Nb-Cr, Nb-Cr-Mo e Nb-Cr-Mo-V pós-laminados e após aplicação dos ciclos térmicos com resfriamento ao ar (1,5°C/s), ao óleo (30°C/s) e a água (115°C/s).

Se correlacionarmos a Figura 62 e 63, onde foi feita uma estimativa do limite de escoamento a partir dos resultados de HR_B (Tabela 12) dos três tipos de aço pós-laminados e após aplicação dos ciclos térmicos, verificamos que esta diminuição do tamanho de grão é coerente, no sentido que quando aplicamos ciclos térmicos com taxas de resfriamento crescentes no material pós-laminado sua dureza aumenta e o tamanho de grão diminui.

Com a aplicação de taxas de resfriamento mais altas (ao óleo 30°C/s e a água 115°C/s), observamos que também ocorre uma correlação coerente entre a dureza (associado ao limite de escoamento estimado) e o tamanho de grão, pois a

medida que o tamanho de grão diminui, o limite de escoamento estimado aumenta. Pode-se observar que o limite de escoamento do aço Nb-Cr-Mo-V é sempre mais alto para todos os ciclos térmicos aplicados quando comparamos aos aços Nb-Cr e Nb-Cr-Mo.

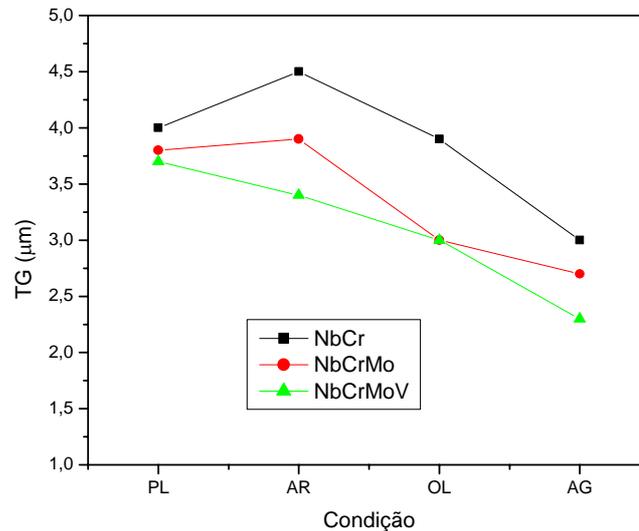


Figura 62. Tamanho de grão medido dos aços Nb-Cr, Nb-Cr-Mo e Nb-Cr-Mo-V na condição de pós-laminados e após tratamentos térmicos (PL – pós-laminado, AR – ar calmo, OL – óleo, AG – água).

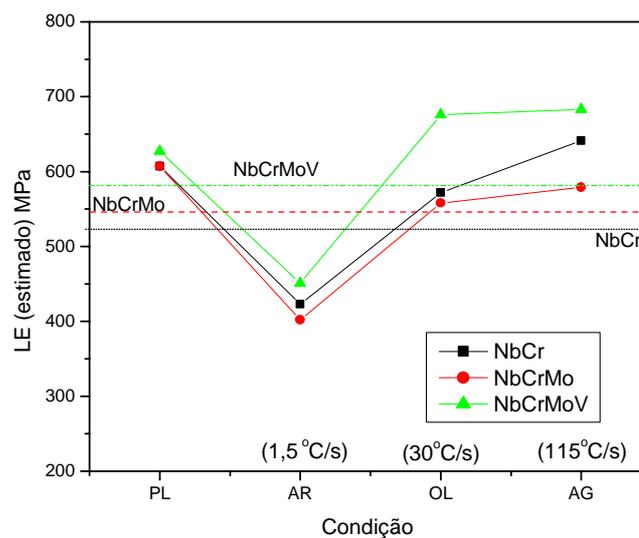


Figura 63. Limite de escoamento estimado (MPa) versus condição dos aços estudados neste trabalho (PL – pós-laminado, AR – ar calmo, OL – óleo, AG – água) [39].

Com relação a microestrutura, observa-se que para resfriamento ao ar, os aços Nb-Cr e Nb-Cr-Mo não apresentaram diferenças quanto a distribuição quantitativa entre as fases ferrita, bainita e AM, indicando que somente a adição de Mo não teve influência quando aplicado um resfriamento lento como ao ar calmo ($1,5^{\circ}\text{C/s}$). No entanto o aço Nb-Cr-Mo-V apresentou um aumento na quantidade de AM com a aplicação do ciclo térmico de resfriamento ao ar constatando que a maior quantidade de Mo e a presença de V no aço afetou a distribuição entre as fases.

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 apresentou a introdução de mais uma fase, a martensita.

Com a aplicação de uma taxa de resfriamento ainda maior, 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% de contribuição da fase na microestrutura para o aço Nb-Cr-Mo e para 20% no Nb-Cr-Mo-V. A fase bainítica, apesar de apresentar pequeno aumento, não foi tão marcante quanto a fase martensítica (Figura 64).

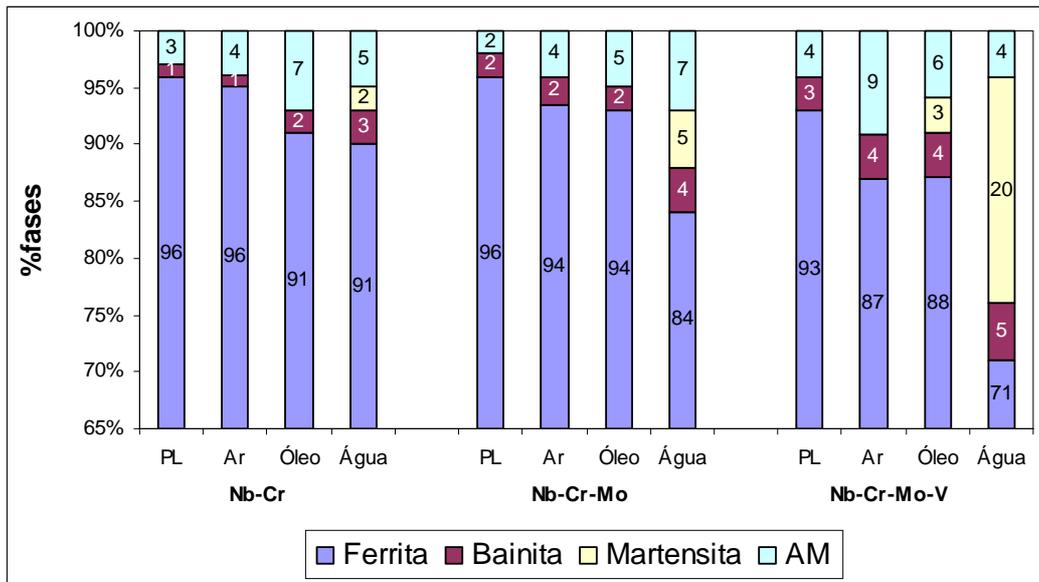


Figura 64. Comparação geral entre as frações volumétricas das fases obtidas nos aços Nb-Cr, Nb-Cr-Mo e Nb-Cr-Mo-V pós-laminados e após aplicação dos ciclos térmicos.

Os gráficos de microdureza apresentados na Figura 65 mostram que para os sistemas Nb-Cr e Nb-Cr-Mo os valores de microdureza são similares e uma associação pode ser feita com a quantidade de fases de cada um, pois a distribuição das fases para ambos os sistemas é muito similar. Já no caso do sistema Nb-Cr-Mo-V que apresenta uma distribuição bem diferente dos outros dois devido a formação de martensita a medida que a taxa de resfriamento diminui e uma microestrutura diferenciada para o resfriamento ao óleo (30°C/s) e a água (115°C/s). O aço Nb-Cr-Mo-V apresenta maiores valores de microdureza (Figura 65).

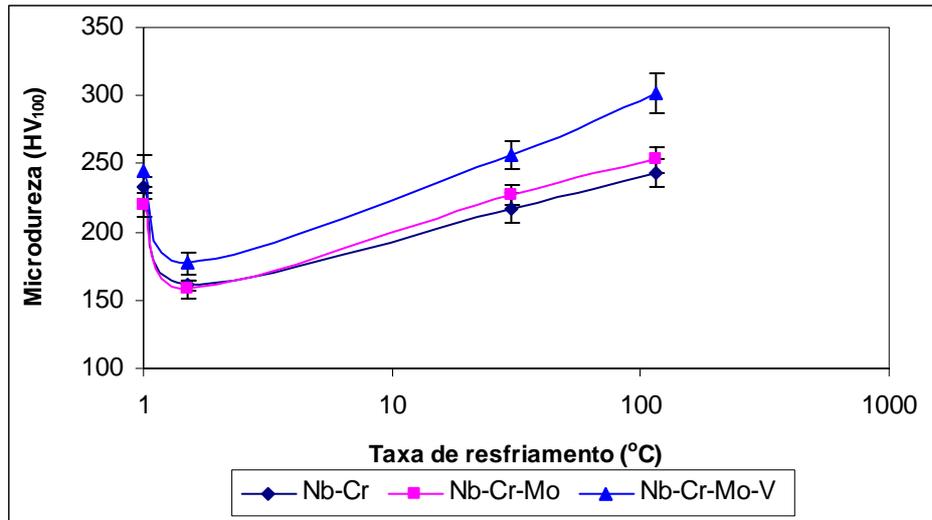


Figura 65. Microdureza HV₁₀₀ para os aços Nb-Cr, Nb-Cr-Mo e Nb-Cr-Mo-V pós-laminados e após aplicação dos ciclos térmicos com resfriamento ao ar (1,5°C/s), ao óleo (30°C/s) e a água (115°C/s).