

Materiais

Metalurgia dos aços microligados usados em tubos soldados de grande diâmetro

A redução nos custos de implantação, as severas condições de operação e os crescentes requisitos de segurança necessários aos dutos para condução de produtos petrolíferos proporcionaram um forte impulso à metalurgia dos aços usados para estes fins. Este trabalho descreve a evolução siderúrgica e os últimos desenvolvimentos observados em aços microligados usados na fabricação de tubos de grande diâmetro voltados para a exploração de petróleo, com destaque para propriedades relacionadas a soldabilidade e resistência à corrosão.

A. A. Gorni, J. H. D. da Silveira e J. S. de S. Reis

A combinação explosiva de uma sociedade de consumo cada vez mais sofisticada com a expansão demográfica implicou uma demanda crescente por matérias primas e energia. Tornou-se necessário construir e manter uma infra-estrutura cada vez maior para atender a essas necessidades, inclusive complexas redes de dutos de grande diâmetro para o transporte de diversos tipos de fluidos, como água, inclusive potável; efluentes domésticos ou industriais; petróleo e seus derivados; gás natural e GLP; e minérios ou carvão, estes geralmente na forma de uma suspensão aquosa. As propriedades requeridas pelos tubos variam muito, dependendo das características es-

pecíficas da aplicação: diâmetro do tubo, propriedades do fluido a ser transportado (por exemplo, pH e abrasividade), condições de transporte (por exemplo, pressão e temperatura), meio ambiente ao qual o tubo estará exposto, custos de instalação e operação, facilidade de reparo, etc. A figura 1 (pág. 51) mostra uma correlação entre tendências e requisitos associados para tubos⁽¹³⁾.

As linhas de desenvolvimento para novos produtos nesta área já são bem conhecidas no caso do aço, particularmente o usado na fabricação de tubos de grande diâmetro para o transporte de petróleo e seus derivados. A busca por menores custos de instalação e reparo requerem o menor peso pos-

sível para os tubos. Isso impõe que eles sejam feitos com o uso de aços com maior resistência mecânica, permitindo assim a redução da espessura dos tubos sem que seu desempenho seja afetado. A forma mais fácil de elevar a resistência mecânica do aço consiste em aumentar seus teores de carbono e elementos de liga, mas esta primeira abordagem deve ser evitada, uma vez que composições químicas mais complexas, além de serem mais caras, dificultam e oneram economicamente os processos de soldagem envolvidos na fabricação e união dos tubos. Não são raros os casos em que os tubos também devem apresentar alta tenacidade, ou seja, eles oferecem resistência e demandam muita energia para que ocorram trincas e sua propagação. Essa é uma característica primordial

Antonio Augusto Gorni (antonio.gorni@usiminas.com) é analista de operação da superintendência de laminação a quente da Usiminas (Cubatão, SP) e editor técnico de *Corte e Conformação de Metais*; José Herbert Dolabela da Silveira é gerente da laminação de chapas grossas da Gerdau-Açominas; Jackson Soares de Souza Reis é engenheiro metalurgista e trabalha na superintendência de laminação a quente da Usiminas. Reprodução autorizada.

no caso dos dutos soldados. Caso contrário, uma vez iniciada uma trinca, ela pode se propagar facilmente ao longo de grandes extensões, produzindo enormes danos e escape do conteúdo dos dutos. A redução dos custos operacionais requer aumento do diâmetro dos tubos e elevação da pressão de operação, o que demanda a maximização da relação diâmetro:espessura, aumentando também as solicitações mecânicas decorrentes⁽¹³⁾.

Evolução metalúrgica dos aços para tubos

A figura 2 mostra a evolução metalúrgica ocorrida nos processos de laminação e tratamento térmico de chapas grossas de aço usadas para a fabricação de tubos soldados para transporte de petróleo e seus derivados. A partir dela pode-se observar que, há mais de 40 anos, já eram produzidas chapas de aço para a produção de tubos API 5L-X60 apresentando teor de carbono relativamente alto – 0,20% – e contendo também vanádio para aumentar sua resistência mecânica. O processo de laminação a quente dessas chapas tinha como objetivo somente obter as dimensões necessárias para a chapa, cujas propriedades mecânicas eram definidas posteriormente, ao se aplicar tratamento térmico de normalização⁽⁵⁾.

Embora satisfatória naquela época, essa abordagem de fabricação apresenta diversas oportunidades de melhoria. Seria muito interessante que a chapa pudesse apresentar suas propriedades mecânicas finais logo após sua laminação a quente, permitindo a supressão do tratamento térmico

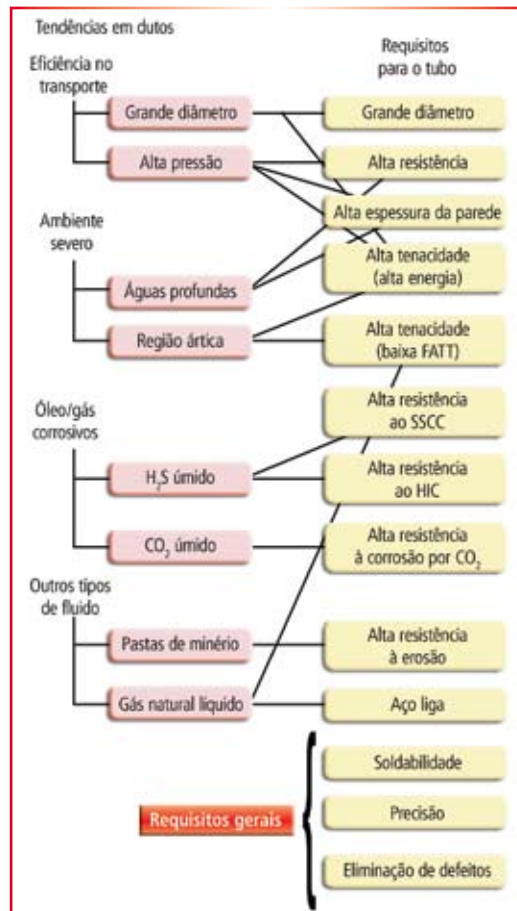


Fig. 1 – Correlação entre as tendências para dutos e os requisitos correspondentes para tubos⁽¹³⁾

adicional, que consome energia e prolonga seu tempo de fabricação, implicando em maiores custos de fabricação. O teor relativamente alto de carbono não favorece a soldagem do material, particularmente durante a construção do duto, quando esse processo é efetuado no campo.

Na década de 1960, pesquisadores ingleses começaram a estudar um novo conceito de material, os aços

microligados de alta resistência e baixa liga (ARBL), contendo teores muito pequenos de nióbio, titânio e/ou vanádio, que apresentam uma característica muito peculiar durante sua conformação a quente. Como se sabe, os aços convencionais submetidos a este processo se recristalizam de forma rápida e completa após cada passe de deformação. Isso também ocorre no caso dos aços microligados, mas somente até certo ponto: abaixo de uma dada temperatura, denominada Temperatura de Não-Recristalização (T_{nr}), parte dos elementos microligados, particularmente o nióbio, se precipita na austenita. Esses precipitados ancoram os contornos de recristalização que varrem a microestrutura após cada passe de deformação, virtualmente paralisando a restauração do material. Dessa forma, como a austenita não mais se recristaliza entre os passes de deformação, ela encrua progressivamente à medida que é laminada, formando grãos achatados (ou “panquecados”). A transformação da austenita encruada, que ocorre durante o resfriamento da chapa após sua laminação a quente, gera uma microestrutura com tamanho de grão extremamente refinado. Como se sabe, só o refino de grão microestrutural leva à elevação simultânea da resistência mecânica e da tenacidade da chapa que dará origem ao tubo⁽³⁾.

O refino de grão promovido pela laminação controlada pode ser entendido com maior clareza observando-se a figura 3 (pág. 52). A partir dela é possível depreender que, na laminação convencional de aços comuns (os dois casos à esquerda), a nucleação da ferrita ocorre exclusivamente

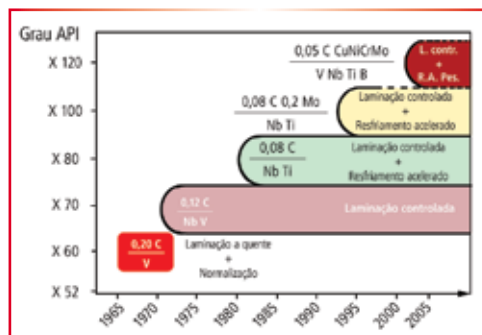


Fig. 2 – Evolução dos aços usados na fabricação de tubos com grande diâmetro para transporte de óleo e gás⁽⁵⁾

Materiais

nos contornos de grão prévios da austenita. O abaixamento da temperatura final de laminação promove microestrutura final mais refinada e, portanto, mais resistente e tenaz. Já a laminação controlada dos aços microligados (terceiro caso na figura 3) faz com que a nucleação da ferrita também ocorra nas bandas de deformação intragranulares decorrentes do encruamento da austenita, refinando ainda mais a microestrutura final do material⁽⁹⁾.

O endurecimento proporcionado pelo refino de grão é complementado por outros fenômenos metalúrgicos. Os elementos microligantes ainda em solução também podem se precipitar simultaneamente com a transformação da austenita em ferrita durante o resfriamento da chapa, aumentando ainda mais sua resistência mecânica, ainda que comprometendo um pouco a tenacidade do material. A união desses mecanismos de endurecimento permite reduzir os teores de carbono e demais elementos de liga sem que haja prejuízo para as propriedades mecânicas da chapa, o que contribui para

umentar sua soldabilidade. E mais: agora é possível dispensar o tratamento térmico final de normalização, uma vez que o produto apresenta as características mecânicas desejadas já no estado laminado⁽¹⁴⁾.

Por outro lado, o fato de a laminação definir as propriedades finais do produto impõe que seus parâmetros de processo sejam, neste caso, controlados com muito maior rigor do que anteriormente, uma vez que é necessário aplicar os passes de laminação de forma coordenada com a evolução de temperatura do laminado. Ou seja, tem-se neste caso um tratamento

termomecânico, mais conhecido como laminação controlada. Aqui o processo ocorre basicamente em duas etapas: esboçamento a alta temperatura (com recristalização plena da austenita entre os passes de laminação) e acabamento a baixa temperatura (com nenhuma recristalização da austenita entre passes), conforme mostrado na figura 4 (pág. 54). Geralmente há uma etapa intermediária de espera, pois não pode haver aplicação de deformação na faixa de temperaturas em que a recristalização entre passes da austenita torna-se incipiente. Se isso ocorrer, a microestrutura do

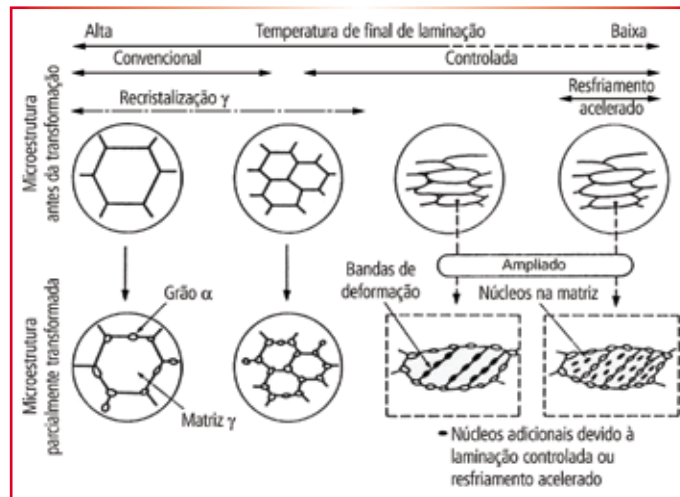


Fig. 3 – Evolução do tamanho de grão da austenita e da nucleação posterior de ferrita a partir dela de acordo com a evolução de temperatura aplicada durante o processo⁽⁹⁾

CorDob
Máquinas Hidráulicas e Excêntricas
www.cordobmaq.com.br

Guilhotina hidráulica
LINHA GHP 2.5/3.5/5.0/6.5



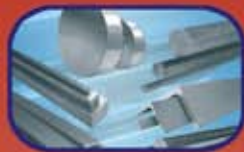
**EQUIPAMENTO LANÇADO NA FEIRA
CORTE & CONFORMAÇÃO DE 2009.**



**VIRADEIRA HIDRÁULICA DEDO EXTENSOR COM 24 FERRAMENTAS NA
LINHA DE 2 METROS E 36 FERRAMENTAS NA LINHA DE 3 METROS.**

**COR DOB IND. E COM. DE MÁQUINAS LTDA - AV. JACOB JORGE ABI RACHED, Nº 291 - III DISTRITO INDUSTRIAL
ARARAQUARA - SP - FONE/FAX: (16) 3324 - 3326 / 3324 - 2908**





Divisão FEITAL

- Placas, bobinas, chapas e tiras;
- Barros: sextavadas, redondas, quadradas, chatas e cantoneiras.

Tel.: (11) 4343-1800
Fax: (11) 4343-4043
e-mail: feital@feital.com.br

Divisão TUBRA

- Tubos com e sem costura: redondo, quadrado e retangular

Tel.: (11) 4343-1900
Fax: (11) 4343-4043
e-mail: tubra@feital.com.br

Divisão FITTINOX

- Conexão em aço: carbono, ligado e inox
- Válvulas Velan

Tel.: (11) 4343-1950
Fax: (11) 4343-4043
e-mail: fittinox@feital.com.br

MATRIZ

INOX-TECH LTDA.
Av. Moinho Fabril, 1296
S. Bernardo do Campo - SP
PABX: (11) 4343-1999

FILIAIS:

Rio de Janeiro
Tel.: (21) 2270-9922
feital.rio@feital.com.br

Porto Alegre
Tel.: (51) 3347-1047
feital.poa@feital.com.br

Belo Horizonte
Tel.: (31) 3462-8166
feital.bh@feital.com.br

Recife
Tel.: (81) 3472-0000
feital.rec@feital.com.br

Salvador
Tel.: (71) 3671-3303
feital.ba@feital.com.br



Materiais

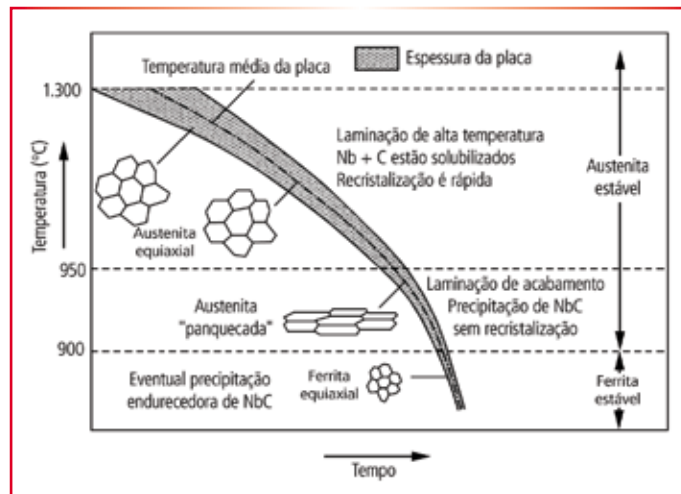


Fig. 4 – Fenômenos metalúrgicos que ocorrem durante a laminação controlada⁽¹⁴⁾

produto final torna-se heterogênea, o que pode degradar a tenacidade do material⁽¹⁴⁾. Esta rota de fabricação foi viabilizada industrialmente a partir da década de 1970, conforme se pode observar na figura 2, possibilitando a obtenção de chapas com maior resistência mecânica, conforme a norma API 5L-X70, a partir de aços microligados ao NbV contendo 0,12% de C⁽⁵⁾.

A contínua busca por aços com níveis mais elevados de resistência mecânica e tenacidade, e com teores ainda menores de carbono e elementos de liga, levou a pesquisas sobre novas abordagens para refinar ainda mais o tamanho de grão do material. Uma das maneiras de alcançar esse objetivo consiste em promover a transformação da austenita sob menores temperaturas, com as quais a nucleação dos novos grãos de ferrita é ainda mais acelerada. Isso pode ser conseguido resfriando-se a chapa com jatos de água logo após sua laminação a quente. Voltando mais uma vez à figura 3, pode-se observar que a laminação controlada seguida de resfriamento acelerado (último exemplo) faz com que a nucleação da ferrita também passe a ocorrer em toda a área dos grãos austeníticos

prévios, e não somente em suas bandas de deformação e contornos de grão, como é o caso da laminação controlada convencional. Isso leva a microestruturas ainda mais refinadas, com maior resistência mecânica e tenacidade⁽⁹⁾.

Os fundamentos metalúrgicos do refino microestrutural promovido pelo resfriamento acelerado – ou seja, pelo uso de água como elemento de liga – já eram conhecidos de longa data, mas os problemas tecnológicos decorrentes de sua aplicação, como heterogeneidade de propriedades mecânicas e planicidade nas chapas grossas obtidas, retardou bastante sua implantação. Ela só foi viabilizada após o desenvolvimento de técnicas sofisticadas para controle das taxas de resfriamento efetivamente aplicadas sob condições industriais, o que ocorreu no início da década de 1980⁽²⁾. Esse novo processo viabilizou a fabricação de chapas grossas para tubos conforme a norma API 5L X80, usando aços com teores de C ainda menores, da ordem de 0,08%, no início da década de 1980, conforme foi mostrado na figura 1.

Essa mesma figura também mostra que a contínua evolução dos projetos de liga ocorrida desde então

Materiais

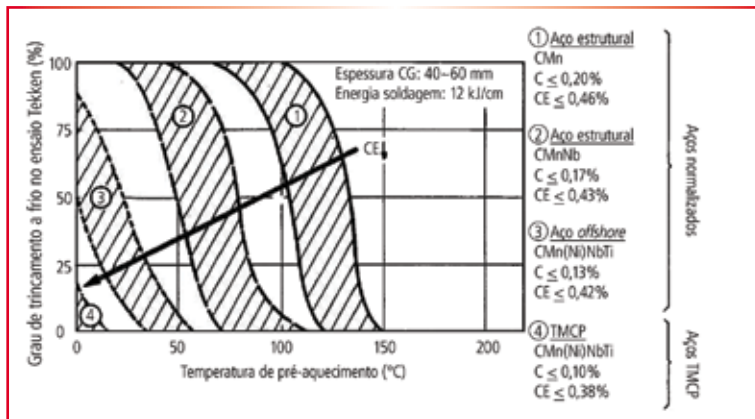


Fig. 5 – Efeito da redução do teor de C e do valor de carbono equivalente (CE) em decorrência da incorporação de elementos de microliga e da aplicação de laminação controlada (TMCP) sobre a temperatura de pré-aquecimento recomendada para a soldagem de aços com limite de escoamento igual ou superior a 355 MPa⁽⁶⁾

viabilizou o surgimento do grau X100 em meados da década de 1990. O aperfeiçoamento dos sistemas de resfriamento acelerado, que elevou as taxas de resfriamento possíveis e viabilizou a execução de têmpera direta após a laminação, permitiu que o grau X120 fosse alcançado no início do novo milênio⁽⁵⁾.

O encruamento da austenita na fase de acabamento da laminação controlada faz com que as cargas de laminação no final do processo atinjam valores muito altos. Isso inviabiliza a aplicação desse processo em linhas mais antigas, que não foram originalmente concebidas para a aplicação

desse novo tratamento termomecânico. Uma das soluções para este inconveniente é a adoção de aços com teores relativamente altos de Nb, entre 0,06 e 0,10%, os quais permitem elevar as temperaturas da laminação controlada, reduzindo as cargas de laminação. Esse tipo de laminação é conhecido como processamento sob alta temperatura (*High Temperature Processing*, HTP)⁽⁸⁾. Outra possibilidade é a chamada laminação controlada com recristalização (*Recrystallization Controlled Rolling*, RCR), na qual são usados aços ao V-Ti-N. Neste caso não é usado Nb, pois não se deseja encruar a austenita durante a lamina-

ção – muito pelo contrário. A intenção aqui é promover sucessivas recristalizações estáticas plenas da austenita entre os passes de laminação para refinar sua microestrutura⁽¹⁰⁾. O refino do tamanho de grão alcançado por essa abordagem metalúrgica não é tão intenso quanto o da laminação controlada convencional; por esse motivo, parte da resistência mecânica do produto tem de ser conseguida por meio de endurecimento por precipitação de VN durante o resfriamento do laminado. Deve-se observar que o menor grau de refino de grão e o endurecimento por precipitação tendem a reduzir a tenacidade do produto. De toda forma, tanto o processo HTP como o RCR requerem a aplicação de resfriamento acelerado para que sejam produzidas chapas grossas com maiores níveis de resistência mecânica por meio do refino suplementar da microestrutura.

FC MIRASSOL®

Máquinas para Corte e Conformação de Aço e Metais em Bobinas



Soluções em ferramentais cilíndricos e linhas de perfilamento para indústria civil, automobilística, implementos agrícolas/rodoviários e metalurgia

Fone: (17) 3242-1690 Fax: (17) 3253-4597

ETAGE ISO 9001 : 2000 **ANDS** + **COPRA®** Copra RollForming

Projeto e Fabricação de Ferramentais para Tubos e Perfis

www.fcmirassol.com.br

Chapas grossas de aços microligados destinados a aplicações de grande responsabilidade, como tubos para transmissão de gás e derivados de petróleo, precisam apresentar valores extremos de resistência mecânica com boa tenacidade. Pode-se citar como exemplo tubos conformados pelo processo UOE atendendo à norma API 5L-X80, que devem apresentar limite de escoamento entre 550 e 690 MPa, limite de resistência entre 620 e 830 MPa, razão elástica máxima igual a 0,93 e alongamento total mínimo de 20%. Além disso, esses tubos devem atender a requisitos de tenacidade, os quais geralmente são definidos conforme as especificações do projeto do duto. A razão elástica também é uma propriedade muito importante para este tipo de produto, uma vez que valores excessivos desse

parâmetro fazem com que a chapa sob conformação apresente o chamado efeito-mola (*spring back*). Ou seja, ela “salta” da matriz após a conformação, como que se recusando a ser conformada. O tubo que está sendo processado apresenta formato ovalado, exigindo um maior esforço para ser adequadamente conformado.

Aços microligados com microestrutura ferrítica-perlítica não conseguem atender aos requisitos de propriedades mecânicas para graus API 5L iguais ou superiores ao X80, mesmo que apresentem tamanho de grão intensamente refinado e grau apreciável de endurecimento por precipitação. Além disso, seu valor de razão elástica sob esses elevados níveis de resistência mecânica torna-se excessivamente alto, superior a 0,93, o que não só dificulta a conformação do tubo como

também deixa preocupados os projetistas das linhas de transmissão de gás e petróleo, em razão do pequeno intervalo existente entre as tensões necessárias para o início da deformação permanente e a ruptura do material. A saída para esse impasse está na adoção de frações cada vez maiores de constituintes aciculares na microestrutura, promovendo endurecimento por discordâncias e por segunda fase^(4,3). Por exemplo, entre as várias abordagens microestruturais adotadas para aços microligados com limite de resistência entre 600 e 800 MPa e baixa razão elástica, pode-se citar mistura de ferrita poligonal, ferrita acicular, bainita e constituinte MA (martensita-austenita)^(15,16); ferrita acicular mais precipitação de cobre (HSLA-80)^(1,17); e bainita com teor extra-baixo de carbono (ULCB, *Ultra-Low Carbon*

A melhor maneira de vencer os obstáculos
do presente é se preparar para o futuro



011.9134.8591

• www.faro.com

FARO

© 2009 FARO Technologies, Inc. All Rights Reserved

Materiais

Bainite^(1,11,12). As composições químicas típicas desses materiais podem ser vistas na tabela 1.

O desenvolvimento de novos graus ainda mais resistentes, equivalentes às futuras classes API 5L X100 e X120 – que apresentam limite de escoamento de 690 e 830 MPa⁽⁴⁾, respectivamente – vem ocorrendo já há muito tempo. Em 2005, a Nippon Steel Corporation comunicou o início da comercialização do grau API 5L X120 para a execução dos primeiros testes sob condições práticas. Note-se, contudo, que ocorre considerável demora para que os avanços metalúrgicos se reflitam na prática comercial consagrada. Os tubos API 5L grau X80 somente começaram a ser usados de forma disseminada a partir de meados da década de 1990. Uma vez que dutos para transporte de gás e derivados de petróleo constituem uma aplicação de enorme responsabilidade, seus projetistas são extremamente cautelosos acerca do material a ser adotado, demandando experiências e testes preliminares exaustivos até que ele passe a ser aceito sem reservas.

Soldabilidade

A soldabilidade dos tubos para condução de derivados de petróleo é uma característica vital para este tipo de produto, já que a soldagem é usada intensivamente em sua fabricação e na união entre os tubos em campo. Logo, todo esforço é necessário para facilitar esse processo, reduzindo seus altos custos, a necessidade de reparos e a ocorrência de defeitos. Os recentes aços estruturais processados termomecanicamente e microligados ao

Tab. 1 – Composições químicas médias típicas das várias abordagens de projeto de liga usadas na fabricação de chapas grossas com limite de resistência entre 600 e 800 MPa^(1, 16)

Aço	C	Mn	Si	Al	Nb	Ti	V	Cr	Mo	Ni	B	N
HY80	0,15	0,26	0,23	0,050	–	–	–	1,55	0,38	2,65	–	–
X80	0,06	1,68	–	0,025	0,060	0,018	0,018	0,14	0,15	–	–	0,0090
HSLA-80	0,04	0,65	0,32	0,013	0,077	–	–	0,77	0,23	0,87	–	0,0030
ULCB	0,03	1,93	0,29	0,015	0,062	0,029	–	–	0,35	0,39	0,0016	0,0030

Nb, V e/ou Ti com teor reduzido de elementos de liga, particularmente C, apresentam soldabilidade superior em relação aos aços convencionais de baixa e média liga, além de maior resistência mecânica e tenacidade. A busca por uniões soldadas mais tenazes também levou à redução dos teores de S (abaixo de 0,001%) e de N (abaixo de 40 ppm) do aço, bem como a microadições de Ti (para refinar o tamanho de grão) e/ou Ca (para globularizar as inclusões de sulfeto). As providências tomadas no sentido de reduzir e globularizar as inclusões de sulfetos praticamente eliminaram a ocorrência de rompimento lamelar (*lamellar tearing*) nas estruturas metálicas soldadas⁽⁶⁾.

Essas medidas para melhoria da soldabilidade tornaram a execução deste processo de união mais simples,

confiável e econômica, um fator de enorme importância quando se sabe que os custos associados à soldagem de uma estrutura podem ser superiores à metade do valor total do componente⁽³⁾. Por exemplo, um aço estrutural com melhor soldabilidade permite suprimir o reaquecimento do local da futura junta durante a soldagem em campo, o que significa uma redução de custos da ordem de 70 dólares por tonelada de aço.

O conceito de soldabilidade de um aço é um tanto quanto complexo, uma vez que ele também depende das tensões que atuarão sobre a construção metálica, das condições ambientais que influenciarão a quantidade de hidrogênio absorvido pelo metal fundido durante a soldagem, do processo específico de soldagem aplicado, dos consumíveis adotados e,

não menos importante, da composição química do metal-base.

Um dos aspectos mais críticos na soldabilidade de um aço é sua suscetibilidade ao trincamento a frio na zona termicamente afetada (ZTA), causada pelo efeito combinado das tensões internas do cordão e da presença de hidrogênio em uma região com baixa ductilidade devido à formação de constituintes duros na microestrutura. A presença do H decorre dos aspectos operacionais da soldagem,

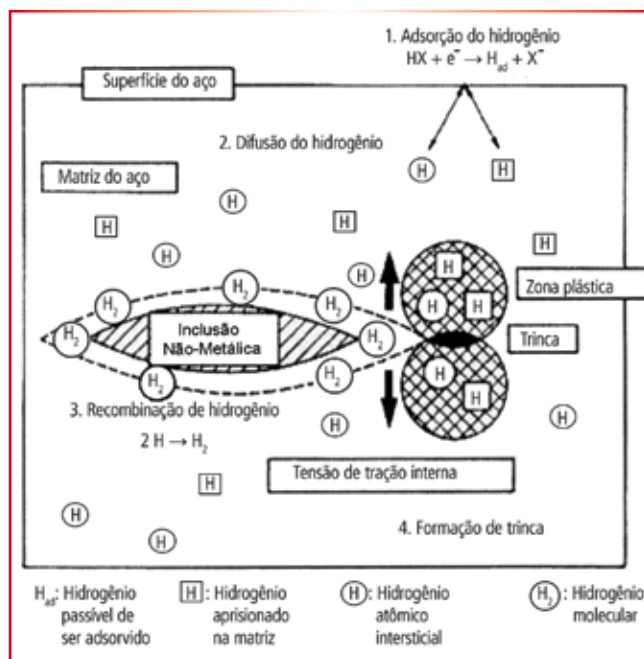


Fig. 6 – Esquema da formação da trincas induzidas pela presença de hidrogênio (HIC)⁽⁷⁾

Materiais

tais como o tipo de eletrodo usado e seu processo de secagem. Já a composição química do aço possui grande efeito na tendência à formação de constituintes duros na microestrutura. Essa tendência pode ser estimada numericamente por meio de um consagrado parâmetro conhecido como Carbono Equivalente (C_{eq}), definido inicialmente na década de 1940. Desde então foram desenvolvidas várias fórmulas para o cálculo desse parâmetro de acordo com aplicações específicas. A seguir, estão listadas algumas fórmulas usadas no cálculo de C_{eq} ⁽¹⁸⁾. A equação original, proposta em 1940 por Dearden & O'Neill, é a seguinte:

$$C_{EQ_Dearden} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Mo}{4} + \frac{Cr+V}{5} + \frac{Cu}{13} + \frac{Ni}{15} + \frac{P}{2} \quad (1)$$

As equações a seguir são mais adequadas para os aços mais modernos, com teor de C inferior a 0,16%, inclusive microligados, como a de Ito & Bessio:

$$P_{cm} = C + \frac{Si}{30} + \frac{Mn+Cu+Cr}{20} + \frac{Ni}{60} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{10} + 5B \quad (2)$$

Shinozaki:

$$C_{EQ_FBW} = C + \frac{Mn}{5} + \frac{Si}{15} + \frac{Cr}{9} + 7Nb(1 - 10C) + \frac{V(50C - 1)}{3} + 1,3Ti(1 - 5C) + \frac{Mo(1 - 6C)}{2} + 29B(11C - 1) \quad (3)$$

Graville:

$$C_{EQ_HSLA} = C + \frac{Mn}{16} - \frac{Ni}{50} + \frac{Cr}{23} + \frac{Mo}{7} + \frac{Nb}{5} + \frac{V}{9} \quad (4)$$

Yurioka:

$$C_{EN} = C + A(C) \left(\frac{Mn}{6} + \frac{Si}{24} + \frac{Cr+Mo+V}{5} + \frac{Cu}{15} + \frac{Ni}{20} + \frac{Nb}{5} + 5B \right)$$

$$A(C) = 0,75 + 0,25 \tanh [20(C-0,12)] \quad (5)$$

Todas as fórmulas listadas acima foram determinadas por correlação estatística a partir de resultados de trincamento a frio e da máxima dureza prevista. O C é o elemento mais significativo, sendo o responsável pela dureza da microestrutura martensítica e, em menor grau, também pela dureza na microestrutura bainítica.

A figura 5 (pág. 56) mostra como a redução do teor de C e do valor do carbono equivalente (C_{eq}), a incorporação de elementos de microliga e a aplicação de tratamento termomecânico contribuíram para reduzir tanto a temperatura de pré-aquecimento necessária para realizar a soldagem de estruturas de aço quanto a incidência de trincamento do cordão de solda ⁽⁶⁾.

Resistência à corrosão

A resistência à corrosão é outro aspecto muito importante para o material a ser usado na fabricação

Mais força para seus lucros

Guilhotinas Hidráulicas e Mecânicas

Conheça a linha de produtos IMAG

Batente traseiro motorizado

Grade opcional

Prensas Viradeiras
Hidráulicas
e Mecânicas

Nossa força, seu lucro.

Limeira - (19) 2113.2811-3451.2811
São Paulo - (11) 3271-5784
www.imag.com.br | vendas@imag.com.br

Fabricação
100% Nacional

Calandras
Pirâmide

dos tubos. Em muitos casos é necessária a proteção contra oxidação na superfície exterior, seja por meio da aplicação de um revestimento ou de proteção catódica. Além disso, as jazidas de petróleo exploradas a partir da década de 1950 apresentam altos teores de H_2S , condição que está se tornando cada vez mais frequente e que piora à medida que o campo petrolífero envelhece. Esse gás forma uma solução aquosa com o CO_2 , o chamado gás azedo (*sour gas*), que é extremamente corrosiva. A ação dessa substância faz com que a superfície interna do tubo trinque mesmo sem estar submetida a tensões externas. Essa é a chamada fragilização induzida por hidrogênio (HIC, *Hydrogen Induced Cracking*), cujo esquema de atuação está mos-



Fig. 7 – Relação entre dureza na banda de segregação central da chapa grossa e o trincamento decorrente da fragilização induzida por hidrogênio⁽⁷⁾

trado na figura 6 (pág. 58): o ataque do ácido sulfídrico na superfície do tubo gera hidrogênio atômico, que é adsorvido pelo aço e se difunde até pontos específicos da microestrutura, geralmente pontas de inclusões alongadas, tais como sulfetos. Nesses pontos os átomos de hidrogênio se recombinam, formando hidrogênio molecular, que não mais se difunde pelo aço. Dessa forma ocorre acúmulo do gás nesses pontos, e quando

sua pressão supera o limite de resistência do aço ocorre a formação de trincas que enfraquecem a parede do tubo e podem provocar seu rompimento⁽⁷⁾.

A fragilização induzida pelo hidrogênio pode ser combatida pela purificação prévia ou pela adição de inibidores ao óleo ou gás a serem transportados, mas estas soluções aumentam o custo operacional do duto. O ideal é usar tubos de aço capazes de suportar tais condições. Entre as medidas necessárias para tal está a redução da presença de sulfetos na microestrutura do material, bem como a globulização das inclusões remanescentes por meio de técnicas de metalurgia de panela. A redução da segregação central formada durante o lingotamento contínuo das placas é fundamental, conforme mostrado na



L1Xe com fonte de fibra óptica: reduz o custo ao mínimo, atinge o máximo de performance

Alta eficiência da fonte óptica minimiza custos. Feixe extremamente de alta densidade garante maior velocidade de corte e piercing. A típica onda laser utilizando a fibra óptica, amplia a gama de materiais que podem ser processados. A utilização de uma fibra óptica para transportar o feixe possibilita um layout compacto da máquina laser. A simples construção da fonte óptica e da ausência de espelhos para transmitir o feixe, reduz os custos de manutenção. O laser L1Xe: A Salvagnini trouxe o laser até aqui. Você acredita que possa receber mais do que isso?



salvagnini

salvagninigroup.com

CLOOS & DEUMA
DO BRASIL LTDA

Líder Mundial de Tecnologia em Soldagem

- Soluções completas para automação em linhas de soldagem
- Equipamentos de solda MIG, MAG, TIG e Plasma
 - Viradores
- Manipuladores
- Robôs e dispositivos especiais
- Elaboração e execução de projetos especiais



comercial@deuma.com.br www.deuma.com.br
Tel.: (47) 3371-9046

Materiais

Fig. 8 – Conforme mostrado neste diagrama ferro-carbono, os aços com teores de carbono que propiciam o aparecimento de ferrita delta durante a solidificação a partir do aço líquido apresentam maior grau de homogeneização da segregação durante a solidificação, o que contribui para a obtenção de chapas grossas com maior grau de resistência à fragilização induzida pelo hidrogênio⁽⁷⁾

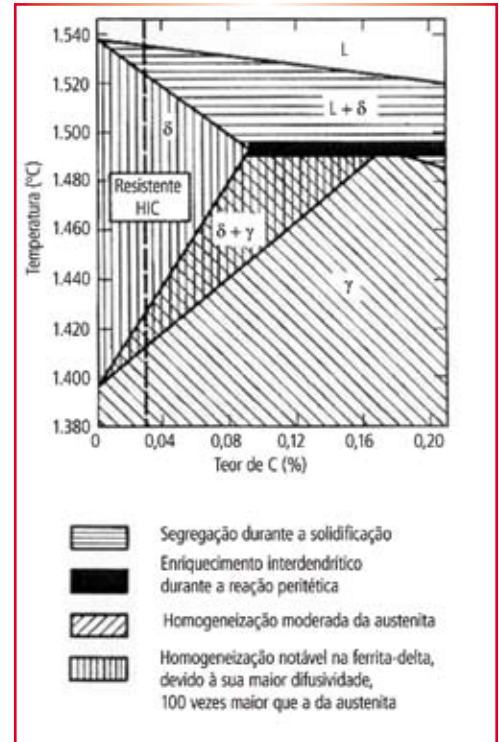


figura 7 (pág. 61): quanto maior for a dureza da região segregada, pior será o desempenho do material quanto à fragilização induzida pelo hidrogênio.

Sob esse aspecto a redução dos teores de C, Mn e P da liga é bem-vinda, bem como o uso de solidificação peritética para aproveitar a homogeneização mais rápida que ocorre enquanto o veio se encontra na faixa de temperaturas associada à existência de ferrita delta, conforme mostrado na figura 8. Outra contramedida bastante eficaz consiste na produção das placas por máquinas de lingotamento contínuo dotadas de rolos segmentados com curtas distâncias entre si e de recursos de *soft reduction*, com aplicação de redução de 1 mm por metro no final da solidificação. A aplicação de resfriamento acelerado após a laminação a quente é praticamente obrigatória para a produção de chapas grossas para tubos resistentes ao HIC, uma vez que o refino intensificado de grão que ele promove permite reduzir os teores de elementos de liga do aço, particularmente de carbono e manganês, minimizando também a dureza da região segregada. Além disso, a maior velocidade de resfriamento após a laminação também tende a restringir a segregação propriamente dita de carbono e fósforo durante a transformação da austenita⁽⁷⁾.

Conclusão

Chapas grossas destinadas à fabricação de tubos de grande diâmetro para condução de produtos petrolíferos constituem uma das classes mais sofisticadas de produ-

Corte a Laser

Qualidade · Preços Competitivos · Prazo de Entrega

Capacidade de corte

- aço carbono - 12 mm
- aço inox - 3 mm
- alumínio - 6 mm

Tel.: 11 4229.9344
comercial@racz.com.br

RACZ
Desde 1956
www.racz.com.br

tos planos de aço, em razão dos requisitos que elas devem atender em termos de resistência mecânica, tenacidade, soldabilidade e resistência à corrosão, entre outros fatores. Esses requisitos estão se tornando cada vez mais severos, uma vez que a demanda energética mundial requer a exploração de jazidas petrolíferas em locais cada vez mais inóspitos e sob condições operacionais crescentemente severas. Esse desafio contínuo vem sendo vencido pela siderurgia há décadas, por meio da aplicação de conceitos metalúrgicos sofisticados à concepção, produção e aplicação desses materiais, bem como do desenvolvimento da tecnologia associada a seus processos de fabricação e aplicação. Tudo isso, obviamente, sem perder de vista os aspectos econômicos envolvidos. E, no caso específico do Brasil, a recente descoberta das reservas petrolíferas do pré-sal acabou de demonstrar que esse esforço técnico e comercial está muito longe de terminar.

Referências

- 1) GORNI, A.A. *Desenvolvimento de Aços Alternativos aos Materiais Temperados e Revenidos com Limite de Resistência entre 600 e 800 MPa*. Tese de Doutorado, Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas, 2001, 120 p.
- 2) GORNI, A.A. e SILVEIRA, J.H.D. Resfriamento Acelerado de Chapas Grossas: O Futuro Chegou. *Metalurgia e Materiais*, 62:654, Março 2006, 103-105.
- 3) GORNI, A.A. e outros. Um Panorama do Desenvolvimento Recente de Chapas Grossas e suas Aplicações. *Corte e Conformação de Metais*, 2:19, Novembro 2006, 78-93.
- 4) GRAY, J.M. Recent Developments in Plate and Linepipe Steels. In: Sino-Brazilian Symposium: Niobium in Steels and Alloys. *Proceedings*. CBMM, Beijing, 1999, 15-62.
- 5) GRIMPE, F. e outros. Development, Production and Application of Heavy Plates in Grades up to X120. In: 1st International Conference on Super-High Strength Steels. *Proceedings*. Associazione Italiana di Metalurgia/Centro Sperimentali Materiali, Rome, November 2004, 10 p.
- 6) HULKA, K. e HESTERKAMP, F. Weldability Considerations in the Development of Structural Steels. In: Third International Conference on HSLA Steels. *Proceedings*. The Chinese Society for Metals, Beijing, October 1995, 543-551.
- 7) HULKA, K. Sour Gas Resistant Steel. *Niobium Information 18/01*, Companhia Brasileira de Metalurgia e Mineração, 2001, 8 p.
- 8) HULKA, K. e outros. Experience with Low Carbon HSLA Steel Containing 0,06 to 0,10 Percent Niobium. *Niobium Technical Report*, nº 1/04, August 2004, 27 p.
- 9) KOZASU, I. Processing – Thermomechanical Controlled Processing. In: *Materials Science and Technology – A Comprehensive Treatment: Constitution and Properties of Steels*, vol. 7, VCH, Weinheim, 1992, 186-217.
- 10) LAGNEBORG, R. e outros. The Role of Vanadium in Microalloyed Steels. *Scandinavian Journal of Metallurgy*, 28:5, October 1999, 186-241.
- 11) MASSIP, A. & MEYER, L. Grobblech und Warmband aus bainitischen Stählen mit sehr niedrigem Kohlenstoffgehalt. *Stahl und Eisen*, 98:19, 21 September 1978, 989-996.
- 12) NAKASUGI, H. e outros. Development of Controlled Rolled Ultra Low Carbon Bainitic Steel for Large Diameter Linepipe. In: *Alloys for the Eighties*. *Proceedings*. Climax Molybdenum Company, Ann Arbor, June 1980, 213-224.
- 13) NARA, Y. Production of Line Pipe in Japan. *Metals Technology*, vol. 10, nº 8, August 1983, 322-329.
- 14) PAXTON, H.W. The Metallurgy of Steels for Large Diameter Linepipe. In: *Alloys for the Eighties*. *Proceedings*. Climax Molybdenum Co., Ann Arbor, June 1980, 185-211.
- 15) RAMIREZ, M.G. e outros. Caracterização Microestrutural de um Aço API 5L-X80 Através de Microdureza e Microscopia Ótica e Eletrônica. In: 62^o Congresso Anual da Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais. *Anais*. Vitória, Julho 2007, 3633-3642.
- 16) ROZA, J.S. e outros. Tubos API 5L X80 Processados por ERW. In: 3rd Conference on Uses of Steel. *Proceedings*. Instituto Argentino de Siderurgia, San Nicolás, Novembro 2006, 113-122.
- 17) WILSON, A.D. e outros. Properties and Microstructures of Copper Precipitation Aged Plate Steels. In: *Microalloying '88*. *Proceedings*. American Society for Metals, Chicago, 1988, 259-275.
- 18) YURIOKA, N. Physical Metallurgy of Steel Weldability. *ISIJ International*, 41:6, June 2001, 566-571.



Tecnologia SICK.

Simplemente Fundamental.

safety PLUS

A tecnologia de segurança inovadora e comprovada da SICK é capaz de controlar, gerenciar e garantir a segurança em pontos de acesso e áreas de risco.

Para cada aplicação é necessária uma solução. A SICK sabe disso e disponibiliza para o mercado uma enorme variedade de cortinas de luz, relés de segurança e sensores indutivos (categoria 4 -NBR14153) que são responsáveis pela garantia do seu maior patrimônio, o seu funcionário.

Quando pensar em segurança, conte sempre com a SICK.

SICK
Inteligência em Sensores.

SICK Solução em Sensores | 11 3215.4949 | www.sick.com.br