



**INFLUÊNCIA DA REFRIGERAÇÃO E DA SEQÜÊNCIA DE
APLICAÇÃO DE CARGAS EM ENSAIOS DE FADIGA FLEXO-ROTATIVOS
NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DO AÇO SAE 8620**

Álvaro Alvarenga Júnior

Mestrado em Engenharia Mecânica – PUC/Minas
Rua Dom José Gaspar, n. 500, Bairro Coração Eucarístico, CEP 30535-610, Belo Horizonte, MG,
Brasil, e-mail: alvarengajr@yahoo.com.br

Tanius Rodrigues Mansur

Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear, CDTN/CNEN
Rua Prof. Mário Werneck, s/n, Pampulha, Caixa Postal 941, 30123-970, Belo Horizonte, MG,
Brasil, e-mail: tanius@cdtn.br

Ernani Sales Palma

Departamento de Engenharia Mecânica e Mecatrônica - PUC/Minas
Rua Dom José Gaspar, n. 500, Bairro Coração Eucarístico, 30535-610, Belo Horizonte, MG, Brasil,
e-mail: palma@pucminas.br

***Resumo.** Utilizando-se ensaios flexo-rotativos refrigerados e não refrigerados levantou-se a curva S-N-P do aço SAE 8620. Notou-se a elevação da temperatura do corpo-de-prova devido a flexo- rotação no ensaio não refrigerado e conseqüente alteração da propriedades mecânicas do material. Em conseqüência destes ensaios, optou-se por utilizar ensaios flexo-rotativos refrigerados para a aplicação de danos controlados. Assim, determinou-se o Limite de Resistência à Fadiga (Se) para o material virgem e utilizando-se quatro níveis de tensões alternadas, aplicou-se danos controlados no aço SAE 8620. Após a aplicação dos danos realizou-se ensaios tipo “Up-and-Down” para a obtenção do novo Limite de Resistência à Fadiga (Se). Obteve-se propriedades mecânicas distintas para cada seqüência de solicitação. Limite de Resistência à Fadiga (Se) e a Dureza diminuíram em decorrência da aplicação das tensões alternadas.*

***Palavras-chave:** Limite de Resistência à Fadiga, acúmulo de danos, fratura*

1. INTRODUÇÃO

Algumas teorias de acúmulo de danos partem do pressuposto que quando um aço é submetido a uma tensão alternada superior ao Limite de Resistência à Fadiga (Se) estabelecido para este aço, ocorre uma redução desta propriedade (Henry, 1955). Também é observado que ao se submeter um aço a tensões seqüenciais crescentes ou decrescentes, sempre maiores que o Limite de Resistência à Fadiga, este limite altera-se de forma distinta (Henry, 1955; Gatts, 1961).

Assim, o objetivo deste artigo é comparar os resultados experimentais do Limite de Resistência à Fadiga obtidos de corpos-de-prova submetidos a tensões crescentes com os corpos-de-prova submetidos a tensões decrescentes bem como comparar outras propriedades mecânicas como Dureza, Limite de Resistência à Tração, Limite de Ruptura e Limite de Escoamento em função da alteração do dano.

Realizou-se uma comparação entre ensaios flexo-rotativos refrigerados e não refrigerados, onde notou-se uma grande elevação da temperatura nos corpos-de-prova durante o ensaio não refrigerado, produzida pelo trabalho de flexão na parte central deste, principalmente em tensões elevadas. Para atingir os objetivos deste trabalho, tomou-se como base para os ensaios, as curvas S-N-P do ensaio refrigerado, eliminando-se assim a influência da temperatura no comportamento mecânico do material.

2. METODOLOGIA PARA DETERMINAR O LIMITE DE RESISTÊNCIA À FADIGA

Para se determinar o valor médio e dispersão do Limite de Resistência à Fadiga (Se) do material, o método utilizado foi o método do "Up-and-Down" ou "Staircase".

Um grupo 11 a 16 de corpos-de-prova foi selecionado para realização dos ensaios. O primeiro corpo-de-prova é ensaiado a uma tensão superior à resistência esperada, até que ele falhe (ruptura) ou atinja a vida pré-determinada (vida útil). Se o corpo-de-prova falhar antes de atingir a vida útil, a tensão é diminuída de um gradiente pré-selecionado e o segundo corpo-de-prova é ensaiado nesta nova tensão. Caso contrário, ou seja, se o corpo-de-prova atinge a vida útil sem ocorrência de falha, a tensão é elevada do gradiente pré-selecionado e o segundo corpo-de-prova é ensaiado nesta nova e mais elevada tensão. Os ensaios seguintes seguem esta metodologia, onde cada corpo-de-prova é submetido a tensões inferiores ou superiores ao seu predecessor, conforme tenha havido ou não a falha.

O procedimento para o ensaio "Up-and-Down" está detalhado em (Collins, 1993):

1. Estimar o Limite de resistência à fadiga (Se) inicial.
2. Estimar o gradiente (d) para se elevar ou diminuir as tensões.
3. O primeiro ensaio deve ser realizado com uma tensão inicial superior ao (Se). Os ensaios posteriores devem seguir o esquema explicado anteriormente, até que se atinja o total de corpos-de-prova disponíveis.
4. Após o término dos ensaios, deve-se determinar o número do evento menos freqüente (N): se falhou ou se atingiu a vida útil (neste caso 2.000.000 de ciclos). O Limite de Resistência à Fadiga (Se) pode ser determinado pela Eq. (1).

$$Se = So + \left[\frac{A}{N} \pm \frac{1}{2} \right] \quad (1)$$

onde So é o valor da menor tensão onde o evento menos freqüente ocorreu, N é o número total do evento menos freqüente e A é a soma dos produtos obtidos quando se multiplica a ordem dos níveis de tensão no sentido crescente pelo número das respectivas ocorrências.

O sinal (+) na Eq. (1) é usado quando o evento menos freqüente é a vida útil e o sinal (-) é usado quando o evento menos freqüente é a falha.

O desvio padrão experimental (S) pode ser estimado através das Eq. (2a) e (2b).

$$S = 1,62 \left[\frac{A}{N} \pm \frac{1}{2} \right] \text{ se } \frac{NB - A^2}{N^2} \geq 0,3 \quad (2a)$$

$$S = 0,53d \text{ se } \frac{NB - A^2}{N^2} < 0,3 \quad (2b)$$

onde d é o gradiente de tensões, “ B ” é um parâmetro definido em (Collins, 1993) e B é a soma dos produtos que se obtém elevando-se ao quadrado a ordem dos níveis de tensão no sentido crescente pelo número das respectivas ocorrências.

A metodologia completa para determinação da curva S-N-P está descrito em (Collins, 1993).

3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O material utilizado na fabricação dos corpos-de-prova foi o aço SAE 8620. A composição química prevista para este aço (SAE Handbook, 1997) é mostrada na Tab. (1).

Tabela 1. Composição química prevista para o aço SAE 8620

C (%)	Si (%)	Mn (%)	Cr (%)	Ni (%)	Mo (%)	P (%)	S (%)	Co (%)	Pb (%)	Cu (%)	Al (%)	U (%)	W (%)
0,18	0,15	0,70	0,40	0,40	0,15	<0,035	<0,040	<0,1	0	<0,3	<0,1	<0,1	0
0,23	0,30	0,90	0,60	0,70	0,25				0,15				0,1

Os corpos-de-prova, cujo desenho esquemático está mostrado na Fig. (1), foram fabricados com rugosidade superficial $RA = 0,020 \pm 0,005 \mu\text{m}$.

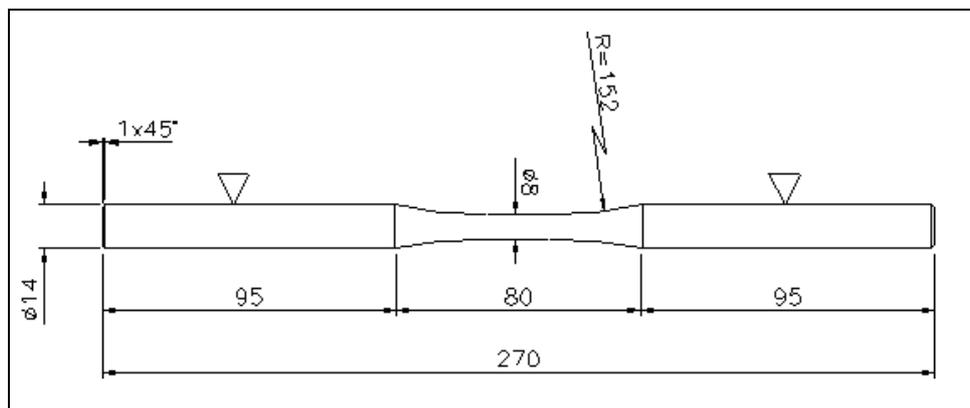


Figura 1. Corpo-de-prova e respectivas dimensões (em mm).

Os ensaios de fadiga foram realizados em uma máquina de fadiga por flexo-rotação com uma rotação de 3500 rpm e tensão média nula. Todos os ensaios foram realizados à temperatura ambiente (24°C) com refrigeração líquida sobre o corpo-de-prova (exceto os ensaios não refrigerados), visando assim evitar os efeitos do aquecimento gerado pela flexo-rotação. Para efeito de cálculo do número de ciclos do ensaio de acúmulo de danos para cada tensão, é considerada a curva de 1% de probabilidade de falhas do gráfico S-N-P.

4. RESULTADOS

4.1. Influência da Refrigeração no Ensaio de Fadiga

A equação de Fadiga é dada por:

$$\sigma_a = a + b \log [N] \quad (3)$$

Onde: “*a*” é o coeficiente linear da reta, intercepta no eixo das tensões, “*b*” é o coeficiente angular ou declividade da reta, ou seja, tangente do ângulo formado pela reta e a parte positiva do eixo dos ciclos. Como o ângulo é obtuso ($90 < \alpha < 180^\circ$), a tangente é negativa.

São apresentados na Tab. (2) os parâmetros obtidos nos ajustes das equações das curvas S-N para os ensaios de fadiga flexo-rotativos. Estes parâmetros foram determinados utilizando-se o “software” ORIGIN (CDTN), usando-se distribuição de Gauss.

Tabela 2. Parâmetros das equações de fadiga

Parâmetro	Percentuais para ensaios não refrigerados			Percentuais para ensaios refrigerados		
	1%	50%	99%	1%	50%	99%
a	441,7093	482,0178	522,3259	578,9886	604,5737	630,1601
b	-45,2483	-45,2486	-45,2486	-65,5171	-65,5171	-65,5173
Qui Quadrado	$3,16 \times 10^{-7}$	$2,85 \times 10^{-7}$	$2,64 \times 10^{-7}$	0,0011	0,0011	0,0011
Coeficiente de Determinação (R^2)	1	1	1	1	1	1
Intervalo de Confiança	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95

As curvas S-N-P para 1% probabilidade de falha levantadas por meio dos dados dos ensaios refrigerados e não refrigerados são mostradas na Fig. (2).

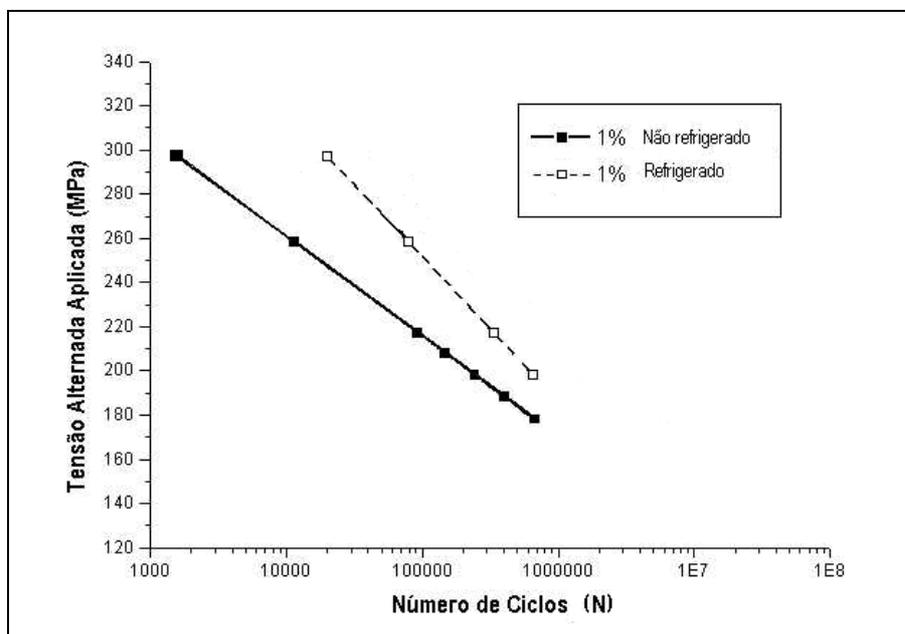


Figura 2. Comparação entre as curvas S-N-P para corpos-de-prova não refrigerados e refrigerados

As curvas S-N-P para 50% e 99% de probabilidades de falha seguem a mesma tendência da curva S-N-P para 1% de probabilidade de falha.

Um ensaio tipo “Up-and-Down”, como mostrado na Fig. (3), determinou o Limite de Resistência à Fadiga (Se) para corpos-de-prova virgens, que foi de 194 ± 5 MPa, conforme metodologia descrita anteriormente.

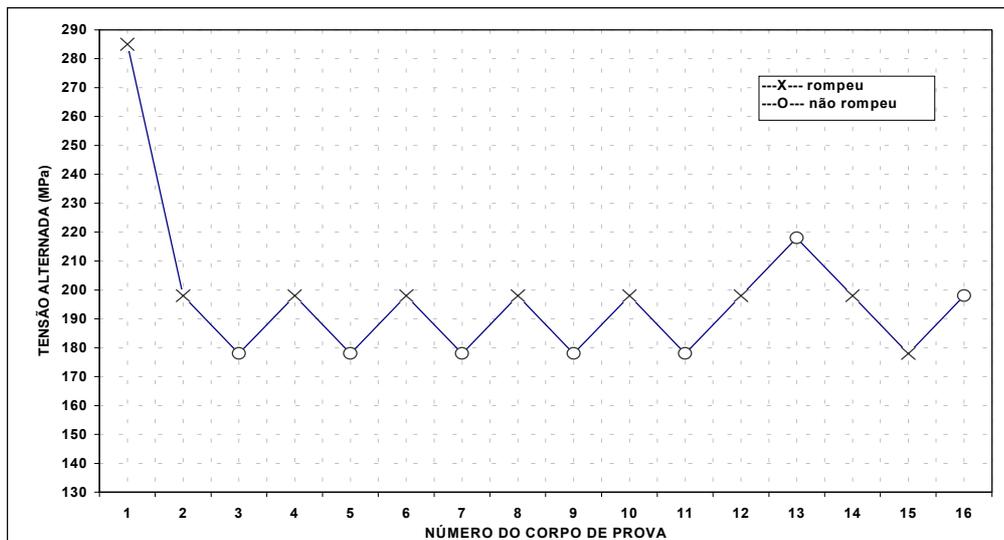


Figura 3. Gráfico do ensaio refrigerado “Up-And-Down” material virgem

A curva S-N-P para 1% de probabilidade de falha levantada experimentalmente para o aço SAE 8620 obtida através do ensaio de fadiga refrigerado, conjugada com o Limite de Resistência à Fadiga para o aço virgem, é mostrada na Fig. (4).

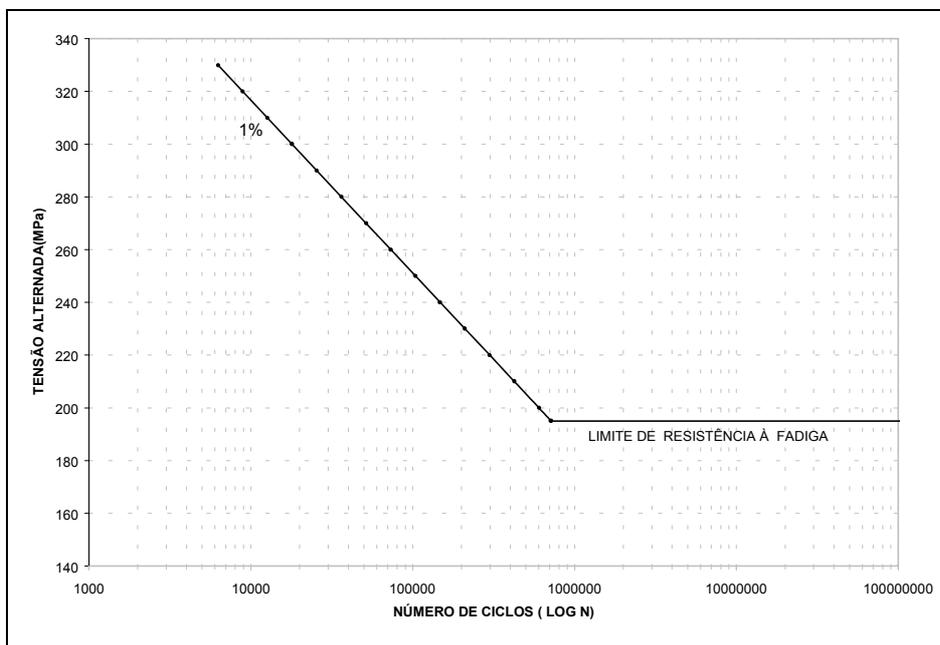


Figura 4. Gráfico da curva S-N-P 1% para o aço SAE 8620 para o ensaio refrigerado

4.2 Aplicação Controlada dos Danos

Uma série de 11 (onze) corpos-de-prova foram submetidos à tensões crescentes mostradas na Tab. (3).

Tabela 3. Tensões crescentes e número de ciclos correspondentes

Níveis de tensões (MPa)	Nº de ciclos previstos para 1% de prob. Falha (N)	Condição de teste - dano (em ciclos) 30% de N
198	653.279	195.983
217	335.041	100.512
236	171.829	51.548
259	76.567	22.970

A Figura (5) é uma composição das curvas S-N-P do aço SAE 8620 e da seqüência de aplicação das tensões crescentes aplicadas no corpo-de-prova.

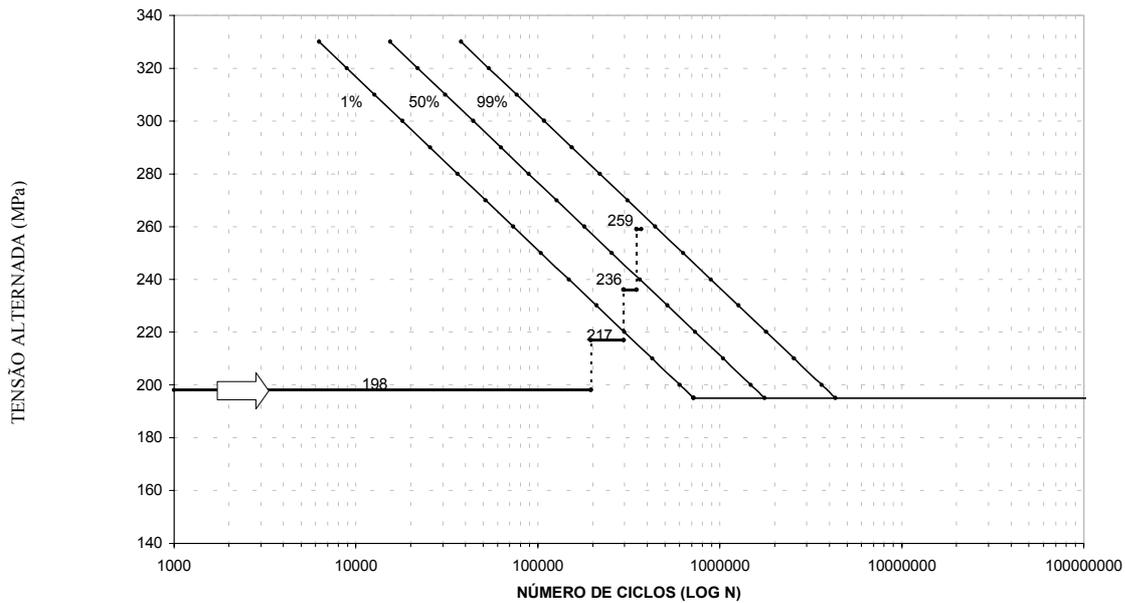


Figura 5. Cargas crescentes

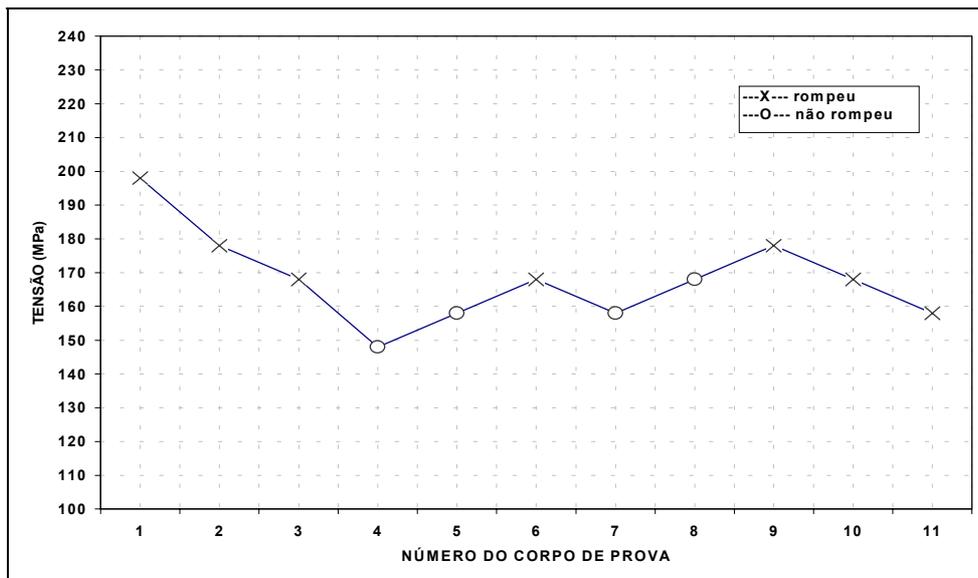


Figura 6. Ensaio experimental de "Up-and-Down" para corpos-de-prova danificados com cargas crescentes

Os resultados dos ensaios experimentais de "Up-and-Down" para os corpos-de-prova danificados, após serem submetidos à cargas crescentes, são mostrados na Fig. (6). O ensaio foi iniciado com uma tensão igual a 198 MPa, superior ao limite de resistência à fadiga esperado. O gradiente foi estimado para "d" igual a 10 e 20 MPa de acordo com a disponibilidade de pesos da máquina. Obteve-se o valor de $Se = 165 \pm 6$ MPa para uma confiabilidade de 95%, conforme metodologia descrita anteriormente.

Uma série de 11 (onze) corpos-de-prova foram submetidos à tensões decrescentes mostrada na Tab. (4).

Tabela 4. Tensões decrescentes e número de ciclos correspondentes

Níveis de tensões (MPa)	Número de ciclos previstos para 1% de probabilidade de falha (N)	Condição de ensaio - dano (em ciclos) n =30% de N
259	76.567	22.970
236	171.829	51.548
217	335.041	100.512
198	653279	195.983

A Figura (7) é uma composição das curvas S-N-P do aço SAE 8620 e da seqüência de aplicação das tensões decrescentes aplicadas no corpo-de-prova.

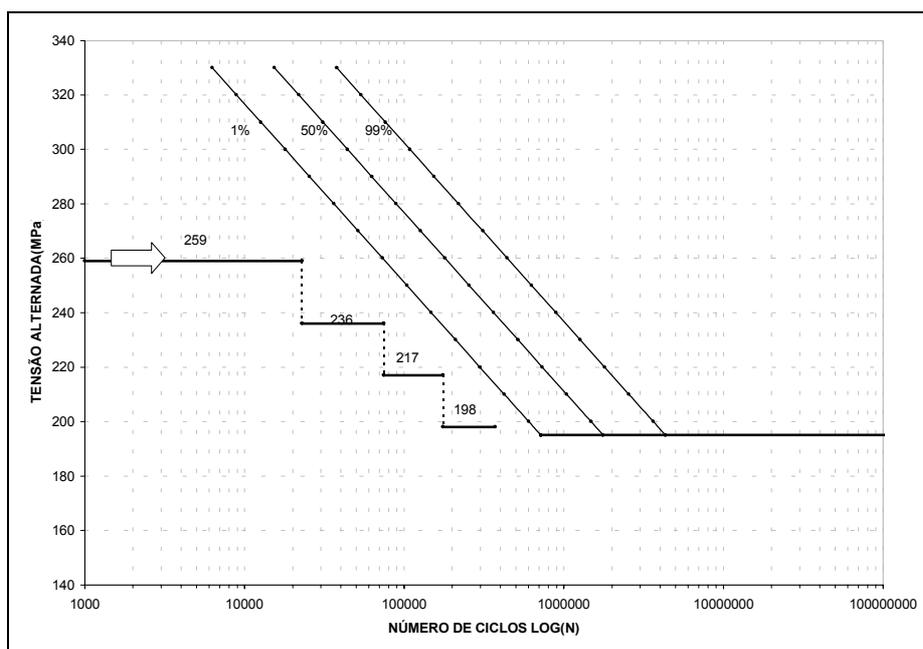


Figura 7. Cargas decrescentes

Os resultados dos ensaios experimentais de "Up-and-Down" para os corpos-de-prova danificados após serem submetidos à cargas decrescentes são mostrados na Fig. (8). O ensaio foi iniciado com uma tensão igual a 234 MPa, superior ao Limite de Resistência à Fadiga esperado. O gradiente "d" foi estimado entre 10 e 36 MPa, de acordo com a disponibilidade de pesos da máquina. Obteve-se o valor de $Se = 145 \pm 19$ MPa para uma confiabilidade de 95%, conforme metodologia descrita anteriormente.

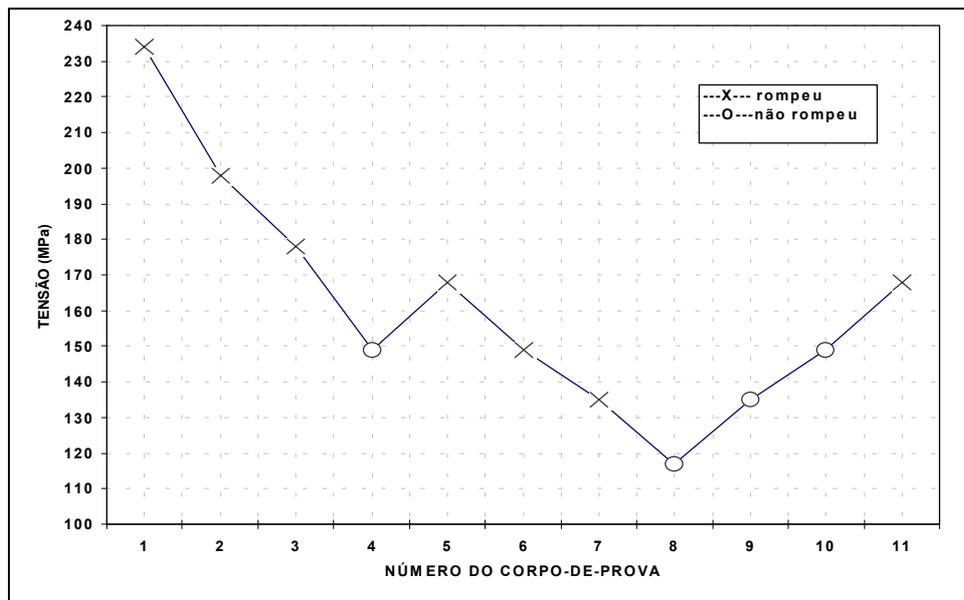


Figura 8. Ensaio experimental de "Up-and-Down" para corpos-de-prova danificados com cargas decrescentes, para 2.000.000 de ciclos

São mostradas nas Tab. (5) e (6) uma comparação entre os valores de Dureza, Limite de Escoamento, Limite de Resistência à Tração e o Limite de Ruptura do material virgem e do danificado. Os ensaios de tração foram realizados em corpos-de-prova provenientes dos ensaios de fadiga.

Tabela 5. Ensaios quasi-estáticos e dinâmicos no aço SAE 8620 virgem e danificado

	Limite de escoamento (MPa)	Limite de Resistência à Tração (MPa)	Limite de Ruptura (MPa)	Limite de Resistência à Fadiga (MPa)
Virgem	370 ± 10	602 ± 23	432 ± 19	195 ± 8
Danificado - tensões crescentes	389 ± 9	588 ± 10	418 ± 0	165 ± 6
Danificado - tensões decrescentes	400 ± 8	571 ± 12	419 ± 1	145 ± 19

Tabela 6. Ensaios de dureza no aço SAE 8620 virgem e danificado

Ensaio com tensões crescentes	Dureza Vickers
Material Virgem	208 ± 3
Material danificado tensões crescentes	195 ± 6
Ensaio com tensões decrescentes	Dureza Vickers
Material Virgem	200 ± 5
Material danificado tensões decrescentes	192 ± 4

5. DISCUSÃO DOS RESULTADOS

Notou-se durante os ensaios flexo-rotativos não refrigerados, uma grande elevação da temperatura nos corpos-de-prova, produzida pelo trabalho de flexão na parte central deste, principalmente em tensões elevadas. Isto se deve à natureza acelerada deste tipo de ensaio que

produz uma grande geração interna de calor no corpo-de-prova, que não é capaz de dissipá-la. Para atingir os objetivos deste trabalho, tomou-se como base para os ensaios as curvas S-N-P do ensaio refrigerado, eliminando-se assim a influência da temperatura no comportamento mecânico do material. Desta forma, o corpo-de-prova mantém-se muito próximo à temperatura ambiente durante todo o ensaio.

Devido à dispersão das medidas de dureza para um lote grande de corpos-de-prova, estas medidas foram realizadas em cada corpo-de-prova antes e depois da aplicação do dano, obtendo-se assim maior precisão na quantificação do decréscimo desta propriedade em cada ensaio.

Uma maior faixa de dispersão foi notada nos dados apresentados na Fig. (8), para corpos-de-prova danificados por tensões decrescentes, provavelmente porque a última tensão para provocar o dano, não ultrapassou a curva de 1% de probabilidade de falha (ver Fig. 7).

Fica claro que a seqüência de tensões crescentes produz rompimentos do corpo-de-prova numa faixa mais reduzida de ciclos (N), o que também reflete na dispersão do ensaio “*Up-and-down*”.

As durezas iniciais caíram em ambas as situações, sendo que a aplicação de tensões decrescentes produz menor amolecimento do material. Apesar disso não ser conclusivo, mostra uma tendência de tensões decrescentes produzirem danos menores do que tensões crescentes no material.

O Limite de Escoamento produziu dados contrários às outras propriedades, como por exemplo, o Limite de Ruptura que caiu em ambos os casos de aplicação da seqüência de tensões.

6. CONCLUSÕES

Os ensaios de fadiga flexo-rotativos não refrigerados alteram a curva S-N-P, sendo aconselhável a introdução da refrigeração para que os resultados obtidos reflitam o comportamento mecânico do componente sem influência da temperatura.

O Limite de Resistência à Fadiga (*Se*) caiu tanto na aplicação do dano com tensões crescentes, quanto na aplicação do dano com tensões decrescentes. Os valores finais mantiveram-se em faixas próximas.

Houve uma tendência para que o dano causado por tensões decrescentes fosse maior que o dano causado por tensões crescentes. Entretanto, o ensaio crescente apresentou uma dispersão maior no resultado.

A Dureza, o Limite de Resistência à Ruptura e o Limite de Resistência à Tração caíram bastante após a aplicação do dano. Observou-se uma queda maior nos resultados dos ensaios com tensões crescentes, sendo que a dureza teve uma queda mais acentuada.

O Limite de Escoamento do material danificado foi maior do que esta mesma propriedade do material virgem, contrariando a tendência das outras propriedades mecânicas. A razão deve-se ao endurecimento cíclico, durante a aplicação do dano.

7. AGRADECIMENTOS

Agradecimentos a Fundação Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo suporte financeiro para realização deste trabalho, ao CDTN – Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear pela cessão do Laboratório de Análise de Tensões e material consumível e a todos que de algum modo colaboraram com este trabalho.

8. REFERÊNCIAS

Bannantine, J.A. et al, 1990 "Fundamentals of Metal Fatigue Analysis:", Ed. Prentice Hall, New Jersey, USA.

Collins, J.A., 1993, "Failure of Materials in Mechanical Design", Ed. John Wiley & sons, New York, USA.

Henry, D.L., August 1955, “A Theory of Fatigue-Damage Accumulation in Steel”, Transp. ASME, pp. 913-918.

Gatts, R.R., December 1961, “Application of a Cumulative Damage Concept to Fatigue”, Trans. ASME pp. 529-540.

SAE, Chemical Compositions of SAE Alloy Steels – SAE J404 Apr94. SAE Handbook Vol. 1, 1997, p.1.12–1.13.

INFLUENCE OF THE REFRIGERATION AND THE SEQUENCE OF LOAD APPLICATION IN ROTATING-BENDING FATIGUE TESTS IN THE MECHANICAL PROPERTIES OF STEEL SAE 8620

Álvaro Alvarenga Júnior

Mestrado em Engenharia Mecânica – PUC/Minas

Rua Dom José Gaspar, n. 500, Bairro Coração Eucarístico, CEP 30535-610, Belo Horizonte, MG, Brasil, e-mail: alvarengajr@yahoo.com.br

Tanius Rodrigues Mansur

Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear, CDTN/CNEN

Rua Prof. Mário Werneck, s/n, Pampulha, Caixa Postal 941, 30123-970, Belo Horizonte, MG, Brasil, e-mail: tanius@cdtn.br

Ernani Sales Palma

Departamento de Engenharia Mecânica e Mecatrônica - PUC/Minas

Rua Dom José Gaspar, n. 500, Bairro Coração Eucarístico, 30535-610, Belo Horizonte, MG, Brasil, e-mail: palma@pucminas.br

***Abstract:** The S-N-P curve of the SAE 8620 steel was plotted using refrigerated and not refrigerated rotating-bending fatigue tests. An increment of the temperature, and consequent changing in the mechanical properties were observed in the rotating-bending fatigue for the not refrigerated. From such results, only the refrigerated rotating-bending fatigue tests were chosen for application on the fatigue cumulative damage tests.*

The Fatigue limits (S_e) were determined for the blank specimens. It was used four levels of alternated tensions. Then, fatigue cumulative damage were applied on the SAE 8620 steel. After the damages applications, “Up-and-Down” tests were conducted in order to achieve a new Fatigue Limits (S_e). The mechanical properties of the material were influenced by the order of application of stress levels (decreasing and increasing stress amplitudes). Fatigue limits and Hardness decreased with fatigue damage.

***Keywords:** Fatigue limit, fatigue damage, fracture.*