



ALGUMAS OBSERVAÇÕES SOBRE O ASPECTO MACROSCÓPICO DAS FALHAS EM FADIGA TORSIONAL REVERSA

J. STRYHALSKI¹, R. BARBIERI²

¹Instituto Federal de Santa Catarina – IF-SC
Avenida Getúlio Vargas, 830, Centro – Jaraguá do Sul-SC – Brasil
CEP 89250-100

²Programa de Pós Graduação em Ciências e Engenharia dos Materiais – PGCEM – UDESC
Campus Universitário Prof. Avelino Marcante - Bairro Zona Industrial Norte – Joinville-SC – Brasil
CEP 89219-710

(Recibido 12 de mayo de 2013, para publicación 20 de septiembre de 2013)

Resumo – Este artigo relata o estudo de fadiga torsional reversa, $R=-1$, e os modos de falha e propagação de trinca para Aço SAE 1020 trefilado a quente, Alumínio 6063 e Ferro Fundido Cinzento, na literatura encontram-se que os padrões de falha sempre são combinações dos Modos I, Modo II e Modo III. É determinada a curva de fadiga de corpos de prova com a forma de uma ampulheta. Também investigam-se os padrões de falha macroscópicos desde o início da trinca até a ruptura final do corpo de prova. Verificando-se que na maioria dos casos a trinca inicia no Modo II, com posterior ramificação para o Modo I até a falha em altos ciclos, e ramificação para o Modo III para médio e baixo ciclo.

Palavras-chave – Fadiga, torção, crescimento de trinca, modos de falha.

1. INTRODUÇÃO

A fadiga é uma redução gradativa da capacidade de carga das peças mecânicas, consequência do avanço de micro-trincas que acumulam com o tempo até a ruptura final da peça ou do corpo de prova, Bishop e Sherratt [1].

A propagação da trinca sob fadiga ocorre com tensões nominais normalmente inferiores ao limite de escoamento do material, porém, com tensões extremamente localizadas e superiores a este limite. Os modos I, II e III de propagação da trinca são definidos em função dos três tipos de movimentos relativos das duas superfícies das trincas. Cada um desses modos está associado a um tipo de campo de tensões na vizinhança da ponta da trinca, e qualquer problema de deformação na ponta desta, pode ser tratado como uma combinação desses modos de deslocamento, da Rosa [2]. Na medida em que a trinca cresce, o seu tamanho torna-se grande o bastante para aumentar o fator de intensidade de tensão na extremidade da trinca, até o nível da tenacidade à fratura do material, quando ocorre uma falha repentina.

Os padrões macroscópicos que normalmente ocorrem em fadiga torsional estão ilustrados na Fig. 1 e nota-se com clareza que os três modos de falha podem ocorrer. Entretanto, estes padrões de falha podem mudar dependendo do fator de intensidade de tensão K_{III} para o carregamento torsional, Darrel e Gary [3]. A taxa de crescimento da trinca com K_{III} constante é maior do que a taxa de crescimento com K_I constante onde existe menor contato entre as superfícies trincadas. Estas observações sugerem que a fricção entre as superfícies trincadas é um importante fator na obtenção da trinca por fadiga no modo III de carga Stanzl e Tschegg [9]. Nos modos II e III de propagação de trincas as superfícies irregulares e as forças de fricção são as principais responsáveis pela determinação da taxa de crescimento da trinca. Uma consequência disso é que a taxa de crescimento não está unicamente ligada ao Fator de Intensidade de Tensão. No Modo I, a tensão tende a abrir a trinca, reduzindo o efeito de fricção e fazendo com que esse

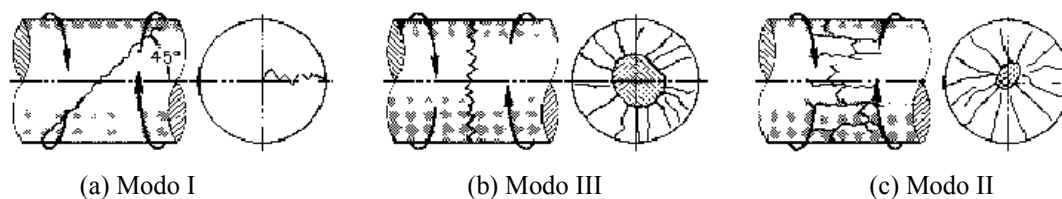


Fig. 1. Aspectos de falha por torção. Adaptado de ASM Handbook apud Shigley [6].

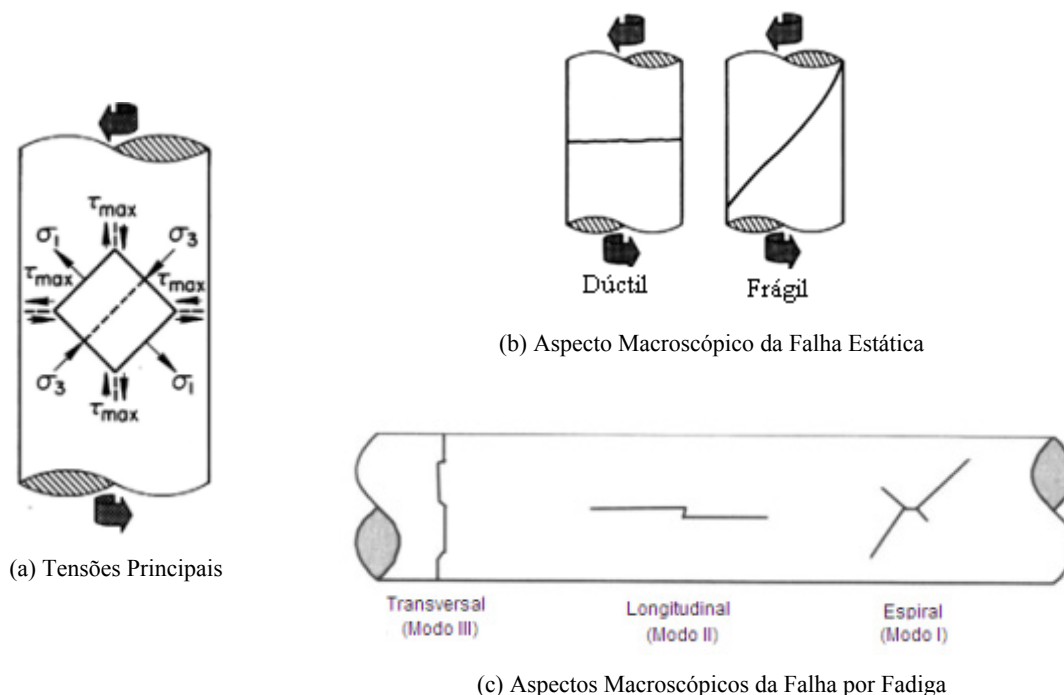


Fig. 2. Aspectos macroscópicos da Falha por torção em aços Adaptado de Socie e Marquis.

modo tenha grandes taxas de crescimento de trinca. Para pequenas trincas, o efeito de fricção pode ser desprezado, Socie e Marquis [7].

Segundo Doquet [4] em fadiga torsional, a trinca inicia no modo II depois ramificando no modo I. Após o início na trinca no modo II o valor de ΔK_{II} diminui e então a trinca deixa de propagar no modo II e continua crescendo no modo I em forma de ramificação. Quando o ângulo da ramificação da trinca não é constante, é devido ao espalhamento cristalográfico da orientação dos grãos na frente da trinca para tubos finos de liga Co45Ni.

Em testes realizados com aços Socie e Marquis [7] relatam que os aspectos macroscópicos da falha por fadiga torsional dependem do material e do nível da tensão alternada. Ao contrário da falha estática por torção, Figura 2(a), a falha por fadiga pode apresentar os aspectos macroscópicos ilustrados na Figura 2(b).

As falhas transversais, formadas ao longo da circunferência da barra normalmente ocorrem com altas tensões alternadas. Estas falhas possuem formato irregular e esta irregularidade normalmente também produz o modo I de falha. As tensões alternadas intermediárias usualmente produzem trincas longitudinais que podem ocorrer ao longo de toda a barra, porém não são muito profundas. Trincas espirais ocorrem usualmente para altos ciclos (baixo valor da tensão alternada) nos planos da máxima

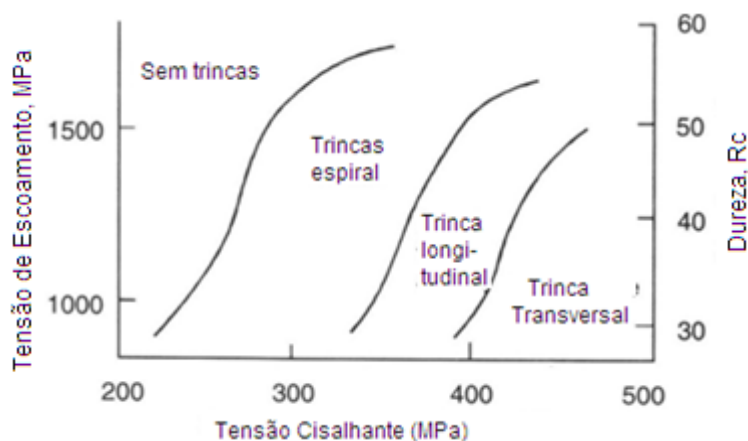


Fig. 3. Mapa dos padrões macroscópicos da falha em fadiga torsional para aço com 0,4% de carbono em função do nível da tensão alternada.

tensão principal, Figura 2(a). Estas trincas são nucleadas no plano da máxima tensão cisalhante, porém giram e se propagam no modo I, Socie e Marquis [7].

Realizando testes de fadiga torsional em aços com 0,4% de carbono e com diversos tratamentos térmicos Zhizhong *et al.* [10] construíram o mapa mostrado na Fig. 3 que ilustra o padrão macroscópico das fraturas em função da tensão de escoamento do material (ou da dureza) e do nível da tensão cisalhante alternada.

Alguns aspectos da falha macroscópica da fadiga com carregamento de torção reversa são mostrados neste trabalho para corpos de prova confeccionados com o aço 1020 laminado a quente, ferro fundido cinzento e alumínio. O procedimento dos testes e os resultados encontrados são mostrados na seqüência.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

A máquina de fadiga torsional utilizada nos testes deste trabalho é a ilustrada na Fig. 4. Todo o seu princípio de funcionamento e os detalhes do projeto deste equipamento são encontrados no trabalho de Tonon e Barbieri [8].

O torque que atua no corpo de prova é do tipo reverso $R=-1$ e é registrado através da célula de carga vista na Fig. 4. Um exemplo dos picos deste sinal (torque) em função do número de ciclos, N , pode ser visto na Fig. 5. Na medida em que a trinca é nucleada, cresce e propaga a rigidez torsional do corpo de prova também é alterada (diminuição) e a curva do torque também é alterada. Desta maneira identifica-se que já houve um crescimento apreciável da trinca que passou de microscópica para macroscópica (indicando que já ultrapassou o estágio I da fadiga). Na prática esta identificação foi realizada com a interrupção do ensaio quando o registro do torque acusa um de aumento de 2% no seu valor nominal que é o valor correspondente ao torque do início do ensaio quando o corpo de prova é isento de qualquer dano.

Após a interrupção do ensaio para a identificação macroscópica da trinca o ensaio é reiniciado e conduzido até que ocorra a ruptura final do corpo de prova (padrão final da falha).

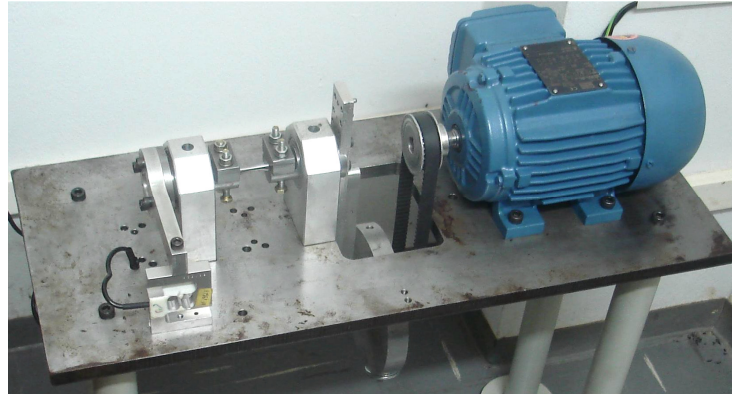


Fig. 4. Máquina para Fadiga torsional.

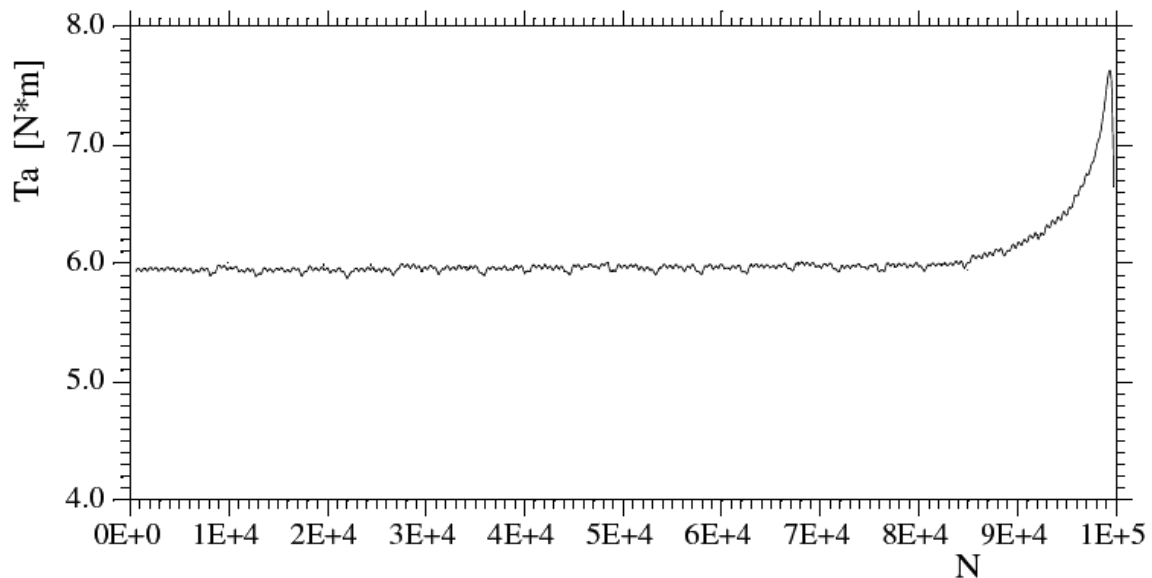


Fig. 5. Picos do Torque em função do tempo.

3. OS CORPOS DE PROVA

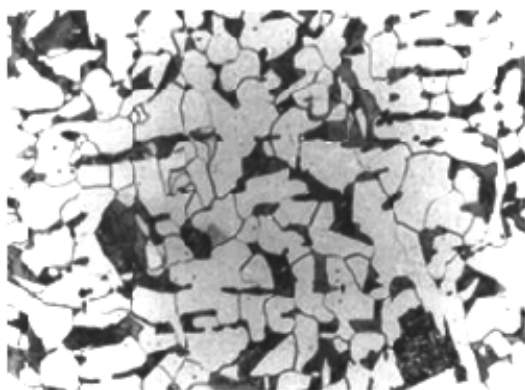
O projeto dos corpos de prova foi elaborado seguindo todas as exigências recomendadas pela norma ISO, 1977 [5] e o acabamento superficial foi obtido com o polimento na direção radial. As propriedades dos materiais empregados nos testes obtidas experimentalmente estão listadas na Tabela 1.

A Figura 6(a) mostra a metalografia para o aço SAE 1020 e Figura 6(b) para o ferro fundido cinzento. A composição química dos materiais ensaiados em porcentagem de peso (wt.%) foi obtida com uso de um espectrômetro óptico (Optical Emission Spectrometer OES-5500 II) e os resultados foram os seguintes:

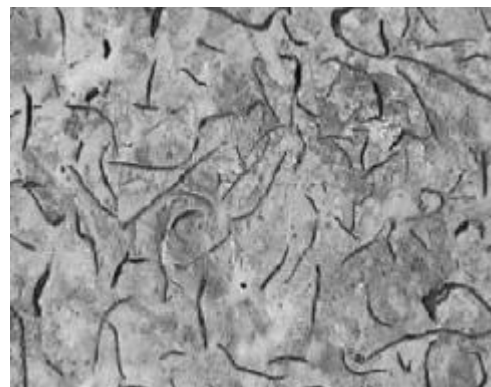
- Aço SAE 1020: Fe 97,422; Mn 0,699; P 0,014; S 0,035; Ni 0,042; Cr 0,051; Cu 0,074; Co 0,334; C 0,163; Sn 0,032; Al 0,026; W 0,301; As 0,58; Ti 0,012; V 0,010; B 0,008; Pb 0,071.
- Ferro Fundido Cinzento: Fe 94,195; C 2,905; Si 2,100; Mn 0,5; S 0,100; P 0,200
- Alumínio: Al 98,869; Fe 0,39; Mg 0,132; Si 0,109; Cu 0,023; Mn 0,298; Cr 0,008; Ti 0,007; Zn 0,076; Ni 0,022; V 0,017; Pb 0,022; Sn 0,027.

Tabela 1. Resultados de ensaios de tração em aço e Ferro fundido cinzento.

	Aço 1020	FoFo Cinzento	Alumínio 6063
Módulo de Young E	238,53 GPa	110,00 GPa	73,20 GPa
Tensão de Escoamento, σ_e	428,66 MPa	-	248,59 MPa
Tensão de ruptura, σ_r	686,93 MPa	250,00 MPa	264,10 MPa
Tensão Máxima, σ_{ut}	723,97 MPa	-	-



(a) aço 1020 (300X)



(b) Ferro Fundido Cinzento (200X)

Fig. 6. Metalografia dos materiais ensaiados.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. Aço 1020

Os resultados encontrados para o aço 1020 estão mostrados na Tabela 2 e a curva de fadiga correspondente para os dados de ruptura é mostrada na Fig. 7. Nota-se que para 3×10^6 de ciclos a ruptura ocorreu com nível de tensão alternada $\tau_a = 209,85$ MPa. Dos dados clássicos da literatura, Shigley [6] o limite de fadiga para vida infinita (teoricamente 10^6 ciclos) em flexão reversa é dado por $0,504 \times \sigma_{ut}$ e em torção reversa é dado por $0,577 \times 0,504 \times \sigma_{ut} = 0,577 \times 0,504 \times 723,97 = 210,53$ MPa que é compatível com o valor obtido experimentalmente. Outro dado interessante que pode ser observado na Tabela 2 é o fato de que a partir do momento que a trinca é detectada até a ruptura final são decorridos (em média) 6% do número total de ciclos até a quebra.

As Figuras 8 a 10 mostram alguns padrões de propagação das trincas para tensões variando de 230 MPa a 280 MPa.

Para tensões consideradas altas (baixo número de ciclos para ruptura) na Fig. 8 a verifica-se a existência de trinca no modo II e na Figura 8(b) nota-se a presença também do modo III. O aspecto da ruptura final pode ser visto na Fig. 11 e a falha transversal é bem característica.

Para tensões consideradas moderadamente alta (baixo número de ciclos até a ruptura também) na Figura 9(a) verifica-se que na primeira parada do ensaio já existiam trincas nos modo II e III. O aspecto da ruptura final pode ser visto na Fig. 12 e pode-se notar que já existem alterações com relação aos padrões da falha mostrados na Fig. 8.

Para tensões consideradas médias (cerca de 200.000 ciclos até a ruptura) na Figura 10(a) a Figura 10(d) verifica-se a grande quantidade de trinca no sentido axial do corpo de prova. Existem também trincas no sentido radial e o aspecto é muito próximo do ilustrado na Figura 1c (modo II). O aspecto da ruptura final pode ser visto na Fig. 13 onde nota-se o aspecto irregular da fratura final e na Figura 10 (d) a existência de trincas no modo I.

Tabela 2. Tensão Alternada e Número de Ciclos para o Aço 1020.

CP	τ_a [MPa]	N^1	N	$(N-N^1)/N$
1	277.60	8.300	8.830	0,0601
2	271.50	12.700	13.610	0,0668
3	262.76	23.500	24.890	0,0558
4	258.52	22.300	23.920	0,0677
5	253.93	39.000	41.450	0,0591
6	243.87	67.200	71.500	0,0601
7	230.29	200.500	213.350	0,0602
8	222.90	512.900	545.640	0,0600
9	212.40	1.287.000	1.369.800	0,0604
10	211.78	1.508.000	1.593.700	0,0538
11	209.85	2.889.500	3.063.600	0,0568

N^1 =número de ciclos para a primeira interrupção do ensaio
 N = número de ciclos para a ruptura do corpo de prova

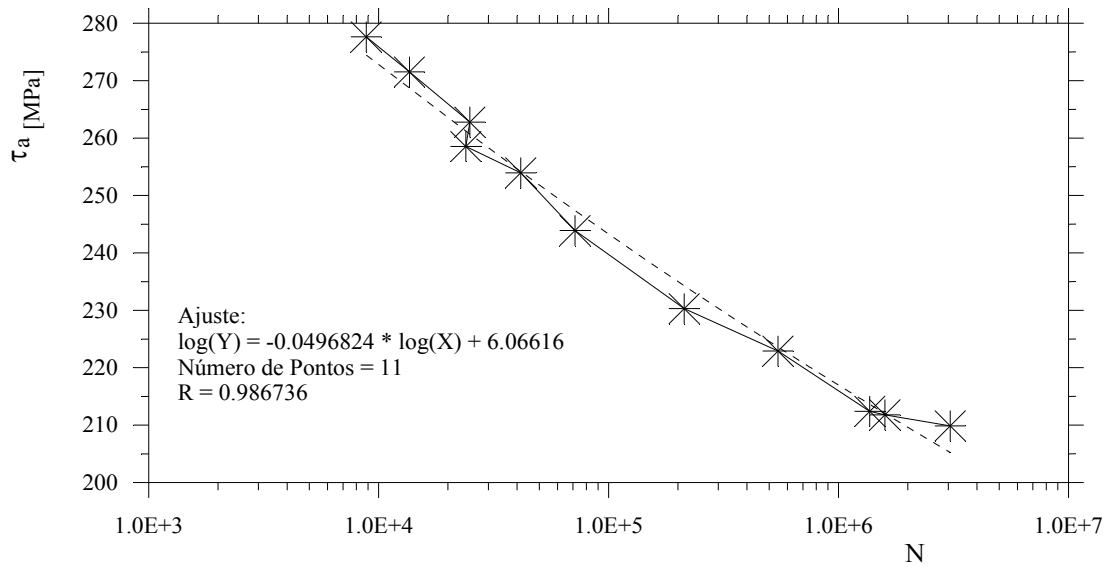
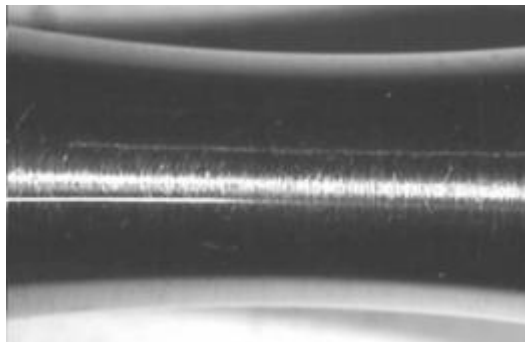
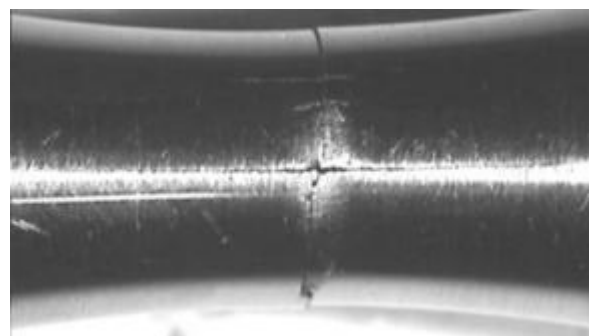


Fig. 7. Curva de Fadiga Torsional para o Aço 1020.



(a)



(b)

Fig. 8. Padrão de Evolução da Trinca para o Aço 1020 com $\tau_a=277\text{MPa}$ (alta).

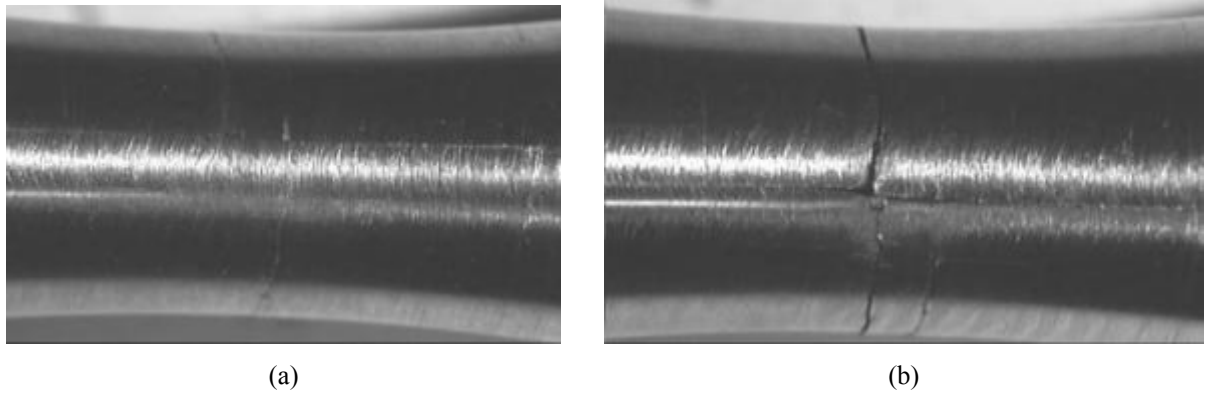


Fig. 9. Padrão de Evolução da Trinca para o Aço 1020 com $\tau_a=254$ MPa (moderadamente alta).

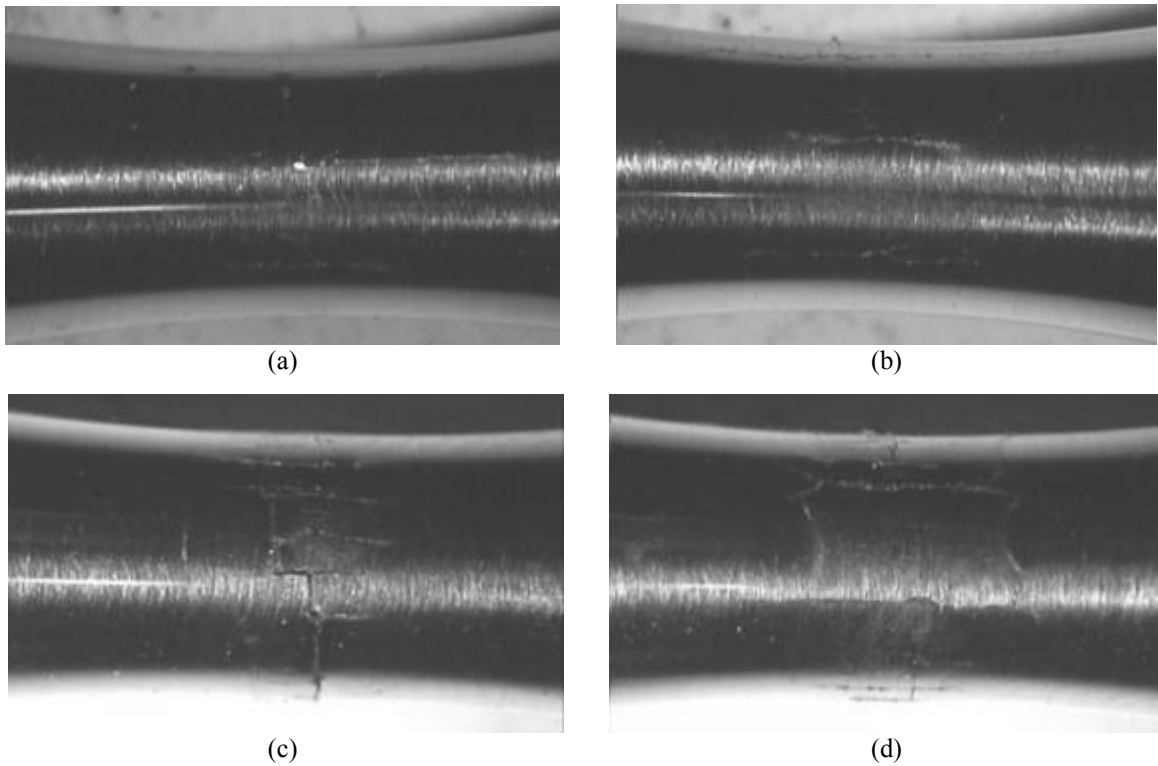


Fig. 10. Padrão de Evolução da Trinca para o Aço 1020 com $\tau_a=230$ MPa (média).

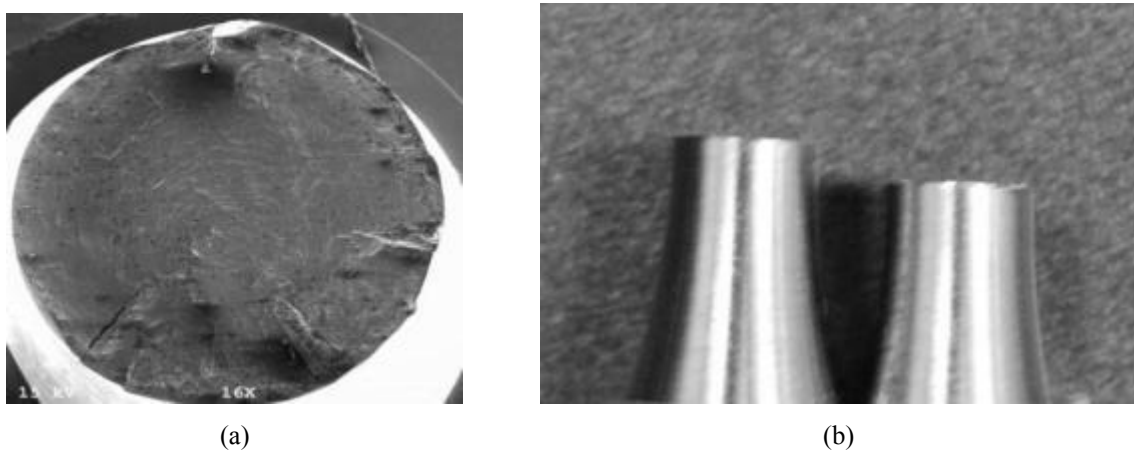


Fig. 11. Aspecto da falha de corpo de prova para alta tensão 280 Mpa.

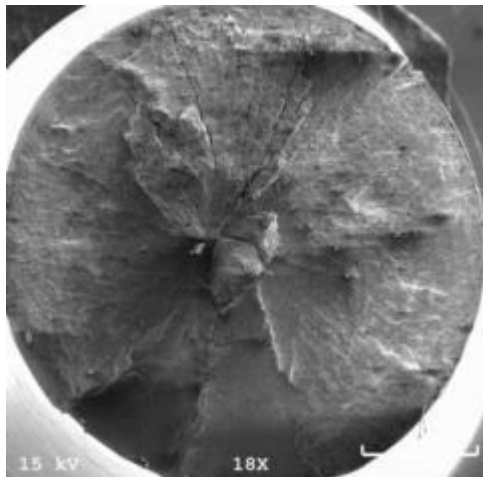


Fig. 12. Aspecto da falha de corpo de prova para tensão média, 250 Mpa.

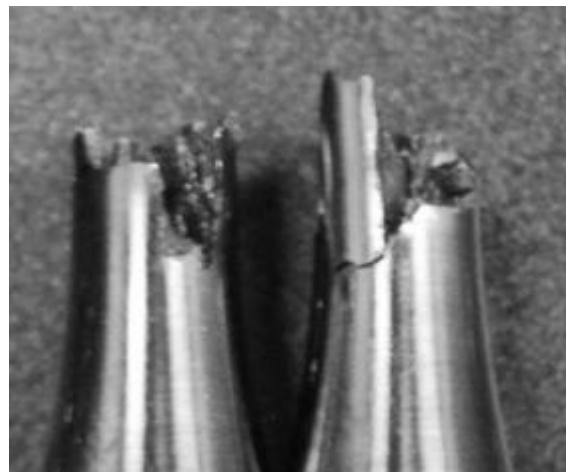
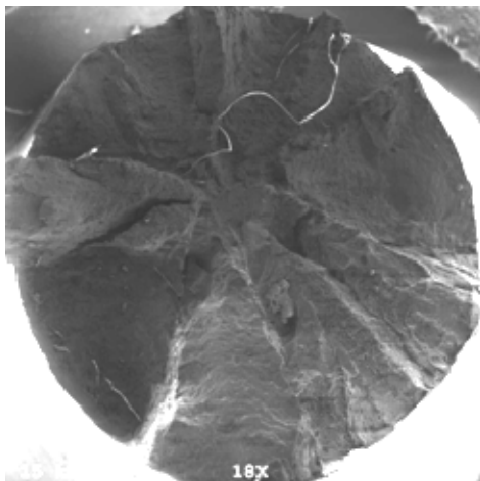


Fig. 13. Aspecto da falha de corpo de prova para baixa tensão, 230 MPa.

Tabela 3. Tensão Alternada e Número de Ciclos para o Ferro Fundido Cinzento.

CP	τ_a [MPa]	N^1	N	$(N-N^1)/N$
1	142.19	1160	1200	0,0333
2	133.29	4280	4424	0,0325
3	110.71	26340	27960	0,0579
4	99.09	106380	112565	0,0549
5	98.70	115870	120976	0,0422
6	94.13	114270	118240	0,0336
7	90.92	174200	198240	0,1213
8	79.30	-	1588456	-

N^1 =número de ciclos para a primeira interrupção do ensaio

N= número de ciclos para a ruptura do corpo de prova.

4.2.

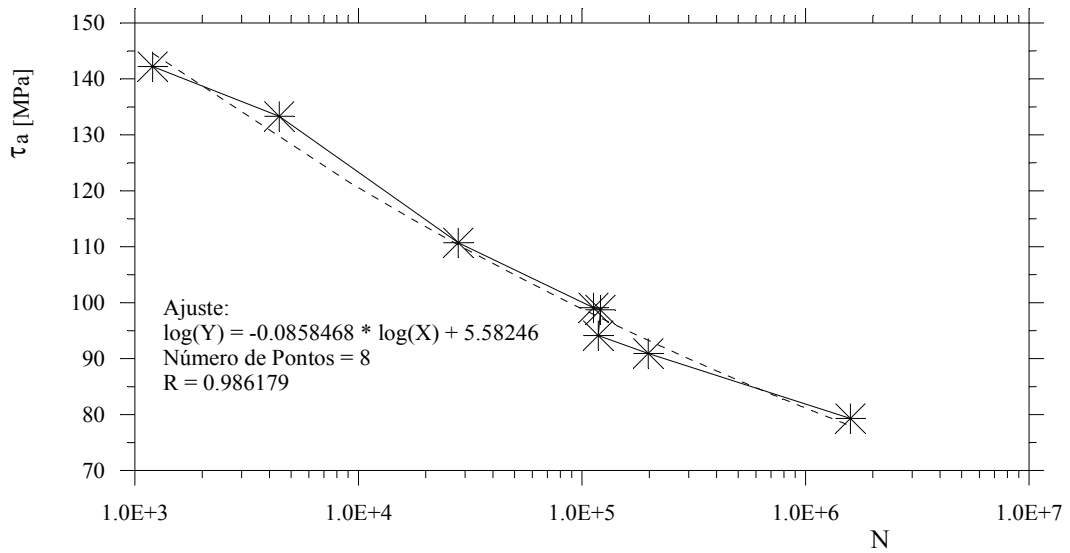
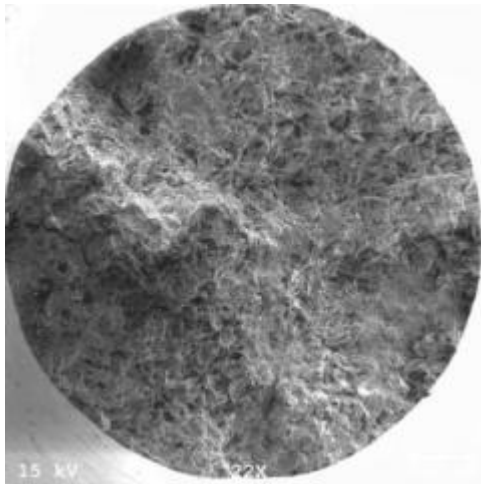
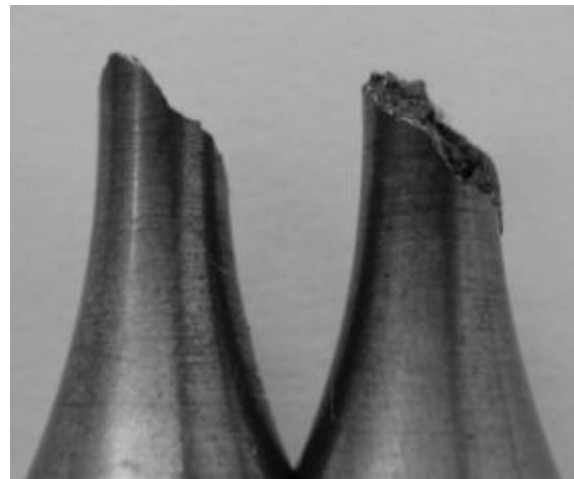


Fig. 14. Curva de Fadiga Torsional para o Ferro Fundido Cinzento.

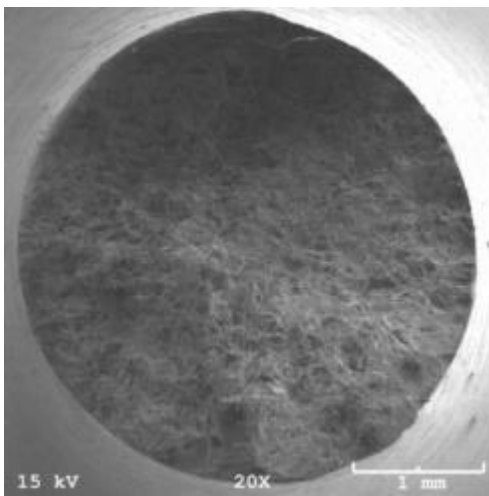


(a)

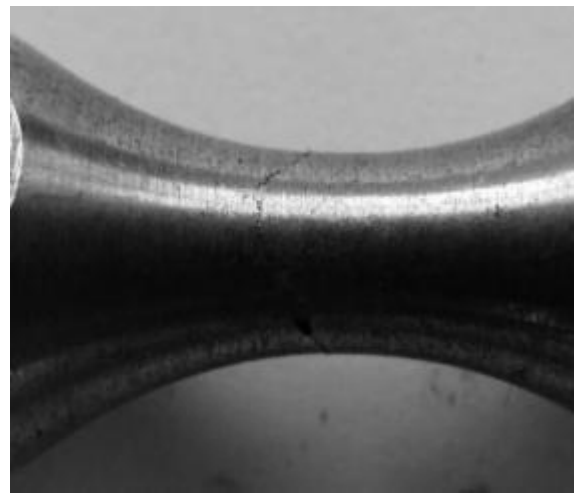


(b)

Fig. 15. Aspecto da falha de corpo de prova de ferro fundido cinzento com tensão alternada de 140 MPa.



(c)



(d)

Fig. 16. Aspecto da falha de corpo de prova de ferro fundido cinzento com tensão alternada de 80 MPa.

4.2. Ferro fundido Cinzento

Os resultados encontrados para o ferro fundido cinzento estão mostrados na Tabela 3 e a curva de fadiga correspondente para os dados de ruptura é mostrada na Fig. 14.

Para os corpos de prova confeccionados com o ferro fundido cinzento o padrão de falha encontrado foi sempre o mesmo independente do valor da tensão alternada do ensaio: a fratura ocorreu sempre no modo I (muito semelhante à falha estática para materiais frágeis). Estes resultados podem ser observados nas Figuras 15 e 16 que foram obtidas para tensões alternadas de 140 MPa e 80 MPa, respectivamente.

4.3. Alumínio

Os resultados encontrados para os corpos de prova confeccionados com alumínio estão mostrados na Tabela 4 e a curva de fadiga correspondente para os dados de ruptura é mostrada na Fig. 17.

Como pode ser observado nas Figuras 18 e 19 o modo de falha por fadiga torsional reversa para estes corpos de prova sempre foi o modo III, independente do valor da tensão alternada da tensão cisalhante. Como já havia sido observado para os corpos de prova de ferro fundido, o aspecto macroscópico desta falha é semelhante ao da falha estática. Neste caso, é a falha estática característica para materiais dúcteis com carregamento de torção.

5. CONCLUSÕES

Avaliando os resultados mostrados neste trabalho conclui-se:

- O padrão de falha encontrado para os corpos de prova confeccionados com alumínio é semelhante ao padrão de falha estática para materiais dúcteis com carregamento de torção. A falha ocorre no modo III.

Tabela 4. Tensão Alternada e Número de Ciclos para o Alumínio 6063.

CP	τ_a [MPa]	N^1	N	$(N-N^1)/N$
1	191.81	-	180	-
2	140.98	4000	4257	0,0604
3	132.98	8040	8793	0,0856
4	124.24	19850	21510	0,0772
5	121.66	20130	23517	0,1440
6	114.54	51890	57573	0,0987
7	107.49	48900	53361	0,0836
8	96.33	166900	184023	0,0930
9	89.20	463220	503676	0,0803
10	86.41	547300	611901	0,1056
11	82.08	1190430	1255302	0,0517
12	79.30	1570300	1726488	0,0905
13	75.80	3470400	3724731	0,0683

N^1 =número de ciclos para a primeira interrupção do ensaio

N= número de ciclos para a ruptura do corpo de prova

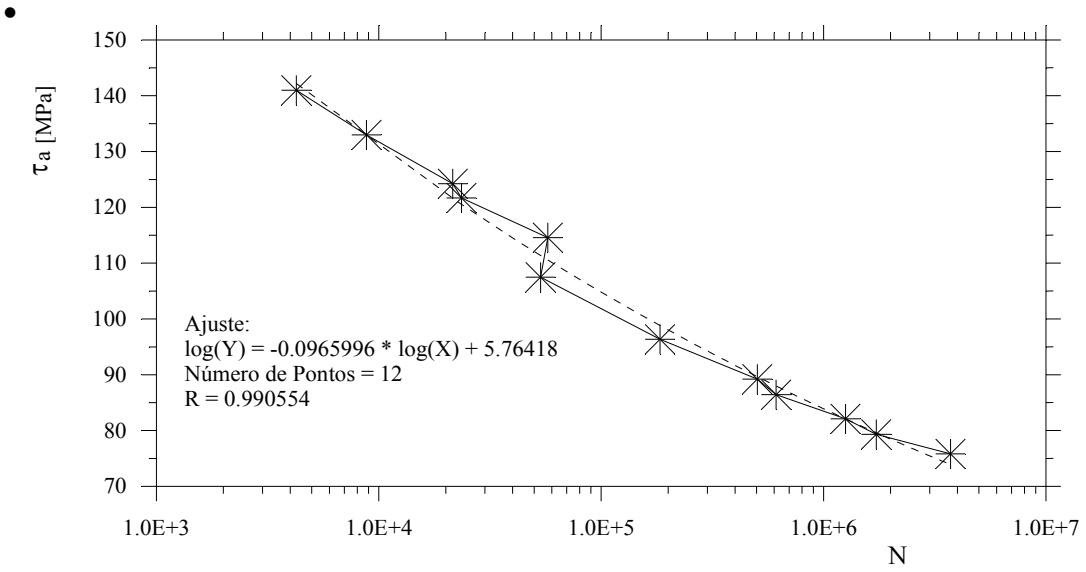
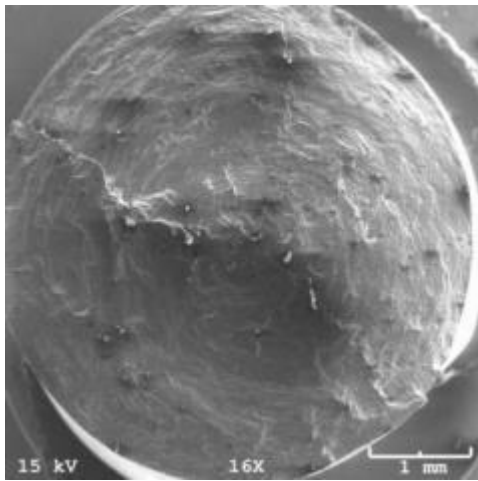
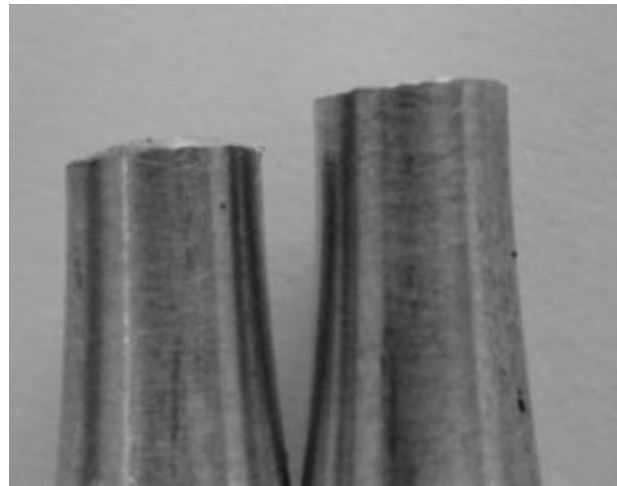


Fig. 17. Curva de Fadiga Torsional para o Alumínio.

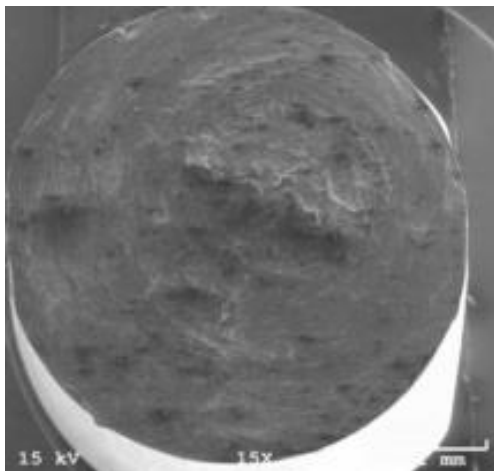


(a)

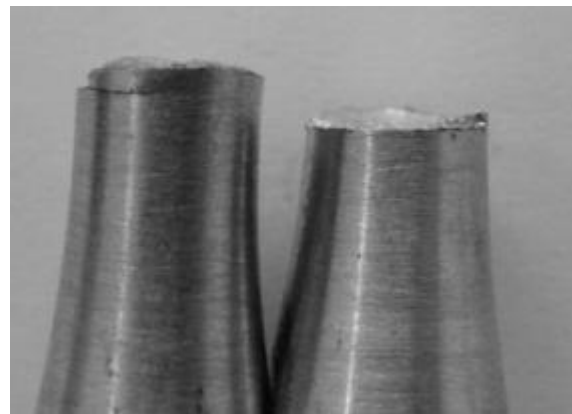


(b)

Fig. 18. Aspecto de falha do alumínio em alta tensão, 141 Mpa.



(a)



(b)

Fig. 19. Aspecto de falha para alumínio em baixa tensão 82 MPa.

O padrão de falha encontrado para os corpos de prova confeccionados com ferro fundido cinzento é semelhante ao padrão da falha estática para materiais frágeis com carregamento de torção. A falha predominante é no modo I; e

- O padrão da falha macroscópica dos corpos de prova confeccionados com o aço 1020 é dependente do nível da tensão alternada. A trinca macroscópica sempre origina no modo II. Para altas tensões a falha final apresenta aspectos do modo III. Para tensões médias o aspecto da falha é irregular e apresenta características dos modos II e III predominantemente. Para baixas tensões a ruptura final pode apresentar características do modo I também.

REFERENCIAS

- [1] Bishop, N.W.M., Sherratt, F., “A theoretical solution for the estimation of Rainflow ranges from power spectral density data”, *Fatigue and Fracture of engineering materials and structures*, **13**(4), 311-326 (1990)
- [2] Da Rosa, E., *Mecânica da Fratura*, Apostila do Curso de Mestrado, UFSC (2002)
- [3] Darrell, F.S., Gary, B.M., *Multiaxial Fatigue*, SAE International Society of Automotive (2000)
- [4] Doquet, V., “Crack initiation mechanisms in torsional fatigue”, *Fatigue Fracture Engineer Materials and Structures*, **20**(2), 227-235 (1997)
- [5] ISO Steel – Torsional Stress Fatigue Testing, 1352 (1977)
- [6] Shigley, J.E., *Elementos de Máquinas*, Terceira edição, Rio de Janeiro, LTC, Livros Técnicos e científicos (1984)
- [7] Socie, D., Marquis, G.B., *Multiaxial Fatigue*, Society of automotive engineers Inc. USA (2000)
- [8] Tonon, F.J., Barbieri, R., Barbieri, N., “Investigating torsional fatigue with a novel resonant testing fixture”, *International Journal of Fatigue*, **31**, 1271–1277 (2009)
- [9] Stanzl, S., Tschegg, E., “The sliding Mode Crack Closure on Mode II Fatigue Crack Growth. Basic Question in Fatigue”, *American Society of Testing and Materials*, **1**, 214-232 (1998)
- [10] Zhizhong, H., Lihua, M., Shuzhen, C., “A study of shear fatigue crack mechanisms”, *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*, **15**(6), 563-572 (1992)

SOME MACROSCOPIC OBSERVATIONS OF REVERSE TORSIONAL FATIGUE

Abstract – This article reports the study of torsional fatigue reverse, $R = -1$, and the failure modes and crack propagation for Steel SAE 1020 hot-drawn, Aluminum and Cast Iron Gray6063, in the literature is that the patterns of failure always are combinations of modes I, Mode II and Mode III. In this document is given the curve of fatigue specimens in the shape of an hourglass. It also investigates the patterns of failure from the beginning of macroscopic crack until the final rupture of the specimen. Noting that in most cases the crack starts in Mode II, with further branch to the Mode I to failure at high cycles, and branch to the Mode III for medium and low cycle.

Keywords – Fatigue, Twist, Crack growth, Failure modes.