

Capítulo 5

Conclusões

Este trabalho teve como objetivo verificar o efeito do tratamento termomecânico aplicado num aço endurecível por precipitação ao cobre (HSLA-80) e bainítico de ultra-baixo carbono (ULCB) sobre suas microestruturas e propriedades mecânicas. Foram executadas duas séries de ensaios principais. Na primeira série, corpos de prova das duas ligas estudadas foram submetidos à laminação controlada, sendo aplicados diferentes graus de deformação totais iguais a 58, 70, 77 e 83% com temperatura de acabamento de 750°C. Na segunda série, corpos de prova foram submetidos à laminação controlada, mas desta vez com deformação total fixada em 83% e temperaturas de acabamento fixadas em 800 ou 700°C. Os corpos de prova de aço HSLA-80 ainda foram submetidos a tratamento de envelhecimento após a laminação a quente, constituído de aquecimento por uma hora a 600°C, seguido de resfriamento ao ar. Os dados gerados por estes ensaios permitiram conhecer melhor os efeitos do tratamento termomecânico sobre a microestrutura e propriedades finais desses aços, que não estavam disponíveis na literatura. A partir desses efeitos foram deduzidas as conclusões descritas a seguir:

5.1. Morfologia da Microestrutura Austenítica durante a Laminação a Quente

A elevação da temperatura de reaquecimento de 1100 para 1200°C provocou leve aumento no tamanho de grão austenítico inicial. O aço HSLA-80, que apresentou menores tamanhos de grão após o reaquecimento, apresentou o maior aumento relativo em função da elevação da temperatura de austenitização, da ordem de 24%.

Os sucessivos passes de deformação a quente/recristalização ocorridos durante a fase de esboçamento provocaram refino intensificado no tamanho de grão austenítico de ambos os aços. A diferença entre os tamanhos de grão austeníticos pós-esboçamento entre as duas ligas diminuiu, embora o aço HSLA-80 sempre tendesse a apresentar tamanho de grão ligeiramente mais refinado.

Aparentemente a temperatura de reaquecimento não afetou o tamanho de grão obtido no caso do aço HSLA-80 após uma laminação esboçadora onde se aplicou um grau de deformação a quente de 50%. O mesmo não pode ser afirmado com relação ao aço ULCB, onde a diferença entre os tamanhos de grão nos materiais reaquecidos a diferentes temperaturas e submetidos a esboçamento foi pequena, mas estatisticamente significativa.

5.2. Morfologia da Microestrutura Bainítica Final

A aparência da microestrutura bainítica final dos aços HSLA-80 e ULCB não apresentou diferenças significativas ao microscópio ótico em função das diferentes condições experimentais empregadas. O poder de resolução da microscopia ótica é insuficiente para revelar os contornos de grão e outras características fundamentais dos constituintes bainíticos para aços de baixo carbono. Isto impede uma comparação qualitativa e quantitativa entre as microestruturas bainíticas obtidas nos diferentes aços e para as diferentes condições experimentais de laminação a quente.

5.3. Transformação da Austenita durante o Resfriamento Contínuo

A determinação dos diagramas Transformação no Resfriamento Contínuo (TRC) para os aços HSLA-80 e ULCB mostrou que a temperabilidade dessas ligas é relativamente alta. No caso do HSLA-80 a formação de 5% de ferrita só ocorre para velocidades de resfriamento a partir de $0,5^{\circ}\text{C/s}$, enquanto que para o aço ULCB essa formação não foi observada mesmo sob velocidade de $0,25^{\circ}\text{C/s}$, que foi a menor taxa de resfriamento utilizada na determinação desses diagramas.

5.4. Resposta ao Envelhecimento

O aço HSLA-80 apresentou boa resposta ao envelhecimento em termos de aumento de dureza quando foi submetido a um reaquecimento sob 600°C, atingindo-se valor máximo após 30 minutos de tratamento. Esse envelhecimento, quando efetuado a 500°C, resultou em alterações quase nulas em sua dureza mesmo após duas horas de tratamento, provavelmente devido à baixa velocidade de difusão do cobre. Já o uso de temperatura igual a 700°C chegou a promover até mesmo redução da dureza para tempos de envelhecimento superiores a 30 minutos pois, além de super-envelhecimento, deve ter ocorrido revenimento da microestrutura bainítica.

Já o comportamento após envelhecimento do aço ULCB foi um pouco diferente. O envelhecimento a 500°C promoveu um contínuo aumento de dureza até duas horas de tratamento, quando atingiu valor máximo. O aumento da temperatura de tratamento para 600°C fez com que se atingisse um valor bastante alto de dureza já aos 5 minutos de envelhecimento. A dureza teve um aumento suplementar após 30 minutos de tratamento, assumindo valor ligeiramente inferior ao conseguido no envelhecimento a 500°C durante duas horas e manteve-se estabilizado nesse patamar até duas horas de tratamento. Já o envelhecimento a 700°C apresentou efeitos semelhantes como os verificados para a liga HSLA-80: um aumento inicial de dureza para 5 minutos de tratamento seguido de nítida queda para tempos maiores de envelhecimento. A causa para este fato parece também ser a mesma verificada para o aço HSLA-80: super-envelhecimento associado a efeitos de revenimento da matriz bainítica.

5.5. Propriedades Mecânicas

Uma comparação entre os resultados em termos de dureza para as amostras de aço HSLA-80 como laminadas e as laminadas e submetidas a envelhecimento de uma hora a 600°C mostrou que a temperatura de austenitização antes da laminação não afetou os resultados de dureza para as duas condições. Logo, a temperatura de austenitização - que afeta diretamente o teor de Nb solubilizado no aço - não afetou a resposta ao envelhecimento do material. A partir daí pode-se concluir que a precipitação de compostos de nióbio não contribuiu significativamente para o aumento de dureza conseguido após o envelhecimento da liga.

O aumento do grau de deformação total tendeu a elevar a dureza observada nas amostras de

aço HSLA-80 como laminadas e as laminadas e envelhecidas a 600°C durante uma hora, mas a diferença de dureza entre elas sempre se manteve aproximadamente igual. Isto sugere que o maior grau de refino microestrutural promovido pelo crescente grau total de deformação não afeta a resposta ao envelhecimento do aço HSLA-80.

A alteração na temperatura de acabamento não afetou os resultados de dureza para as amostras de aço HSLA-80 como laminadas e as laminadas e envelhecidas a 600°C durante uma hora. Ou seja, também este parâmetro de processo não alterou a resposta ao envelhecimento do material.

Já os valores de dureza obtidos nas amostras de aço ULCB como laminado indicam que eles foram bem maiores nas amostras reaquecidas a 1200°C do que nas reaquecidas a 1100°C, mostrando claramente que os maiores teores de elementos microligados solubilizados que ocorrem sob tal condição se refletem nas características de temperabilidade e endurecimento por precipitação da liga.

O efeito do grau total de deformação e da temperatura de acabamento sobre a dureza das amostras de aço ULCB como laminado foram idênticos aos observados para o aço HSLA-80 como laminado. Ou seja: maiores níveis de deformação a quente aumentam a dureza do material, enquanto que a temperatura de acabamento não exerceu influência mensurável.

No estado como laminado as amostras de aço HSLA-80 tenderam a apresentar menor dureza que as de ULCB. Contudo, após o envelhecimento das amostras de HSLA-80 a 600°C durante uma hora essa tendência se inverteu.

O efeito dos parâmetros experimentais da laminação a quente sobre o limite de escoamento foi similar para os aços HSLA-80 envelhecido a 600°C por uma hora e ULCB como laminado. As temperaturas de reaquecimento e de acabamento não exerceram efeito significativo, enquanto que a elevação do grau de deformação a quente tendeu a aumentar o limite de escoamento de ambas as ligas, em função do maior grau de refino promovido.

A situação é um pouco diferente no caso do limite de resistência. Aqui a o aumento da temperatura de reaquecimento promoveu aumento no limite de resistência para aço HSLA-80 laminado e envelhecido a 600°C por uma hora e no aço ULCB como laminado. O efeito foi mais significativo para essa última liga, o que parece indicar que o maior nível de Nb solubilizado contribuiu de forma mais intensa para o aumento do limite de resistência do que para o de escoamento. Já o grau total de deformação a quente aumentou o limite de resistência com grau aproximadamente igual para ambas as ligas. A temperatura de acabamento, por sua vez, parece não ter influenciado significativamente os valores do limite de resistência; as variações associadas com a mudança desse parâmetro experimental aparentemente caíram dentro da margem de erro experimental. A diferença entre os valores do limite de resistência obtido para as duas ligas foi menor do que a observada para o limite de escoamento.

A razão elástica observada para o aço HSLA-80, laminado e envelhecido a 600°C oscilou entre 88 a 89%, valores muito altos quando comparados com os conseguidos pelo aço ULCB como laminado, 72 a 73%. Este é um ponto desfavorável para o aço HSLA-80 envelhecido, pois a diferença de magnitude entre os limites de escoamento e resistência é muito pequena neste caso, o que causa preocupação nos projetistas que considerem o uso desse material. Além disso, seu desempenho fica prejudicado pela maior probabilidade de ocorrência do chamado efeito mola (*spring-back*) durante sua conformação. Foi verificado que a temperatura de reaquecimento e acabamento não afetou os valores desse parâmetro para ambas as ligas. Curiosamente, o aumento do grau total de deformação a quente só elevou a razão elástica do aço HSLA-80 envelhecido, enquanto que o do aço ULCB como laminado não sofreu grandes alterações.

O alongamento total observado nos aços HSLA-80 laminado e envelhecido a 600°C por uma hora e ULCB como laminado parece não ter sido afetado pelas condições experimentais da laminação a quente. Ou seja: variações na temperatura de reaquecimento, de acabamento e no grau total de deformação a quente não levaram a alterações significativas na ductilidade do material. Também não houveram diferenças significativas entre os valores de alongamento total verificados para as duas ligas.

Os valores de resistência ao impacto a -20°C foram significativamente maiores para o aço

ULCB como laminado do que para o aço HSLA-80 laminado e submetido a envelhecimento a 600°C durante uma hora. Isto já era previsível, pois a maior contribuição do endurecimento por precipitação ocorrido nesta última liga compromete sua tenacidade. Verificou-se ainda que a temperatura de reaquecimento usada não influenciou os valores de resistência ao impacto que, por outro lado, aumentaram à medida que se aumentou o grau total de deformação a quente ou se baixou a temperatura de acabamento. É interessante notar que o maior refino de grão promovido pela menor temperatura de reaquecimento não foi relevante para se aumentar a resistência ao impacto das amostras de ambos os aços, enquanto que o efeito do maior grau de deformação a quente e da menor temperatura de acabamento se fez sentir neste caso. Aliás, esta foi a única propriedade mecânica influenciada de forma significativa pela temperatura de acabamento.

5.6. Resumo das Conclusões

Os dois aços aqui estudados - HSLA-80, laminado e envelhecido a 600°C durante uma hora e ULCB como laminado - apresentaram nível de resistência mecânica equivalente ao especificado para os aços HY-80/HSLA-80, desde que se aplique um grau total de deformação de pelo menos 83% durante a laminação a quente. Sob tais condições, as amostras de aço HSLA-80 chegaram a apresentar níveis de resistência mecânica até mesmo equivalentes aos aços HY-100/HSLA-100.

Não foi possível efetuar uma comparação entre os valores de resistência ao impacto levantados para os materiais estudados neste trabalho e os especificados nas normas que regem as propriedades dos aços HY-80/HSLA-80. Em primeiro lugar, os valores especificados em norma levam em conta os atuais recursos de refino secundário disponíveis industrialmente, que permitem maiores níveis de limpeza inclusionária e menores teores de elementos indesejáveis do que os que podem ser conseguidos em fornos laboratoriais de fusão por indução, como o que foi usado na elaboração das ligas estudadas nesse trabalho. Disto resulta que geralmente o material produzido industrialmente apresenta maior tenacidade em relação ao elaborado em laboratório. Além disso, o tamanho dos corpos de prova Charpy adotados neste trabalho é significativamente menor do que o usado nos corpos de prova extraídos a partir de material produzido industrialmente, em função da pequena quantidade de material disponível para as experiências aqui realizadas.

Contudo, o aço HSLA-80 laminado e envelhecido a 600°C durante uma hora apresentou dois pontos desfavoráveis: razão elástica muito elevada e menor resistência ao impacto Charpy que o aço ULCB. São dois aspectos que inspiram preocupações aos projetistas de estruturas que venham a utilizar este tipo de material. Além disso, o aumento de dureza conseguido após o envelhecimento a 600°C por uma hora desse aço foi de apenas 11%, o que parece ser um ganho muito pequeno para um tratamento térmico adicional.

Do ponto de vista industrial, contudo, o que vem se observando é uma aplicação mais intensa do aço HSLA-80 em aplicações práticas, particularmente na área naval, em detrimento do aço ULCB. Isso decorre de vários fatores. Em primeiro lugar, do fato do aço HSLA-80 ter sido derivado de materiais já consagrados há décadas em aplicações práticas, como o *NiCuAge* e o A710. Esse histórico bem-sucedido aumenta a confiança dos projetistas nesse material, incentivando seu uso. Por sua vez, o aço ULCB ainda apresenta algum caráter experimental, tendo sido relativamente pouco usado em aplicações práticas. Além disso, o aço HSLA-80 é mais fácil de ser elaborado numa aciaria do que o ULCB. Neste último caso, o teor de carbono ultra baixo da liga exige obrigatoriamente a desgaseificação do aço líquido com um controle de processo bastante rígido, fato que dificulta ou até mesmo inviabiliza sua produção. Finalmente, o envelhecimento do aço HSLA-80 também pode servir de tratamento de alívio de tensões nas peças soldadas. Nos casos em que esse tratamento for obrigatório, independentemente do aço escolhido, o envelhecimento decorrente da adoção do aço HSLA-80 não implicará em custos extras.

Em termos do efeito dos parâmetros de processo de laminação, verificou-se que o mais importante deles é o grau total de deformação a quente aplicado ao material, que influenciou todas as propriedades mecânicas dos aços aqui estudados, com exceção de sua ductilidade e da razão elástica do aço ULCB. Por exemplo, o aumento do grau total de deformação a quente de 58 para 83% elevou o limite de escoamento de 8% (aço HSLA-80) e 4% (aço ULCB). Seu efeito sobre a tenacidade desses aços foi decisivo: a energia absorvida no ensaio Charpy a -20°C subiu 450% (aço HSLA-80) e 114% (aço ULCB). A temperatura de acabamento também afetou significativamente essa propriedade; seu abaixamento, de 800 para 700°C, aumentou a energia absorvida no ensaio Charpy a -20°C em 35% (aço HSLA-80) e 17% (aço ULCB).