

CAPÍTULO X - PROPRIEDADES DE MATERIAL

Para que seja possível uma avaliação do equipamento é necessária a definição das propriedades de material adequadas. Em muitos casos, as informações relativas a testes de material durante a fabricação do equipamento não são disponíveis ou são incompletas. O objetivo é estabelecer um comportamento para o material representativo para o equipamento e que seja considerada conservativa em termos de engenharia. Dessa forma, estimativas de valores associadas a fatores de segurança adequados podem garantir uma resposta segura do problema a ser analisado.

O Apêndice F do API-RP 579 apresenta diversas fontes de informações para obtenção de propriedades mecânicas, físicas e de tenacidade de materiais, bem como modelos de comportamento esperados em função do dano existente no equipamento. Os itens previstos no documento são os seguintes:

1 - Parâmetros de resistência

Tensões de escoamento e limites de resistência - o documento além de fornecer diretrizes para a definição de valores reais do material, apresenta equação e coeficientes para a obtenção de tensões de escoamento e limite de resistência de materiais em função da temperatura.

Tensão sigma-flow;

Relação Ramberg-Osgood

2 - Propriedades físicas

Módulo de elasticidade;

Coeficiente de Poisson;

Coeficiente de expansão térmica;

Coeficiente de condutividade térmica;

Coeficiente de difusividade;

Densidade.

3 - Tenacidade à fratura

Relações entre parâmetros K , δ e J

Testes de tenacidade à fratura;

Relações de energia Charpy e tenacidade;

Relações lower-bound de tenacidade;

Tenacidade à fratura para materiais sujeitos à degradação em serviço;

Distribuição probabilística de tenacidade à fratura (curva Master);

Efeitos da taxa de carregamento na tenacidade.

4 - Taxas de crescimento de trincas

Fadiga;

Corrosão sob tensão;

HAC - trincamento assistido pelo hidrogênio;

Equações / modelos de crescimento de trincas

Valores recomendados de taxas de propagação.

5 - Curvas de fadiga

Fadiga baseada em espécimes testados;

Fadiga baseada em testes em espécimes soldados.

6 - Dados de material para análise de creep

Dados de ruptura;

Projeto Omega (estimativa de vida residual)

Crescimento de trincas em regime de creep.

Alguns dos critérios e formulações definidas pelo API são descritas.

a) Relação entre valores médios e mínimos de propriedades mecânicas de materiais.

$$\sigma_{uts}^{mean} = \sigma_{uts}^{min} + 69,0 \text{ Mpa}$$

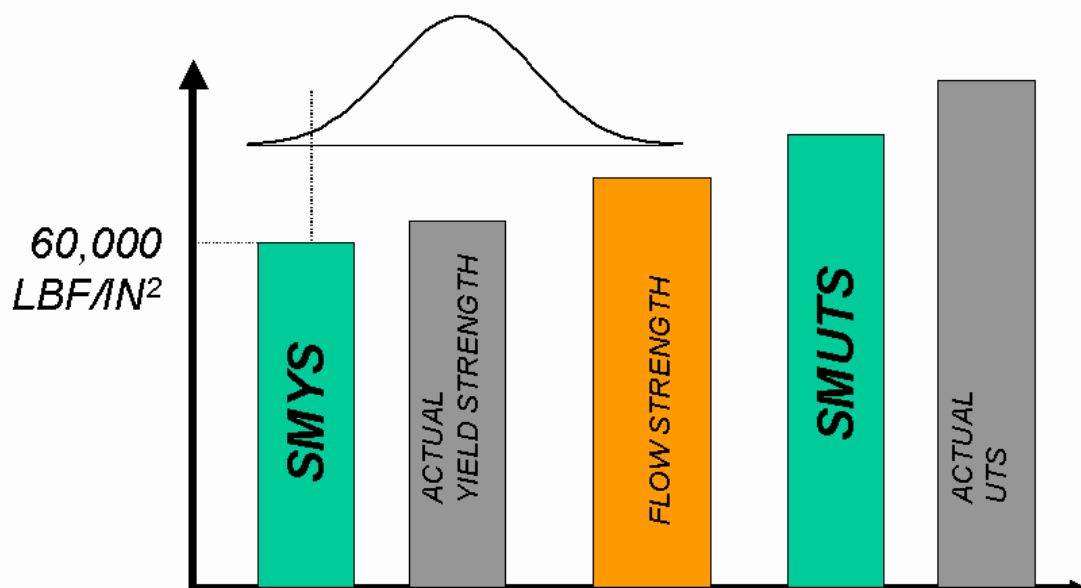
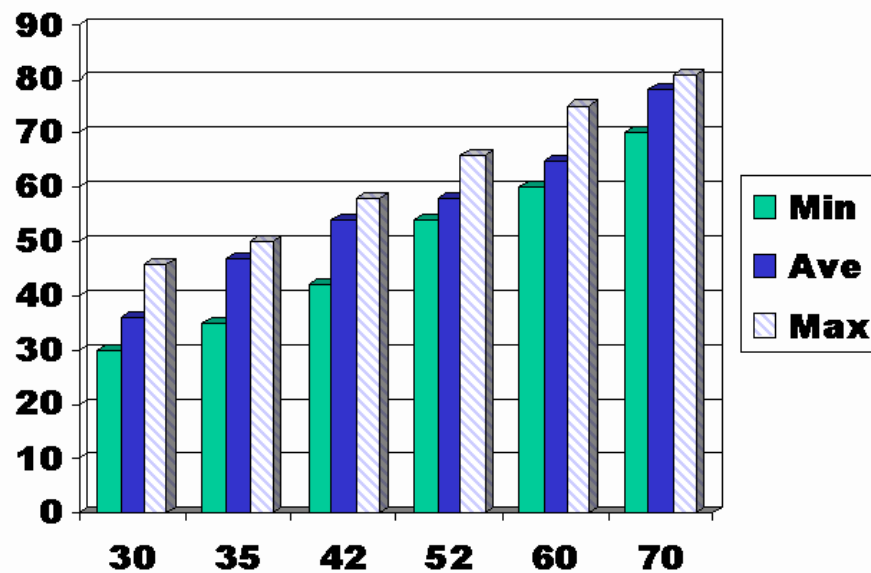
$$\sigma_{ys}^{mean} = \sigma_{ys}^{min} + 69,0 \text{ Mpa}$$

σ_{uts}^{mean} : valor médio do limite de resistência;

σ_{uts}^{min} : valor mínimo do limite de resistência;

σ_{ys}^{mean} : valor médio da tensão de escoamento;

σ_{ys}^{min} : valor mínimo da tensão de escoamento.



b) Relações para estimativa da tensão sigma-flow do material.

$$\sigma_f = (\sigma_{ys} + \sigma_{uts}) / 2$$

$$\sigma_f = \sigma_{ys} + 69,0 \text{ Mpa}$$

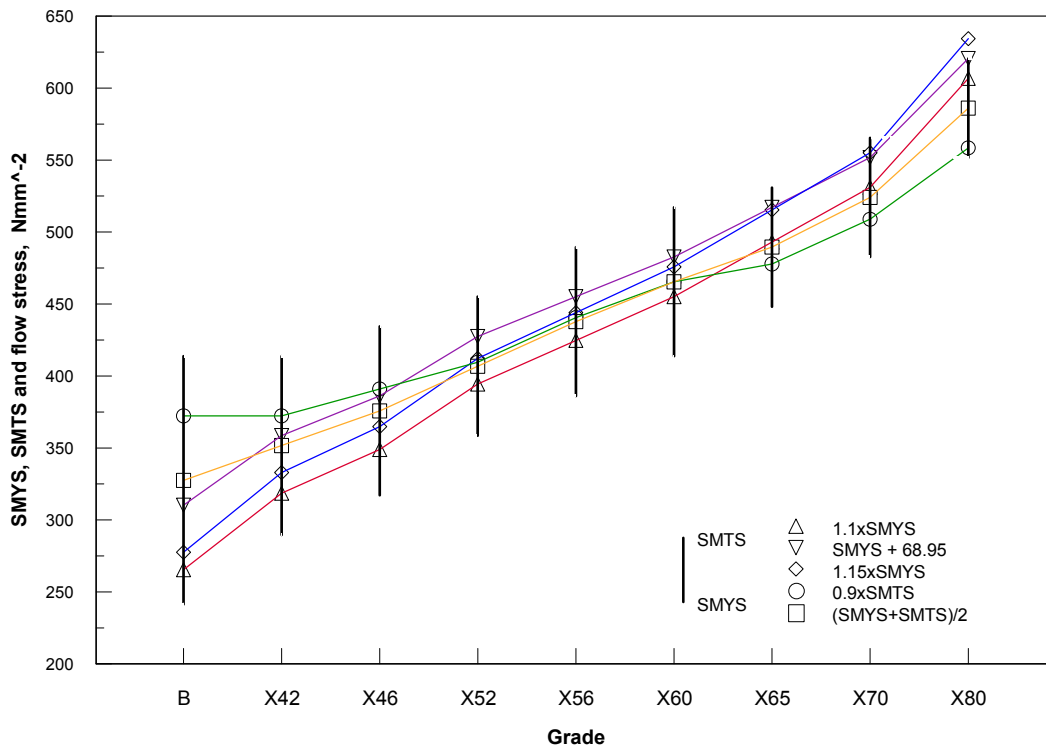
$$\sigma_f = 1,15.(\sigma_{ys} + \sigma_{uts}) / 2$$

$$\sigma_f = (\sigma_{ys} / 2).[1 + (1 / 0,002.n)^{1/n} / \exp(1 / n)]$$

σ_f - tensão sigma-flow

σ_{ys} - tensão de escoamento do material

σ_{uts} - tensão limite de resistência do material



c) Relação de Ramberg-Osgood.

$$\varepsilon / \varepsilon_0 = \sigma / \sigma_0 + \alpha.(\sigma / \sigma_0)^n$$

$$\sigma = (1 + \varepsilon_e). \sigma_e$$

$$\varepsilon = \ln(1 + \varepsilon_e)$$

$$\sigma_{uts} / \sigma_{ys} = [1 + (1 / 0,002.n)^{1/n} / \exp(1 / n)]$$

$$\alpha = 0,002.E / \sigma_{ys} - 1,0$$

ε - deformação do material

ε_0 - deformação do material na condição de escoamento

σ - tensão aplicada no material

σ_0 - tensão de escoamento do material

α, n - coeficientes da equação de Ramberg-Osgood

d) Relações para determinação de tenacidade.

Relação entre o parâmetro K crítico e J crítico : $K_{Jc} = [J_{crit} \cdot E / (1 - \nu^2)]^{1/2}$

Relação entre o parâmetro J crítico e δ crítico : $J_{crit} = m \cdot \sigma_f \cdot \delta_{crit}$.

Relação entre o parâmetro K crítico e δ crítico : $K_{\delta c} = [m \cdot \sigma_f \cdot \delta_{crit} \cdot E / (1 - \nu^2)]^{1/2}$

K_{Jc} - parâmetro K crítico obtido à partir do resultado da integral J

$K_{\delta c}$ - parâmetro K crítico obtido à partir do resultado de COD

δ_{crit} - parâmetro de COD crítico

J_{crit} - parâmetro de integral J crítica

E - módulo de elasticidade do material

ν - coeficiente de Poisson

m - fator de conversão (=1,4)

e) Metodologia lower-bound para a tenacidade do material.

$$K_{Ic} = 36,5 + 3,084 \cdot \exp[0,036 \cdot (T - T_{ref} + 56)] \quad [Mpa \cdot m^{1/2}, ^\circ C]$$

$$K_{IR} = 29,5 + 1,344 \cdot \exp[0,026 \cdot (T - T_{ref} + 89)] \quad [Mpa \cdot m^{1/2}, ^\circ C]$$

Valores máximos :

110 $Mpa \cdot m^{1/2}$

para materiais de composição química desconhecida;

220 $Mpa \cdot m^{1/2}$

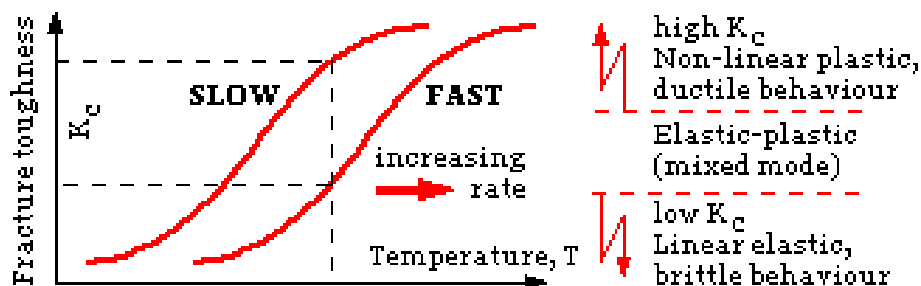
para materiais com baixo enxofre (0,01% ou menor) ou para materiais 2 $\frac{1}{4}$ Cr - 1 Mo com valores de J controlados ($J < 150$)

K_{Ic} - tenacidade mínima do material - carregamento estático

K_{IR} - tenacidade mínima do material - carregamento dinâmico

T - temperatura do material

T_{ref} - temperatura de referência do material



f) Correlações entre energia Charpy e tenacidade do material.

Relação de Rolfe-Novak :

$$K_{Ic} = 8,47.(CVN)^{0,63} \quad [Mpa.m^{1/2}; J]$$

Relação lower-bound para tenacidade à fratura dinâmica:

$$K_{Id} = 15,5.(CVN)^{0,375} \quad [Mpa.m^{1/2}; J]$$

Para comportamento 100% ductile (upper-shelf):

$$[K_{Ic} / \sigma_{ys}]^2 = 0,52.[CVN / \sigma_{ys} - 0,02] \quad [Mpa.m^{1/2}; Mpa; J]$$

K_{Ic} - tenacidade do material

CVN - energia Charpy-V

σ_{ys} - tensão de escoamento do material

g) Modelos de propagação de trincas.

Lei de Paris: $da/dN = C.(\Delta K)^n$

Equação de Walker: $da/dN = C.(\Delta K_{eff})^n$ $\Delta K_{eff} = \Delta K / (1 - R)^m$

da/dN - taxa de propagação de defeitos

C, n, m - parâmetros de comportamento do material

ΔK - variação da intensificação de tensões no defeito ao longo do ciclo

ΔK_{eff} - variação corrigida para a tensão média

R - relação entre a tensão mínima e a tensão máxima no ciclo.

Table F.1
Approximate Equivalent Hardness Number and Tensile Strength for Carbon and Low Alloy Steels in the Annealed, Normalized, and Quenched-and-Tempered Conditions

Brinell Hardness No. (3000 kg load)	Vickers Hardness No.	Approximate Tensile Strength	
		(MPa)	(ksi)
441	470	1572	228
433	460	1538	223
425	450	1496	217
415	440	1462	212
405	430	1413	205
397	420	1372	199
388	410	1331	193
379	400	1289	187
369	390	1248	181
360	380	1207	175
350	370	1172	170
341	360	1131	164
331	350	1096	159
322	340	1069	155
313	330	1034	150
303	320	1007	146
294	310	979	142
284	300	951	138
280	295	938	136
275	290	917	133
270	285	903	131
265	280	889	129
261	275	876	127
256	270	855	124
252	265	841	122
247	260	827	120
243	255	807	117
238	250	793	115
233	245	779	113
228	240	765	111
219	230	731	106
209	220	696	101
200	210	669	97
190	200	634	92
181	190	607	88
171	180	579	84
162	170	545	79
152	160	517	75
143	150	490	71
133	140	455	66
124	130	427	62
114	120	393	57

Table F.2
MPC Yield and Tensile Data

Material	Parameter	Yield and Tensile Parameter Constants (1), (2)					
		A_0	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5
Carbon Steel with $\sigma_{ys} \leq 40 \text{ ksi}$	σ_{ys}	3.5597435E-02	-5.5648438E-04	1.2182325E-06	-1.8210422E-09	1.2840057E-12	-3.7019131E-16
	σ_{uts}	-3.1558675E-02	7.9423823E-04	-6.2091189E-06	1.5915891E-08	-1.6369700E-11	5.6191204E-15
C-1/2Mo	σ_{ys}	3.1111810E-02	-5.1713330E-04	1.3656653E-06	-1.9196382E-09	1.6006149E-12	-6.6169444E-16
	σ_{uts}	5.7801897E-02	-8.0842027E-04	1.1756835E-06	8.7008977E-11	-6.7722618E-13	3.6235837E-17
1-1/4Cr-1/2Mo Annealed	σ_{ys}	3.1111810E-02	-5.1713330E-04	1.3656653E-06	-1.9196382E-09	1.6006149E-12	-6.6169444E-16
	σ_{uts}	5.7801897E-02	-8.0842027E-04	1.1756835E-06	8.7008977E-11	-6.7722618E-13	3.6235837E-17
1-1/4Cr-1/2Mo N&T	σ_{ys}	4.5732479E-02	-7.3532107E-04	2.3268109E-06	-3.9803980E-09	3.4450521E-12	-1.2741522E-15
	σ_{uts}	3.2332577E-02	-4.7810813E-04	7.7091662E-07	-7.8371239E-11	-5.6239737E-13	1.1351646E-16
2-1/4Cr-1Mo Annealed	σ_{ys}	3.1111810E-02	-5.1713330E-04	1.3656653E-06	-1.9196382E-09	1.6006149E-12	-6.6169444E-16
	σ_{uts}	5.7801897E-02	-8.0842027E-04	1.1756835E-06	8.7008977E-11	-6.7722618E-13	3.6235837E-17
2-1/4Cr-1Mo N&T	σ_{ys}	4.5732479E-02	-7.3532107E-04	2.3268109E-06	-3.9803980E-09	3.4450521E-12	-1.2741522E-15
	σ_{uts}	3.2332577E-02	-4.7810813E-04	7.7091662E-07	-7.8371239E-11	-5.6239737E-13	1.1351646E-16
2-1/4Cr-1Mo Q&T	σ_{ys}	4.5732479E-02	-7.3532107E-04	2.3268109E-06	-3.9803980E-09	3.4450521E-12	-1.2741522E-15
	σ_{uts}	3.2332577E-02	-4.7810813E-04	7.7091662E-07	-7.8371239E-11	-5.6239737E-13	1.1351646E-16

Notes For Table F.2:

- Units for the equations in this table are as follows: σ_{ys} and σ_{uts} are in ksi and the temperature, T , is in degrees Fahrenheit.
- σ_{ys} is the value of the yield stress at temperature where σ_{ys}^r is the value of the yield stress (minimum, average, or maximum as applicable) at room temperature.

$$\sigma_{ys} = \sigma_{ys}^r 10^M \quad (F.153)$$

where

$$M = A_0 + A_1 T + A_2 T^2 + A_3 T^3 + A_4 T^4 + A_5 T^5 \quad (F.154)$$

- σ_{uts} is the value of the ultimate tensile stress at temperature where σ_{uts}^r is the value of the ultimate tensile stress (minimum, average, or maximum as applicable) at room temperature.

$$\sigma_{ut} = \sigma_{ut}^r 10^M \quad (F.155)$$

where

$$M = A_0 + A_1 T + A_2 T^2 + A_3 T^3 + A_4 T^4 + A_5 T^5 \quad (F.156)$$

- Temperature limitations for the equations in this table are defined in the following below:

Classification	Lower Temperature Limit	Upper Temperature Limit
Ferritic Materials	70°F	1100°F
Austenitic Stainless and Nickel Base Alloys	70°F	1500°F

- The yield and tensile strength values tabulated in the ASME Code, Section II, Part D for elevated temperature may differ from the values derived using the temperature trend coefficient, M , derived from the coefficients in this table when the room temperature yield and tensile strength value from the Code is used. This difference is associated with the robust nature used in performing the regression of the yield and tensile strength data.