Curvas S/N

A partir dos resultados dos ensaios, em que cada ponto experimental corresponde ao número de ciclos para a falha de um corpo de prova ensaiado com um determinado valor da amplitude de tensão ou tensão nominal máxima, são obtidas as curvas tensão-vida (S/N). Devido à natureza estatística da fadiga, conforme já descoberto por Wöhler, entre 1850 e 1860, os resultados do ensaio de fadiga, curva S-N, apresenta uma dispersão dos dados que necessitam de ajuste por técnicas estatísticas.

Existem basicamente dois tipos de curva S/N, representados na Figura 1. Aços em geral e ligas de titânio que sofrem endurecimento cíclico apresentam um patamar na curva S/N, que corresponderia ao limite de resistência à fadiga do material. Este limite representa o maior valor de amplitude de tensão alternada que não irá causar a falha do material para um número de ciclos infinito. No caso de materiais policristalinos, a ocorrência deste patamar foi relacionada à parada (arrest) de trincas logo após a nucleação, ao encontrarem obstáculos microestruturais como contornos de grãos [Klesnil, 1992]. Para a maioria das ligas não ferrosas (por exemplo, ligas de alumínio, cobre e magnésio) a curva S/N não apresenta o patamar, mantendo a tendência de queda para números de ciclos cada vez maiores.

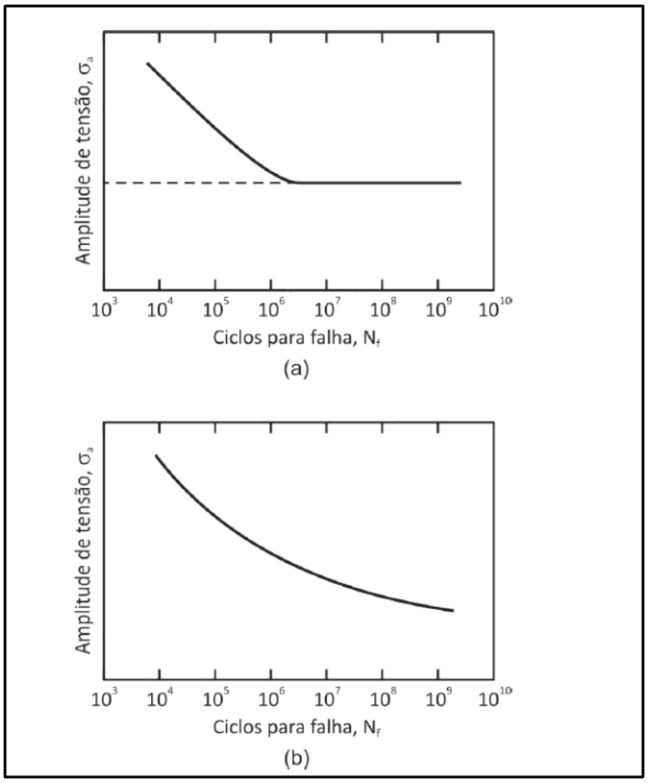

Figura 1 Curva S/N típicas: (a) aços e ligas de titânio; (b) metais não ferrosos em geral.

Diversas equações foram propostas para descrever a curva S/N [Conway, 1991]. Uma das mais simples e aceitáveis é a clássica lei de Basquin, representada pela equação (1). Esta expressão relaciona a amplitude de tensão σ_a com o número de reversões para a falha, 2Nf (um ciclo de carregamento corresponde a duas reversões). O coeficiente de resistência à fadiga, σ'_f é dado pela extrapolação da curva S/N para o primeiro meio-ciclo ($2N_f = 1$). O parâmetro b é o expoente de resistência à fadiga.

$$\sigma_a = \sigma'_f \left(2N_f\right)^b \quad (1)$$

A norma ASTM E739 define algumas relações para o ajuste dos dados de fadiga de forma a representar o trecho linear ou linearizado das curvas S/N. As expressões seguem o modelo linear dado pela equação (2), onde Y = log(Nf), A e B são os parâmetros de ajuste e X é um termo representativo do carregamento aplicado. Pode ser utilizado o método estatístico dos mínimos quadrados. No caso das curvas S/N, tem-se X = S ou X = log(S), onde S pode assumir o valor da tensão máxima do ciclo de carregamento ($\sigma_{máx}$) ou da amplitude de tensão (σ_a). Quando X = log(σ_a), tem-se uma expressão equivalente à equação de Basquin. A Figura 2 apresenta os resultados de ensaios de fadiga por flexão rotativa de um lote de corpos de prova de aço microligado de baixo carbono com LE = 516 MPa e LR = 604 MPa e a correspondente reta de ajuste para a região de vida finita. A modelagem baseada em expressões na forma da equação (2) é eficaz para $10^3 < N_f < 10^6$. Em regimes de vida acima de 10^6 ciclos, esses modelos são obviamente incapazes de representar a curvatura de transição para o patamar apresentado por alguns materiais. Na região do patamar, estipula-se um número de ciclos para suspender o ensaio (run-out), usualmente 10^7 ciclos. A determinação do patamar pode ser feita pelo método escada (staircase method). Em determinadas situações a curva S/N é melhor representada por modelos não-lineares.

$$Y = A + BX \quad (2)$$

A dispersão dos resultados é um aspecto importante dos ensaios de fadiga, que pode refletir uma variabilidade inerente ao material ensaiado (devido à natureza aleatória de sua microestrutura), mas depende também do acabamento superficial dos corpos de prova. Do ponto de vista estatístico, uma curva S/N como a da Figura 2 representa o comportamento médio, ou seja, para um dado nível de tensão, a probabilidade de que a

falha por fadiga ocorra com um número de ciclos menor ou igual ao determinado pela curva é de 50%. Obviamente em projetos para vida finita deve-se adotar uma curva S/N que caracterize uma vida mínima esperada, de modo que a grande maioria das falhas ocorra a um número maior de ciclos para o nível de tensão adotado. Uma forma de fazer isso é usar as curvas de projeto 2-sigma ou 3-sigma, obtidas deslocando-se para a esquerda a curva mediana S/N, por uma distância correspondente a 2 ou 3 vezes o desvio-padrão da amostra. A escolha do limite inferior para a curva S/N depende do custo, da política de segurança e de normas industriais. Na indústria automotiva é comum usar a curva limite inferior R95C90 (*Lower bound*), que assegura o número de ciclos com 95% de probabilidade de sobrevivência (confiabilidade) com nível de confiança de 90%, para um dado nível de tensão. Como o número de ensaios geralmente é limitado, este nível de confiança (C) é introduzido no cálculo para assegurar que haja 90% de chance de que o valor real de 95% de confiabilidade (R) esteja acima do limite mínimo. A Figura 3 mostra uma curva S/N média e seu correspondente intervalo de confiança de 95% (significando que existe 95% de probabilidade de a curva média real estar dentro desse intervalo determinado a partir da amostra ensaiada), bem como a curva de projeto R95C90 (linha tracejada).

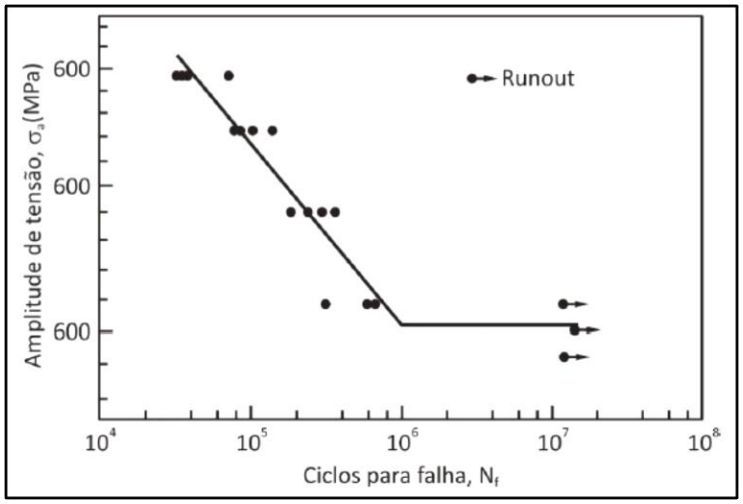

Figura 2 Pontos experimentais e a correspondente curva S/N em flexão rotativa para um aço microligado de baixo carbono.

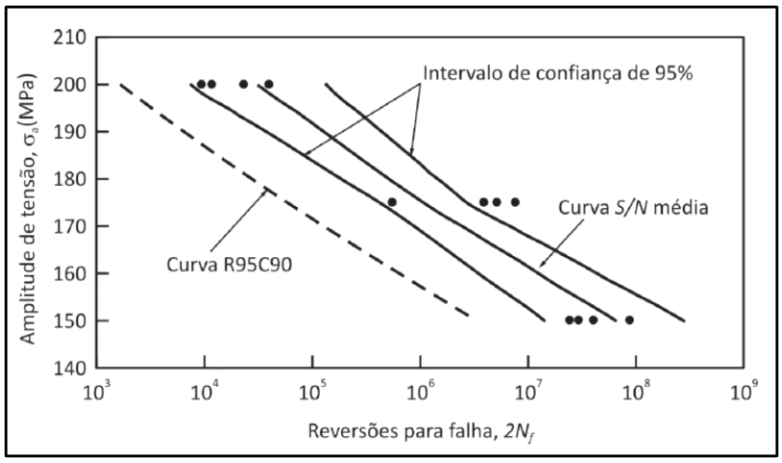

Figura 3 Curva S/N com intervalo de confiança e curva de projeto R95C90.

Para garantir o conceito de R95C90, por exemplo, ou outro padrão de curvas *lower bound*, podem ser utilizados coeficientes como o K de Owen, representado por $K_{Owen.}$ Desse modo, no lugar de se utilizar na curva ajustada, o deslocamento para esquerda, referente ao desvio padrão, utiliza-se o K_{Owen} (Fig.4).

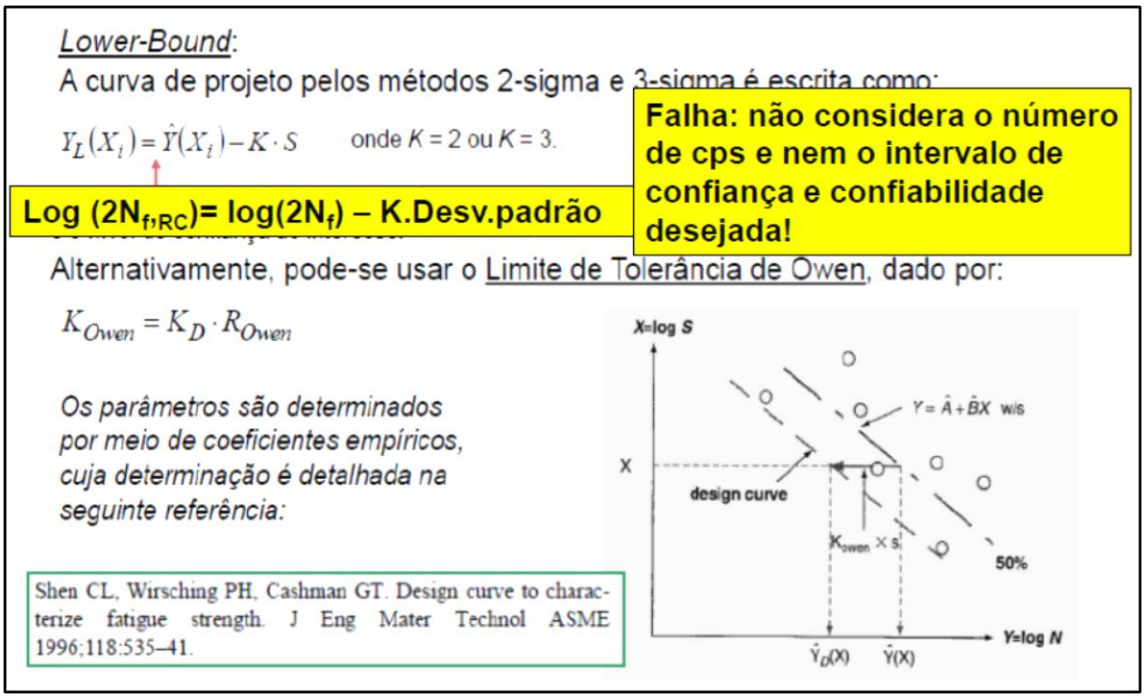

Figura 4 – Substituição do K, como duas ou três vezes o desvio padrão, pelo $K_{Owen.}$

Os valores do K_{Owen} são tabelados e levam em consideração o número de corpos-de-prova, o intervalo de confiança e a confiabilidade, conforme tabela 1.

Tabela 1 – Valores do K_{Owen}

TABLE 4.5 K_{Owen} Factors for the Approximate Owen Tolerance Limits

n_S	$C = 0.90$			$C = 0.95$		
	$R = 0.90$	$R = 0.95$	$R = 0.99$	$R = 0.90$	$R = 0.95$	$R = 0.99$
6	2.862	3.504	4.750	3.560	4.331	5.837
7	2.608	3.190	4.319	3.167	3.846	5.173
8	2.441	2.987	4.043	2.910	3.534	4.751
9	2.323	2.843	3.851	2.728	3.314	4.455
10	2.253	2.736	3.707	2.592	3.151	4.237
11	2.162	2.651	3.595	2.485	3.024	4.069
12	2.105	2.583	3.505	2.400	2.923	3.936
13	2.057	2.526	3.430	2.331	2.840	3.827
14	2.016	2.478	3.367	2.272	2.771	3.737
15	1.980	2.436	3.313	2.222	2.712	3.660
16	1.949	2.400	3.266	2.178	2.661	3.594
17	1.922	2.369	3.225	2.140	2.617	3.536
18	1.898	2.340	3.189	2.106	2.577	3.485
19	1.876	2.315	3.156	2.076	2.542	3.440
20	1.857	2.292	3.127	2.048	2.510	3.399
21	1.839	2.272	3.100	2.024	2.482	3.363
22	1.822	2.252	3.076	2.001	2.456	3.329
23	1.807	2.235	3.054	1.981	2.432	3.300
24	1.793	2.219	3.034	1.961	2.410	3.271
25	1.781	2.204	3.015	1.947	2.389	3.247
26	1.769	2.191	2.997	1.927	2.370	3.221
27	1.757	2.178	2.981	1.912	2.353	3.199
28	1.747	2.166	2.966	1.898	2.337	3.178
29	1.737	2.155	2.952	1.885	2.321	3.158
30	1.728	2.144	2.939	1.872	2.307	3.140

Source: From Williams et al., 2003.