

AVALIAÇÃO DO DANO POR FADIGA NO AÇO SAE 8620 UTILIZANDO MEDIDA DE RESISTÊNCIA ELÉTRICA¹

Kétsia dos Santos Martins²
Roberto Francisco Di Lorenzo³

Resumo

Fadiga é uma forma de falha que ocorre em estruturas que estão sujeitas a tensões dinâmicas e cíclicas, e a falha ocorre, geralmente, a uma tensão inferior ao limite de escoamento do material. A falha por fadiga ocorre repentinamente, sem qualquer aviso prévio. Mesmo nos metais dúcteis, a falha por fadiga é de natureza frágil, apresentando pouca ou nenhuma deformação plástica. A falha do material testado em fadiga ocorre pelo acúmulo de danos no material. O objetivo deste trabalho é determinar a nucleação e a propagação no acúmulo de danos, utilizando ensaios de fadiga mecânica e medidas de variação de resistência elétrica no corpo de prova testado, antes do colapso. Para atingir este objetivo foram realizados ensaios de fadiga flexo-rotativa em corpos de prova de aço SAE 8620, e realizado medidas de resistência elétrica antes do teste e após determinados números de ciclos testados, durante todo o ensaio antes da falha por fadiga, e importante, sem retirar o corpo de prova do equipamento de fadiga. A procura de método para medir ou avaliar o acúmulo de danos em materiais sujeitos à fadiga é de primordial importância para segurança e integridade da estrutura, tentando detectar dano antes que ocorram falhas catastróficas.

Palavras-chave: Fadiga mecânica; Dano; Resistência elétrica; Integridade estrutural.

FATIGUE DAMAGE EVALUATION ON STEEL SAE 8620 USING ELECTRICAL RESISTANCE MEASUREMENTS

Abstract

Fatigue is a failure that occurs in structures that are submitted to dynamic and cyclic stress, and the failure occurs, usually, under a lower stress than yield stress of the material. A fatigue failure occurs suddenly, without any pre notice. Even on ductile metal, the fatigue failure is fragile and has little or any plastic deformation. The fatigue failure occurs by damages accumulation on the material. The purpose of the work is to determine the nucleation and the propagation on the damages, necessary to damage accumulation, using mechanical fatigue tests and the changing of electrical resistance, before of the collapse. To achieve this purpose, flexo-rotative fatigue tests in SAE 8620 steel specimens and electrical resistance measurements were accomplished, before and after a defined number of cycles. The specimens during all the test of fatigue were not withdrawn of machine before the fatigue failure. The electrical resistances were done in specimens mounted in fatigue equipment. The search of a method to measure or evaluate the damages accumulation in materials under fatigue has great importance to security and integrity of the structure, trying to detect damage before catastrophic or fragile failure occurs.

Key words: Mechanical fatigue; Damage; Electrical resistance; Structural integrity.

¹ *Contribuição técnica ao 68º Congresso Anual da ABM - Internacional, 30 de julho a 2 de agosto de 2013, Belo Horizonte, MG, Brasil.*

² *Engenharia Metalúrgica. Bolsista de iniciação científica do CDTN – Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear, Belo Horizonte, MG, Brasil.*

³ *Engenharia Mecânica. UFMG, Tecnologista Senior, CDTN – Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear, Belo Horizonte, MG, Brasil.*

1 INTRODUÇÃO

O escopo desse trabalho compreende um estudo acerca da relação entre o dano causado por fadiga e a resistência elétrica do material, o aço 8620, medida a cada certo número de ciclos, até a falha completa do corpo de prova.

O aço estrutural 8620 é usado na indústria mecânica e automotiva para engrenagens de câmbio e diferencial, coroas, pinhões, terminais, setores, parafusos sem-fins de direção, eixos de comando de válvulas, cruzetas, pinos de pistão, castanhas para placa de tornos, etc.

Fadiga é uma forma de falha que ocorre em estruturas que estão sujeitas a tensões dinâmicas e oscilantes. Sob essas circunstâncias, é possível que uma falha ocorra em um nível de tensão consideravelmente menor do que o limite de resistência à tração ou o limite de escoamento para uma carga estática. O termo fadiga é usado porque esse tipo de falha ocorre normalmente após um longo período de tensões repetidas ou ciclos de deformação. A fadiga é catastrófica ocorrendo repentinamente e sem qualquer indicação prévia da falha.

Pode-se definir a fadiga como sendo o processo de degradação localizada, progressiva e permanente, que ocorre em material sujeito a variações de tensões e deformações, e, que produzem a nucleação de trincas ou a completa fratura depois de um número especificado de ciclos.⁽¹⁾

No ensaio de fadiga, as tensões de compressão e de tração são impostas sobre o corpo de prova conforme ele é submetido simultaneamente a uma flexão e a uma rotação. Com frequência, também são conduzidos ensaios onde se utiliza um ciclo alternado de tensões uniaxiais de tração e de compressão.

Mesmo nos metais normalmente dúcteis, a falha por fadiga é de natureza frágil, existindo muito pouca ou nenhuma deformação plástica generalizada associada à falha. O processo de falha por fadiga é caracterizado pela iniciação e propagação da trinca até a falha final. A falha ocorre geralmente a partir de um ponto de concentração de tensão, tal como um canto vivo ou um entalhe.

A região de uma superfície de fratura que se forma durante a etapa de propagação de uma trinca pode ser caracterizada por dois tipos de marcas: marcas de praia e estrias. As marcas de praia possuem dimensões macroscópicas e podem ser observadas a olho nu. Essas marcas são encontradas em componentes que sofreram interrupções durante o estágio de propagação de trinca. Por outro lado, as estrias de fadiga apresentam dimensões microscópicas.

O comportamento em fadiga de materiais de engenharia é altamente sensível a diversas variáveis. Alguns fatores que alteram a vida em fadiga são:

- tensão média – o aumento no nível de tensão leva a uma diminuição na vida em fadiga;
- efeitos da superfície – para muitas situações comuns de aplicação de carga, a tensão média em um componente ou em uma estrutura ocorre na sua superfície. Consequentemente, a maioria das trincas que levam à falha por fadiga tem a sua origem em posições localizadas na superfície. Portanto, observa-se que a vida em fadiga é especialmente sensível às condições e às configurações da superfície do componente;
- variáveis de projeto – a probabilidade de falhas por fadiga pode ser reduzida evitando as irregularidades estruturais ou introduzindo modificações no projeto onde sejam eliminadas mudanças bruscas no contorno, as quais levam à formação de cantos vivos; e

- tratamentos de superfície – durante as operações de usinagem, pequenos riscos e sulcos são introduzidos invariavelmente na superfície da peça sendo trabalhada pela ação da ferramenta de corte. Essas marcas superficiais podem limitar a vida em fadiga. Observa-se que uma melhoria no acabamento da superfície, através de polimento, aumenta significativamente a vida em fadiga.

Quando se determina o limite de resistência à fadiga de um material, deve-se ter em mente que cada amostra possui seu próprio limite de fadiga e que, para tensões acima, ela se romperá e para tensões abaixo, permanecerá em trabalho. No entanto, essa tensão crítica varia de amostra para amostra de mesmo material por razões não previstas. Em função disso, corpos de prova de mesmos materiais e submetidos às mesmas condições de ensaio podem apresentar uma grande dispersão no número de ciclos que os levam à falha.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Os corpos de prova de aço 8620 foram usinados utilizando-se uma máquina com controle numérico. A geometria e o acabamento superficial seguiram o modelo sugerido^(2,3) e pela norma DIN 50113.⁽⁴⁾

Os ensaios de fadiga foram realizados na máquina de fadiga flexo-rotativa, mostrada na Figura 1, desenvolvida no CDTN.

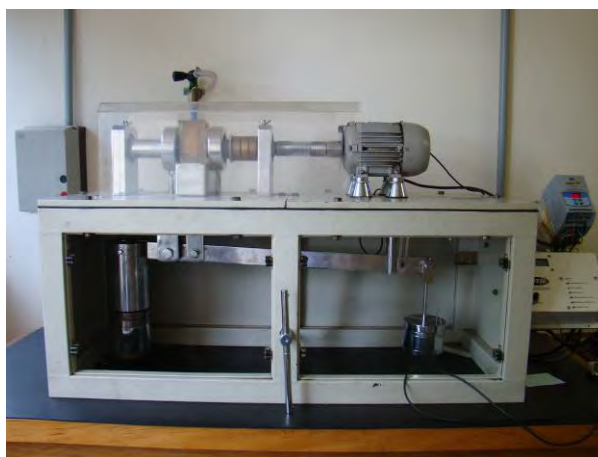


Figura 1. Máquina de fadiga flexo-rotativa do CDTN e seu sistema de refrigeração.

Neste tipo de máquina, a aplicação da carga é realizada por meio de braço de alavanca. Em um lado da alavanca existe um peso de compensação e no outro se aplicam pesos mortos, de acordo com a tensão que se deseja aplicar no corpo de prova. O fator de multiplicação dessa máquina é 10, portanto, a força aplicada no corpo de prova equivale a dez vezes a força do peso morto. O motor elétrico da máquina gira a 3600 rpm e transmite diretamente essas rotações ao corpo de prova através de uma mola. A máquina possui, acoplada a ela, um contador eletrônico que registra o número de ciclos no corpo de prova. O ensaio é também refrigerado por água, para evitar o aquecimento do corpo de prova durante o ensaio, independente da carga aplicada ou da velocidade de rotação.

Foi utilizado um multímetro de alta precisão (8,5 dígitos) para a medida de resistência elétrica dos corpos de prova após determinados ciclos de carga. O método de medida de resistência elétrica foi a quatro fios para permitir maior precisão dos dados. Neste método é aplicada uma corrente elétrica nos polos

externos (fios vermelho e preto) e medida a tensão elétrica, que indica a resistência, nos polos internos (fios verde e amarelo), melhorando a precisão dessas medidas de resistência. Na medida de resistência elétrica utilizou-se um gabarito, conservando a posição entre dos dois pontos de medida de resistência, sem retirar o corpo de prova da máquina de fadiga. Na Figura 2 é mostrado o gabarito de medida de resistência a quatro fios adaptado à máquina de fadiga com o corpo de prova instalado. A medida de resistência elétrica é estática, parando-se a máquina de fadiga após os ciclos definidos. Observa-se que se conserva a posição dos polos de medidas de resistência elétrica antes e depois de aplicar determinados ciclos de fadiga flexo-rotativa.

Na Figura 3 são mostrados detalhes do gabarito. Foram realizadas aproximadamente 50 medidas de resistência antes de iniciar o ensaio e a cada 100 mil ou 50 mil ciclos, até que ocorra a falha do corpo de prova, e essas medidas foram armazenadas no computador para posterior análise.

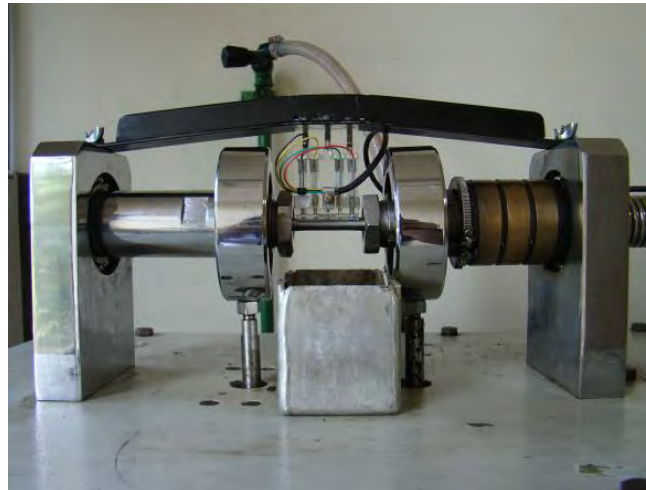


Figura 2. Medidor de resistência elétrica com gabarito fixado na máquina de fadiga.

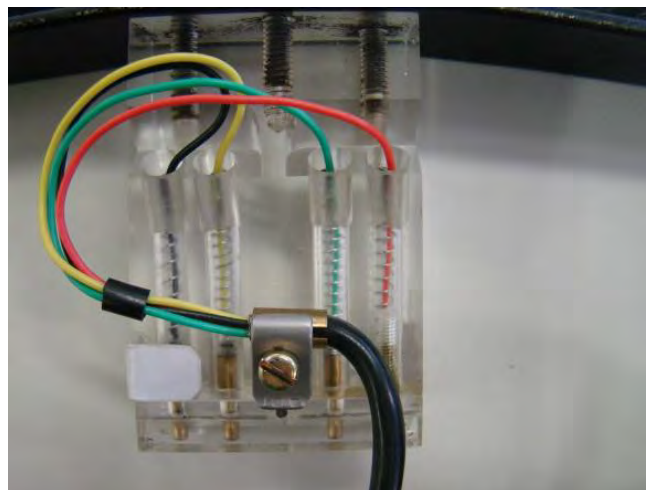


Figura 3. Detalhe do gabarito.

Foram ensaiados onze corpos de prova intitulados de 3A a 11A (Figura 4); os nove primeiros com uma carga de 3508g correspondendo a uma tensão de 411 MPa e os demais com uma carga de 2511g correspondendo a 294 MPa.



Figura 4. Corpo de Prova “A” Usinado Conforme as Normas.

Diferentemente do corpo de prova de fadiga convencional, onde a falha de fadiga pode ocorrer em qualquer posição da seção útil, corpos de prova de fadiga entalhados define-se exatamente a região de falha por fadiga. Foram ensaiados outros oito corpos de prova intitulados de S1 a S8 do tipo mostrado na Figura 5 e em detalhe na Figura 6. Nestes corpos de prova foram feitos entalhes de 0,5 mm de profundidade no meio da seção útil a fim de forçar a trinca na posição definida e acelerar o processo de falha, e se ter um único ponto de falha. O primeiro corpo de prova foi ensaiado com uma carga de 2511g, o segundo com 2009,5g, o terceiro ao sexto com 1498,5g e os dois últimos com 1690g.



Figura 5. Corpo de prova “S” usinado conforme as normas, com entalhe.



Figura 6. Detalhe do entalhe do corpo de prova “S”.

3 RESULTADOS

No Quadro 1 são apresentados os números de ciclos de fadiga em ensaio flexo rotativo até a fratura obtidos em temperatura ambiente em corpos de prova indicados como A. Os corpos de prova de 1A até 9A foram testados com carga de 3.508 gf e levados até a fratura, enquanto os 10A e 11A foram testados a 2.511 gf e testados até da ordem de 2.000.000 de ciclos sem fratura.

Quadro 1. Número de ciclos até a falha CP's A

Corpo de Prova	Carga (g)	Número de Ciclos
1A	3508	206251
2A	3508	604300
3A	3508	520400
4A	3508	488900
5A	3508	225800
6A	3508	953298
7A	3508	1053900
8A	3508	691900
9A	3508	478520
10A	2511	2100000
11A	2511	2000000

Na Figura 7 foram expressos os números de ciclos a que cada corpo de prova foi submetido até a fratura de acordo com cada carga que foram testados. Os corpos de prova de 1A até 9A foram testados até a falha com carga de 3.508gf, enquanto os 10A e 11A com carga de 2.511gf, sem fratura.

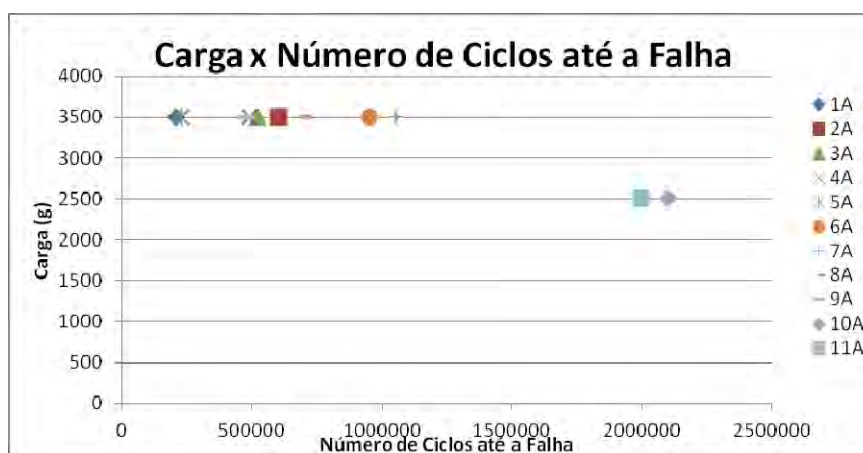


Figura 7. Carga (g) pelo número de ciclos até a falha dos corpos de prova 1A a 11^a.

Na Figura 8 foram representadas as resistências elétricas, medidas a cada 50 ou 100 mil ciclos, nos corpos de prova intitulados A no ensaio de fadiga flexo rotativa. Os corpos de prova 1A e 2A não foram representados no gráfico pois não foram realizadas as medidas de resistência para eles no início do ensaio.

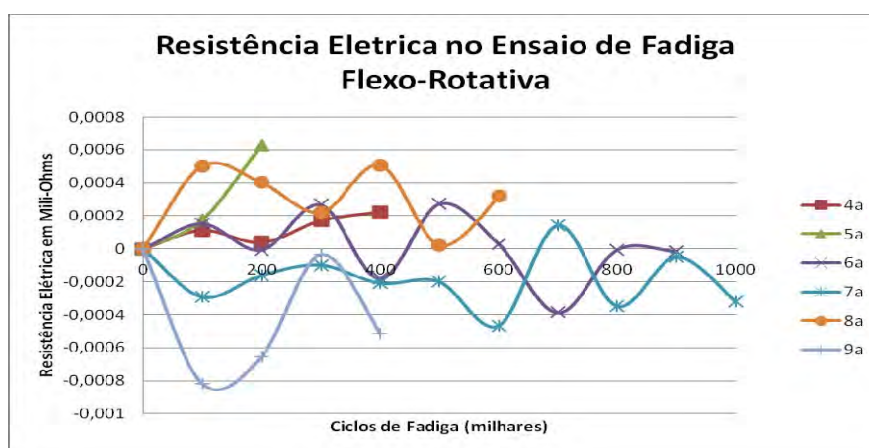


Figura 8. Resistência elétrica no ensaio de fadiga flexo-rotativa.

Na Figura 9, foram expressas as médias das medidas de resistência dos corpos de prova intitulados A a cada 100 mil ciclos no ensaio de fadiga flexo rotativa.

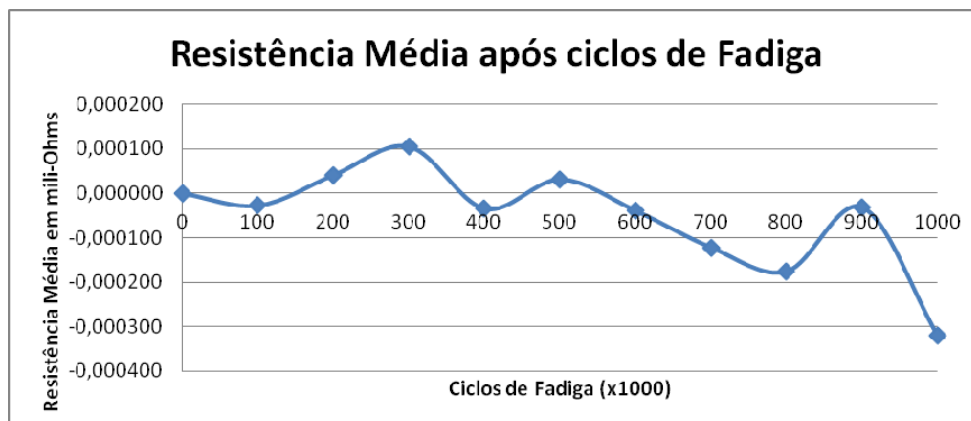


Figura 9. Resistência média após ciclos de fadiga.

Na Figura 10 foram expressas as razões de ciclos aplicados em relação ao número de ciclos até a fratura em função dos valores de resistência elétrica medidos nos corpos de prova 3A a 9A.

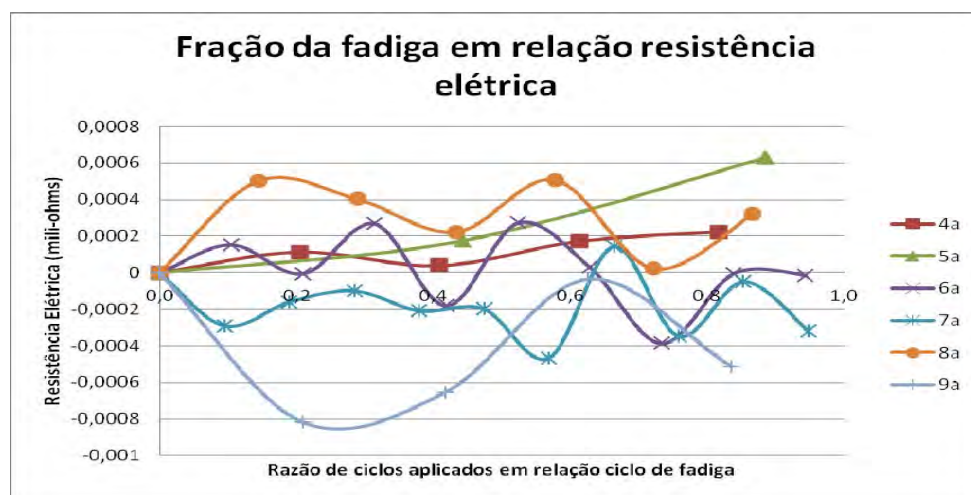


Figura10. Fração da fadiga em relação à resistência elétrica.

No Quadro 2 estão indicados os números de ciclos de fadiga em ensaio flexo rotativo até a fratura obtidos em temperatura ambiente em corpos de prova indicados como S. O corpo de prova S1 foi testado com carga de 2.511gf; o S2, com carga de 2.009,5gf; de S3 a S6, com carga de 1.498,5gf e, finalmente, S7 e S8 com 1.690gf. Todos foram ensaiados até a fratura, com exceção do S3. Os corpos de prova S4 e S5 fraturaram no início do ensaio, por isso seus valores não foram expressos.

Quadro 2. Número de ciclos até a falha CP's S

Corpo de Prova	Carga (g)	Número de Ciclos
S1	2511	67700
S2	2009,5	295400
S3	1498,5	2000000
S6	1498,5	4087600
S7	1690	1295046
S8	1690	945800

Na Figura 11 foram expressos os números de ciclos a que cada corpo de prova foi submetido até a fratura ou não de acordo com cada carga. O corpo de prova S1 foi testado com carga de 2.511gf, S2 com carga de 2.009,5gf, S3 a S6 com carga 1.498,5gf e S7 e S8 com carga de 1.690gf. Apenas S3 não fraturou.

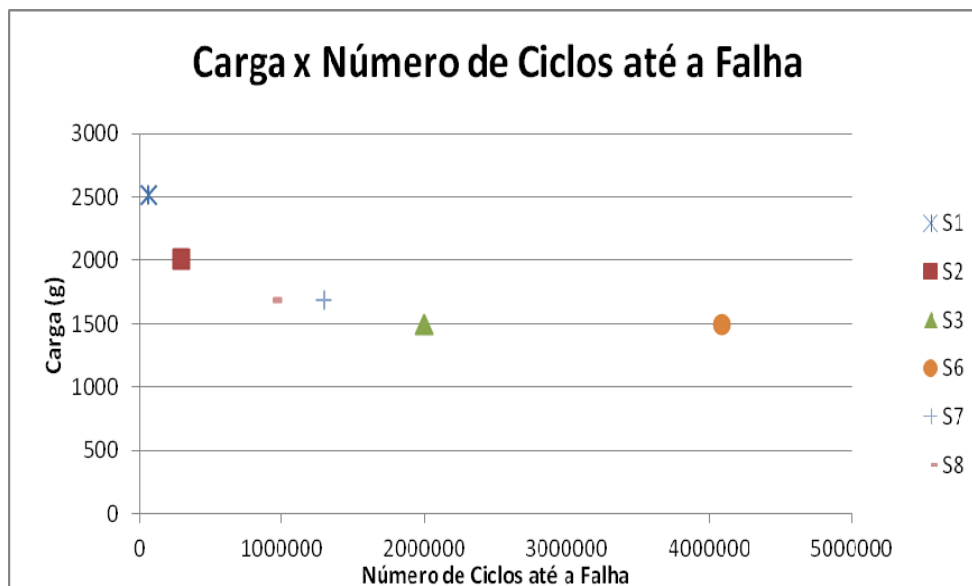


Figura 11. Carga (g) pelo número de ciclos até a falha dos corpos de prova S1 a S8.

Na Figura 12, foram representadas as resistências elétricas, medidas a cada 50 ou 100 mil ciclos, nos corpos de prova entalhados intitulados S no ensaio de fadiga flexo rotativa. As cargas a que cada corpo de prova foi submetido estão expressas na legenda do gráfico.

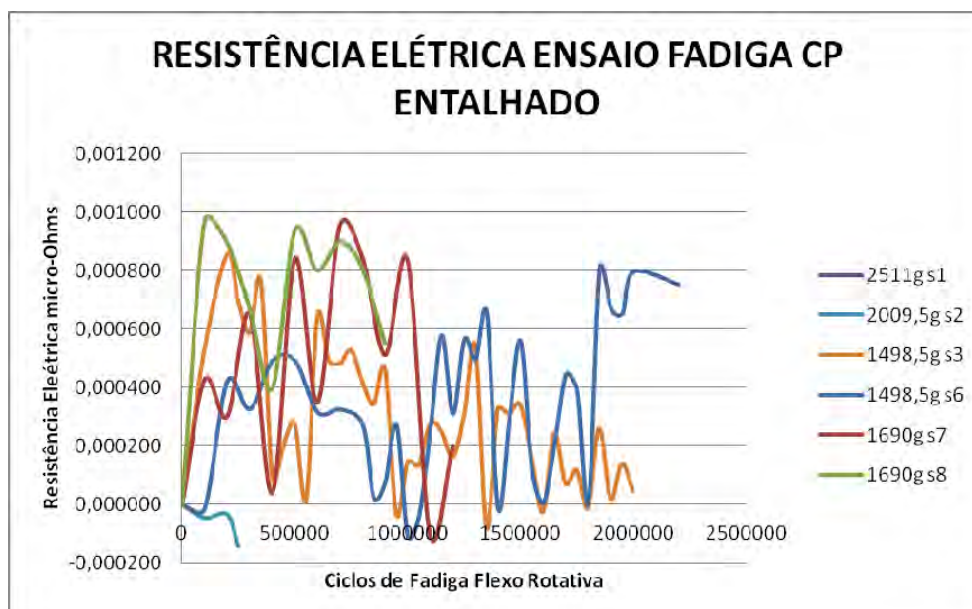


Figura 12. Resistência elétrica no ensaio de fadiga flexo rotativa em amostra entalhada.

Na Figura 13, comparou-se as medidas de resistência elétrica no ensaio de fadiga flexo rotativa para cada fração de ciclo em relação ao ciclo de fadiga para dois corpos de prova, S7 e S8, submetidos à mesma carga de 1690g.



Figura 13. Comparação entre dois corpos de prova S testados com a mesma carga de 1690g.

4 DISCUSSÃO

O método de medida de resistência elétrica a quatro fios tem grande precisão. Da ordem de 50 até 80 medidas contínuas de resistência do corpo de prova tem variação abaixo de 20 μ Ohms. O próprio multímetro de 8,5 dígitos tem uma precisão de 15 μ Ohms.

Tanto o limite de resistência à fadiga como as medidas de resistência elétrica variam grandemente. Testes de fadiga flexo rotativa realizados na mesma tensão de 411 MPa obteve-se de 200 mil a 1000 mil ciclos para fadiga de corpos de prova, que são teoricamente iguais. Este tipo de resultado é normal em fadiga. Não existe qualquer relação formal entre os danos acumulados medidos por resistência elétrica com o número de ciclos de fadiga, conforme pode ser observado na Figura 8. A mesma informação é obtida se se considerar a fração dos ciclos de fadiga em relação ao limite de fadiga de cada corpo de prova (Figura 10).

Observa-se nos gráficos mostrados na Figura 10 que mesmo próximo das fraturas, onde a razão entre o ponto da medida é da ordem de 90% da fratura, não existe uma regra bem definida da variação da resistência elétrica. É importante frisar que estas variações de resistência elétrica estão na faixa de até 8 micro-Ohms, portanto valores muito baixos, inclusive se considerar equipamentos de grande precisão que foram utilizados nos testes. Estas variações podem inclusive ser devido a alguma variação de temperatura durante todos os ensaios. Isto indica, de certo modo, que o método de variação de resistência elétrica não seria adequado para medidas de campo do acúmulo de danos provocados por fadiga.

Nos gráficos “Resistência Elétrica no Ensaio de Fadiga Flexo-Rotativa” dos corpos de prova com e sem entalhe, pode-se observar que não existe influência do número de ciclos sobre a resistência elétrica do material. De acordo com esses gráficos, com o aumento do número de ciclos, os valores de resistência elétrica medidos estão variando sem um padrão específico, ou seja, estão oscilando – ora aumentam, ora diminuem. O gráfico “Fração da Fadiga em Relação à Resistência Elétrica” apresenta os mesmos resultados do gráfico “Resistência Elétrica no Ensaio de Fadiga Flexo-Rotativa”, porém os números de ciclos referentes às medições de resistência realizadas foram divididos pelo número em que o corpo de prova sofreu a falha, ou seja, os dados foram apresentados de acordo com a fração correspondente para cada medição em relação à falha de cada corpo de prova.

No gráfico da comparação entre os dois corpos de prova, S7 e S8, testados com a carga de 1690g, pode-se observar que, para uma mesma carga, a resistência elétrica não apresenta uma grande variação de um corpo de prova para o outro.

No gráfico “Resistência Média Após Ciclos de Fadiga”, fez-se uma média dos valores de resistência de todos os corpos de prova “A” ensaiados para se ter uma visão geral do comportamento da resistência elétrica com a vida em fadiga. Esse gráfico confirma a afirmação de que os valores de resistência oscilam com o aumento do número de ciclos, ou seja, não é possível observar nenhuma dependência entre esses dois parâmetros.

A máquina de medição de resistência elétrica possui uma precisão muito grande, porém essa precisão não garante um resultado satisfatório, uma vez que existe uma grande dispersão nos resultados quando se trata de acúmulo de danos de fadiga. Mesmo dispondo-se de aparelhos precisos, utilizando-se métodos coerentes e com corpos de prova uniformes, a fadiga apresenta grande variância no seu estudo, por razões ainda não previstas.

5 CONCLUSÃO

Com o aumento do número de ciclos – diminuição da vida em fadiga –, esperava-se que houvesse um comportamento definível para o acúmulo de danos provocados por fadiga mecânica em corpos de prova com relação à resistência elétrica (um aumento ou uma diminuição). Como esses valores oscilam durante todo o ensaio, conclui-se que não existe uma correlação entre esses parâmetros.

Em relação à vida em fadiga, houve uma variabilidade grande entre os resultados encontrados para cada corpo de prova ensaiado, devido ao fato de cada amostra possuir seu próprio limite de fadiga, mesmo que todos os corpos de prova sejam do mesmo material e tenham sido fabricados sob as mesmas condições.

Quanto aos corpos de prova entalhados, ainda não é possível avaliar o quanto o entalhe influencia na vida em fadiga, pois poucos corpos de prova foram ensaiados até o momento. Apesar disso, pode-se confirmar que o entalhe acelera a ruptura e que esta se deu sempre na região do entalhe, como esperado.

Agradecimentos

Houve muitas contribuições para que a realização deste trabalho fosse possível, tornando-se impossível numerar a todos. Entretanto, alguns nomes não poderiam deixar de serem citados, portanto gostaria de agradecer ao meu orientador, Roberto Francisco Di Lorenzo, pela orientação e apoio profissional; aos técnicos do laboratório de mecânica do CDTN, pela ajuda e acompanhamento nos ensaios realizados; ao CDTN/CNEN e ao CNPq, pelo incentivo e estrutura oferecidos; ao meu pai, pelo exemplo profissional e pessoal e aos demais familiares, pelo apoio.

REFERÊNCIAS

- 1 ASTM. **Standard Terminology Relating to Fatigue and Fracture testing**. E 823-96, 1996.
- 2 CAZAUD, R. **Fadiga de los Metales**. Aguilar, Madrid. 1957.
- 3 ASTM. **Standard Practice for Conducting Force Controlled Constant Amplitude Axial Fatigue Test of Metallic Materials**. E 466-96, 1996.
- 4 DIN. **Testing of Metallic Materials; Rotating Bending Fatigue Test**. 50113, 1982.