

EFEITO DE VIDAS CURTAS E INTERMEDIÁRIAS SOBRE O FATOR DE CONCENTRAÇÃO DE TENSÕES PRÁTICO NO AÇO ASTM A572-50-10

André E. Scian Meneghin, Eng.

Wendell R. Marques, Eng.

Jorge Luiz de A. Ferreira, Dr.,

Departamento de Engenharia Mecânica - Universidade de Brasília, Campus Universitário Darcy Ribeiro, Asa Norte, Brasília, Brasil, CEP 70910-900 – e-mail: jorge@unb.br

Resumo: Este trabalho tem como objetivo realizar um estudo experimental sobre o efeito da vida de fadiga sob condições de vidas curtas e intermediárias sobre o fator prático de concentração de tensões, K_f . Para esse fim foram ensaiados 72 corpos de prova construídos em aço ASTM-A572-50-10 sob condições de flexão rotativa. Tais corpos de prova foram divididos em três grupos de igual tamanho. Dois grupos caracterizam-se por possuírem raios de entalhe de 0,4 e 0,8 mm e o terceiro não entalhado. Com base nos resultados obtidos pôde-se observar que o fator K_f é fortemente dependente do tempo de vida do espécime.

Palavras-Chave: concentração de tensões, fadiga, vidas curtas e intermediárias.

1 - INTRODUÇÃO

Fadiga é um processo de degradação estrutural permanente, progressivo e localizado que ocorre em um material submetido a condições que produzem tensões e deformações variáveis em algum ponto (ou alguns pontos) que pode culminar em uma trinca e na fratura completa da estrutura após um número suficiente de ciclos. Um dos métodos mais utilizados para a previsão da vida de fadiga é o S-N. Este método correlaciona tensão aplicada ao número de ciclos necessários para o aparecimento de uma trinca de fadiga. Tipicamente esse método é aplicado para níveis de vida que superam 10^3 ciclos.. Uma maneira fácil de se obter a resistência à fadiga, S_n , correspondente a um dado número de ciclos N é obtida estimando-se o diagrama S-N. Em escala logarítmica a linha de tendência de tal diagrama apresenta comportamento linear, conforme ilustrado na Fig. 1.

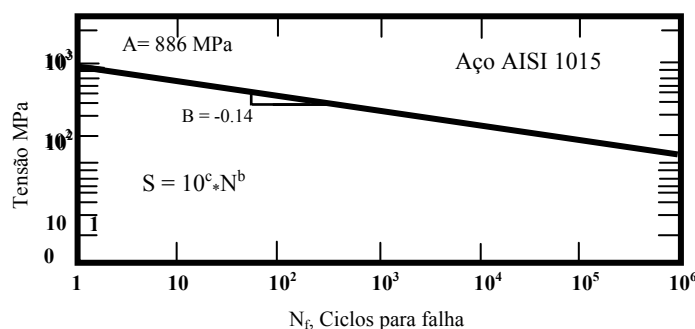


Figura 1 – Curva S-N Típica

A relação entre a tensão e vida segundo a metodologia S-N é expressa pela Eq. (1)

$$S = 10^C \cdot N^b \quad (1)$$

onde S é a tensão nominal, N é a número de ciclos até o início da trinca, C e b são parâmetros da curva S-N

O grande problema na utilização desse método está associado a previsões de vida de fadiga em condições em que as tensões atuantes excedem o limite de escoamento do material. Isso ocorre porque as tensões utilizadas na equação S-N são nominais e estimadas considerando regime linear elástico. Em condições linear elásticas, a relação entre a máxima tensão na região do entalhe, σ_{\max} , e a tensão nominal nesse ponto de tensão máxima, S , é chamada de fator de concentração de tensões teórico, K_t , definido pela Eq. (2):

$$K_t = \frac{\sigma_{\max}}{S} \quad (2)$$

Considerando o modelo S-N de previsão de vida a fadiga, a tensão usada na equação é estimada com base na seção resistente, isto é, a área existente após o entalhe ter sido removido. Entretanto, sob condições de fadiga, o comportamento observado experimentalmente indica que a tensão máxima atuante na região do entalhe, σ_{\max} , não pode ser obtida utilizando-se o fator de concentração de tensões teórico. Nessas situações, utiliza-se o fator de concentração de tensões prático, K_f . Nessas situações, o fator de redução para vidas longas de fadiga, especificamente para $N \geq 10^6$ ciclos, é chamado de fator prático de concentração, ou fator de entalhe a fadiga, sendo denotado por K_f e definido pela Eq. (3).

$$K_f = \frac{S_{nu}}{S_{nn}} \quad (3)$$

onde S_{nu} e S_{nn} representam respectivamente os limites de resistência a fadiga de um espécime sem entalhe e entalhado, com as mesmas seções transversais.

Basicamente, tal parâmetro é função do material, do raio do entalhe, e do fator de concentração teórico. Estando relacionadas pela Eq. (4).

$$K_f = 1 + q \cdot (K_t - 1) \quad (4)$$

onde q é chamado de fator de sensibilidade ao entalhe e o valor limite de K_f está limitado entre 1 e K_t , como pode ser observado na Fig. 2, onde é apresentado o comportamento típico de K_f em relação a K_t .

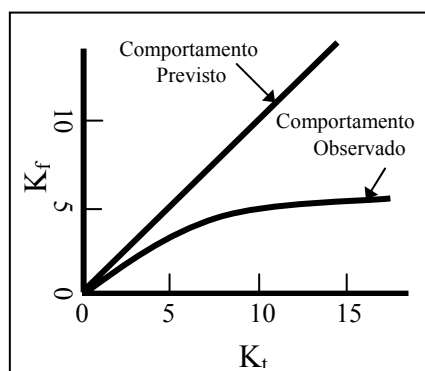


Figura 2 - Relação Típica entre K_t e K_f . [2]

O gradiente de tensão, $\frac{\partial \sigma}{\partial l}$, onde l é uma dimensão característica, é especialmente elevada

próximo a raiz do entalhe e reduz-se rapidamente com o distanciamento da ponta do entalhe. Isso implica que a tensão média em um volume elementar próximo a ponta do entalhe tende a ser menor do que o valor de pico na ponta do entalhe. Assim, baseando-se na hipótese que o material não é sensível a picos de tensão, mas sim a tensões médias que atuam sobre uma região de tamanho pequeno, mas finito, consegue-se explicar o motivo pelo qual o efeito do concentrador de tensões não é tão crítico quanto deveria ser se considerado K_t . [2]. Considerando materiais dúcteis, o fator prático de concentração de tensões, K_f , conforme definido na Eq. (3), é usado para corrigir o limite de resistência para vidas longas, S_n , para membros entalhados. Entretanto, quando são consideradas vidas curtas e intermediárias tal valor se torna conservativo. Isso se deve basicamente ao efeito do escoamento reverso que acontece na ponta do entalhe. Uma consequência deste comportamento é que a razão entre a resistência a fadiga de um espécime não entalhado e outro entalhado torna-se menor do que K_f . Desta forma, é usual definir K'_f como uma função da vida, ou seja:

$$K'_f = f(N) = \frac{S_{fu}}{S_{fn}} \quad (5)$$

onde K'_f é o fator prático de concentrações de tensões para vidas curtas e intermediárias, S_{fu} e S_{fn} representam, respectivamente, as tensões que causam falha para N ciclos de vida. A Fig. 3 ilustra a relação empírica entre K'_f e o limite de resistência para vidas de 1000 ciclos e diferentes materiais.

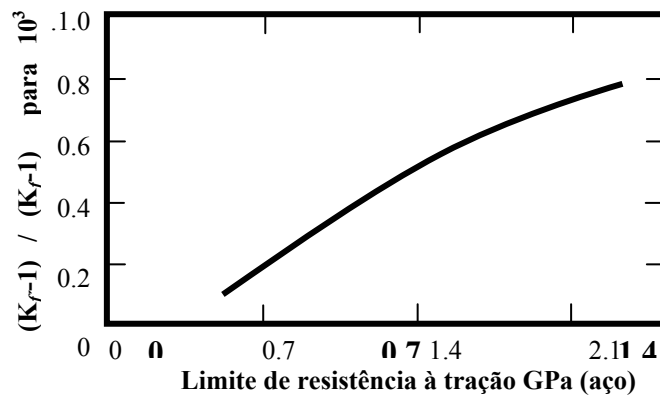


Figura 3 Relação entre K'_f e K_f como função do limite de resistência [12].

Considerando a curva de tendência apresentada na Fig. 3, pode-se verificar que o fator prático de concentração de tensões para vidas curtas é fortemente dependente do limite de resistência a tração. Sendo muito atenuado para aços de baixa tensão de resistência (tipicamente dúcteis) e sendo pouco influenciado quando a tensão de resistência é elevada.

Dois modelos empíricos que descrevem o efeito da vida sobre o fator de concentrações prático: De uma forma geral, a diferença básica entre esses modelos está associada a definição de K'_f para a vida de 10^3 ciclos.

Segundo Bannantine [12], a curva S-N para componentes entalhados, definida como *S-N modificada*, apresenta como limite de resistência a fadiga para 10^3 ciclos o valor obtido na Eq. (6)

$$S_{1000n} = \frac{S_{1000u}}{K'_f} \quad (6)$$

onde S_{1000n} é o limite de resistência do espécime entalhado a 10^3 ciclos, S_{1000u} é o limite de resistência do espécime não entalhado a 10^3 ciclos, e K'_f é estimado com base no gráfico apresentado na Fig. 3. Na Fig. 4 apresenta-se a curva S-N modificada.

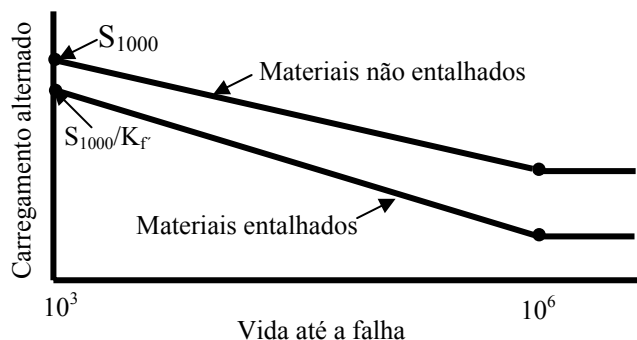


Fig. 4. Modificação da curva S-N para componentes entalhados (Aproximação de Juvinall) [12]

Além do método acima descrito, Bannantine [12] descreve o método alternativo para previsão da curva S-N para componentes entalhados, considerando o diagrama S-N em escala Log-Log este método usa uma linha reta para conectar o limite de resistência a 10^6 ciclos, S_m/K_f , a tensão verdadeira na fratura σ_f . Embora este método incorpore a tendência que o efeito de entalhe diminui com a vida a fadiga, o mesmo parece se mostrar mais conservativo. Outra característica digna de nota é que a curva S-N é definida para vidas menores que 10^3 ciclos, o que é uma hipótese não apropriada. Na Fig. 5 apresenta-se a curva S-N alternativa.

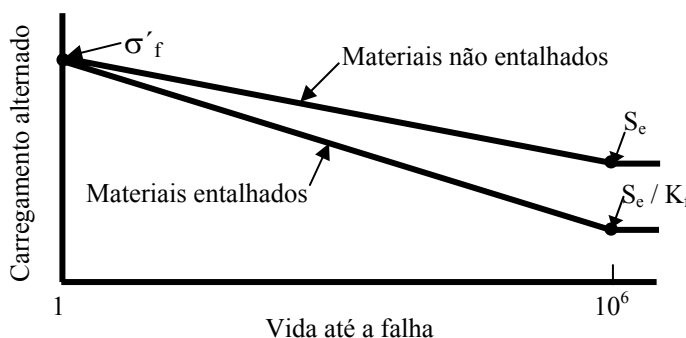


Figura 5 - Curva S-N alternativa para componentes entalhados [12].

O objetivo deste trabalho é o de estimar experimentalmente a curva S-N para corpos de prova entalhados fabricados em aço ASTM-A572-50-1 sob condições de vida intermediária e curta de modo a se avaliar o efeito da vida sobre o fator prático de concentração de tensões.

2 - MATERIAIS E MÉTODOS

Neste item serão apresentados os materiais utilizados durante o desenvolvimento do trabalho, os procedimentos seguidos para suas caracterizações e o tipo de ensaio realizado. O material utilizado nesse trabalho foi o ASTM-A572-50-1. Tal material foi selecionado por ser um aço estrutural amplamente utilizado na construção de pontes, viadutos, estruturas offshore, etc. As propriedades mecânicas e químicas desses aços são apresentadas, respectivamente nas Tabs. 1 e 2.

Tabela 1 – Propriedades Químicas – Conforme Especificado pelo Fabricante

C Max	Mn	Si Max	P Max	S Max	Nb
0,20	0,80 a 1,50	0,40	0,040	0,050	0,005 a 0,050

Tabela 2 - Propriedades Mecânicas

Tração (Transversal)			Dobramento (Longitudinal)		
S_y (MPa)	S_{rt} (MPa)	Alongamento		Espessura (mm)	Diâmetro
		Espessura (mm)	% (min)		
≥ 345	≥ 450	$e \geq 50$	16	$25,4 < e \leq 50$	2,5 e

2.1 - ENSAIO DE FADIGA

Os ensaios de fadiga sob flexão rotativa foram realizados em uma máquina da marca "BUDD" Modelo RFB-200. Os corpos de prova, CPs, utilizados nestes ensaios são apresentados nas Figs. 1 e 2. A seguir as Figs. 6 e 7 que representam os CPs com e sem entalhe

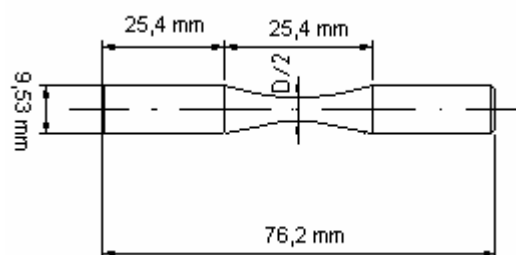


Figura 6 - Modelo sugerido de corpo de prova sem entalhe (Manual Budd)

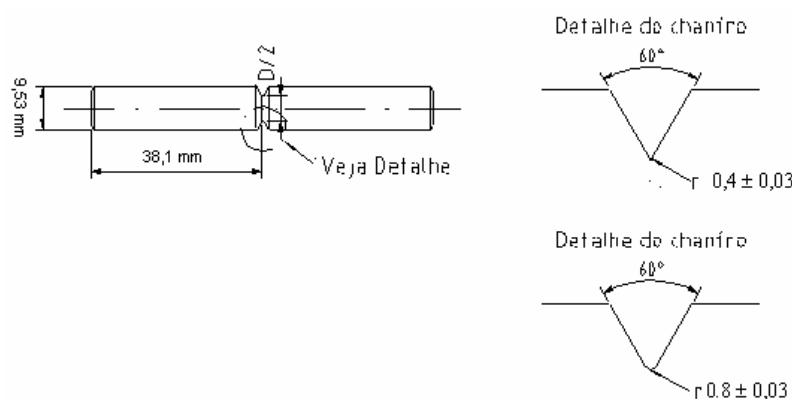


Figura 7 - Modelo sugerido de corpo de prova com entalhe (Manual Budd)

Para a determinação da curva S-N procurou-se inicialmente utilizar três diferentes níveis de tensão: $0,80.S_u$, $0,70.S_u$ e $0,60.S_u$ [4]. Conforme recomenda a norma ASTM E - 739/91, o número mínimo necessário de espécimes para se montar uma curva padrão S-N depende do tipo de ensaio que será realizado. Neste estudo trabalhou-se no intervalo de 12 a 24 CPs, que segundo a norma, corresponde ao tipo de teste para se obter "dados admissíveis para projeto" ou "dados para análise de confiabilidade". O grau de confiabilidade utilizado, α , foi de 10%, o erro percentual, ϵ , de 5% e o coeficiente de variância, c.v, de 7% [4]. 72 corpos de prova foram ensaiados, sendo 24 corpos de cada modelo (Sem entalhe, entalhado com raio de adoçamento de 0,4 mm e entalhado com raio de adoçamento de 0,8 mm).

2.1 - ENSAIO DE DUREZA

Ensaio de dureza foram realizados com o objetivo de usar tais medidas para inferir a resistência a tração, S_{rt} , e o limite de escoamento. Isso é realizado considerando, respectivamente, as Eqs. (8) e (9). Além disso, tais ensaios serviram para verificar se durante o processo de corte por oxiacetileno da chapas ocorreu mudança nas propriedades mecânicas nas proximidades dessa região.

$$S_{rt} = 3,488 \cdot Hb \quad (8)$$

$$S_y = 3,62 \cdot Hb - 206,8 \quad (9)$$

Os testes foram realizados utilizando-se um aparelho medidor de dureza tipo HPO 250 VEB Werkstoffprüfmaschinen Leipzig, utilizando uma esfera de 2,5 mm de diâmetro. Os resultados obtidos nesses ensaios são apresentados na Tab. 3. É importante observar que os valores de dureza medidos nas regiões próximas às bordas do material apresentaram um pequeno aumento quando comparado aos encontrados no centro, ou seja, a região das bordas provavelmente representa uma zona termicamente afetada. Com base nas medidas tomadas no centro da peça pode-se afirmar também que a dureza do aço ASTM A 572-50-1 é de aproximadamente 168 Hb. Com a intenção de verificar se o material sofreu encruamento após o processo de fabricação dos corpos de prova novos ensaios de dureza foram realizados. Tais resultados são apresentados na Tab. 4.

Tabela 3 - Valores obtidos por Ensaio de dureza Brinell

Local	Média (Hb)	Desvio-Parão (Hb)
Centro	168,1	2,8
Bordas	178,5	12,0

Tabela 4 – Propriedades Mecânicas Estimadas para o aço ASTM A 572-50-1

Estatística	Valor (Hb)	S_{rt} (MPa)	S_y (MPa)
Média	170,9	596	412
Desvio Padrão	5,1	17,8	18,5

Como se pode observar a dureza média obtida após a usinagem dos corpos de prova foi igual a $170,9 \pm 5,1$ Hb. A dureza obtida antes da usinagem foi igual a $168 \pm 2,8$ Hb. Assim, com base nesses resultados pôde-se verificar a inexistência de encruamento do material durante a fabricação.

2.2 - ENSAIO DE TRAÇÃO

O corpo de prova utilizado na realização desse ensaio foi fabricado de acordo com a norma ASTM A-48 e as dimensões são mostradas na Fig. 8.

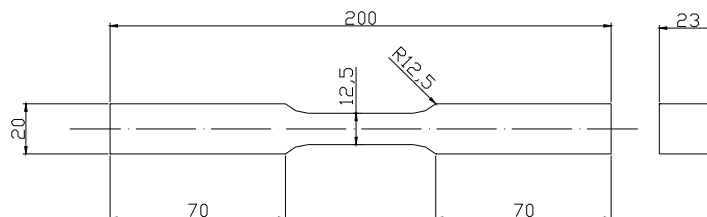


Figura 8 - Corpo de prova de tração.

Devido a pequena quantidade de material disponível somente dois ensaios foram realizados, resultando nos valores de 585 e 486 MPa para as tensões de resistência e de escoamento, respectivamente. Deve-se ressaltar que tais valores são da ordem de grandeza dos obtidos segundo as Eqs. (8) e (9).

3 - ANÁLISE DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS DE FADIGA

Durante a fabricação dos corpos de prova, ocorreram problemas de caráter dimensional, que ocasionaram uma variação considerável no nível de tensão nominal aplicada na seção de teste. Por esse motivo, o primeiro passo na análise dos dados consistiu na estimativa das tensões nominais, nas vidas resultantes e nas suas respectivas dispersões. Tais resultados são apresentados na Tab. 5

Tabela 5. Condições de Ensaio e Respective Resultados.

Raio do Entalhe (mm)	Tensão Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Vida Média (Ciclos)	Desvio Padrão (Ciclos)
S/ Entalhe	339,2	8,2	4,80E+05	3,03E+05
S/ Entalhe	367,4	12,1	2,06E+05	1,49E+05
S/ Entalhe	395,0	4,1	1,36E+05	5,17E+04
0,8	353,2	4,0	3,46E+04	3,71E+03
0,8	319,1	2,3	6,01E+04	3,30E+04
0,8	282,6	5,4	1,15E+05	4,22E+04
0,4	285,1	1,2	6,89E+04	5,74E+04
0,4	317,6	4,7	6,35E+04	2,27E+04
0,4	352,9	4,1	2,58E+04	8,47E+03

Considerando os resultados apresentados na Tab. 5, pode-se perceber que a dispersão associada as tensões nominais atuantes na região entalhada dos CPs foi praticamente desprezível, 1,5 % de coeficiente de variação. Entretanto, considerando-se os ciclos de carregamento necessários para a falha por fadiga, observa-se que uma dispersão muito elevada, coeficiente de variação da ordem de 47 %. Isto se explica pela natureza aleatória do fenômeno de fadiga. Com base nos resultados apresentados na Tab. 6 construiu-se o diagrama S-N considerando os corpos de prova entalhados e não entalhados. Tal diagrama é apresentado na Fig. 9.

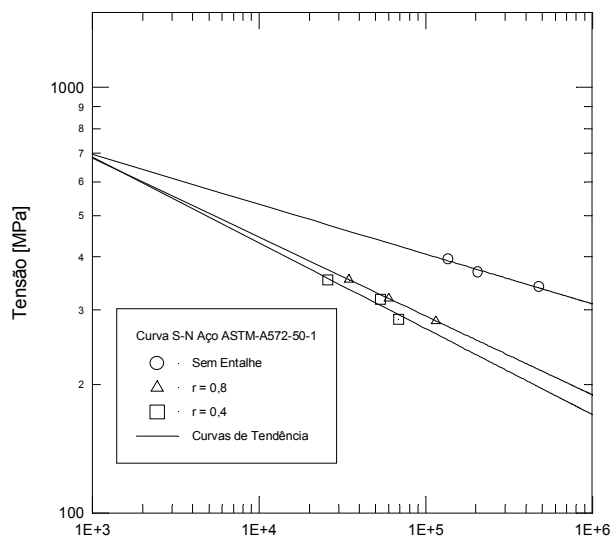


Figura 9 - Curva S-N para os resultados experimentais obtidos.
Número de ciclos para falha

Uma comparação entre as curvas experimentais e as curvas teóricas baseadas nos modelos apresentados em Juvinal [3] e em Bannantine [12] são apresentadas, respectivamente, nas Figs. 10 e 11.

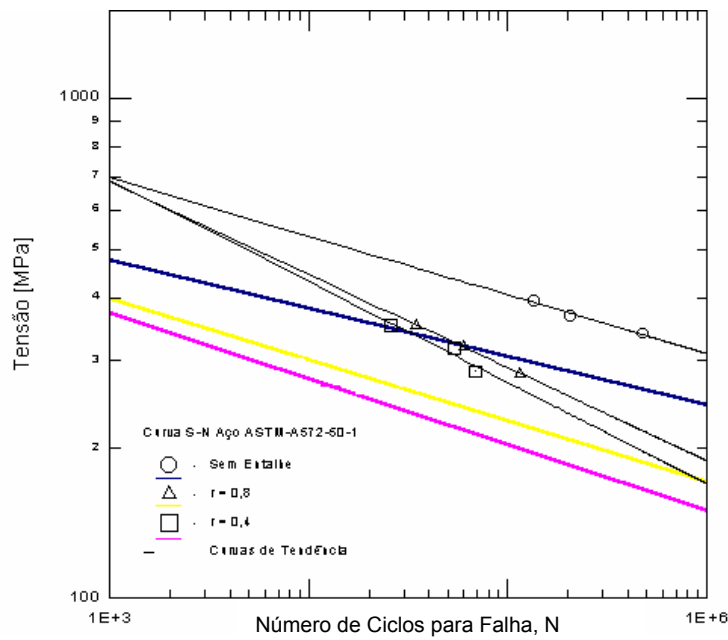


Figura 10 - Comparação entre os Resultados Experimentais e Teóricos Apresentados em Juvinal [3]

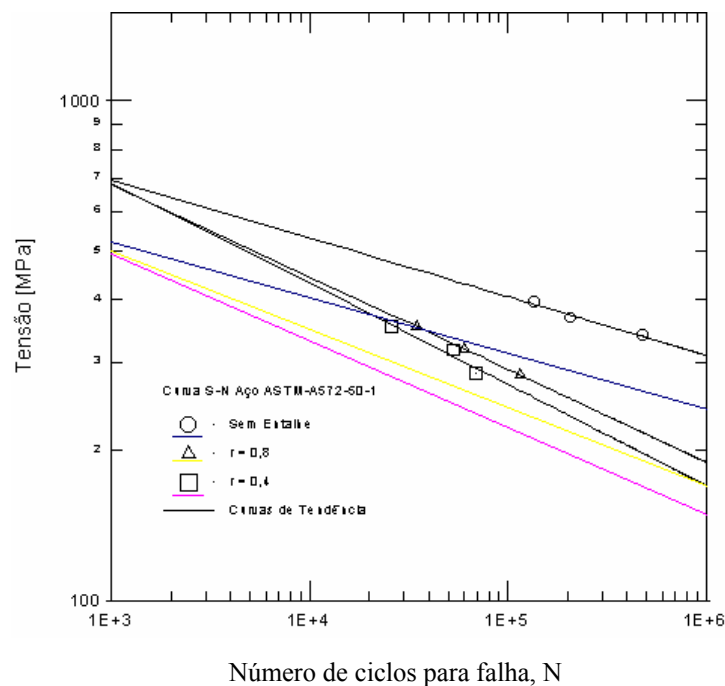


Figura 11 - Comparação entre os Resultados Experimentais e Teóricos Apresentados em Bannantine [12]

Ao se analisar os gráficos apresentados nas Figs. 10 e 11, pode-se observar que, para o aço ASTM A 572-50-10, o método de previsão que mais se aproximou dos resultados experimentais foi o que segue o modelo apresentado na ref. [3]. A partir dos resultados obtidos na Tab. 5, foram calculados os fatores de concentração de tensões práticos, K_f para os corpos de prova com raio de entalhe 0,4 e 0,8 mm. O que permitiu determinar qual o comportamento do fator de concentração de tensão K_f para cada raio e ainda comparar os respectivos fatores obtidos experimentalmente com os

previstos com base na ref. [3]. Com base nos resultados apresentados na Fig. 12 verifica-se que o comportamento dos fatores de concentração de tensão para cada raio de adoçamento e para os valores experimentais e previstos, sendo K_f para o caso do raio 0,4 maior que o de 0,8 mm, o que mostra uma maior influência do concentrador de tensão num raio de adoçamento menor. Outra observação importante é que ao se comparar as curvas experimentais com as teóricas, o comportamento foi bastante semelhante, porém, a curva experimental se apresenta trasladada no eixo das abscissas, o que pode ser explicado pelo processo de fabricação dos corpos, que deixou a região do entalhe irregular.

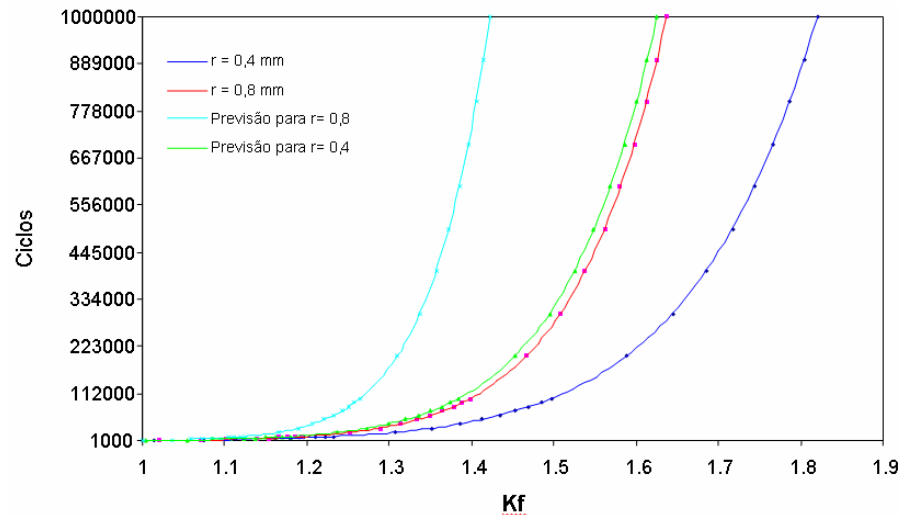


Figura 12 Comparação dos fatores de concentração de tensão K_f

5. Conclusões

O objetivo principal desse trabalho foi determinar a influência do fator de concentração de tensões K_f , na vida à fadiga do aço ASTM A 572-50-10, utilizando para isso corpos de prova padronizados submetidos ao ensaio de flexão rotativa. Para que os resultados pudessem ser atingidos, um extenso trabalho de caracterização do material foi realizado. Ensaio de tração, dureza, micrografia, foram alguns dos meios usados para caracterizar o material. A fabricação dos corpos de prova envolveu um trabalhoso processo de transformação do material base até se obter o corpo de prova acabado e pronto para o ensaio de flexão rotativa. Mais uma vez o material foi submetido a um ensaio de dureza para verificar se todo o processo de fabricação provocou encruamento no material. Todos os corpos de prova utilizados foram medidos num projetor de perfil e devidamente etiquetados para que se pudesse relacionar os resultados obtidos durante o ensaio de fadiga com possíveis variações no diâmetro dos C.Ps, o que não pode ser observado devido à grande dispersão dos resultados. Devido ao processo demorado de fabricação dos corpos de prova, os ensaios só puderam ser realizados em três níveis de tensão, o que impediu a obtenção de dados que permitissem quantificar de forma mais consistente a influência de K_f na vida à fadiga do material. A partir dos resultados obtidos, a principal conclusão que se pode tirar é que o concentrador de tensão, (no caso do experimento o entalhe com raio de adoçamento variado), tem influência na vida à fadiga do material, fazendo com que ela diminua. Através da enorme variação dos resultados obtidos para corpos de prova semelhantes em iguais níveis de tensão, foi possível perceber a natureza aleatória do fenômeno fadiga. A curva S-N experimental obtida, mostrada na Fig. 5.1, apresenta maior confiabilidade na região entre as tensões usadas nos ensaios. As demais regiões foram obtidas de pontos extrapolados, e possuem caráter apenas ilustrativo para que se possa visualizar melhor a curva S-N, pois a norma ASTM E 739-91 desaconselha que os dados sejam extrapolados, porque dados experimentais de fadiga apresentam uma dispersão muito elevada. Aparentemente, para esse material específico, o efeito do concentrador de tensões parece ser melhor representado pelo modelo proposto por Juvinall. [3]

6. Referências Bibliográficas

- [1] BRANCO, C. A. G. , "Mecânica dos Materiais", Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa, 1985.
- [2] DOWLING, NORMAN E. , "Mechanical Behavior of Materials - Engineering Methods for Deformation, Fracture, and Fatigue", Prentice-Hall International, INC, 1993.
- [3] JUVINALL, R. C. & MARSHEK, K. M. , "Fundamentals of Machine Component Design", John Wiley & Sons, United States of America, 1991.
- [4] LIPSON, C. & SHETH, N. J. , "Statistical Design and Analysis of Engineering Experiments", Mac-Graw-Hill Book Company, 1973.
- [5] SHIGLEY, J. E. & MISCHE, C. R. , "Mechanical Engineering Design", Editora McGraw-Hill, Singapura, 1989.
- [6] SHIGLEY, J. E. , "Elementos de Máquinas 1", Livros Técnicos e Científicos Editora, São Paulo, 1986.
- [7] Associação Brasileira de Metais , "Análise de Fraturas" 5ª impressão
- [8] C.R. Mischke "Prediction of Stochastic Endurance Strength" journal of Vibration, Acoustics, Stress, and Reliability in Design
- [9] H. Neuber, "Theory of Notch Stresses: Principle for Extract Stress Calculations", Edwards, Ann Arbor, Mich., 1946
- [10] R. E. Peterson, "Analytical Approach to Stress Concentration Effects in Aircraft Materials," Technical Report 59-507, U. S. Air Force – WADC Symp. Fatigue Metals, Dayton, Ohio, 1959.
- [11] Society of Automotive Engineers, Fatigue Design Handbook, Vol.4 SAE, Warrendale, Pa., 1968, p.29
- [12] Bannantine, Julie. "Fundamentals of metal fatigue analysis/Julie Bannantine, Jess Comer, James Handrock. 1990.

THE EFFECT OF THE SHORTS AND INTERMEDIARY LIVES ON THE FATIGUE NOTCHED FACTOR IN ASTM A572-50-10 STEEL

André E. Scian Meneghin, Eng., e-mail: am@o2.net.br

Wendell R. Marques, Eng., e-mail: wrm@aipnet.com.br

Jorge Luiz de A. Ferreira, Dr., e-mail: jorge@unb.br

Mechanical Engineering Department - University of Brasília, Campus Universitário Darcy Ribeiro, Asa Norte, Brasília, Brazil, ZIP CODE 70910-900.

***Abstract:** The objective of the present work is to carry out an experimental study on the effect of the fatigue life under short and intermediary lives on the fatigue notched factor, K_f . In this sense, 72 specimens built in ASTM-A572-50-10 steel were subjected to completely reverse bending test. Such specimens were divided in three groups of the same size. Two groups are characterized for they possess notch equal to 0,4 and 0,8 mm and the third group were composed by smooth specimens. Based on the obtained results could be verified that the K_f factor is strongly dependent of the live.*

Keywords: stress concentration, fatigue, short and intermediary lives, fatigue notched factor