



ESTUDO DA ENERGIA DISSIPADA NO ENSAIO DE FADIGA

Fernando Bettioli Elias¹

Ricardo Mikio Doi²

Rodrigo Concer³

Anderson Daleffe⁴

Resumo: Este trabalho tem como objetivo verificar o comportamento do aço inoxidável AISI 304L sujeito a ensaios uniaxiais de fadiga do tipo tração-compressão. O parâmetro principal para estudo foi a energia dissipada pelas amostras. A temperatura da peça no decorrer dos ensaios foi medida com o auxílio de termopares e de uma câmera térmica para que fosse possível observar sua distribuição na superfície da amostra ensaiada e possibilitando o cálculo da energia dissipada a cada pausa do equipamento. Uma análise de sensibilidade da energia dissipada apontou o gradiente de temperatura como o parâmetro mais influente nos cálculos da energia liberada. Várias análises foram realizadas e foi possível estimar a vida a fadiga do material e verificar como os parâmetros se comportam durante os ensaios, abordando as relações entre si.

Palavras-chave: Ensaios de Fadiga; Energia dissipada; Temperatura.

1 INTRODUÇÃO

Diversos estudos relacionados a projetos de máquinas e equipamentos em geral têm mostrado que a maior parte das falhas relacionadas a componentes mecânicos, em torno de 90%, está relacionada à fadiga sofrida pelo material que o compõe (DA ROSA, 2002). A trinca se propaga ao longo de sua utilização, geralmente de forma repentina, por isso, tão perigosa. Na maioria das vezes, esses projetos envolvem esforços que variam de amplitude e intensidade em função do tempo, porém, numa primeira observação, podem nos levar a crer, de forma enganosa, que esses esforços são estáticos.

Com o passar do tempo, a repetição das solicitações, sejam estas cíclicas ou não, levam o material a sofrer microfissuras que avançam de forma quase infinitesimal

¹ Bacharel em Engenharia Mecânica UniSATC. E-mail: fbelias@hotmail.com

² Professor Centro Universitário UniSATC. E-mail: ricardo.doi@satc.edu.br

³ Mestrando em Engenharia Metalúrgica UniSATC. Email: rodrigoconcer@gmail.com

⁴ Professor Dr. Centro Universitário UniSATC. E-mail: anderson.daleffe@satc.edu.br



no meio material, gerando deformações plásticas que se agravam em função do tempo até que estas venham a nuclear uma trinca, crescendo e se propagando até a ruptura final, caracterizando a falha por fadiga. O número de ciclos suportados pela peça está diretamente relacionado à tensão a ela empregada, sendo que maiores tensões caracterizam uma menor vida à fadiga (SHIGLEY, 2006).

O aço inoxidável AISI 304L é um aço de liga cromo-níquel austenítico com teor de carbono muito baixo, possui alta resistência a corrosão e grande durabilidade, mesmo em ambientes agressivos, podendo ser aplicado tanto para trabalhos em altas temperaturas quanto baixas temperaturas (CALLISTER, 2002).

O projeto de equipamentos que necessitam de confiabilidade e segurança está diretamente relacionado à consideração dos parâmetros de fadiga no seu desenvolvimento. Uma série de métodos pode ser empregado para se avaliar o comportamento de uma determinada peça em relação a sua vida à fadiga, sendo que, comumente, os que relacionam a tensão em função do número de ciclos são os mais encontrados na literatura. Outra diferente forma de abordagem relacionada ao estudo da fadiga em materiais metálicos envolve análises de dissipação de energia para se estimar a vida à fadiga de determinado material (ATZORI *et al.* 2010).

Para isso, a temperatura da amostra é captada com o auxílio de câmera infravermelha e termopares, tornando-se essencial para a obtenção do gradiente de temperatura empregado no cálculo da energia liberada para o meio durante o ensaio, e que, posteriormente, será relacionada à tensão aplicada a fim de se estimar a vida a fadiga do material (MENEGETTI, 2006).

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Todo material possui uma tensão limite de escoamento, sendo que os esforços que lhe serão atribuídos devem estar abaixo desse limite, pois se caracteriza pela tensão máxima que o material pode suportar sem se deformar plasticamente. Geralmente, todos os fabricantes especificam que o produto pode suportar esforços próximos ou menores a este limite devido a controles de processo, ensaios e cuidados para que não haja problemas.



Mesmo com todas essas precauções, é possível que o material venha a falhar ou romper de repente, sem nenhum tipo de aviso ou motivo aparente, mesmo em tensões muito abaixo do seu limite. Essa é uma falha típica de um fenômeno conhecido como fadiga. O mecanismo da fadiga consiste no avanço das microfissuras geradas por conta das solicitações repetitivas. Esta falha possui, mesmo em metais dúcteis, natureza frágil, pois a deformação plástica é muito pequena, quando esta não é nula, e a superfície de fratura é perpendicular a tensão aplicada (NORTON, 2006). Geralmente, a fratura por fadiga apresenta-se fibrosa na região da propagação da trinca e cristalina na região da ruptura repentina.

Trabalhos envolvendo medições de temperatura em experimentos de fadiga em materiais metálicos a fim de se estimar o seu limite de resistência à fadiga podem ser encontrados em estudos conduzidos por alguns autores como La Rosa (2000), Dengel (1980) e Harig (1983), sendo possível verificar que a temperatura da amostra encontra-se mais elevada nos pontos onde há concentração de tensões, relacionando também às variações de temperatura da amostra durante o ensaio com o efeito termoelástico do material.

A temperatura do corpo sofre uma variação proporcional à tensão durante todo o tempo em que ele é ensaiado devido ao efeito termoelástico, resultante da carga cíclica aplicada no material. Esse efeito é gerado devido à passagem da zona de tração para a zona de compressão, conforme mostrado na Fig.1, formando uma variação senoidal com razão de tensão $R=-1$, ou seja, a tensão máxima $\sigma_{m\acute{a}x}$ e a tensão mínima $\sigma_{m\grave{i}n}$ possuem mesmas amplitudes, calculada pela seguinte equação, baseada em Callister (2002).

$$R = \frac{\sigma_{m\grave{i}n}}{\sigma_{m\acute{a}x}}$$

(1)

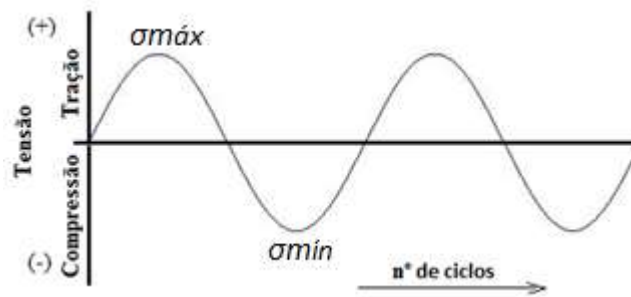
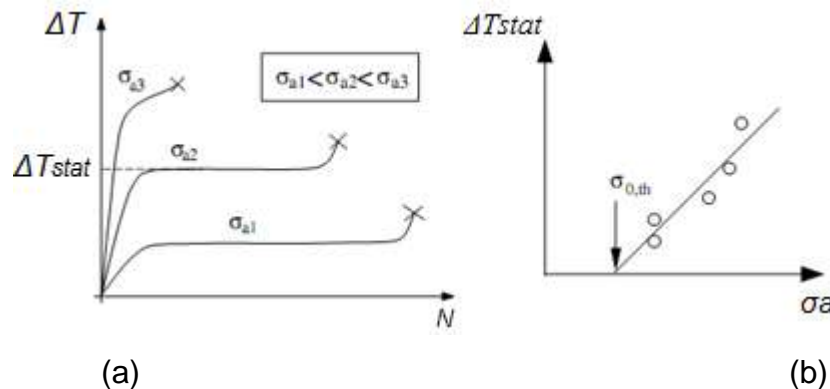


Figura 1 – Ciclo de tensões alternadas de mesma magnitude.

Por convenção as tensões de tração são positivas e de compressão negativas. Estudos como os de Catalbiano (1984) e Reifsnider (1974) relatam que a amplitude da temperatura da amostra está diretamente associada à tensão aplicada durante o ensaio, e tende a se estabilizar em um ΔT estático ao longo dos ciclos, conforme a Fig. 2a. Pode-se estimar o limite de resistência à fadiga do material relacionando os valores da variação de temperatura (ΔT) estático com as suas respectivas tensões, conforme mostra a Fig. 2b do estudo de Meneghetti (2006).

Figura 2 - Variação da temperatura estática em função do número de ciclos (a) e em função da tensão aplicada (b) no ensaio uniaxial

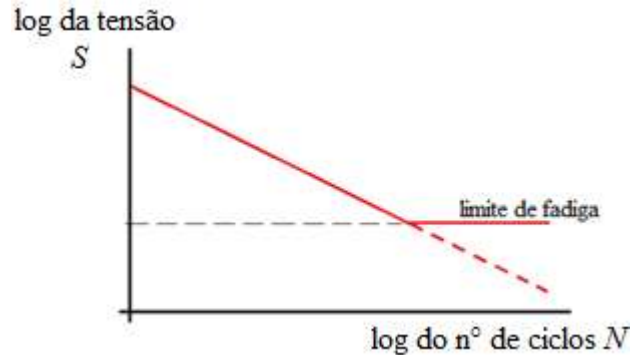


Fonte: Meneghetti (2006).

Comumente empregado no estudo da fadiga e bem relatado na literatura (Norton, 2006) está o Diagrama de Wöhler (Fig.3), ou Diagrama S-N, retratando a tensão de fadiga (S) e o número de ciclos (N), em escala logarítmica, a fim de se observar o limite de resistência à fadiga.

Amostras ensaiadas que ultrapassam 2 milhões de ciclos são consideradas como amostras com vida infinita (Meneghetti, 2006).

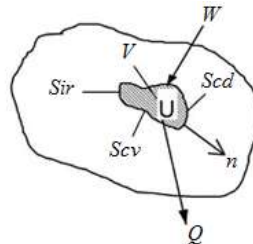
Figura 3 – Curva de Wöhler ou Diagrama S-N.



Muitos trabalhos, como por exemplo, Meneghetti (2006) e Atzori et al. (2010), utilizaram uma câmera térmica infravermelha para capturar os valores da temperatura da superfície das amostras sujeitas a ensaios de fadiga. Neste trabalho, a temperatura será medida com a câmera térmica e com termopares colados na superfície da peça.

A energia (Q) decorrente do emprego de um trabalho (W) é dissipada pela amostra por unidade de volume (V) do material por ciclo para a direção normal no decorrer dos ensaios. Essa energia é estimada utilizando a condução (S_{cd}), a convecção (S_{cv}) e a radiação (S_{ir}) da energia da superfície da peça, conforme ilustrada na Fig. 4. O balanço de energia pode ser encontrada em Meneghetti (2006).

Figura 4 – Balanço de energia do material sujeito a cargas de fadiga



Fonte: Meneghetti (2006).

Meneghetti chegou na simplificação da equação que será utilizada neste estudo, para se estimar a energia dissipada para o ambiente pela amostra:



$$Q = \left(\rho \cdot c \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \Big|_{t=(t^*)+} \right) \cdot \frac{1}{f} \quad [\text{J}] \quad (2)$$

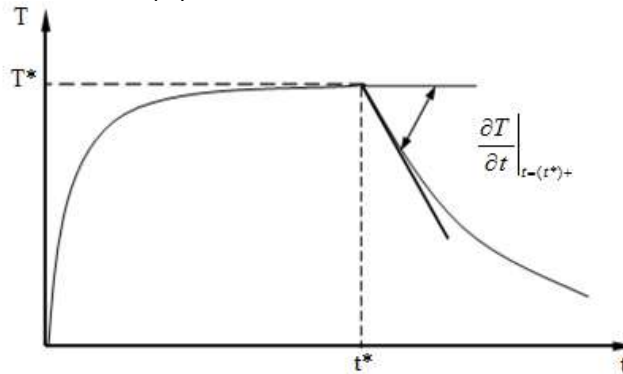
Nesta equação, $\frac{\partial T}{\partial t} \Big|_{t=(t^*)+}$ é a taxa de variação da temperatura em função do tempo após o instante $(t^*)+$, f é a frequência utilizada no ensaio, ρ é a densidade do material e c é o calor específico do material estudado, que neste caso para o aço 304L valem 7900 kg/m³ e 500 J/(kg.K) respectivamente. As propriedades mecânicas do aço inoxidável 304L podem ser observadas na Tab.1.

Tabela 1 – Propriedades mecânicas do Aço Inoxidável AISI 304L, Meneghetti (2006).

Resistência à tração [MPa]	Tensão limite de escoamento [MPa]	Módulo de elasticidade [GPa]	Alongamento após fratura [%]
650	300	200,5	60

Com base na abordagem descrita, Meneghetti utilizou o método de estudo baseado em curvas de resfriamento que são geradas após a parada do equipamento quando a amostra encontrava-se numa temperatura estacionária (T^*) e esta tende a decair a temperatura do ambiente após o instante de tempo $(t^*)+$, conforme ilustrado na Fig.5.

Figura 5 – Determinação de Q por meio de medições experimentais da taxa de resfriamento no instante $t = (t^*)+$



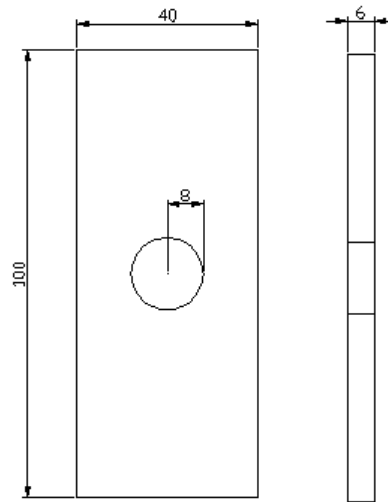
Fonte: Meneghetti (2006).

O ponto da derivada foi escolhido visualmente para cada curva de resfriamento. Ampliando a curva várias vezes, a reta foi definida no ponto (t^*, T^*) subjetivamente. A inclinação dessa reta nos fornece a derivada no ponto $\frac{\partial T}{\partial t} \Big|_{t=(t^*)+}$.

3 PROCEDIMENTO METODOLÓGICO

As amostras têm formato retangular e um furo no centro, conforme ilustrado na Fig. 6. Todas as amostras com as mesmas dimensões foram usinadas em uma fresa convencional deixando-as com superfícies planas e sem fatores que pudessem agir como concentradores de tensão na superfície.

Figura 6 – Corpo de prova e dimensões após usinado.

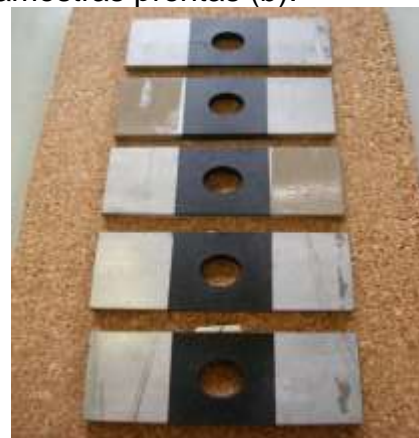


Este formato de amostra foi escolhido com a finalidade de se estudar o comportamento do material sujeito a um concentrador de tensão, que neste caso é o furo no centro da peça, onde um termopar foi colado em seu interior utilizando um adesivo epóxi a base de prata, por ser um bom condutor térmico. Em seguida, todas as amostras tiveram suas extremidades isoladas com fita e foram pintadas na cor preta com o intuito de melhorar a captação das imagens térmicas, diminuindo consideravelmente a reflexão da peça. Após cerca de 15 minutos, com a tinta seca, as fitas isolantes foram retiradas, conforme Fig. 7, e deram início aos ensaios.

Figura 7 – Preparação das amostras ensaiadas: fixação do termopar, isolamento das extremidades e pintura (a) e amostras prontas (b).



(a)



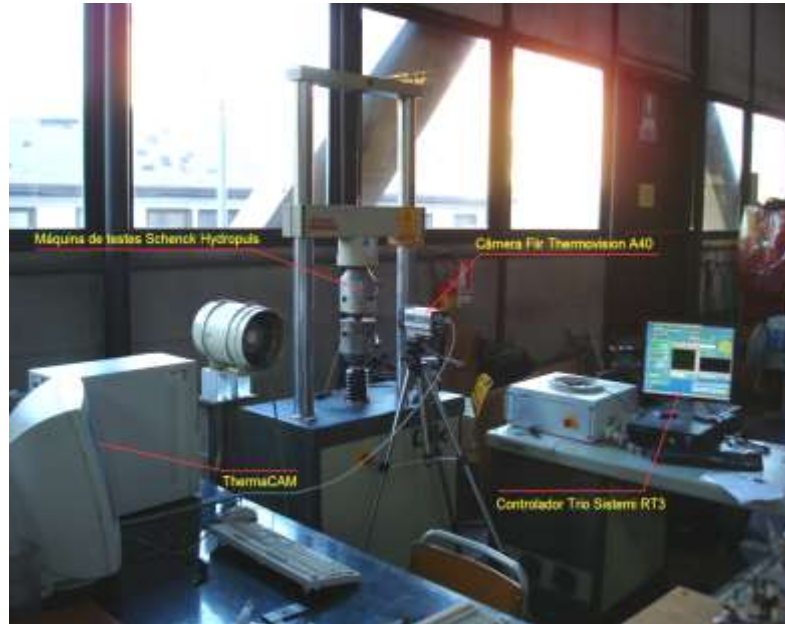
(b)



A máquina de teste empregada foi uma Schenck Hydropuls, de circuito fechado e servo-hidráulico, sistema equipado com uma célula de carga de 100 kN e um controlador Trio Sistemi RT3. Ensaios dinâmicos foram conduzidos através da pré-definição de uma velocidade igual a 2 mm/min. Os valores de temperatura foram monitoradas por meio de uma câmera Flir Thermovision A40 capaz de detectar a radiação infravermelha com uma resolução de 0,1°C, além de um termopar colado na superfície lateral do interior do furo da amostra, o esquema dos equipamentos é representado na Fig. 8.

Para o funcionamento dos *softwares* RT3 da máquina de tração, do *software* da câmera Thermacam e do termopar, foram utilizados dois computadores, um para controlar a máquina e o outro para monitoramento de temperatura. No RT3, todas as funções da máquina de teste são salvas, tais como: comandos de início, pausa, frequências e tensão do ensaio, tensões máximas, contagem de ciclos, e controles de segurança. Assim sendo, após a regulagem do equipamento, o ensaio se dará dentro das normas impostas pelo operador e os valores são registrados e salvos de acordo com as necessidades. O *software* que monitora a temperatura da câmera térmica e do termopar mostra a imagem térmica instantânea da peça e gráficos de temperatura em função do tempo, sendo possível gravar o comportamento da temperatura durante as pausas dos ensaios para se gerar as curvas de resfriamento utilizadas no cálculo da energia dissipada.

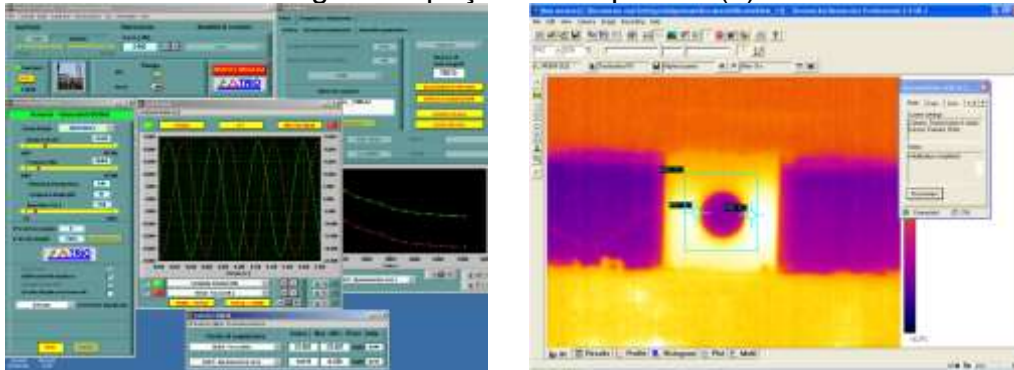
Figura 8 – Posicionamento dos equipamentos utilizados no ensaio de fadiga.



A amostra previamente preparada foi levada à máquina de testes e presa verticalmente por meio de duas castanhas hidráulicas, de forma que os movimentos de tração e compressão fossem perpendiculares a sua seção transversal.

Então os procedimentos foram controlados, por meio do controlador RT3, conforme Fig. 9, onde as funções da máquina de teste são programadas, tais como: comandos de início, pausa, frequências e força do ensaio, contagem de ciclos e controles de segurança. Da mesma forma, os valores de temperatura da câmera foram expressos através de seu *software* ThermoCAM. No outro computador, tem-se a imagem térmica instantânea da amostra e as temperaturas podem ser diferenciadas de acordo com a cor da imagem, variando entre preto (valores amenos) e branco (valores elevados).

Figura 9 – Softwares de controle dos ensaios: RT3 (a) e ThermoCAM com imagem da peça em tempo real (b).



Após a regulagem de todo equipamento, iniciou-se o ensaio de tração-compressão com o primeiro nível de força aplicada, criando uma tensão pré-definida na área da seção transversal, mais especificamente na região do furo da peça. As tensões empregadas em cada amostra (σ_a), nos ensaios, constam na Tab.2.

Tabela 2 – Parâmetros estabelecidos para cada amostra ensaiada.

Amostra	Força Max. [kN]	Seção transversal [mm ²]	Tensão σ_a [MPa]
1	37,4	144	260
2	34,5	144	240
3	31,6	144	220
4	28,8	144	200
5	26,6	144	180
6	24,4	144	170
7	23,0	144	160
8	21,6	144	150

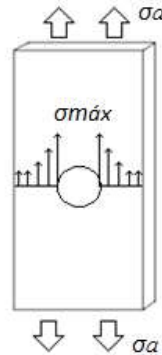
A força aplicada na amostra gera um aumento na sua temperatura tendendo a uma estabilização, visivelmente verificada através do *software* de acesso às temperaturas. Quando essa estabilização foi atingida, iniciou-se a gravação da temperatura através dos *softwares*. Em seguida, a máquina era parada, gerando uma curva de resfriamento, ou curva de decaimento da temperatura. Esse procedimento se sucedeu a cada 15 mil ciclos, em média, e diversas curvas de resfriamento foram obtidas para cada amostra, até que esta fadigasse ou sua tensão limite de fadiga fosse

atingida. Utilizando as curvas de resfriamento, a derivada da temperatura em função do tempo foi encontrada para cada uma, permitindo determinar a energia dissipada utilizando a Eq.2.

4 RESULTADO E ANÁLISE

Devido ao fator de concentração de tensão (K_t) influenciar neste tipo da amostra, o cálculo desse fator deve ser considerado a fim de se obter a tensão máxima ($\sigma_{m\acute{a}x}$) na peça, conforme a Fig. 10, pois esta é a tensão responsável pelo início da falha no furo da peça.

Figura 10 – Influência do fator de concentração na amostra.



A expressão para determinar o fator de concentração de tensão para $\frac{D}{L} \leq 0,65$ é facilmente encontrado na literatura (NORTON, 2006).

$$K_t = 3,0039 \cdot 3,753 \cdot \frac{D}{L} \quad (3)$$

Para o cálculo das tensões máximas, utiliza-se a equação da definição de K_t , sendo σ_a a tensão escolhida no ensaio.

$$\sigma_{m\acute{a}x} = \sigma_a \cdot K_t \quad [\text{MPa}] \quad (4)$$



Utilizando a Eq. 3, encontram-se $K_t = 1,50$ e com a Eq. 4 as tensões máximas $\sigma_{máx}$ de cada teste, expostas na Tab.3. Com o monitoramento da temperatura, foi possível verificar que a temperatura da amostra cresce em função do tempo, seguindo até uma estabilização (ΔT_{stat}). Todas as estabilizações da temperatura, para cada amostra e antes de cada pausa do equipamento, foram registradas e com elas uma média em função do número de curvas de resfriamento pode ser feita, conforme a Tab. 3.

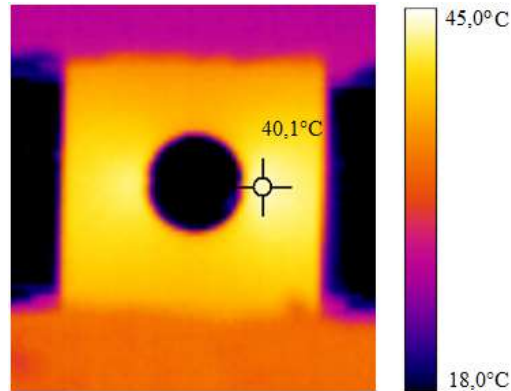
Tabela 3 – Tensões máximas encontradas e ΔT_{stat} de cada amostra.

Amostra	Força Max. [kN]	Tensão máxima $\sigma_{máx}$ [MPa]	ΔT_{stat} [°C]
1	37,4	390	38,4
2	34,5	360	56,8
3	31,6	330	45,0
4	28,8	300	41,5
5	26,6	270	26,5
6	24,4	255	38,0
7	23,0	240	26,3
8	21,6	225	27,5

Algumas temperaturas não se comportaram da forma esperada, como foi o caso das amostras 1 e 5, isso pode ser explicado pelo ambiente dos ensaios não ter sido controlado de forma muito precisa. Porém, essas amostras não foram descartadas por servirem no estudo da energia.

A partir desses valores, pôde-se observar que, na maioria dos casos, a temperatura é maior para ensaios com valores de tensão maiores. Pode-se observar através das imagens da câmera térmica que a temperatura na região em torno do furo encontrava-se razoavelmente maior, isso devido ao fator de concentração de tensão, podendo ser melhor visualizado através da Fig.11.

Figura 11 – Temperatura estabilizada da amostra 4.



As amostras foram ensaiadas com o intuito de se estimar sua vida à fadiga e a tensão limite de fadiga, não se preocupando com a ruptura do material, assim sendo, a Tab.4 mostra o número de ciclos atingido por cada amostra até a ruptura do material, o caso da amostra 8, a tensão limite de fadiga foi atingida e o corpo de prova não veio a romper, ultrapassando 2 milhões de ciclos.

Tabela 4 – Número de ciclos atingido pelas amostras ensaiadas.

Amostra	Número de Ciclos
1	8.155,0
2	9.205,0
3	35.047,0
4	91.404,0
5	210.452,0
6	249.901,0
7	965.444,0
8	2.000.000,0

Com o intuito de analisar a importância com que cada parâmetro da Eq. 2 influencia no cálculo da dissipação de energia (Q), foi realizada uma análise de sensibilidade em relação aos seus parâmetros, calculada pela derivada analítica da expressão da energia:



$$\frac{\partial Q}{\partial \rho} = c \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \cdot \frac{1}{f} \quad (5)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial c} = \rho \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \cdot \frac{1}{f} \quad (6)$$

$$\left(\frac{\partial Q}{\partial T} \right) = \rho \cdot c \cdot \frac{1}{f} \quad (7)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial f} = -f^{-2} \cdot \rho \cdot c \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \quad (8)$$

Tomando por exemplo a amostra 1, a média dos gradientes de temperatura $\frac{\partial T}{\partial t}$ gerados pelas curvas de resfriamento ficou em torno de 1,47 e com a frequência de 3,1 Hz que foi utilizada no ensaio desta amostra, chegou-se aos valores da Tab.5. Nessa mesma tabela, foram apresentados os valores normalizados, para facilitar a verificação da contribuição de cada parâmetro. O mesmo foi realizado para a amostra 4, com a média dos gradientes de temperatura $\frac{\partial T}{\partial t}$ foi igual a 2,86, e sua frequência de 14 Hz. Os resultados foram apresentados também na Tab.5.

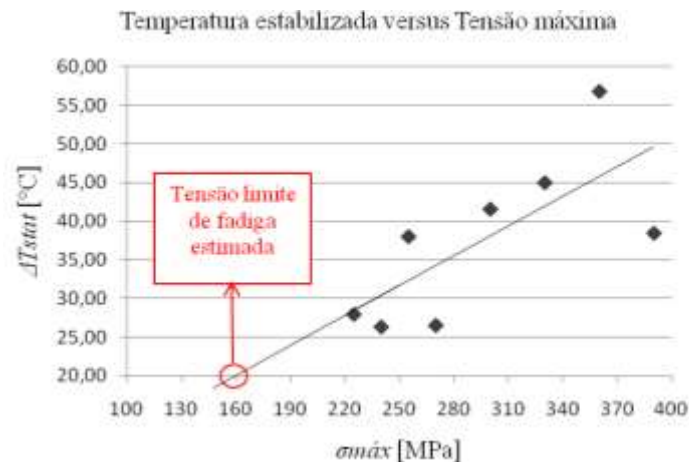
Tabela 5 - Influência dos parâmetros no cálculo de Q.

Parâmetro:	Porcentagem de influência			
	Amostra 1		Amostra 4	
	Sensibilidade	Sensibilidade Relativa	Sensibilidade	Sensibilidade Relativa
$\frac{\partial Q}{\partial \rho}$ [kg/m ³]	237,09	0,013%	102,14	0,03%
$\frac{\partial Q}{\partial c}$ [J/kg. K]	3746,12	0,20%	1613,85	0,47%
$\left(\frac{\partial Q}{\partial T} \right)$ [Kelvin/s]	1274193,54	67,69%	282142,85	82,61%
$\frac{\partial Q}{\partial f}$ [Hz]	-604214,36	32,09%	-57637,75	16,87%

Com essa análise, foi possível observar que o parâmetro que mais irá influenciar no cálculo da dissipação de energia é o gradiente de temperatura $\left(\frac{\partial T}{\partial t}\right)$. Assim sendo, os erros nas medições da energia dissipada serão maiores se as temperaturas dos ensaios forem mal obtidas e as curvas de resfriamento forem mal definidas.

Através da associação dos valores de ΔT_{stat} e $\sigma_{m\acute{a}x}$, foi possível construir um gráfico entre as amostras para se estimar a tensão limite de fadiga do material baseado na prolongação da linha de tendência gerada, conforme Fig.12, na qual se observa que a tensão limite de fadiga para esse material está em torno de 160 MPa.

Figura 12 – Gráfico da Temperatura estabilizada versus Tensão máxima.

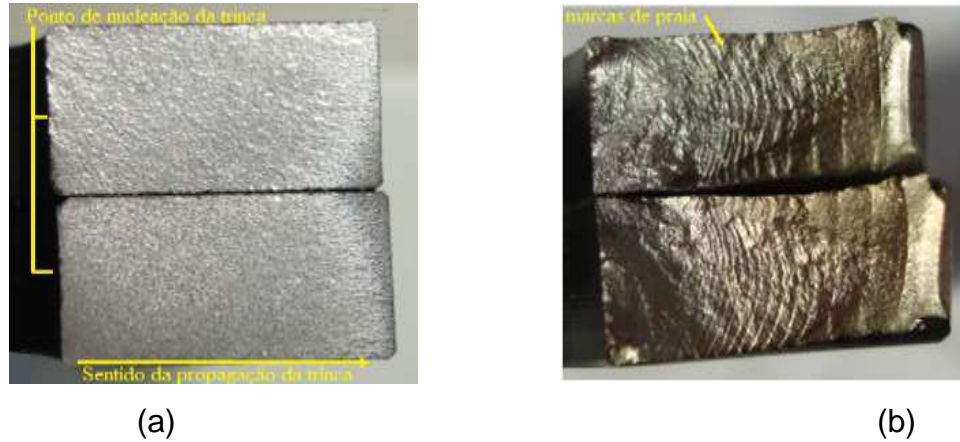


Analisando a amostra 6, observou-se que a energia liberada durante o ensaio a cada pausa do equipamento manteve uma média em torno de 240 kJ, seguindo uma linha de tendência linear em função do número de ciclos, Fig.13. O último ponto do gráfico, onde a energia liberada pelo material foi pouco mais que o dobro da média, pode ser explicado pelo fato do corpo de prova estar próximo da sua ruptura, atingindo valor de temperatura ligeiramente superior as ΔT_{stat} aferidas durante todo o ensaio, tendo por conseguinte, energia Q liberada de valor elevado. Isso se explica pelo fato da área da seção transversal ser menor, ou seja, parte dessa área já havia se rompido, fazendo com que o resto dela recebesse toda tensão aplicada e com isso um aumento na temperatura.

Figura 13 – Energia liberada Q em função do número de ciclos, amostra 6.

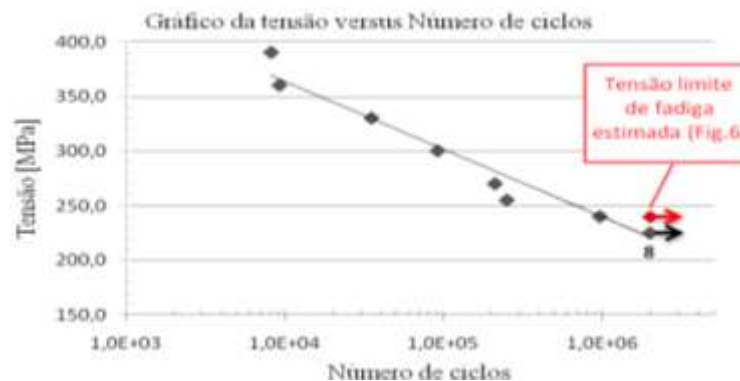
A nucleação da trinca ocorreu na superfície interna do furo, na posição lateral, por ser a região de maior tensão, com influência do fator K_t , garantindo esforços mais intensos. Observou-se, através de uma macrografia das amostras rompidas, que na região onde a trinca iniciou, a fratura teve caráter frágil, gerando uma superfície cristalina, mesmo em se tratando de um material com boa ductilidade, devido à deformação repentina e com pouca deformação plástica, no momento da geração e nucleação da trinca. No decorrer da ruptura, a superfície foi se tornando fibrosa, ocorrendo nesta área maior deformação plástica, facilmente observada na Fig.14(a). No lado da seção transversal oposta ao que ocorreu a nucleação da trinca, a superfície teve caráter fibrosa e foi possível contar e observar as marcas dos ciclos de tração-compressão impostos pelo equipamento, conhecidas através da literatura como marcas de praia, conforme Fig.14(b).

Figura 14 – Superfícies da amostra rompida: Ponto de nucleação da trinca ruptura cristalina (a), superfície fibrosa e com marcas de praia (b).



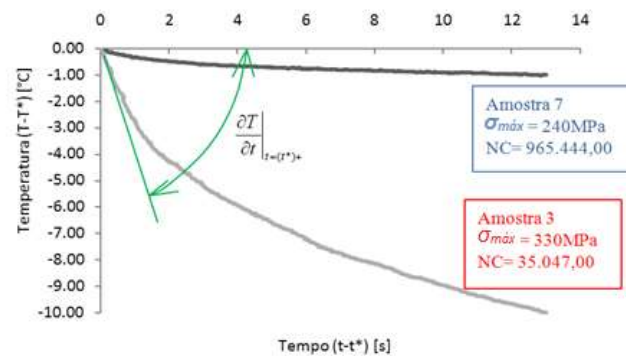
Com base na Tab.5, foi elaborado um gráfico que envolve a tensão empregada no material durante o ensaio em função do número de ciclos por ele suportado, conforme a Fig. 15. Seguindo uma relação inversamente proporcional, ou seja, observa-se que quanto maior a tensão aplicada, menor será sua vida à fadiga.

Figura 15 – Relação entre tensão e número de ciclos



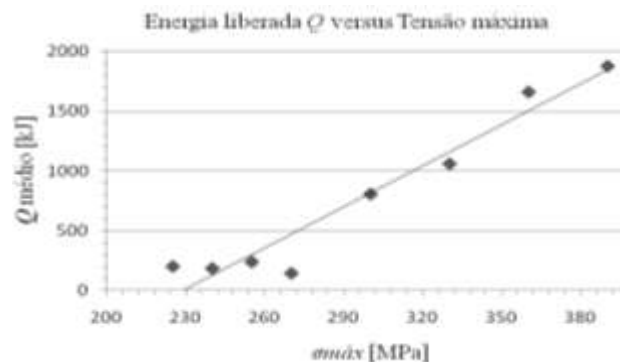
O ponto em vermelho assinalado no gráfico mostra a tensão limite de fadiga que foi estimada na Fig.12 com base na temperatura estabilizada em função da tensão, assim, supõe-se que amostras ensaiadas com tensões inferiores a esta possuem grande probabilidade de terem vida infinita. Este fato foi observado pela amostra 8 com tensão limite a fadiga e não rompeu no ensaio.

Figura 16 – Comparação entre curvas de resfriamento (amostras 3 e 7).



O gradiente de temperatura, como visto anteriormente, é o fator que mais influência no cálculo da dissipação de energia. Na Fig.16 é mostrada duas curvas de resfriamento, para amostras 7 e 3, apesar dessas curvas iniciarem em temperaturas distintas, elas foram colocadas no mesmo ponto zero a partir do momento que as retas decaem, para efeito comparativo. A diferença entre as amostras é que a amplitude da tensão mecânica imposta na amostra 7 é menor do que na amostra 3, conseqüentemente a temperatura estática da amostra 7 também é menor. Quanto menor a tensão, menos acentuada é a curva de resfriamento. Isso implica no gradiente de temperatura da amostra 3 ser maior do que na amostra 7.

Figura 17 – Gráfico da Energia média dissipada versus Tensão máxima.



Uma comparação entre a energia dissipada média de cada amostra em função da tensão máxima adotada foi elaborada com o intuito de representar a maneira com que a energia é influenciada pela tensão. Com isso, foi possível observar com base na Fig.17,

que quanto menor a tensão, menor será a energia que a amostra dissipa para o ambiente. Isso se dá da mesma forma, como foi visto na Fig.12, entre a temperatura estabilizada média e a tensão, pois a energia dissipada Q é diretamente influenciada pelo gradiente de temperatura que também possui influência direta à temperatura estabilizada.

Figura 18 – Relação entre energia dissipada e número de ciclos.



Com o intuito de analisar a dissipação de energia no decorrer dos ensaios, a Fig. 18 mostra a relação entre energia liberada em função do número de ciclos suportados pela amostra. Pode-se observar que a forma com que a energia está relacionada ao número de ciclos é de grandeza indiretamente proporcional, ou seja, quanto menor a energia dissipada maior será o número de ciclos, da mesma forma que ocorre com a tensão (vide Fig. 15). Assim, abaixo de determinado valor da energia dissipada, as amostras tenderão a uma vida infinita à fadiga, devido à baixa tensão mecânica submetida.

5 CONCLUSÃO

A temperatura da amostra aumenta durante o ensaio, conforme a tensão aplicada, e segue até se estabilizar, voltando a aumentar a partir do momento em que ocorre a propagação da trinca, devido à diminuição da seção transversal, seguindo até a ruptura do material.



A tensão limite a fadiga foi estimada em 160 MPa com base na temperatura estabilizada em função da tensão aplicada. Isso foi verificado devido à tendência que o gráfico apresentou ao se comparar essas grandezas, condizendo posteriormente com os números de ciclos alcançados pelos ensaios, em função das suas tensões.

A análise de sensibilidade da energia dissipada serviu para identificar quais os parâmetros influenciam com maior predominância na dissipação de energia, sendo que o gradiente de temperatura mostrou ser o mais influente.

Para maiores tensões, por conseguinte, temperaturas mais elevadas, têm-se as curvas de resfriamento mais acentuadas, assim, a amostra resfria mais rapidamente do que amostras com menores tensões, ou seja, dissipa mais energia em função do tempo.

Um determinado valor de energia dissipada caracteriza o ponto em que valores de energia inferiores a esta tenderão a uma vida infinita do material, uma energia de dissipação limite à fadiga, análoga a tensão limite à fadiga.

BIBLIOGRAFIA

Atzori, B, Meneghetti, G. and Ricotta, M.,2010, *Fatigue Behaviour of a Stainless Steel based on Energy Measurements*. Key Engineering Materials Vols. 417-418, pp 333-336.

Callister, W. D.,2002, *Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução*. 5ed. LTC, São Paulo.

Catalbiano, T., Geraci, A., Orlando, M.,1984, *Analysis of the fatigue strength of specimens by means of the infrared technique*. Il Progettista Industriale:2.

Dengel, D., Harig, H., 1980, *Estimation of the fatigue limit by progressively- increasing load tests*. Fatigue Fract Eng Mater Struct; 3:113–28.

Da Rosa, E., 2002, *Análise de Resistência Mecânica: Mecânica da Fratura e Fadiga*. Grupo de Análise e Projeto Mecânico, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina.

Harig, H., Weber, M., 1983, *Estimation of crack initiation in plain carbon steels by thermometric methods. Defects, fracture and fatigue*. In: Proceedings of the 2nd international symposium. The Hague: Martinus Nijhoff Publ; p. 161–70.

La Rosa, G., Risitano A., 2000, *Thermographic methodology for rapid determination of the fatigue limit of materials and mechanical components*. Int J Fatigue; 22:65–73.



Meneghetti, G., 2007, *Analysis of the fatigue strength of a stainless steel based on the energy dissipation*. International Journal of Fatigue 29, 81–94.

Norton, R. L., 2006, *Projeto de Máquinas: Uma abordagem integrada*. Worcester, Massachusetts: Bookman.

Reifsnider, K.L., Williams, R.S., 1974, *Determination of fatigue-related heat emission in composite materials*. Exp Mech;14:479–85.

Shigley, J. E., 2006, *Shigley's Mechanical Engineering Design*, 8th Edition. The McGraw-Hill Companies.