

REVISÃO DAS PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS QUE DEFINEM AS APLICAÇÕES DE AÇOS PLANOS NÃO LIGADOS¹

Herbert Christian Borges²
Alberto de Andrade Fernandes³
Adriana Kanashiro da Costa⁴
Willy Ank de Moraes⁵

Resumo

Como qualquer outro material plano utilizado em aplicações de engenharia, o aço plano tem uma série de características que podem ser organizadas em grupos de requisitos: composição química, propriedades físicas e mecânicas, geometria (forma) e superfície. Combinações entre diferentes características, dentre estes requisitos técnicos, definem a adequação do produto para uma ou mais aplicações de engenharia específicas. Este trabalho tem como objetivo indicar as principais características que definem as aplicações de aços planos e sua relação com exigências explícitas ou não explícitas nas normas técnicas aplicadas e as expectativas no uso desses aços.

Palavras-chave: Aços planos; Resistência mecânica; Seleção de materiais; Aplicações de aços.

REVIEW OF MAIN CHARACTERISTICS THAT DEFINES THE APPLICATIONS OF FLAT STEELS

Abstract

As any other flat material used in engineering applications, flat steel has a number of characteristics that can be arranged in groups of requirements: chemical composition, physical and mechanical properties, geometrics (form) and superficial. Combinations between different characteristics, among these technical requirements, define the adequacy of the product to one or more specific engineering applications. This work has as objective to indicate the main characteristics that define the applications of flat steels and their relationship with explicit or not explicit requirements in the technical standards applied and the expectations on these steels usage.

Key words: Flat steels; Strength; Materials selection; Steel applications.

¹ Contribuição técnica ao 67^o Congresso ABM - Internacional, 31 de julho a 3 de agosto de 2012, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

² Mestrando, Eng^o. Metalurgista. Eng^o. de Produto Sênior, Usiminas, Cubatão, Brasil; herbert.borges@usiminas.com.

³ Doutor, Mestre, CQE/ASQ, Eng^o Metalúrgico. Engenheiro de Produto Pleno, Usiminas, Cubatão, Brasil; alberto.fernandes@usiminas.com.

⁴ Eng^a. de Materiais. Eng^a. de Produto, Usiminas, Cubatão, Brasil; adriana.costa@usiminas.com.

⁵ Doutorando, Mestre, Eng^o Metalurgista, Téc. em Metalurgia. Especialista em Produto, Usiminas, Cubatão; Prof. Faculdade de Engenharia da Unisantia; Consultor Técnico da Inspebras; Diretor da divisão técnica "Aplicações de Materiais" da ABM, Brasil; willy.morais@usiminas.com.

1 INTRODUÇÃO

O ferro puro não apresenta características que atendam à maior parte das aplicações de engenharia.⁽¹⁾ O aço, no entanto, é a forma mais prática e econômica de se utilizar o ferro de maneira a se obter propriedades e desempenho adequados para uma larga faixa de aplicações.⁽²⁾ Isso se dá graças à capacidade de manipulação das características estruturais do aço,⁽³⁾ através do processamento do material e seu beneficiamento. Assim é possível obter combinações de composição química e estruturais mais favoráveis para uma determinada aplicação,⁽⁴⁾ que permite uma amplitude de aplicações sem igual deste material. Por isso, o aço tem um enorme grau de importância para a sociedade humana graças às suas inúmeras aplicações.⁽²⁻⁴⁾

A aplicação de um material é definida em função do atendimento deste produto às características necessárias dentro de um leque de aplicações de engenharia. No caso do aço, temos como exemplo de aplicações: estrutural, estampagem, vasos de pressão, construção mecânica entre outras. As características que norteiam a aplicabilidade dos aços planos podem ser separadas em 5 grupos (Quadro 1). A conciliação das necessidades em cada grupo de características leva à escolha do aço mais apropriado à aplicação em análise.

Quadro 1. Grupos de características pertinentes aos aços planos

Característica	Descrição
Propriedades físicas	Grupo de características mais diretamente associadas à estrutura cristalina presente e ao elemento químico dominante. São empregadas como forma de particularizar as categorias de materiais e nos projetos mais elaborados. Exemplos: densidade (d), condutividade (ρ), dilatação (α), módulo de rigidez (E), coeficiente de Poisson (ν) etc.
Composição química	A composição química além de ser fundamental na definição das características do aço, está diretamente vinculada à capacidade de beneficiamento do aço, à sua soldabilidade e ao seu emprego em meios agressivos. Exemplos: CE (carbono equivalente), P_{cm} (parâmetro de medição de trincamento) etc.
Propriedades mecânicas	As propriedades mecânicas são um tipo particular de características físicas dos materiais, que estão diretamente associadas ao seu uso estrutural/mecânico e que são mais facilmente manipuláveis processualmente. Exemplo: limite de escoamento (S_{LE}), limite de resistência (S_{LR}) etc.
Forma	Todo material deve possuir uma geometria mais ou menos bem definida para ser empregado. No caso dos aços planos, a principal característica é a planicidade das chapas ou bobinas. Exemplos: flecha, coroa, câmber (desvio de retilinearidade) etc.
Superfície	A superfície de materiais planos é a característica principal e mais fácil de perceber. Não é preciso ter experiência nem possuir um equipamento sofisticado para verificar se uma superfície é adequada ou não, porém a quantificação e obtenção de uma superfície que garanta a aplicação final é uma tarefa relativamente complexa. Exemplos: quantidade de óxidos, profundidade de riscos, presença de manchas, rugosidade etc.

Neste artigo serão descritas algumas particularidades dos cinco grupos de categorias e contextualizar valores característicos ou recomendáveis para uma correta aplicação. Com isso, oferece-se um guia das principais características dos aços planos não ligados para nortear a seleção e aplicação destes materiais.

2 CARACTERÍSTICAS DOS AÇOS

2.1 Propriedades Físicas

Valores de propriedades físicas dos aços são empregados em projetos mais detalhados, nos quais é necessário um modelamento mais preciso e abrangente do comportamento do material.⁽⁵⁾ A Tabela 1 ilustra alguns exemplos destas propriedades, que são representativos das principais propriedades físicas dos aços e foram obtidas de aços com composições químicas bem distintas e variadas condições de tratamento térmico.⁽⁵⁾ O coeficiente de Poisson (ν), os módulos de rigidez (E) e cisalhamento (G) foram considerados dentro das propriedades físicas, por possuírem abrangência similar.

Tabela 1. Valores típicos de propriedades físicas de aços mais requisitadas em aços⁽⁵⁾

Norma e Série		Coeficiente de dilatação térmica linear, α ($\mu\text{m}/\text{m}^\circ\text{C}$)	Condutividade térmica, k (W/m·K)	Densidade d	Resistividade elétrica, ρ ($\mu\Omega\cdot\text{cm}$)	Módulo de rigidez, E (GPa)	Coeficiente de Poisson, ν	Módulo de cisalhamento, G (GPa)
SAE J403 ⁽⁶⁾	1X XX	11,0 a 16,6	27,1 a 65,2	7,84 a 7,87	14,2 a 18,0	200 a 205	0,29	80
SAE J404 ⁽⁷⁾	4X XX	10,4 a 14,6	42,6 a 48,1	7,75 a 7,85	20,0 a 26,3	196 a 213	0,27 a 0,30	75,0 a 82,0
	5X XX	11,9 a 14,9	44,6 a 48,6	7,81 a 7,85	21,0 a 22,8	205 a 210	0,29 a 0,30	80
	8X XX	11,2 a 14,8	37,6 a 51,9	7,75 a 7,85	17,4 a 30,0	187 a 209	0,27 a 0,30	72,0 a 82,0
	9X XX	11,5 a 14,6	46,8 a 51,9	7,75 a 7,87	17,4	200 a 209	0,27 a 0,30	80,0 a 82,0
Alto Carbono		10,4 a 15,1	21,9 a 51,9	7,75 a 7,89	16,2 a 26,3	187 a 213	0,28 a 0,30	72,0 a 82,0

SAE J403: aços carbono. SAE J404: aços ligados. Alto Carbono: aços na faixa de 0,80 a 1,30%C

Como regra geral, as propriedades físicas dos aços são relativamente constantes dentro de uma categoria de aço. Os valores das propriedades físicas apresentam menor sensibilidade que as propriedades mecânicas em relação às variáveis de processamento empregáveis para produzir os aços. É possível fazer uma rápida comparação entre estes dois grupos de propriedades, de forma a demonstrar a diferença de variabilidade entre estes. A Tabela 2 apresenta esta comparação para aços carbono tipo SAE J403 10XX.⁽⁶⁾

Tabela 2. Comparação entre valores típicos de propriedades físicas e mecânicas⁽⁵⁾

Aço SAE	Propriedades físicas			Propriedades mecânicas		
	densidade	módulo de rigidez	resistividade elétrica	dureza Brinell	Alongamento	limite de resistência (SLR)
J403 10XX	$\Delta = 0,38\%$ (de 7,84 a 7,87);	$\Delta = 2,5\%$ (de 200 a 205Ga)	$\Delta = 21\%$ (de 14,2 $\mu\Omega\cdot\text{cm}$ a 18 $\mu\Omega\cdot\text{cm}$)	$\Delta = 322\%$ (de 86 HB a 363 HB)	$\Delta = 433\%$ (de 9% a 48%)	$\Delta = 649\%$ (de 295 MPa a 2.210 MPa)
J404 4XXX	$\Delta = 1,3\%$ (de 7,75 a 7,85);	$\Delta = 8,7\%$ (de 196 Ga a 213 Ga)	$\Delta = 32\%$ (de 20 $\mu\Omega\cdot\text{cm}$ a 26,3 $\mu\Omega\cdot\text{cm}$)	$\Delta = 378\%$ (de 121 HB a 578 HB)	$\Delta = 338\%$ (de 8% a 35%)	$\Delta = 338\%$ (de 450 MPa a 1.970 MPa)
Resumo	$\Delta = 11,9\%$			$\Delta = 410\%$		

2.2 Características Químicas

A composição química dos aços influencia todos os aspectos do seu processamento e utilização. A capacidade de um aço ser soldável, tratado termicamente ou de resistir a um meio corrosivo depende diretamente da sua composição, apesar de não depender somente dela, como descrito nos itens a seguir.

2.2.1 Impacto na soldabilidade

A soldabilidade dos aços é importante não apenas para a fabricação de estruturas e componentes em aço, mas também para a instalação e manutenção destes, principalmente quando empregados em ambientes com baixas temperaturas. Tradicionalmente a fórmula do Instituto Internacional de Soldagem (IIW - *International Institute of Welding*)⁽⁸⁾ é utilizada para quantificar esta característica:

$$\%CE_{IIW} = \%C + \%Mn/6 + \%(Mo+Cr+V)/5 + \%(Ni+Cu)/15 \quad (1)$$

Aços carbono estruturais normalmente não são tratados termicamente após operações de soldagem. O valor CE_{IIW} de 0,45% é considerado⁽⁹⁾ o limite para operações de soldagens destes aços sem tratamento (pré ou pós). Porém, este valor é função da espessura da chapa, uma vez que espessuras mais elevadas aumentam o efeito térmico da operação de soldagem, assim como a presença de hidrogênio no meio. Por isso, aços mais modernos, com teores mais baixos de carbono, a fórmula do IIW (Equação 1) não é tão adequada e, cada vez mais, tem-se empregado os valores de P_{CM} - *Parameter of Crack Measurement*,⁽¹⁰⁾ especialmente na indústria do petróleo e gás:

$$\%P_{cm} = \%C + \%Si/30 + \%(Mn+Cu+Cr)/20 + \%Ni/60 + \%Mo/15 + \%V/10 + 5\%B + t/600 + H/60 \quad (2)$$

Onde: t é a espessura da chapa [mm]; e H o hidrogênio difusível no metal quente [$cm^3/100g$].

O estudo do Ito e Bessyo⁽¹⁰⁾ permitiu a obtenção da Equação 2 pela qual determinou-se uma condição mínima para ocorrer o trincamento na região soldada de aços, numa faixa bastante ampla de composições (por exemplo: 0,07%C a 0,22%C / 0,40%Mn a 1,40%Mn). Esta condição foi associada ao pré aquecimento do aço, de forma a obter uma relação linear entre a temperatura de pré-aquecimento (T_R) e o P_{CM} máximo recomendável para não ocorrer trincamento: $T_R \geq 20^\circ C \rightarrow P_{cm} \leq 0,28$ e $T_R \geq 175^\circ C \rightarrow P_{cm} \leq 0,39$. Combinando os critérios das duas equações (Equações 1 e 2), os autores observam que, em aços de maior responsabilidade,⁽¹¹⁾ deve-se procurar a combinação $CE_{IIW} \leq 0,40\%$ e $P_{cm} \leq 0,20\%$.

Particularidades em determinados processos de soldagem também devem ser levadas em consideração, além do carbono equivalente. Por exemplo, na soldagem de tubos sem metal de adição pelos processos ERW (*Electric Resistance Welding*) e HFIW (*High Frequency Induction Welding*), os aços também devem ter um teor de silício compatível com o teor de manganês. Não são desejáveis aços com faixas muito baixas da relação Mn/Si, por exemplo, $Mn/Si < 1$, e nem muito altas, como $Mn/Si > 20$.⁽¹²⁾ Conforme o tipo de regulagem empregada, pode ocorrer uma descontinuidade conhecida como penetrator.⁽¹²⁾ Neste caso, durante o processo de soldagem ERW/HFIW, é gerada uma carepa de solda, formada por uma mistura de óxidos de manganês e silício e que apresenta uma maior dificuldade de eliminação do interior da junta soldada pelo processo de recalque da solda.

2.2.2 Impacto nos tratamentos térmicos

Basicamente, quando se deseja tratar termicamente um aço, necessita-se que este apresente uma composição química adequada ao tipo de processo e aos equipamentos disponíveis para fazê-lo. Aços podem ser endurecidos diretamente por têmpera, seguida ou não de revenimento, ou por austêmpera. Também é possível empregar processos termoquímicos para obter uma condição diferenciada de desempenho mecânico. No primeiro caso, o objetivo é não alterar a composição química do aço e, no segundo caso, o interesse maior está em modificar quimicamente a superfície de forma a alterar diferenciadamente a sua resistência.

No que diz respeito ao processo de tratamento térmico convencional, os aços são escolhidos com base em dois critérios: conteúdo em carbono (%C) e carbono equivalente (%CE_{IW}). O teor em carbono está ligado ao máximo valor de dureza que pode ser conseguido no aço após têmpera. O carbono equivalente relacionado à facilidade de se temperar o aço e na homogeneidade dos valores de dureza obtidos. A Tabela 3 apresenta valores típicos de propriedades mecânicas após têmpera.

Tabela 3. Desempenho após têmpera^(13,14) de aços carbono comuns^(6,7)

Faixa	SAE J403 grau	Elementos de Liga Principais ^(6,7)		%C _{médio}	Propriedades recomendáveis ⁽¹³⁾ após Têmpera		
		%C	%Mn		HR _C ⁽¹³⁾	HB ⁽¹⁴⁾	S _{LR} (MPa) ⁽¹⁴⁾
A	1015	0,13 a 0,18	0,30 a 0,60	0,155	35,5	331	1122
	1016		0,60 a 0,90	0,155	35,5	331	1122
	1017	0,15 a 0,20	0,30 a 0,60	0,175	37,5	349	1181
	1018		0,60 a 0,90	0,175	37,5	349	1181
	1019		0,70 a 1,00	0,175	37,5	349	1181
B	1020	0,18 a 0,23	0,30 a 0,60	0,205	40,0	373	1259
	1021		0,60 a 0,90	0,205	40,0	373	1259
	1022		0,70 a 1,00	0,205	40,0	373	1259
	1023	0,20 a 0,25	0,30 a 0,60	0,225	41,5	387	1310
	1025	0,22 a 0,28		0,250	43,5	408	1383
	1026	0,60 a 0,90	0,250	43,5	408	1383	
C	1029	0,25 a 0,31	0,60 a 0,90	0,280	45,0	425	1442
	1030	0,28 a 0,34		0,310	46,5	442	1505
	1035	0,32 a 0,38	0,60 a 0,90	0,350	48,5	467	1599
	1037		0,70 a 1,00	0,350	48,5	467	1599
	1040	0,37 a 0,44	0,60 a 0,90	0,405	50,5	495	1702
	1044	0,43 a 0,50	0,30 a 0,60	0,465	52,0	517	1788
	1045		0,60 a 0,90	0,465	52,0	517	1788
	1046		0,70 a 1,00	0,465	52,0	517	1788
	1049	0,46 a 0,53	0,60 a 0,90	0,495	52,5	524	1817
	1050	0,48 a 0,55		0,515	53,0	532	1848

Pela Tabela 3, é possível confirmar que o valor da dureza após têmpera só depende do teor de carbono. Por exemplo, compare-se os resultados obtidos para os aços 1017, 1018 e 1019, todos com 0,175% C_{médio}. Os dados desta tabela também permitem obter equações de regressão, válidas nas faixas cobertas pela Tabela 3, de tal forma a prever as propriedades mecânicas após têmpera:

$$HR_C = 116,26 \cdot (\%C)^3 - 227,52 \cdot (\%C)^2 + 157,88 \cdot (\%C) + 16,172 \quad (3)$$

$$HB = 201,85 \cdot (\%C)^3 - 995,72 \cdot (\%C)^2 + 1150,5 \cdot (\%C) + 177,58 \quad (4)$$

$$S_{LR} \text{ [MPa]} = -2.474 \cdot (\%C)^2 + 3.676 \cdot (\%C) + 614,3 \quad (5)$$

Porém, para o processo ter eficiência e a peça final realmente atingir as propriedades previstas, deve-se empregar corretamente outros elementos químicos de tal forma que o carbono equivalente do aço seja adequado para a aplicação. As Equações 1 e 2 demonstram quais são os elementos químicos chave para esta aplicação, dos quais o boro (Equação 2) possui destaque. Estão se tornando costumeiras aplicações de aços com adições de manganês e boro para otimizar os resultados após têmpera, como os descritos na faixa 'B' da Tabela 3. Existem processos de conformação específicos para estes aços, como a estampagem a quente.⁽¹⁵⁾

No que diz respeito aos tratamentos superficiais, é costumeiro o emprego de um aço na faixa 'A' da Tabela 3, ou com teor de carbono baixo, de forma a facilitar a adição de liga, especialmente carbono e nitrogênio, por processos termoquímicos. Para estas aplicações, exige-se um maior controle dos elementos residuais, com destaque para o alumínio. Neste caso o alumínio pode produzir pontos de heterogeneidade na camada depositada e assim comprometer a longevidade do componente,⁽¹⁶⁾ sendo recomendável o menor teor possível, tipicamente $Al \leq 0,010\%$.

2.2.3 Impacto na resistência à corrosão

Há mais de 80 anos, conhecem-se os aços⁽²⁾ do tipo "patináveis", nos quais forma-se uma capa de óxido relativamente estável e que dificulta a posterior continuidade do processo de corrosão. Esta película (denominada pátina) funciona como uma barreira entre o aço e o meio corrosivo, protegendo-o da corrosão. Pequenos teores de alguns elementos químicos, tais como cobre, cromo, silício, níquel ou fósforo,^(2,17) propiciam a formação desta película de óxidos, a qual é compacta e aderente em sua superfície.⁽²⁾

Os aços "patináveis" foram originalmente desenvolvidos pela US Steel (*United States Steel Corporation*) com o nome "Cor-Tem", que tem sido empregado por outras siderúrgicas. Inicialmente este aço foi usado em vagões ferroviários,⁽²⁾ mas seu uso foi rapidamente incorporado na construção civil. Muitas siderúrgicas desenvolveram diferentes famílias de aços "patináveis", com resistência à corrosão atmosférica, como o USI SAC e USI AR COR da Usiminas. A diferença entre estes aços é a composição química e a quantidade/precisão das informações a respeito de sua longevidade à exposição atmosférica.

Normalmente, os fabricantes destes aços têm disponíveis dados obtidos de experiências de resistência à corrosão. Quantifica-se a perda de massa ou de espessura do material em função do tempo (anos), em amostras (pintadas e não pintadas) expostas em diferentes tipos de atmosferas (marinha, urbana, rural e industrial). Neste sentido, a ASTM criou o guia G101,⁽¹⁷⁾ de forma a oferecer uma referência e para padronizar as formas de estimar a resistência à corrosão de aços patináveis de baixa-liga. Além da realização de ensaios de exposição, a G101 permite também empregar uma equação para estimar um índice de resistência à corrosão (I_{RC}), a partir da composição química do aço:

$$I_{RC} = 26,01 \cdot Cu + 3,88 \cdot Ni + 1,20 \cdot Cr + 1,49 \cdot Si + 17,28 \cdot P - 7,29 \cdot (Cu \cdot Ni) - 9,10 \cdot (Ni \cdot P) - 33,39 \cdot (Cu^2) \quad (6)$$

Este índice foi obtido a partir da análise de vários estudos e ensaios de resistência à corrosão e é válido para aços cujos teores dos elementos estabilizadores da pátina estão limitados à: $Cu \leq 0,51\%$; $Ni \leq 1,1\%$; $Cr \leq 1,3\%$; $Si \leq 0,64\%$ e $P \leq 0,12\%$.⁽¹⁷⁾

Adicionalmente, por ser um método bem eficiente de proteção contra a corrosão, a galvanização é uma alternativa eficiente para a preservação do aço.⁽¹⁸⁾ Além de uma barreira física, a camada de galvanização oferece uma proteção ativa (catódica)

para a superfície do aço. Para fazer o recobrimento, usualmente é utilizado o zinco; também pode ser empregado alumínio, pois ambos metais são eletroquimicamente adequados para gerar a proteção catódica nos aços. No caso do recobrimento a quente com zinco, conhecido como HDG (*Hot Dip Galvanizing*), recomenda-se limitação nos teores de silício ($\text{Si} \leq 0,05\%$) ou da combinação silício + fósforo ($\text{Si} + 2,5\text{P} \leq 0,1\%$) visando garantir a homogeneidade da camada depositada. Como visto na Equação 6, estes elementos criam uma camada de óxidos no metal, o que leva a um comportamento heterogêneo da superfície durante o recobrimento.

Com o crescimento do consumo de petróleo, gás e seus derivados, houve a necessidade de explorar campos em ambientes cada vez mais agressivos, tornando a resistência à corrosão dos materiais destinados a fabricação de tubos um aspecto importante. As recentes descobertas apresentam altos teores de H_2S , que na presença de água facilita a formação do hidrogênio, sendo essa condição extremamente fragilizante. Neste caso, a introdução do H^+ no aço (Figura 1), ocorre como resultado da reação de corrosão do Fe em uma solução aquosa contendo H_2S : $\text{Fe} + \text{H}_2\text{S} + (\text{H}_2\text{O}) \rightarrow \text{FeS} + 2\text{H}_{\text{ad}} + (\text{H}_2\text{O})$.

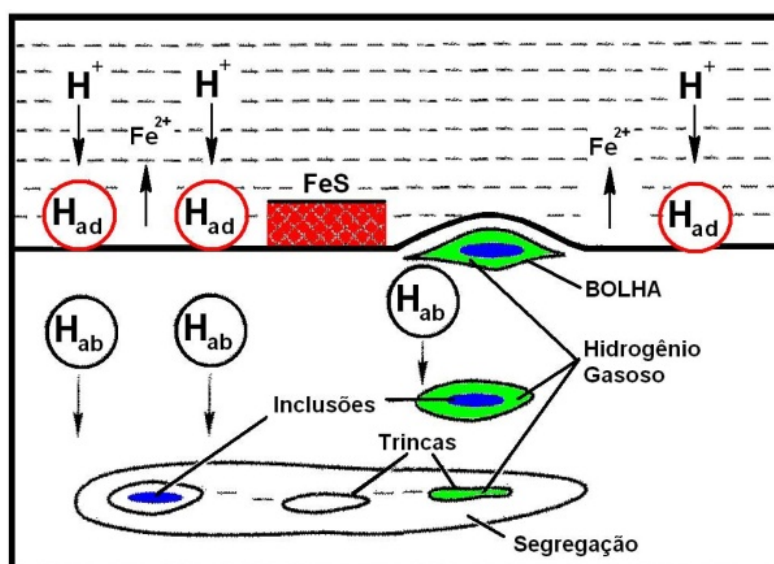


Figura 1. Ilustração do mecanismo de geração de danos (trincas) por hidrogênio oriundo do H_2S .

O hidrogênio liberado pela reação do sulfeto de hidrogênio com o ferro é absorvido pelo aço e eventualmente acumulado dentro de heterogeneidades na estrutura do aço, tais como inclusões e bandas de segregação. O acúmulo do hidrogênio pode levar ao trincamento do componente ou à total fragilização do material. Existem ensaios de trincamento por hidrogênio que devem ser atendidos⁽¹⁹⁾ e alguns fatores metalúrgicos que podem ser controlados para oferecer uma maior resistência ao trincamento por hidrogênio em meios contendo H_2S , também conhecidos como ambientes *Sour*. Além da limpidez, microestrutura e propriedades mecânicas, existem recomendações em termos de composição química para tais aços:^(19,20)

- diminuição de C, Mn e P visando a redução do bandeamento e da quantidade de perlita que produzem locais preferenciáveis para o hidrogênio;
- diminuição de S, O, N que poderiam produzir inclusões nas quais o hidrogênio pode se acumular; e
- adição de Cu, Cr, Ni, Mo que por efeito de pátina reduzem a formação de sulfetos e assim diminuem a formação e incorporação de hidrogênio no aço.

Pela composição química é possível inferir, ainda que indiretamente, algumas características dos aços, tais como:

- resistência mecânica, em função do tipo de tratamento térmico;^(21,22) e
- limpidez, característica necessária em situações mecânicas críticas.^(23,24)

2.3 Propriedades Mecânicas

Os aços planos podem ser empregados em inúmeras aplicações finais, cada qual com um conjunto de requisitos mecânicos que devem ser atendidos pelo material. A garantia do atendimento destas características nem sempre é feita da forma ideal, ou seja, pela norma técnica aplicável, mas sim indiretamente pela conciliação da composição química e da condição termomecânica empregadas na fabricação do aço. De qualquer forma, em cada tipo de aplicação, certas características mecânicas pelo material devem ser atendidas, as quais podem ser agrupadas em cinco grandes grupos (R, E, P, T e D):

- R - resistência mecânica: grau de força que um material suporta antes da sua alteração dimensional, elástica (S_{LE}) ou plástica (S_{LR}), ou até a sua ruptura;
- E - elasticidade: capacidade de mudança de forma com a aplicação de um esforço mecânico, com acúmulo e liberação de energia mecânica de forma reversível (sem perdas). Ocorre o retorno às suas dimensões originais, após a retirada dos esforços mecânicos;
- P - plasticidade: capacidade de mudança de forma com aplicação de um esforço mecânico; a sua forma não retorna àquela que tinha antes da aplicação do esforço mecânico e/ou térmico (deformação plástica). Normalmente, a deformação plástica é avaliada até a sua ruptura;
- T - tenacidade: a capacidade de absorver energia antes da sua fratura, ou seja, a dificuldade que o material apresenta em ser rompido, normalmente na presença de condições adversas (fragilizantes), tais como: baixa temperatura, concentradores de tensão (trinca), altas taxas de carregamento (impacto); e
- D - resistência a mecanismos degradativos: avaliação da longevidade de um material quando submetido a condições constantes de degradação mecânica (fadiga), térmica (fluência), erosiva (desgaste), químicas (corrosão) ou compostas (por exemplo, corrosão-fadiga).

Os diversos ensaios mecânicos existentes são realizados para quantificar características mecânicas dos materiais e, assim, fornecer dados numéricos empregáveis nos projetos mecânicos. O comportamento dos aços durante os ensaios mecânicos e, especialmente, no seu uso final é intimamente dependente da estrutura e do processo de produção empregados para sua obtenção.

As principais aplicações dos aços planos não ligados estão descritas no Quadro 2 assim como as características mecânicas genericamente desejáveis nestas aplicações. Os valores mostrados nesta tabela são relativos a uma análise geral de vários tipos de aços cobertos por várias entidades normativas listadas na Quadro 3.

Quadro 2. Aplicações e características mecânicas desejáveis para os aços planos não ligados

Aplicação e Característica		Grau de importância	Características gerais desejáveis
Estrutural	R	████████████████████	%CE ≤ 0,40; 250 ≤ S _{LE} ≤ 400 MPa; S _{LE} /S _{LR} ≤ 0,85 (para S _{LE} ≤ 350 MPa); dobramento calço 2E; Along. Prop. ≥ 20%
	P	██████████	
	T	██	
	D	█	
Estampagem	R	██████████	Along. Prop. ≥ 35% (para S _{LE} ≤ 250 MPa); Along. Prop. ≥ 30% e S _{LE} /S _{LR} ≤ 0,85 (para 250 < S _{LE} ≤ 350 MPa); dobramento calço 0E
	P	████████████████████	
	T	██	
	D	█	
Vasos de pressão	R	████████████████████	%CE ≥ 0,30; S _{LE} /S _{LR} ≤ 0,85; dobramento calço 2E; Along. Prop. ≥ 20%; E _C ≥ 27J
	P	██████████	
	T	██████████	
	D	██████████	
Longarinas	R	████████████████████	%CE ≤ 0,35; 300 ≤ S _{LE} ≤ 700 MPa; dobramento calço 0E e Along. Prop. ≥ 25% (para S _{LE} ≤ 400 MPa); E _C ≥ 27J
	P	██████████	
	T	██████████	
	D	██████████	
Rodas	R	████████████████████	%CE ≤ 0,35; S _{LE} /S _{LR} ≤ 0,85 (para S _{LE} ≤ 350 MPa); dobramento calço 0E; Along. Prop. ≥ 30%; S _F ≥ 200 MPa
	P	██████████	
	T	██████████	
	D	██████████	
Tubos	R	██████████	%CE ≤ 0,35; Along. Prop. ≥ 20%; dobramento calço 2E
	P	██████████	
	T	██	
	D	█	

Obs.: dobramento calço xE é a capacidade de uma amostra do aço dobrar a 180° com um diâmetro de dobramento interno equivalente a um múltiplo (x) da espessura (E) da chapa. E_C é o valor da energia (J) obtida no ensaio de impacto Charpy. S_{LE} é o limite de escoamento e S_{LR} o limite de resistência. As cores, assim como o tamanho das barras, implicam no grau de importância da propriedade para a aplicação em questão.

Quadro 3 Principais normas consultadas para a elaboração das características contidas no Quadro 2

API (American Petroleum Institute)	ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas)	ASME (American Society of Mechanical Engineers)
ASTM (American Society for Testing and Materials, agora ASTM International)	JIS (Japanese Industrial Standards) e JSA (Japanese Standards Association)	SAE (Society of Automotive Engineers, agora SAE International)
EURONORM - DIN (Deutsches Institut für Normung)	EURONORM - BS (British Standards)	EURONORM - AFNOR (Association Française de Normalisation)

Desta forma, ainda que um mesmo produto siderúrgico possua uma composição química igual à de outro, sua estrutura interna, suas propriedades e, conseqüentemente, a aplicação final recomendada podem ser bem diferentes. Os gráficos contidos na Figura 2 ilustram graficamente as diferenças entre três tipos de aços com aplicações específicas. Neste caso, a forma gráfica é útil para perceber como o foco no desempenho mecânico pode alterar de uma aplicação para outra. Este tipo de dependência pode afetar o desempenho de um aço quando é oferecida outra aplicação, diferente da original.

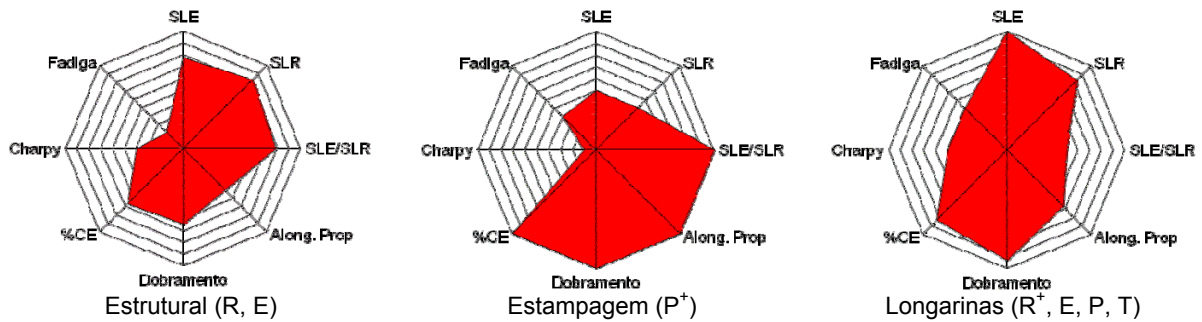


Figura 2. Comparação relativa das características genéricas desejáveis em três aplicações de aços planos. O foco nas características mecânicas principais está indicado entre parêntesis.

Um exemplo bastante conhecido é aplicar aços normalmente empregados em longarinas em operações de estampagem, onde é exigida alta estampabilidade. A estampabilidade é um tipo particular de conformabilidade, característica de materiais que apresentam ductilidade adequada para conformação por um processo de estampagem, sem gerar rupturas e/ou defeitos que impeçam seu uso final.⁽²⁵⁾ Tem-se proposto vários critérios para avaliação da estampabilidade (F) de uma liga.⁽²⁵⁾ Um deles, leva em consideração uma série de propriedades mecânicas, podendo ser escrito conforme uma equação semi-quantitativa (Equação 7).⁽²⁶⁾

$$F = \varepsilon_u \cdot R_m \cdot n \cdot \left(\frac{S_{LR}}{S_{LE}} \right) \cdot \frac{1}{2^\lambda} \quad (7)$$

Onde: ε_u é a deformação uniforme, até o início da estricção (em tração pura $\varepsilon_u = n$); R_m é o coeficiente de anisotropia médio; n é o expoente de encruamento; S_{LR} é o limite de resistência; S_{LE} é o limite de escoamento e λ é o grau de dificuldade relativo na conformação.

Apesar da Equação 7 ser apenas uma fórmula semi-quantitativa, ela mostra sinteticamente a importância de cada propriedade mecânica para materiais destinados a operações de estampagem. Considerando os dados do Quadro 2 e os gráficos mostrados na Figura 2, pode-se concluir que existem restrições na substituição de um aço para estampagem por um aço empregado para longarinas (Figura 3), especialmente no que diz respeito à relação elástica (S_{LE}/S_{LR}) e assim, indiretamente nos valores do expoente de encruamento (n).^(25,27)

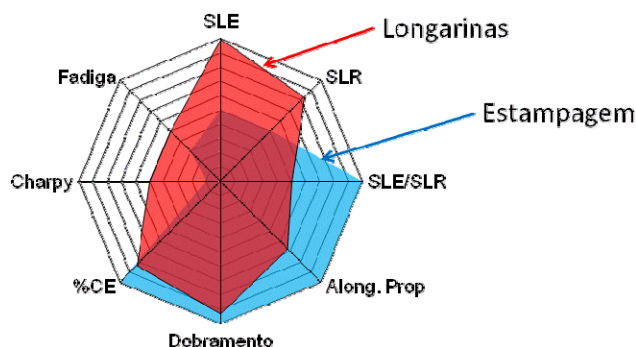


Figura 3. Comparação relativa das características genéricas desejáveis de dois grupos de aplicações: longarinas e estampagem.

Assim, na substituição de um determinado tipo de aço por outro, deve-se levar em consideração a combinação de variáveis de desempenho mecânico do aço. Estes valores podem estar estabelecidos por norma e/ou implícitos no aço.^(3,11,23)

2.4 Forma

Todos os produtos siderúrgicos, sejam planos ou não planos, devem possuir características de forma mínimas, padronizadas, para permitir o seu emprego nas mais variadas aplicações industriais. Tais características são cobertas por normas de requisitos gerais, vinculadas e citadas pelas normas de requisitos específicos que definem o tipo particular de aço. No caso dos aços planos, a principal característica de forma é a planicidade, que pode ser percebida com maior ou menor facilidade tanto nos produtos siderúrgicos quanto nos produtos finais.

Nenhum produto é completamente plano, existem desvios da planicidade que são causadas tanto pelo processamento quanto pelo transporte e manuseio do material. A norma ASTM A568,⁽²⁸⁾ por exemplo, oferece métodos alternativos de expressar a planicidade de chapas de aço que não seja pelo tradicional método de medição do máximo desvio da chapa em relação a uma superfície plana. Destes métodos, os autores têm percebido um incremento no uso do parâmetro 'UI'. O conceito empregado está descrito a seguir, ilustrado na Figura 4 e pela Equação 8:⁽²⁸⁾

uma chapa com ondulações (Figura 4a) pode ser cortada em várias tiras ao longo de seu comprimento, a liberação das tensões elásticas em cada pedaço (tira) irá levá-los a apresentar comprimentos diferentes (Figura 4b).

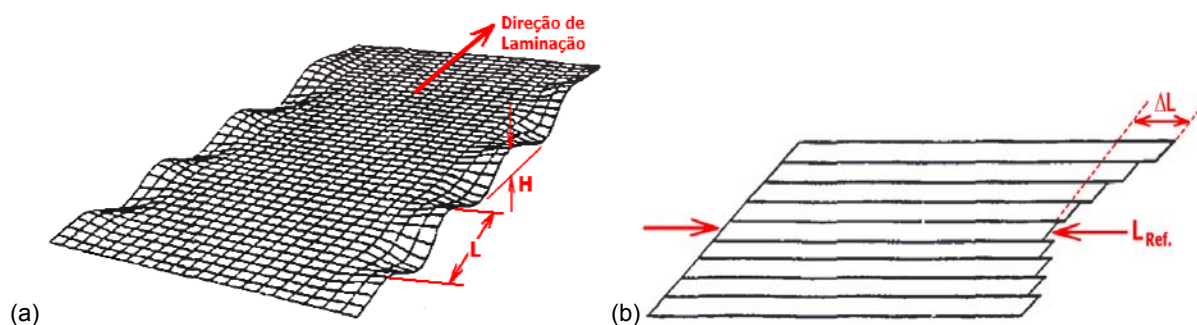


Figura 4. Conceito de planicidade pelo índice 'UI' conforme norma ASTM A568.⁽²⁸⁾

$$I = (\Delta L / L_{ref}) \times 105 \quad (8)$$

A medição e garantia da planicidade depende da capacidade de inspeção do material sobre uma superfície plana. Esta condição representa um problema para as bobinas, que são formas naturalmente não planas. A norma vigente ASTM A568,⁽²⁸⁾ por exemplo, considera que a planicidade de bobinas é “não aplicável a não ser que a bobina tenha sido processada (desempenada) adequadamente”.

2.5 Superfície

A relação entre a área superficial e o volume de um material plano é muito maior do que em qualquer outra geometria. Assim, a principal característica visível de um chapa de aço é a sua superfície. As condições superficiais de um chapa servem não apenas para definir uma aplicação, mas também podem servir para definir o próprio produto em si. Neste aspecto, cabem duas grandes classificações: aços laminados a quente e laminados a frio.

Porém, defeitos superficiais podem surgir pelas mais variadas razões, sejam em chapas grossas, bobinas pretas (sem decapagem) ou em chapas laminadas a frio extra limpas. O nível da intensidade dos defeitos não é definido diretamente nas normas técnicas vigentes, tal com está descrito no texto das normas brasileiras, como no exemplo abaixo reproduzido:

laminados a frio: 'superfície A: o material com superfície A é indicado para utilização em peças expostas, onde o aspecto de superfície tem decisiva importância, não podendo apresentar defeitos que obriguem ao trabalho de recondicionamento para sua utilização; (...) 'superfície C não é indicada para utilização em peças expostas e pode apresentar defeitos leves a moderados, (...).' (NBR 11888)⁽²⁹⁾

Assim, cabe aos usuários definirem juntamente com seus fornecedores quais serão os melhores padrões para o atendimento pleno das características superficiais desejadas, porém considerando-se:

- a relação entre o custo de fornecimento de uma chapa melhor acabada versus o custo de retrabalho ou descarte de uma chapa com defeito; e
- o benefício de receber um material e produzir um produto com menor nível de defeitos e/ou com uma qualidade superficial superior.

3 CONCLUSÕES

Com base nas considerações e dados apresentados nesta contribuição técnica é possível afirmar que:

- os aços planos possuem várias características que podem ser agrupadas em cinco grupos de requisitos para análise de adequabilidade para suas diversas aplicações;
- propriedades físicas, químicas e mecânicas devem ser determinadas pelos valores obtidos em ensaios representativos que refletem as características internas do aço e precisam estar alinhadas às aplicações finais destes aços;
- a forma e superfície dos produtos planos são características externas que são facilmente percebidas pelos usuários, porém necessitam de padrões bem definidos para o pleno atendimento às necessidades das aplicações finais; e
- a correspondência entre a aplicação final e as características dos aços planos deve ser adequada para garantir o sucesso no uso do produto siderúrgico.

REFERÊNCIAS

- 1 BUCH, A. Pure Metals Properties: a scientific-technical handbook. Materials Park: ASM International, 1999.
- 2 LLEWELLYN, D.T. Steels: Metallurgy & Applications (2nd edition). Trowbridge (UK): Nutterworth-Heinemann, 1994.
- 3 MORAIS, W.A. Características do Processo de Desenvolvimento de Produtos Metalúrgicos. In: MORAIS, W.A., MAGNABOSCO, A.S. e MENEZES NETTO, E.B. Metalurgia Física e Mecânica Aplicada (2^a edição). São Paulo: ABM, 2009. mód.5, cap.2, p.455-480.
- 4 BODNAR, R. L.; FLETCHER, F. B.; MANOHAR, M.; The Physical Metallurgy of Normalized Plate Steels. MS&T Conference Proceedings, New Orleans, pp. 89-109, 2004.
- 5 MATWEB – Material Property Data. Disponível em <<http://www.matweb.com> >. Acesso em: 7-4-2012.
- 6 SAE. J 403. Chemical compositions of SAE carbon steel. Edição 2009.
- 7 SAE. J 404. Chemical Compositions of SAE Alloy Steels. Edição 2009.
- 8 International Institute of Welding (IIW): Technical Report, 1967, IIW doc. IX-535-67.
- 9 LANCASTER, J. The metallurgical effects of fusion welding. In: _____. Handbook of structural welding. Cambridge (UK): Abington Hall, 1997. cap. 2, p. 56-113.
- 10 ITO, Y.; BESSYO, K.; Weldability formula of high strength steels related to heat-affected zone cracking. The Sumitomo Search, n.1, p.59-70, May, 1969.

- 11 MORAIS, W.A.; BORGES, H.C. Desafios na criação e especificação de aços para tubos soldados (ERW/HFIW) visando aplicações na extração e transporte de produtos petroquímicos (tubos API). In: Congresso Anual da ABM, 66. 2011, São Paulo, Anais... São Paulo: ABM, 2011. 1 CD-ROM.
- 12 YOKOYAMA, E; KANO, N; YAMAGATA, M.; WATANABE, S.; Effects on Penetrator Defect Occurrence of Welding Conditions and Mn/Si Ratio of ERW High Manganese Line Pipe. KAWASAKI STEEL GIHO, v.10, n.1, 1978. <http://www.jfe-steel.co.jp/archives/ksc_giho/10-1/j10-023-033.pdf> Acesso em 15-4-2010.
- 13 TARIN, P.; PEREZ, J.; SteCal 3.0.3 Low-alloy steels: Their properties and how to obtain them. ASM International. 2004.
- 14 DIN. EN ISO 18265. Metallic Materials - Conversion of hardness values. Deutsches Institut für Normung. 2004.
- 15 ARANDA, L.G.; RAVIER, P.; CHASTEL, Y. Hot stamping of quenched steels: material data and process simulations. In: INTERNATIONAL DEEP DRAWING RESEARCH GROUP - IDDRG, 2003, Bled (slovenia). Conference proceedings. P.155-163, 2003.
- 16 MENEZES NETTO, E. B. Tecnologia dos tratamentos térmicos. In: MORAIS, W.A., MAGNABOSCO, A.S. e MENEZES NETTO, E. B. Metalurgia Física e Mecânica Aplicada (2ª edição). São Paulo: ABM, 2009. mód.2, cap.3, p.205-228.
- 17 ASTM. ASTM G101: Standard Guide for estimating the atmospheric corrosion resistance of low-alloy steels. West Conshohocken (USA): 2004.
- 18 SILVA SOBRINHO, P. Sistemas de proteção. Revista do Aço, v.1, n.1, p.38-43, Abr, 2012.
- 19 MIYOSHI, E.; TANAKA, T.; TERASAKI, F.; IKEDA, A. Hydrogen-Induced cracking of steels under wet hydrogen sulfide environment. Journal of Engineering for Industry, p.1221-1230, Nov., 1976.
- 20 MOREIRA, F.A. et Al. Tubos de aço carbono com alta resistência a corrosão para transporte offshore de óleo e gás com presença de CO₂ e H₂S. In: Congresso Anual da ABM, 64. 2009, Belo Horizonte, Anais... São Paulo: ABM, 2009. 1 CD-ROM.
- 21 BODNAR, R. L.; FLETCHER, F. B.; MANOHAR, M. The Physical Metallurgy of Normalized Plate Steels. MS&T Conference Proceedings, New Orleans, pp. 89-109, 2004.
- 22 COMITRE, T.B. et. Al. Equacionamento e Quantificação das Propriedades Mecânicas de Barras de Aço em Conformidade com Normas SAE. Disponível em: <http://www.inda.org.br/propriedade_mecanica.php>. Acesso em: 30-3-2012.
- 23 MORAIS, W. A. Emprego estatístico de dados de resistência mecânica e ductilidade na modelagem das características mecânicas e estimativa da tenacidade de aços planos. Tecnologia em Met., Mat. e Mineração, v.8, n.4, p. 215-222, out.-dez. 2011.
- 24 KAWASAKI STEEL 21st Century Foundation. An Introduction to Iron and Steel Processing. Disponível em: < <http://www.jfe-21st-cf.or.jp/index2.html>>. Acesso em: 7-4-2012.
- 25 MAGNABOSCO, A.S.; Resistência Mecânica × Conformabilidade. In: MORAIS, W.A.; MAGNABOSCO, A.S; MENEZES NETTO, E. B.; *Metalurgia física e mecânica aplicada*. 2ª Edição. São Paulo: ABM, 2009. vol. 2, mód. 5, cap.3, p. 481-500.
- 26 FONSTEIN, N.M., Low-Alloy Dual-Phase Steels for Cold Forming Applications. In: AUTOMOTIVE STEELS SEMINAR, 1988, Moscow. *Proceedings...* Moscow: TSNIIVHM & CBMM, 1988, p.145-155.
- 27 MORAIS, W.A. et. al. Estudo das variáveis de deformação plástica em aços através de ensaios de tração instrumentados. In: CONGRESSO ANUAL DA ABM, 59., 2004, São Paulo. *Anais...* São Paulo: ABM, 2004. 1 CD-ROM.
- 28 ASTM. ASTM A568/A568M: Specification for steel, sheet, carbon, structural, and high-strength, low-alloy, hot-rolled and cold-rolled, general requirements for. West Conshohocken (USA): 2011.
- 29 ABNT. NBR 11888: Bobinas grossas e chapas grossas de aço-carbono e de aço de baixa liga e alta resistência - Requisitos gerais. Rio de Janeiro. 2008.