

DESENVOLVIMENTO DE AÇOS ALTERNATIVOS AOS MATERIAIS TEMPERADOS E REVENIDOS COM LIMITE DE RESISTÊNCIA DE 600 A 800 MPa¹

Antonio Augusto Gorni²
Celso Gomes Cavalcanti³
Benedito Dias Chivites⁴
Rajindra Clement Ratnapuli⁵
Sérgio Barbosa⁶
Paulo Roberto Mei⁷

RESUMO

A competitividade cada vez mais acirrada entre as diversas usinas siderúrgicas e também entre diferentes tipos de materiais continuam promovendo o desenvolvimento de novos aços estruturais microligados que atendam a requisitos de resistência mecânica e tenacidade cada vez mais severos. Outros aspectos igualmente desejáveis, como a supressão de tratamentos térmicos e melhor soldabilidade do produto, tornam essa evolução ainda mais complexa. Como a melhoria da soldabilidade do produto exige a minimização do teor de carbono do material, esses novos aços precisam dispor de mecanismos de endurecimento que dispensem a presença desse elemento. As alternativas mais viáveis são os aços endurecíveis por precipitação de cobre, do tipo HSLA-80 ou ASTM A710, ou os aços bainíticos com teor extra-baixo de carbono, do tipo ULCB. O objetivo deste trabalho foi estudar o efeito dos parâmetros da laminação controlada sobre as propriedades mecânicas desses dois tipos de aço relativamente novos, visando determinar condições otimizadas para seu processamento termomecânico que permitam atingir as propriedades mecânicas objetivadas.

Palavras-Chaves: aços microligados, precipitação de cobre, bainita

¹ Trabalho a ser apresentado no 54º Congresso da Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, São Paulo SP, 25 a 29 de julho de 1999.

² Sócio da A.B.M. Pesquisador da Companhia Siderúrgica Paulista - COSIPA, Cubatão SP. E-Mail: agorni@iron.com.br

³ Sócio da A.B.M. Assistente de Pesquisa da Companhia Siderúrgica Paulista - COSIPA, Cubatão SP.

⁴ Sócio da A.B.M. Assistente de Pesquisa da Companhia Siderúrgica Paulista - COSIPA, Cubatão SP.

⁵ Sócio da A.B.M. Pesquisador das Usinas Siderúrgicas de Minas Gerais - USIMINAS, Ipatinga, MG.

⁶ Sócio da A.B.M. Assistente de Pesquisa da Usinas Siderúrgicas de Minas Gerais - USIMINAS, Ipatinga, MG.

⁷ Sócio da A.B.M. Professor Doutor da Universidade de Campinas - UNICAMP, Campinas, SP.

- INTRODUÇÃO

O vertiginoso desenvolvimento dos aços microligados, particularmente no campo das aplicações estruturais, navais e em tubos petrolíferos, se deve basicamente às melhores características de tenacidade desses materiais para níveis relativamente altos de resistência mecânica. Além disso, seu preço é mais reduzido em relação aos materiais tratados termicamente, uma vez que suas características mecânicas finais são conseguidas diretamente do calor de laminação. Sob este aspecto, a laminação controlada se revelou como sendo um tratamento termomecânico indispensável para se conseguir tais características a partir das ligas microligadas ao Nb, Ti e/ou V com microestrutura ferrítico-perlítica. Desse modo, tornou-se possível a produção de chapas grossas adequadas à fabricação de tubos petrolíferos segundo as normas API X60, X70 e até mesmo X80, desde que sua espessura de parede não ultrapasse 20 mm.

Por outro lado, aplicações que exijam níveis ainda maiores de resistência mecânica ou chapas mais pesadas com alta resistência mecânica e boa tenacidade requerem a utilização de aços microligados mais complexos. Pode-se citar como exemplos: componentes para pernas de plataformas marítimas móveis, válvulas e conexões para oleodutos, peças para veículos militares e caminhões fora-de-estrada, equipamentos para poços de petróleo e componentes estruturais em vasos de guerra, incluindo submarinos [1]. Além de características mecânicas balanceadas, este tipo de material deve ser de fácil processamento no cliente, o que inclui boa soldabilidade, mesmo que se encontre na forma de chapas grossas pesadas, ou seja, com espessuras entre 25 e 100 mm.

Dois conceitos de liga foram propostos para se responder a esse desafio: aços microligados endurecíveis por precipitação de cobre (ASTM A710/HSLA-80) ou pela formação de estrutura bainítica tenaz (ULCB - "Ultra Low Carbon Bainite"). Eles foram originalmente desenvolvidos para atender aplicações de tubos e conexões petrolíferos. Uma de suas grandes vantagens está no fato de prescindirem de tratamento térmico de têmpera e revenido. Além disso, eles apresentam teores de carbono extra-baixos, uma vez que seus mecanismos de endurecimento não dependem significativamente desse elemento. No caso do aço HSLA-80, a precipitação de cobre representa uma contribuição significativa à resistência mecânica, enquanto que no ULCB esse papel é desempenhado pela microestrutura bainítica e o endurecimento por solução sólida de elementos de liga. Em consequência, a soldabilidade desses aços é grandemente melhorada [2-6]. A grande vantagem dessas ligas é sua soldabilidade muito superior, em função de seu teor minimizado de carbono, que permite redução de até 50% nos custos totais de construção dos componentes e estruturas.

O objetivo deste trabalho é estudar o efeito do tratamento termomecânico, seguido ou não de envelhecimento, sobre a microestrutura e propriedades mecânicas, de um aço endurecível por precipitação de cobre (A710/HSLA-80) e um aço do tipo ULCB.

- DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL

Os materiais necessários para este trabalho foram elaborados em forno de indução a vácuo, sendo obtidos dois lingotes - um de aço HSLA-80 e outro de aço ULCB - com aproximadamente 85 kg cada, de seção retangular (100 x 130 mm) e comprimento de 850 mm. As análises químicas confirmatórias das ligas vazadas estão listadas na tabela I.

Os lingotes foram submetidos à laminação de desbaste para quebrar e homogeneizar a estrutura bruta de fusão. Desse modo, foram obtidas barras retangulares, com seção de 50 x 42 mm, a partir das quais foram usinados os bloquetes para os ensaios de laminação a quente. Suas dimensões foram 42 mm (espessura), 50 mm (largura) e 100 mm (comprimento).

Na primeira série de ensaios objetivou-se verificar o efeito do grau de deformação aplicado sobre as propriedades mecânicas de ambos os aços. As condições de distribuição da deformação entre essas duas fases do tratamento termomecânico podem ser vistas na tabela II. A temperatura de acabamento foi mantida constante em 750°C para todas as amostras estudadas nesta série.

Tabela I: Análises químicas confirmatórias das corridas estudadas.

Aço	C	Mn	Si	P	S	Al _{sol}	Ni	Cr	Cu	Mo	Nb	Ti	B	N
HSLA-80	0,044	0,65	0,32	0,005	0,011	0,013	0,87	0,77	1,12	0,23	0,077	---	---	0,0030
ULCB	0,033	1,93	0,29	0,007	0,011	0,006	0,39	---	---	0,35	0,062	0,029	0,0016	0,0030

Tabela II: Parâmetros experimentais utilizados na série de laminações piloto para exame da influência da distribuição da deformação entre as fases de esboçamento e acabamento da laminação controlada. Espessura inicial dos bloquetes: 42 mm.

Parâmetros	A		B		C		D		
Temperatura de Reaquecimento [°C]	1200	1200	1200	1200	1100	1100	1100	1100	
Deformação no Esboçamento	Real	0,36	0,36	0,69	0,69	0,36	0,36	0,69	0,69
	Nominal [%]	30	30	50	50	30	30	50	50
Deformação no Acabamento	Real	0,51	1,10	0,51	1,10	0,51	1,10	0,51	1,10
	Nominal [%]	40	67	40	67	40	67	40	67
Deformação Total	Real	0,86	1,46	1,20	1,79	0,86	1,46	1,20	1,79
	Nominal [%]	58	77	70	83	58	77	70	83
Espessura Final [mm]	17,6	9,8	12,6	7,0	17,6	9,8	12,6	7,0	

Numa segunda série de ensaios objetivou-se estudar o efeito da temperatura de acabamento sobre as propriedades mecânicas das duas ligas estudadas. Neste caso, o grau de deformação real a quente aplicado foi constante, tendo sido fixado no máximo possível, ou seja, 0,69 no esboçamento e 1,10 no acabamento, totalizando deformação real global de 1,79. As temperaturas de reaquecimento testadas foram as mesmas da primeira série (1200 e 1100°C), enquanto que as temperaturas de acabamento aplicadas foram de 700 e 800°C. Note-se que as amostras da série anterior que foram submetidas ao grau máximo de deformação e à temperatura de acabamento de 750°C também forneceram subsídios para esta análise.

Para se garantir as mesmas condições de tratamento termomecânico para ambas as ligas foi desenvolvido um dispositivo de laminação que permitiu a laminação simultânea de bloquetes de ambos os aços estudados.

A partir dos bloquetes laminados obtidos foram usinados corpos de prova para ensaios de tração, na direção longitudinal, e para ensaios de impacto Charpy, na direção transversal. Todos eles foram do tipo *sub-size*, conforme as especificações da norma ASTM A-370. Os corpos de prova de tração e impacto do aço HSLA-80 foram envelhecidos a 600°C, durante uma hora. Finalmente, foram executados ensaios de tração e de impacto Charpy nos corpos de prova de aço HSLA-80 (envelhecido) e ULCB (como laminado).

- RESULTADOS EXPERIMENTAIS E DISCUSSÃO

Como já seria de se esperar, o limite de escoamento se elevou ao se aumentar o grau total de redução a quente, conforme mostrado na figura 1. O aço HSLA-80 envelhecido apresentou limite de escoamento nitidamente superior ao ULCB, bem como sensibilidade ligeiramente maior dessa propriedade mecânica em relação ao grau total de redução a quente. O uso de temperatura de reaquescimento mais alta levou a um ligeiro aumento no limite de escoamento, ainda que este efeito tenda a se diluir quando se aplicam maiores graus de deformação a quente.

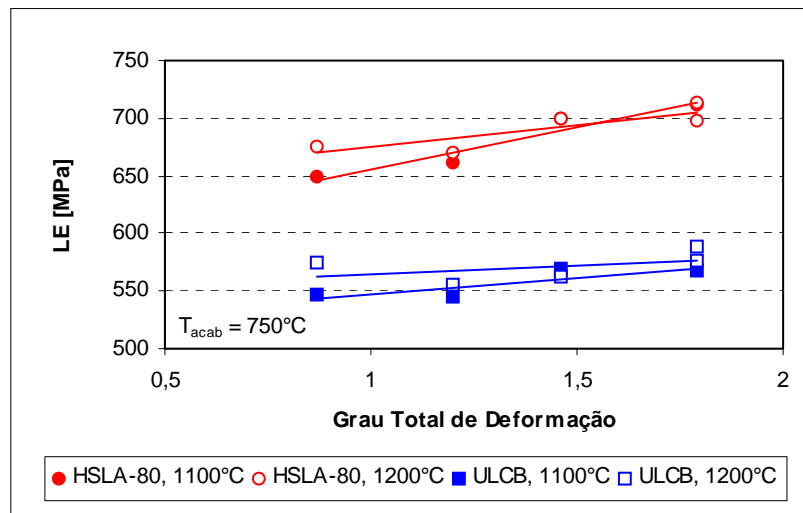


Figura 1: Evolução do limite de escoamento para os aços HSLA-80 (envelhecido) e ULCB (como laminado) em função do grau total de deformação real aplicado.

Pode-se observar que todas as amostras alcançaram limite de escoamento de pelo menos 551 MPa (equivalente ao API X-80), exceto as amostras de aço ULCB reaquescidas a 1100°C e submetidas a menores graus de redução a quente. Ainda assim, essas amostras apresentaram valores bastante próximos desse limite. Os corpos de prova de aço HSLA-80 submetidos aos maiores níveis de redução a quente chegaram a apresentar após o envelhecimento limite de escoamento superior a 699 MPa, nível correspondente ao API X-100.

A figura 2 mostra que também o limite de resistência tendeu a ser proporcional ao grau de deformação total a quente e à temperatura de reaquescimento aplicados aos materiais. Contudo, é interessante notar que a evolução do limite de resistência das amostras de aço ULCB reaquescidas a 1100°C ao longo do grau total de redução a quente aplicado foi ligeiramente diferente em relação aos demais casos estudados. As diferenças observadas entre os limites de resistência dos aços HSLA-80 envelhecido e ULCB como laminado foram menores que as verificadas para o limite de escoamento. De fato, o limite de resistência das amostras de ULCB como laminado reaquescidas a 1200°C chegou a ser ligeiramente maior que as de aço HSLA-80 envelhecido reaquescidas a 1100°C.

Como já seria de se esperar em função da evolução constatada nos limites de escoamento e de resistência, a razão elástica foi maior para as amostras de aço HSLA-80 envelhecido, conforme mostrado na figura 3. Os altos níveis atingidos por este material - entre 85 e 90% - permitem prever que uma eventual conformação desse material (por exemplo, na forma de tubos) poderá ser dificultada pela ocorrência de efeito mola. Além disso, essa diferença relativamente pequena entre o início do escoamento do material e sua ruptura reduz a margem de segurança dos equipamentos com ele construídos em caso de sobrecarga mecânica.

nica. É interessante notar que, para este material, a razão elástica subiu a medida que se elevou o grau total de redução a quente aplicado. O mesmo não ocorreu para o aço ULCB, cujos valores de razão elástica permaneceram relativamente constantes, independentemente da redução a quente total aplicada.

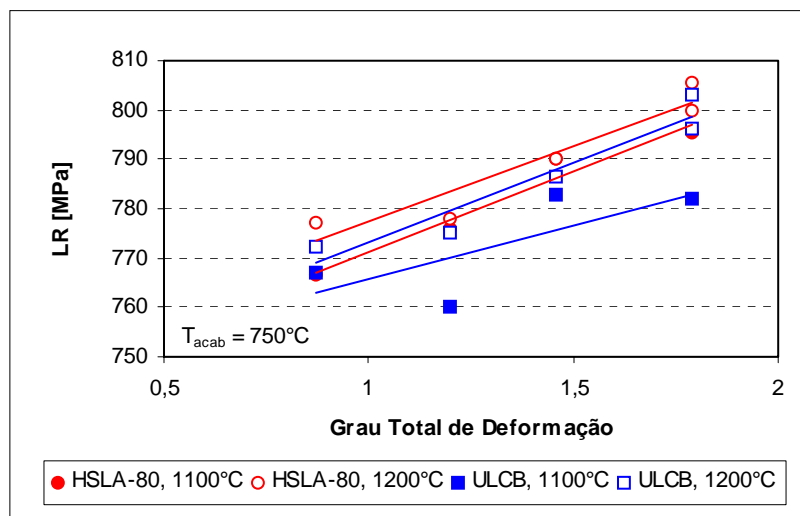


Figura 2: Evolução do limite de resistência para os aços HSLA-80 (envelhecido) e ULCB (como laminado) em função do grau total de deformação real aplicado.

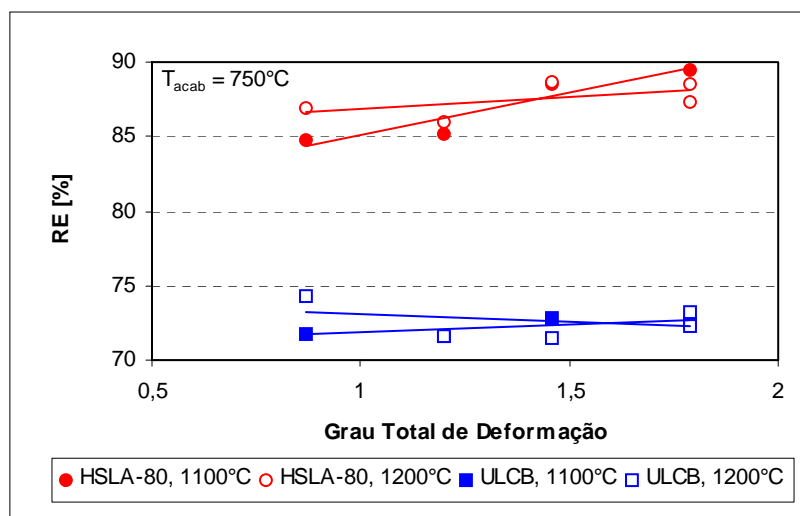


Figura 3: Evolução da razão elástica para os aços HSLA-80 (envelhecido) e ULCB (como laminado) em função do grau total de deformação real aplicado.

O alongamento total parece não ter sido afetado de forma significativa nem pelo aumento no nível de redução a quente nem pela temperatura de reaquecimento, conforme mostrado na figura 4. Rigorosamente falando, foi constatada uma ligeira diminuição na ductilidade no caso de amostras de aço ULCB como laminado quando submetidas a maiores graus de redução a quente. Contudo, a queda constatada foi muito pequena, podendo estar ligada a flutuações experimentais. O aço HSLA-80 envelhecido apresentou ductilidade ligeiramente maior que o ULCB, particularmente para níveis máximos de redução a quente.

Conforme esperado, o efeito do grau total de redução a quente sobre a tenacidade do material foi muito significativo para ambos os aços, particularmente para o HSLA-

80 envelhecido. É o que se pode concluir a partir dos dados mostrados na figura 5. A tenacidade do aço ULCB foi superior à do aço HSLA-80 envelhecido, como já seria de se esperar, em função de seu menor nível de resistência mecânica e da menor contribuição da precipitação como mecanismo de endurecimento neste tipo de material. O abaixamento da temperatura de reaquecimento levou a um ligeiro aumento na tenacidade, se bem que no caso do aço ULCB esse efeito foi menor e acabou sendo neutralizado quando o material foi submetido ao grau máximo de deformação a quente.

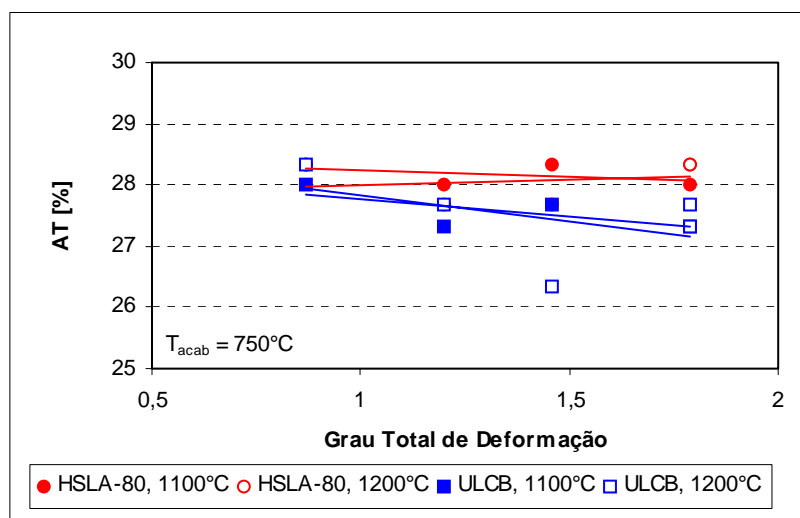


Figura 4: Evolução do alongamento total para os aços HSLA-80 (envelhecido) e ULCB (como laminado) em função do grau total de deformação real aplicado.

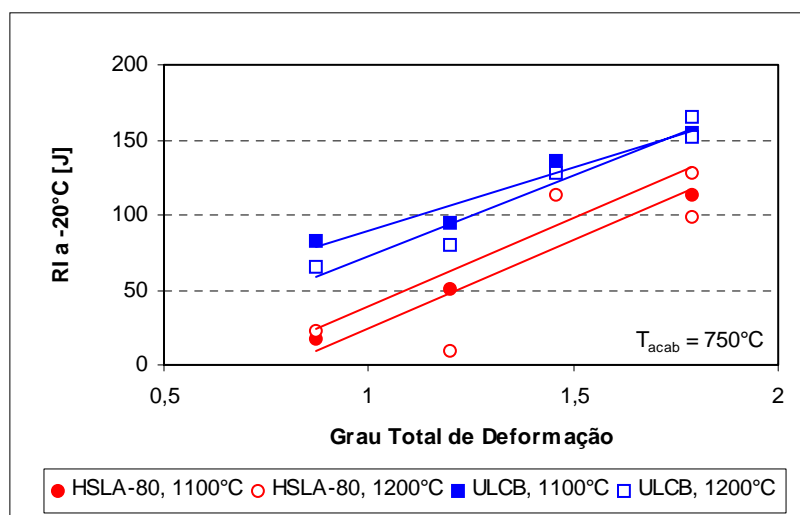


Figura 5: Evolução da energia absorvida no ensaio Charpy a -20°C para os aços HSLA-80 (envelhecido) e ULCB (como laminado) em função do grau total de deformação real aplicado.

A influência da temperatura de acabamento sobre o limite de escoamento, mostrada na figura 6, foi muito pequeno. Há uma tendência muito discreta de queda no limite de escoamento a medida que a temperatura de acabamento se elevou de 700 para 800°C . Aparentemente esta tendência foi um pouco mais nítida para as amostras de aço ULCB reaquecidas a 1200°C . Note-se que, mais uma vez, o efeito da temperatura de reaquecimento sobre o

limite de escoamento foi maior para as amostras de aço ULCB, diminuindo a medida que se elevou o grau de redução total. A figura 6 permite verificar também que os aços HSLA-80 e ULCB atingiram limites de escoamento equivalentes aos graus API X-100 e X-80, respectivamente, independentemente da temperatura de acabamento utilizada.

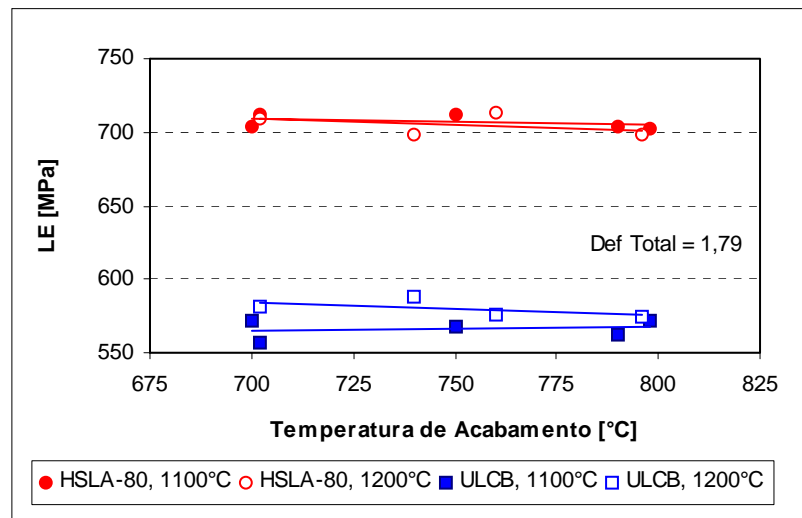


Figura 6: Evolução do limite de escoamento para os aços HSLA-80 (envelhecido) e ULCB (como laminado) em função da temperatura de acabamento.

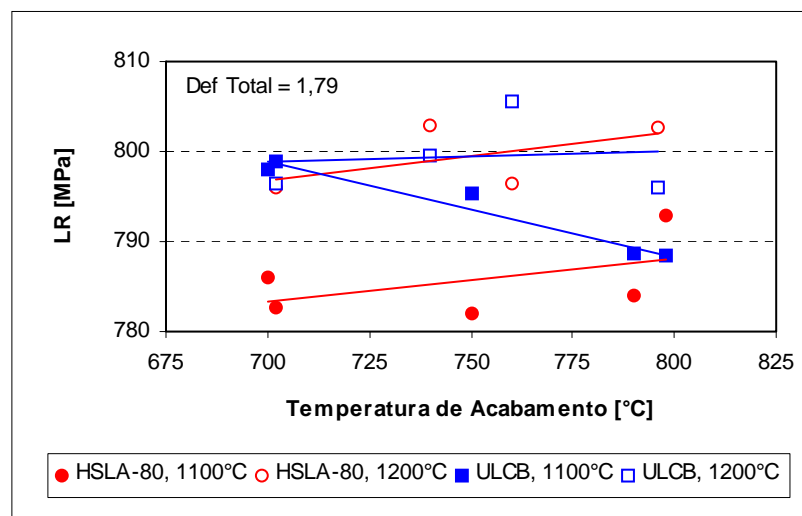


Figura 7: Evolução do limite de resistência para os aços HSLA-80 (envelhecido) e ULCB (como laminado) em função da temperatura de acabamento.

Já no caso do limite de resistência não foi possível constatar uma influência consistente da temperatura de acabamento, conforme mostram os dados da figura 7. As alterações verificadas foram relativamente pequenas e contraditórias, particularmente no caso do aço ULCB. Os resultados obtidos também não permitiram distinguir claramente o efeito da temperatura de reaquecimento e nem mesmo o tipo de aço, ao contrário do verificado na figura 2.

Não foram verificados efeitos plenamente significativos da temperatura de acabamento sobre a razão elástica, conforme mostra o gráfico da figura 8. Aparentemente as amostras reaquecidas sob maior temperatura, 1200°C, apresentaram tendência à queda na

razão elástica com o aumento da temperatura de acabamento, acompanhando a tendência idêntica que ocorre com o limite de escoamento. Conforme já constatado anteriormente na figura 3, não foi detectada influência da temperatura de reaquecimento sobre a razão elástica.

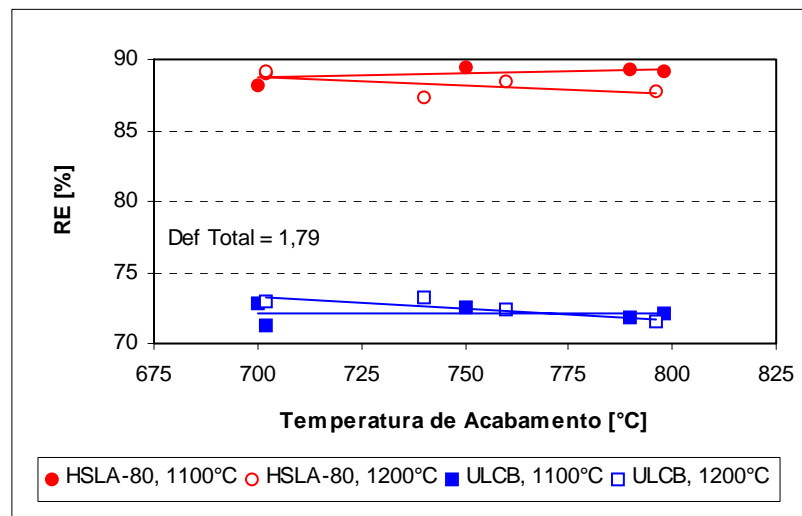


Figura 8: Evolução da razão elástica para os aços HSLA-80 (envelhecido) e ULCB (como laminado) em função da temperatura de acabamento.

Os resultados da figura 9 parecem indicar que, de fato, a elevação da temperatura de acabamento promoveu ligeira redução na ductilidade do material. Os resultados relativos ao aço HSLA-80 envelhecido foram um pouco ambíguos, pois as amostras laminadas reaquecidas a 1100°C não foram afetadas pela temperatura de acabamento. Já as amostras laminadas de aço ULCB, reaquecidas a 1100°C, apresentaram a intensidade de queda mais nítida. Também nesta oportunidade o aço HSLA-80 envelhecido apresentou ductilidade ligeiramente maior que o aço ULCB.

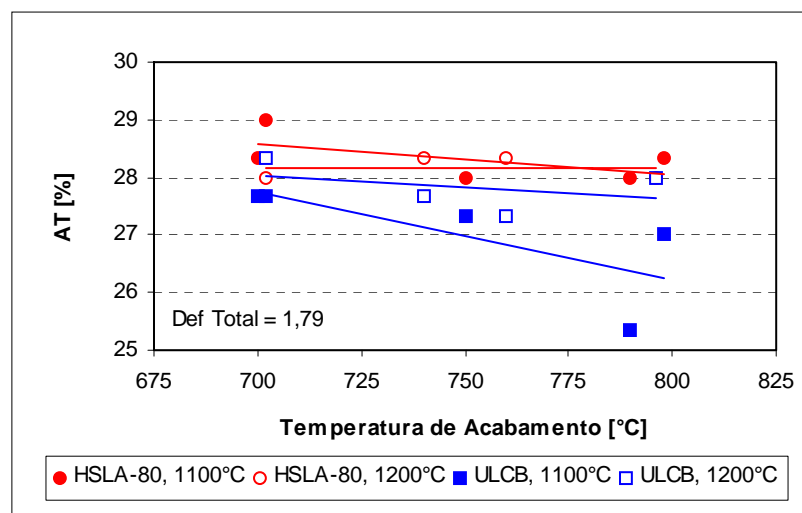


Figura 9: Evolução do alongamento total para os aços HSLA-80 (envelhecido) e ULCB (como laminado) em função da temperatura de acabamento.

Mais uma vez a tenacidade sofreu alterações significativas em funções de parâmetros de processo. Os resultados expostos na figura 10 mostram que a elevação da tem-

peratura de acabamento a reduziu significativamente, particularmente no caso do aço HSLA-80 envelhecido. Mais uma vez, o aço ULCB apresentou melhor desempenho sob este aspecto.

Contudo, o efeito da temperatura de reaquecimento foi surpreendente: para baixas temperaturas de acabamento, os maiores valores de tenacidade foram conseguidos para as amostras laminadas reaquecidas sob temperatura máxima, 1200°C. A medida que se elevou a temperatura de acabamento o efeito da temperatura de reaquecimento diminuiu, anulando-se a 800°C no caso do aço ULCB e invertendo-se a partir de 760°C para o aço HSLA-80 envelhecido. Ou seja, a queda na tenacidade a medida que se aumentou a temperatura de acabamento foi bem nítida para amostras de aço HSLA-80 envelhecido submetidas a temperatura de reaquecimento de 1200°C.

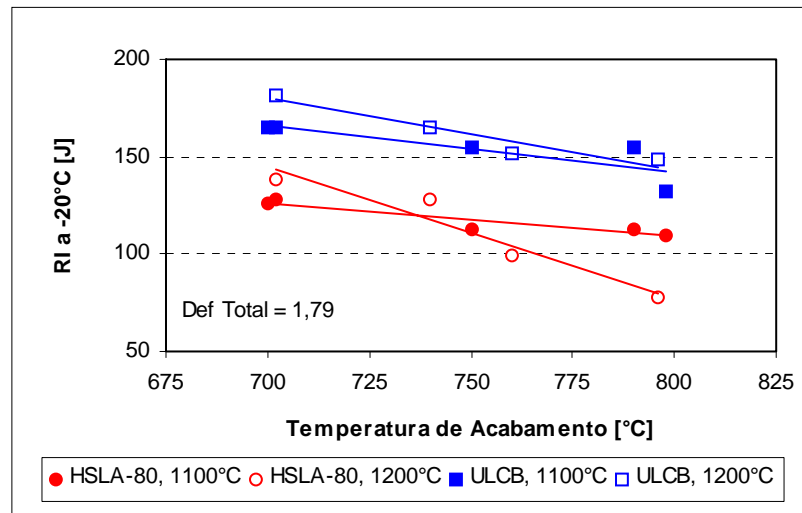


Figura 10: Evolução da energia absorvida durante o ensaio Charpy a -20°C para os aços HSLA-80 (envelhecido) e ULCB (como laminado) em função da temperatura de acabamento.

- CONCLUSÕES

O desenvolvimento deste trabalho sobre aços endurecíveis por precipitação de cobre (HSLA-80) e bainíticos (ULCB), ligas alternativas aos materiais temperados e revenidos com limite de resistência entre 600 e 800 MPa, permitiu chegar às seguintes conclusões:

- ⇒ O efeito da temperatura de reaquecimento sobre as propriedades de ambas as ligas não foi muito acentuado. De maneira geral, maiores temperaturas de reaquecimento levaram a discretas elevações nos níveis de resistência mecânica e diminuição da tenacidade;
- ⇒ A tenacidade de ambas as ligas foi fortemente aumentada com a elevação do grau total de redução a quente aplicado. Isto foi particularmente importante no caso do aço HSLA-80. O aumento do grau total de redução a quente também aumentou a resistência mecânica de ambas as ligas, mas de forma discreta. Não foram constatados efeitos significativos em sua ductilidade;
- ⇒ O efeito das contribuições individuais dos graus de redução a quente aplicados nas fases de esboçamento e acabamento da laminação controlada não puderam ser determinados de maneira confiável devido à pequena quantidade de dados disponível;

⇒ A redução na temperatura de acabamento também aumentou nitidamente a tenacidade de ambas as ligas, mas com menor intensidade que a observada para o grau total de redução a quente. A diminuição dessa temperatura também levou a um aumento muito discreto na resistência mecânica e ductilidade das ligas estudadas.

- AGRADECIMENTOS

Os autores deste trabalho gostariam de agradecer ao **Prof. Dr. Marcelo Gonçalves**, do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo - IPT, pela sua orientação e sugestões durante o planejamento experimental e execução das etapas preliminares deste trabalho.

- REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. JESSEMAN, R.J. & MURPHY, G.J. In: INTERNATIONAL CONFERENCE COPPER IN STEEL. Proceedings. Luxembourg, 1983, 8.1-8.10.
2. WILSON, A.D. e outros. In: MICROALLOYING '88. Proceedings. American Society for Metals, Chicago, 1988, 259-275.
3. PHILLIPS, R.H. e outros. In: MICROALLOYING '88. Proceedings. American Society for Metals, Chicago, 1988, 235-247.
4. GARCIA, C.I. & DE ARDO, A.J. In: MICROALLOYING '88. Proceedings. American Society for Metals, Chicago, 1988, 291-299.
5. GARCIA, C.I. e outros. Iron & Steelmaker, October 1991, 97-106.
6. NAKASUJI, H. e outros. In: Alloys for the Eighties. Proceedings. Climax Molybdenum Company, Connecticut, 1981, 213-224.

DEVELOPMENT OF ALTERNATIVE ALLOYS TO REPLACE QUENCHED AND TEMPERED STEELS WITH TENSILE STRENGTH IN THE RANGE OF 600 TO 800 MPa

The fierce competition between different steelworks and between different alloy design approaches keep promoting the development of new microalloyed structural steels which must satisfy increasingly severe mechanical strength and toughness requirements. Another equally desirable aspects for these new materials are the supression of heat treatments and better weldability, which makes this evolution even more complex. As weldability improvement requires minimization of the carbon content of the steel, these new steels must present hardening mechanisms which does not require the presence of this element. Up to this moment, the most feasible answers to this challenge are steels hardened by copper precipitation, like HSLA-80 or ASTM A710, and the so-called Ultra Low Carbon Bainite (ULCB) steels. The aim of this work was to study the effects of controlled rolling parameters

over the mechanical properties of these relatively new steels. The knowledge of these effects certainly will help to define the optimized process conditions for these new steel alloy designs.

Keywords: microalloyed steels, copper precipitation, bainite