

# CORRELAÇÃO ENTRE TENSÕES DE FADIGA DE CORPOS COM SUPERFÍCIES POLIDAS E CORPOS COM RUGOSIDADE

Carolina Afonso Pereira <sup>1</sup>; Márcio Lucato <sup>2</sup>

<sup>1</sup>Aluno de Iniciação Científica da Escola de Engenharia Mauá (EEM/CEUN-IMT);

<sup>2</sup>Professor Mestre da Escola de Engenharia Mauá (EEM/CEUN-IMT).

**Resumo.** Pretende-se submeter um número determinado de uma amostra estatisticamente significativa de corpos de prova de aço AISI 1045 com cinco rugosidades controladas diferentes, a ensaios de fadiga, a fim de avaliar a correlação entre a rugosidade da superfície e a tensão de fadiga respectiva.

## Introdução

De acordo com Juvinall, 2006, fadiga em qualquer corpo é a degradação das propriedades mecânicas que levam à falha do material. Na verdade, esse fenômeno vem sendo estudado, basicamente, porque é um problema que afeta qualquer componente ou parte que se move nas máquinas que hoje são feitas, sejam elas de grande, médio, ou pequeno porte.

A primeira vez que o termo “fadiga” foi utilizado foi quando o engenheiro britânico, WJM Rankine investigou um acidente de trem e verificou que em alguns componentes dos vagões e da locomotiva houve uma concentração de tensões flutuantes, ou seja, tensões vindas de cargas que variavam no tempo, e que ‘cristalizaram’ o material, (no caso, se tratava de um aço com médio teor de carbono) e esse se tornou frágil e rompeu.

O termo então passou a ser o efeito consequente de esforços alternados em pontos de concentração de tensões. Esses pontos podem ser microfissuras presentes no material desde a sua manufatura ou, surgirem nos processos de fabricação, como por exemplo, na usinagem ou em tratamentos térmicos.

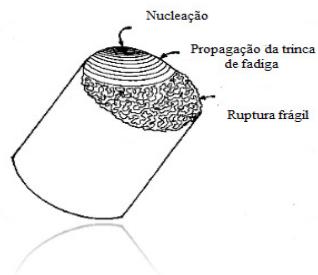
Se nos pontos de concentração de tensões for ultrapassada a tensão de escoamento do material, será iniciada uma trinca. Com a continuidade dos ciclos, nos pontos nos quais a tensão de escoamento é ultrapassada, as trincas formadas crescerão, diminuindo a seção resistente da peça até o ponto em que esta rompa repentinamente.

Uma vez rompida, se a causa for a fadiga, é possível identificá-la pela marca que fica no material e que é nítida a olho nu. São as *marcas de praia*, e são chamadas assim porque elas se assemelham com a marca que as ondas do mar deixam na areia. De acordo com Robert L. Norton, 2009, elas surgem nos pontos de concentração de tensões e circundam a origem da trinca, como podemos ver na figura abaixo.

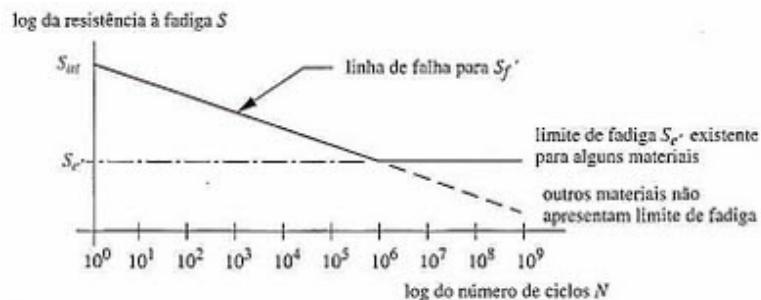


**Figura 1 - Eixo que falhou devido a fadiga com Marcas de Praia visíveis - Fonte: Projeto de Máquinas; Uma abordagem Integrada; NORTON, Robert L.**

**Figura 2 - Representação didática de uma superfície que rompeu devido à fadiga –**  
**Fonte: Material Didático da Disciplina de Materiais de Construção Mecânica do Instituto Mauá de Tecnologia.**



O conhecimento dos esforços alternados, que foram citados como causa da ruptura por fadiga, foi o que permitiu que o engenheiro alemão, August Wöhler testasse, em laboratório, eixos ferroviários até que esses rompessem por causa da carga alternada. Ele obteve duas conclusões importantes. A primeira delas foi que o colapso da peça testada estava diretamente ligado com o número de ciclos de tensão variável. A segunda foi a chamada, *Curva de Wöhler*, um diagrama feito em escala logarítmica, da tensão *versus* número de ciclos, ainda muito usado.



**Figura 1 - Curva de Wöhler. Resistência à fadiga x Vida Esperada (número de ciclos), onde S é a resistência à fadiga em inglês, equivalente em português ao  $\sigma$  -**  
**Fonte: Projeto de Máquinas; Uma abordagem Integrada; NORTON, Robert L.**

O limite de fadiga pode sofrer a interferência de outros efeitos como o do tipo de solicitação do carregamento, das dimensões, da temperatura, da confiabilidade e do acabamento superficial. A equação que correlaciona essa interferência e a redução que ela causa no valor numérico da resistência à fadiga é:

$$\sigma_{f_{final}} = C_{carregamento} \cdot C_{tamanho} \cdot C_{temperatura} \cdot C_{confiabilidade} \cdot C_{superficie} \cdot \sigma_{f_{testado}}$$

Sendo  $\sigma_f$  o valor da resistência à fadiga e  $C$  os fatores pelos quais deve-se multiplicar a resistência padrão para que ela corresponda à uma determinada condição de trabalho.

O primeiro fator é o que corresponde à solicitação do tipo de carregamento, para tal existem valores já estudados. Por exemplo,  $C_{carregamento} = 1,0$  para carregamentos de flexão e  $C_{carregamento} = 0,70$  para carregamentos de força axial.

O seguinte fator,  $C_{tamanho}$ , tem como critério a dimensão do corpo de prova. Shigley e Mitchell apresentaram equações simples que calculam esse fator levando em conta o diâmetro da peça. E concluíram que peças maiores falham sob tensões menores.

$$\text{para } d \leq 8\text{mm} \rightarrow C_{tamanho} = 1$$

$$\text{para } 8\text{mm} \leq d \leq 26\text{mm} \rightarrow C_{tamanho} = 0,869 \cdot d^{-0,097}$$

Os ensaios de fadiga normalmente são realizados à temperatura ambiente. A alteração da temperatura leva a uma alteração também na resistência à fadiga. Com temperaturas muito altas a resistência ao escoamento do material cai significativamente e pode até escoar antes que falhe por fadiga. Por isso, para ensaios com aços, Shigley e Mitchell sugerem:

$$\text{para } T \leq 450^{\circ}\text{C} \rightarrow C_{\text{temperatura}} = 1$$

Dados obtidos em ensaios tem uma dispersão, o valor médio obtido corresponde à uma confiabilidade de 50%. O fator  $C_{\text{confiabilidade}}$  corrige o valor médio para quando é desejado uma confiabilidade maior. Por exemplo, se é desejada uma confiabilidade de 99,99% das amostras, o  $C_{\text{confiabilidade}}$  é 0,702. Para diferentes porcentagens há diferentes fatores de confiabilidade.

O foco desse projeto é na influência do acabamento superficial no valor da resistência à fadiga. Corpos polidos não apresentam microfissuras na sua superfície, porque ela está polida, lisa. Ou seja, só há pontos de concentração de tensão no interior do corpo, diferentemente dos corpos com rugosidade controlada, que tem pontos de concentração de tensões também na sua superfície. Quanto mais pontos de concentração de tensões, maior é a probabilidade de a peça romper por fadiga. O fator  $C_{\text{superfície}}$  vai corrigir a tensão de fadiga para os componentes com rugosidade diferente daquela dos corpos com acabamento polido.

## MATERIAIS E MÉTODOS

### ✓ Materiais

Corpos de prova de aço AISI 1045 trefilado e sem qualquer tratamento térmico, alguns polidos, outros com rugosidades controladas e diferentes.

### ✓ Métodos

Os corpos de prova são submetidos à máquina de flexão rotativa, onde as tensões serão aplicadas de forma alternada e simétrica até que o corpo rompa subitamente.



**Figura 5 - Máquina de Flexão Rotativa - Fonte: Laboratório de Materiais do Centro de Pesquisa do Instituto Mauá de Tecnologia.**

## ✓ Procedimentos Experimentais

A princípio foram feitos ensaios piloto em doze corpos de prova fornecidos pelo Instituto Mauá de Tecnologia (IMT), com a finalidade de obter-se informação para determinação do tamanho da amostra estatisticamente significativa.

Seis deles tinham sua superfície somente usinada, e passaram pela metrologia do próprio Instituto para que fosse medida a rugosidade respectiva. E os outros seis tiveram suas superfícies, usinadas, lixadas e polidas.

Com esses doze corpos de prova, foi realizado o primeiro ensaio no laboratório de ensaios mecânicos da Escola de Engenharia Mauá, e obteve-se a primeira informação relacionando número de ciclos até a ruptura, com o acabamento superficial.

Os dados obtidos através deste primeiro ensaio foram os seguintes:

Para os corpos somente usinados:

Número do Corpo de Prova	Diâmetro do Corpo de Prova	Momento (kgf.mm)	Momento (lb.pol)	Tensão (kgf/mm <sup>2</sup> )	Ra	Número de Ciclos até a Ruptura
1	6,35 mm	1500	131	59	4,13	8900
2	6,35 mm	1500	131	59	2,83	8200
3	6,35 mm	1500	131	59	3,77	7700
4	6,35 mm	1500	131	59	2,68	10600
5	6,35 mm	1500	131	59	5,94	9200
6	6,35 mm	1500	131	59	3,56	17100

E para os corpos usinados, lixados e polidos:

Número do Corpo de Prova	Diâmetro do Corpo de Prova	Momento (kgf.mm)	Momento (lb.pol)	Tensão (kgf/mm <sup>2</sup> )	Ra	Número de Ciclos até a Ruptura
1	6,35 mm	1500	131	59	0,23	17200
2	6,35 mm	1500	131	59	0,25	17600
3	6,35 mm	1500	131	59	0,21	16900
4	6,35 mm	1500	131	59	0,22	11400
5	6,35 mm	1500	131	59	0,24	15800
6	6,35 mm	1500	131	59	0,26	14700

Com os resultados do ensaio piloto e uso do *software* estatístico MiniTab, foi possível determinar o tamanho da amostra estatisticamente significativa, conforme a tabela a seguir.

### Size Power

7 0,75

Onde:

7 0,8

Size – Tamanho da Amostra.

9 0,9

Power – Intervalo de Confiança.

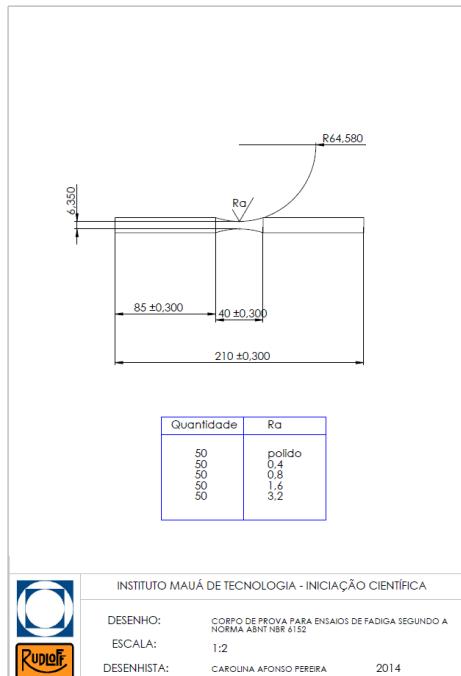
11 0,95

15 0,99

Dela observa-se que o número da amostra vai depender da variabilidade dos resultados obtidos no teste piloto. Com essa variável definida, podemos determinar o tamanho da amostra para o intervalo de confiança desejado.

Tomando um intervalo de confiança entre 0,9 e 0,95 determinou-se uma amostra média de 10 (dez) corpos de prova, como mostrado na tabela acima.

Os corpos de prova foram usinados seguindo a norma brasileira ABNT NBR 6152, que especifica corpos de prova padrão para ensaios de fadiga e tração e os caracterizam como sendo de bom acabamento superficial e sem trincas.



**Figura 6 - Desenho técnico do corpo de prova para usinagem - Fonte: Próprio Autor.**

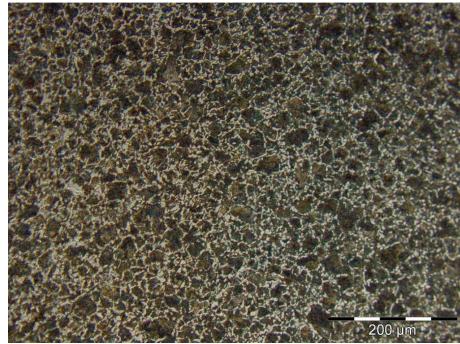
O objetivo do estudo é relacionar o número de ciclos até a ruptura, para uma mesma tensão de ensaio, para corpos de prova com diferentes rugosidades superficiais.

Para tanto serão ensaiados 5 valores de tensão para cada acabamento superficial escolhido. Que no caso foram, além do polido (previsto na norma ABNT NBR 6152), os acabamentos com Ra 0,4, Ra 0,8, Ra 1,6 e Ra 3,2.

Ensaios com cinco valores de tensão para cada um dos 5 acabamentos superficiais escolhidos perfazem 25 tipos diferentes de ensaio. Cada um deles devendo ser repetido 10 vezes para que os resultados sejam estatisticamente significativos.

Para tal, foram confeccionados 250 corpos de prova, 10 para cada tipo de ensaio.

Para a escolha das tensões de ensaio buscou-se conhecer a ordem de grandeza da tensão de ruptura do material dos corpos de prova. Para tanto foi feita uma caracterização metalográfica do mesmo.



**Figura 7 - Micrografia de Corpo de Prova Usinado Pela Rudloff -**  
**Fonte: Laboratório de Ensaios Mecânicos da Escola de Engenharia Mauá.**

O resultado do ensaio (imagem destacada acima) confirma que os corpos de prova são de aço AISI 1045. E pela estrutura do grão constatou-se um aço normalizado.

Com base nessas informações obteve-se no site, [www.matweb.com](http://www.matweb.com), o limite de ruptura  $\sigma_{rup}$  do material.

AISI 1045 Steel, cold drawn, low temperature, stress relieved round (16 - 22 mm)			
Categories: Metal   Ferrous Metal   Carbon Steel   AISI 1000 Series Steel   Medium Carbon Steel			
Material Notes:	Medium-carbon steel, can be hammer forged. Can be heat treated, flame or induction hardened, but not recommended for carburizing or cyaniding. AISI cross reference for JIS S45C and KS SM45C.		
Key Words:	AFNOR NF A35-532 XC45, AFNOR NF A35-554 XC46, DIN 1654 1.1102, DIN 1654 Cd5, DIN 17200 1.0503, AFNOR XC42, AFNOR XC42TS, AFNOR XC48TS, AFNOR NF A35-101 AF855-45, AFNOR NF A35-552 XC49H1, UNE-EN1045, ASTM A28, ASTM A108, ASTM A286, GMAW-3, ASTM A304, ASTM A311, ASTM A510, ASTM A519, AS 1442 K1045 (Australia), AS 1442 S1045, AS 1443 S11045, AS 1446 K1045, AS 1446 S1045, ASTM A568, ASTM A576, ASTM A682, ASTM A683, FED QQ-S-635, FED QQ-S-700, FED QQ-W-461, MIL-S-24093, MIL-S-3039, BDS 6354 45G2A, BDS 6354 45G2C, BDS 6354 45G2K, GB 3078 45 (China), GB 3088 45, GB 699 45, YB 6 45B, DIN 17200 1.1191, DIN 17200 1.1201, DIN 17200 C45, DIN 17200 CK45, DIN 17200 CM45, DIN 17200 GS-CK45, DIN 17212 1.1193, MIL-S-46070, SAE J1397, SAE J403, SAE J412, BS 970 Part 1 060047 (U.K), BS 970 Part 1 060047, BS 970 Part 1 060045, NBN 25-02 C45-3, NBN 25-06 C46, BDS 3492 45L (Bulgaria), BDS 3492 45LII, BDS 5785 45, ONORM M3108 C45SW (Austria), ONORM M3110 RC45, ONORM M3161 C45, NBN 25-02 C45-1 (Belgium), NBN 25-02 C45-2		
Vendors:	No vendors are listed for this material. Please <a href="#">click here</a> if you are a supplier and would like information on how to add your listing to this material.		
Physical Properties	Metric	English	Comments
Density	7.85 g/cc	0.284 lb/in <sup>3</sup>	
Mechanical Properties	Metric	English	Comments
Hardness, Brinell	197	197	
Hardness, Knoop	219	219	Converted from Brinell hardness.
Hardness, Rockwell B	92	92	Converted from Brinell hardness.
Hardness, Rockwell C	13	13	Converted from Brinell hardness. Value below normal HRC range, for comparison purposes only.
Hardness, Vickers	207	207	Converted from Brinell hardness.
Tensile Strength, Ultimate	690 MPa	100000 psi	
Tensile Strength, Yield	620 MPa	89900 psi	
Elongation at Break	12 %	12 %	In 50 mm
Reduction of Area	35 %	35 %	
Modulus of Elasticity	205 GPa	29700 ksi	Typical for steel
Bulk Modulus	140 GPa	20300 ksi	Typical for steel
Poissons Ratio	0.29	0.29	Typical For Steel
Shear Modulus	80.0 GPa	11600 ksi	Typical for steel
Electrical Properties	Metric	English	Comments
	0.0000162 ohm-cm	0.0000162 ohm-cm	annealed specimen

**Figura 8 - Dados de um aço AISI 1045 normalizado - Fonte: [www.matweb.com](http://www.matweb.com).**

Com base na tensão de ruptura da ordem de 700 Mpa foram escolhidos 5 tensões de ensaio, que estão tabelados a seguir.

Tensão (Mpa)	Momento Utilizado (lb.pol)
520	116
570	127
620	138
670	149
720	161

## Resultados e Discussões

Como descrito, objetivou-se um montante de 250 ensaios. Porém o processo iniciado com a obtenção de corpos de prova para o ensaio piloto, passando pela análise estatística dos resultados, dimensionamento da amostra, escolha e compra da matéria-prima e posterior usinagem, terminando com a análise do material e escolha das tensões de ensaio, não deixou tempo suficiente para a execução dos 250 ensaios, tendo em vista que ensaios de fadiga não são rápidos.

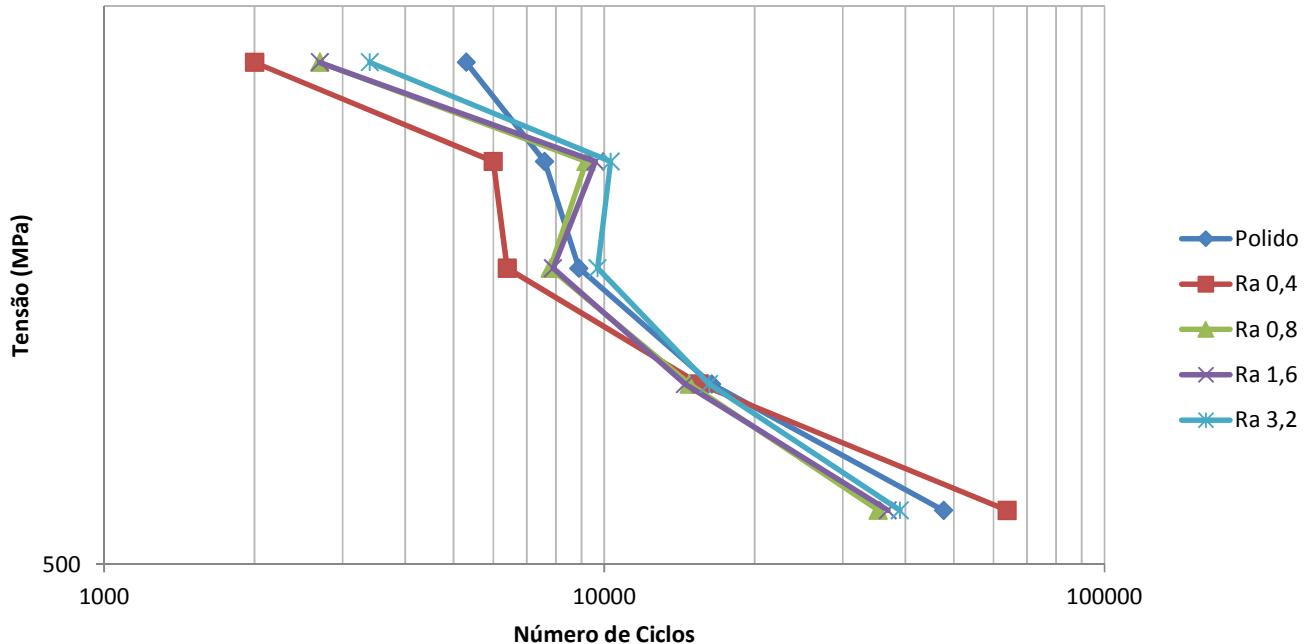
O tempo restante dentro do prazo disponível, permitiu apenas a realização de 25 ensaios, apenas 1 por par (Tensão x Ra), o que, mesmo sem ser estatisticamente significativo, permite uma primeira análise da variação da tensão de fadiga com a rugosidade. O estudo deverá ter sequência com a realização dos demais ensaios em um trabalho futuro.

O resultado do número de ciclos até a ruptura dos 25 ensaios feitos foi representado na tabela a seguir:

Ra/Tensão (Mpa)	Polido	0,4	0,8	1,6	3,2
520	47700	63900	35300	36900	39000
570	16400	15500	14800	14500	16200
620	8900	6400	7800	7900	9700
670	7600	6000	9200	9600	10300
720	5300	2000	2700	2700	3400

## Conclusões

### Gráfico da Tensão de Ruptura x Número de Ciclos



Com base nas curvas acima, observa-se apenas tendências devido à falta de significância estatística dos ensaios.

Mesmo com um número reduzido de ensaios, os resultados apresentados são coerentes com a “Linha de Wöhler” previamente descrita, havendo apenas uma região de desvio significativo, onde as vidas correspondentes a tensões diferentes possuem valores similares. Essa região é caracterizada pelas tensões de 670 e 620 Mpa.

Além disso, observa-se que entre as curvas de Ra 0,8 e 1,6 há pouca diferença na vida correspondente a uma mesma tensão, indicando que nessa faixa de acabamento o efeito da rugosidade na vida não é significativo. Esse efeito é mais evidente entre rugosidades mais elevadas, como se vê nas vidas correspondentes às rugosidades Ra 1,6 e 3,2.

Conclui-se que há, para uma mesma tensão, uma tendência de redução de vida com o aumento de rugosidade. Essa tendência deve ser confirmada com a execução de ensaios em quantidade suficiente para obter-se significância estatística.

## Referências Bibliográficas

Apostila de fadiga da Escola Politecnica da Universidade de São Paulo escritas pelo professor doutor Gilfran Milfont.

JUVINALL, Robert C.; MARSHEK, Kurt M. *FUNDAMENTALS OF MACHINE COMPONENT DESIGN*. New York : John Wiley, 2000 888p.

Material Didático ETM 201 Materiais de Construção Mecânica da Escola de Engenharia Mauá. (EEM/CEUN-IMT)

NIEMANN, Gustav. *Elementos de máquinas*. Tradução de Carlos van Langendonck e Otto Alfredo Rehder. São Paulo, SP: Edgard Blücher, 1971. v. 2.

NORTON, Robert L. *PROJETO DE MÁQUINAS; UMA ABORDAGEM INTEGRADA*. Porto Alegre, RS : Bookman, 2004. 931p.

SPOTTS, M. F.; SHOUP, T. E. *DESIGN OF MACHINE ELEMENTS*. New Jersey : Prentice Hall, 1998. 829p.

## Agradecimentos

Ao professor mestre Márcio Lucato pela orientação do projeto de iniciação científica.

Ao professor mestre Daniel Kashiwamura Scheffer pela ajuda no desenvolvimento estatístico do projeto.

Ao técnico Júlio Yoshimitsu Onoue pela companhia e auxílio durante a realização dos experimentos.

À Rudloff Industrial Ltda. pela usinagem dos corpos de prova.

À Escola de Engenharia Mauá do Instituto Mauá de Tecnologia pela oportunidade de realização do projeto de iniciação científica.