

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

Rafael Rakauskas Gindro ¹; Marcio Lucato ²

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

² Professor da Escola de Engenharia Mauá (EEM/CEUN-IMT).

Resumo. *Este projeto tem o objetivo de submeter uma série de corpos de prova com cinco rugosidades superficiais diferentes a ensaios de fadiga, obtendo a correlação entre o valor de RA da peça com a tensão de falha por fadiga. Este estudo foi realizado em duas etapas: definição da quantidade amostral e a execução do estudo, este relatório descreve a execução deste estudo e apresenta os seus resultados.*

Introdução

Em meados do século XIX os equipamentos mecânicos eram dimensionados somente para resistir cargas estáticas. Quando Rankine estudou uma falha ocorrida em um eixo de trem, determinou que o eixo havia “cristalizado”, o tornando frágil devido a tensões flutuantes. O engenheiro alemão August Wöhler estudou o efeito e a chamou de falha por fadiga.

As fraturas da “fadiga” começam com fraturas (normalmente microscópicas) em uma região onde há acumulo de tensões, esta fratura se propaga a cada variação de tensão ocorrida na peça. Após a falha do componente pode-se observar onde houve a fratura de origem e por onde ela se propagou, observando as “marcas de praia” deixada na superfície da fratura (Juvinall, 2000). A Figura 1 mostra uma foto de um exemplo de um eixo que teve falha por fadiga, indicando onde começou a trinca.

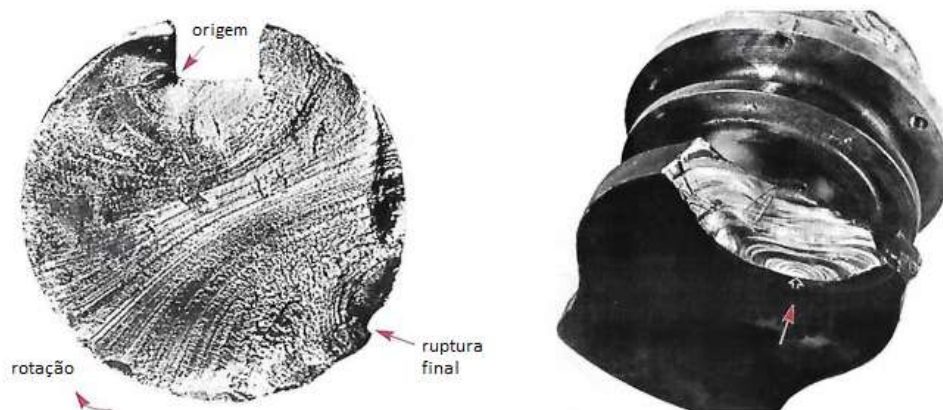


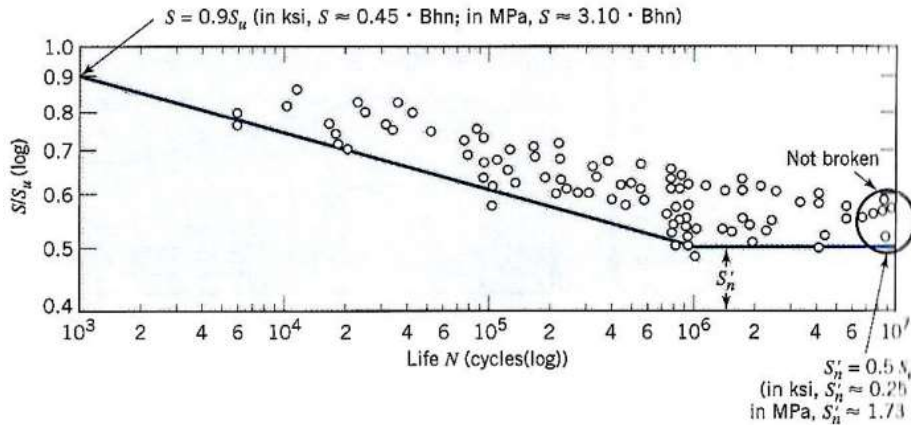
Figura 1 – Ilustração de dois eixos que falharam por fadiga.

A falha por fadiga é devida a uma repetição de deformação plástica ocorrida no material nas regiões onde há acumulo de tensões ou da propagação de uma trinca já existente deixada em um processo de manufatura do mesmo. Enquanto a fratura se propaga no elemento, ela diminui a seção da peça, aumentando a tensão aplicada na seção remanescente e a taxa de propagação da trinca, o material falha quando a seção restante é insuficiente para resistir a carga estática.

Como o estudo da fadiga possui uma característica mais estatística do que para o estudo de cargas estáticas, a dispersão dos ensaios de fadiga é consideravelmente elevada. Para efetuar o estudo, é traçado o diagrama tensão em função do número de ciclos. É observado que há uma grande dispersão nos dados, o Gráfico 1 retirado da bibliografia (Juvinall, 2000), mostra como é

feito este estudo. Normalmente para os aços há um ponto onde há uma inflexão no diagrama, normalmente a 10^7 ciclos que corresponde a uma tensão abaixo da qual não ocorre fadiga. Ou seja, diz-se que a peça tem vida infinita.

Gráfico 1 – Diagrama de tensão de fadiga em função do número de ciclos.



Curva limite de Fadiga para aço laminado (fonte: Juvinall, R.C., Marshek, K.M. FUNDAMENTALS OF MACHINE COMPONENT DESIGN. New York: John Wiley, 2000)

A resistência à fadiga (S_f) obtida em ensaios de corpos de prova padrão deve ser modificada para considerar, em seus valores finais diferenças físicas e ambientais que as peças finais serão sujeitas (Norton, 2004). Essas diferenças das condições laboratoriais e das condições reais são corrigidas com a utilização de fatores de correção da resistência à fadiga, esses coeficientes multiplicam a tensão de fadiga obtida em laboratório, obtendo a fadiga em condições reais. São utilizados o coeficiente de carregamento (C_{carreg}), coeficiente de tamanho ($C_{tamanho}$), coeficiente de superfície (C_{superf}), coeficiente de temperatura (C_{temp}) e o coeficiente de confiabilidade (C_{conf}), assim a equação final é expressa da forma da Equação 1.

$$S_f = C_{carreg} C_{tamanho} C_{superf} C_{temp} C_{conf} S_{f_i}$$

Equação 1 – Tensão de Fadiga real.

Os ensaios são realizados de maneira que se obtenha flexão pura, a peça real poderá estar sujeita a variações de cargas normais e/ou a cargas de torção variável. Por exemplo, para carregamentos de flexão o $C_{carreg} = 1$ e para as solicitações normais o $C_{carreg} = 0,7$.

Os efeitos no tamanho do corpo de prova ensaiado demonstram que quanto maior o diâmetro da peça, menos solicitação ela resiste. A equação de Shigley e Mitchell apresentam uma equação simples que calcula o $C_{tamanho}$ expressa na Equação 2.

$$\begin{array}{ll} \text{Para } d \leq 8 \text{ mm} & C_{tamanho} = 1 \\ \text{Para } 8 \text{ mm} \leq d \leq 250 \text{ mm} & C_{tamanho} = 1,189 d^{-0,097} \end{array}$$

Equação 2 – Cálculo do coeficiente de tamanho.

As superfícies dos corpos de provas são, normalmente, de acabamento espelhado para evitar qualquer concentração de tensão causada pela rugosidade superficial da peça. Na maioria das vezes não é possível usar a peça inteira com acabamento espelhado devido aos custos elevados. Para determinar o C_{superf} utiliza-se o Gráfico 2 extraído do Juvinall que relaciona a conformação que a peça será submetida com a resistência a tração ou a dureza em Brinell.

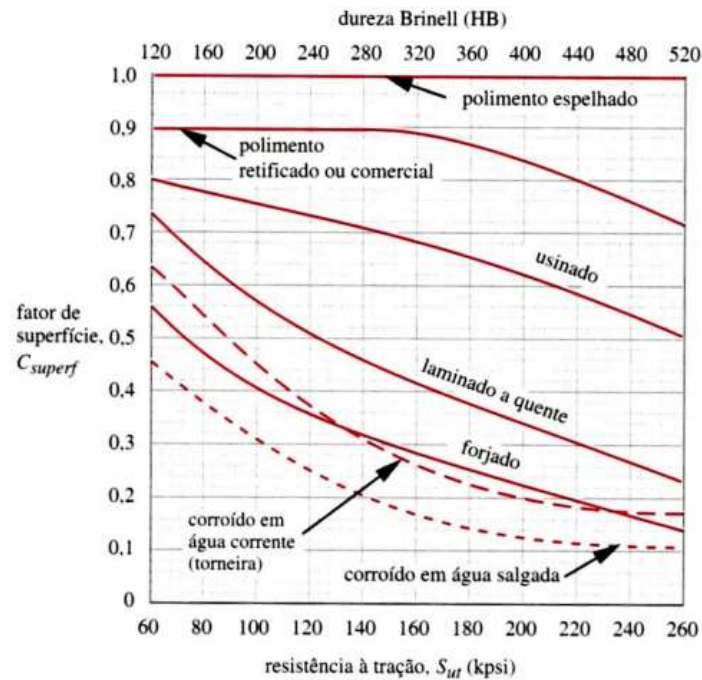


Gráfico 2 – Diagrama para determinar o C_{superf} .

Também se pode utilizar uma equação exponencial de acordo com Shigley e Mischke que calcula o C_{superf} . A Equação 3 mostra esta equação e a Tabela 1 mostra os coeficientes que devem ser aplicados na mesma equação.

Tabela 1 – Coeficientes utilizados para a Equação 3.

Acabamento superficial	Mpa		kpsi	
	A	b	A	b
Retificado	1,58	-0,085	1,34	-0,085
Usinado ou estirado a frio	4,51	-0,265	2,7	-0,265
Laminado a quente	57,7	-0,718	14,4	-0,718
Forjado	272	-0,995	39,9	-0,995

$$C_{superf} \cong A(S_{ut})^b \quad \text{se } C_{superf} > 1,0, \text{ usar } C_{superf} = 1,0$$

Equação 3 – determinação do C_{superf} .

A temperatura influencia no limite de fadiga do material. Os ensaios são normalmente realizados a temperatura ambiente, porém em temperaturas acima de 450 °C o material tende a escoar antes de ocorrer a falha por fadiga. Para Shigley e Mitchell sugerem que para temperaturas menores que 450 °C utiliza o $C_{temp} = 1$.

O C_{conf} quando se deseja levar em consideração a dispersão dos ensaios. Para valores médios (ou seja, confiabilidade de 50%) o valor do C_{conf} é igual a 1, quando, por exemplo, para confiabilidade de 99,9% é de 0,753.

O objetivo deste estudo é buscar uma relação entre a rugosidade superficial de um material específico expressa em R_a e a tensão limite de fadiga do mesmo.

Material e Métodos

- **Materiais**

Os corpos de provas utilizados são de aço AISI 1045 trefilado usinados para obter cinco rugosidades diferentes.

- **Métodos**

Os ensaios de fadiga foram conduzidos na máquina de ensaio de fadiga por flexão rotativa. A tensão no corpo de prova é regulada para que o corpo sofra uma tensão alternada simétrica até que haja a falha por fadiga, a Figura 2 mostra a máquina utilizada de ensaios de fadiga rotativas.



Figura 2 – Máquina de ensaios de fadiga utilizada.

Após os ensaios, os corpos de prova tiveram a sua rugosidade verificada para obter uma distribuição mais precisa. A Figura 3 mostra o rugosímetro digital utilizado para verificar a rugosidade superficial dos corpos de prova.



Figura 3 – Rugosímetro digital utilizado.

• Procedimento Experimental

O desenvolvimento do procedimento experimental teve como base o estudo realizado anteriormente, com as quantidades de corpos de prova, valores de Ra e as tensões aplicadas já pré-determinadas. O estudo anterior (C. A. Pereira, M. Lucato, 2014) definiu a confiabilidade amostral e o material utilizado, seguindo os procedimentos de acordo com a norma ABNT NBR 6152.

Aquele estudo determinou que fossem utilizadas cinco rugosidades diferentes: Polidos, 0,4; 0,8; 1,6 e 3,2 de valores de Ra. Para cada valor de Ra seria realizado dez ensaios para cada uma das cinco tensões escolhidas: 520, 570, 620, 670 e 720 Mpa. Estas tensões foram escolhidas de acordo com o limite de resistência do material que é em torno de 700 Mpa.

Para a realização dos ensaios, foram utilizados os corpos de provas que tinham sido usinados e classificados durante a realização da primeira etapa desse estudo. Alguns corpos de prova foram utilizados no estudo anterior, com isso, foi feita uma adequação da quantidade de corpos por ensaio para que obtivesse o maior número de corpos de prova. A Tabela 2 mostra a distribuição dos corpos de prova pelas tensões testadas.

Tabela 2 – Distribuição dos corpos de provas pelas tensões ensaiadas.

RA	Tensão (Mpa)					Total
	520	570	620	670	720	
Polido	9	10	10	10	10	49
0,4	8	8	8	8	8	40
0,8	8	8	8	8	8	40
1,6	8	8	8	8	8	40
3,2	9	9	0	9	9	36

Ao realizar os ensaios, notou-se que os corpos de provas trazidos pelo fornecedor estavam misturados, com os valores de Ra diferentes. Para solucionar esta adversidade, realizou-se todos os ensaios, mediu-se o valor da rugosidade de cada corpo de prova e, assim, obteve-se um novo intervalo de Ra estudado. A Tabela 3 mostra a nova distribuição estudada, com a nova classificação e a faixa de RA que será analisada.

Tabela 3 – Classificação nova dos corpos de prova

Intervalo			Valores de Tensão				
A partir de	Até	Classificação	520	570	620	670	720
0,4	0,8	0,6	8	9	7	5	8
0,8	1,2	1	6	7	12	12	6
1,2	1,6	1,4	10	7	3	6	8
1,6	1,9	1,7	10	9	8	8	11
1,9	3,2	2,2	8	11	4	11	9

Resultados e Discussão

Foi realizado um total de duzentos e cinco ensaios de fadiga. Primeiramente traçou-se, para cada valor de Ra, um diagrama de dispersão de todos os corpos de provas e o gráfico da média do número de ciclos que os corpos resistiram para o mesmo RA, esses diagramas estão apresentados no Anexo A.

Obteve-se a Tabela 4 que apresenta a média aritmética do número de ciclos que os corpos resistiram ao ensaio em função de cada uma das rugosidades e para a tensão ensaiada.

Tabela 4 – Média aritmética dos números de ciclos obtidos para cada tensão e Ra

Ra	Tensão (Mpa)				
	520	570	620	670	720
0,6	66175	24233	10929	4220	2713
1,0	46233	17429	7150	3900	2083
1,4	37090	15229	6100	3133	2100
1,7	36960	15044	6488	3563	2118
2,2	50463	17482	5975	3909	2500

Com esses valores das médias obtidos para cada um dos valores de Ra, pode-se obter uma equação potencial que relaciona a tensão que o corpo está carregado com o número de ciclos que o corpo de prova resiste. Assim pode-se determinar qual é a tensão limite para uma vida infinita (ou seja, 10^7 ciclos), a Tabela 5 relaciona para cada uma das rugosidades superficiais a equação, o índice de correspondência da função (R^2) e o valor de tensão obtido para que o corpo resista 10^7 ciclos. Assim podemos traçar o Gráfico 2 que relaciona a tensão limite de fadiga com a rugosidade superficial.

Tabela 5 – Tensão de fadiga teórica para cada valor de rugosidade

RA	Equação	R^2	Tensão limite de Fadiga (Mpa)
0,6	$S_f = 1553,7x^{-0,099}$	0,9935	315
1,0	$S_f = 1591,7x^{-0,105}$	0,9957	293
1,4	$S_f = 1631,6x^{-0,109}$	0,9895	282
1,7	$S_f = 1686,3x^{-0,113}$	0,9948	273
2,2	$S_f = 1640,6x^{-0,107}$	0,992	292

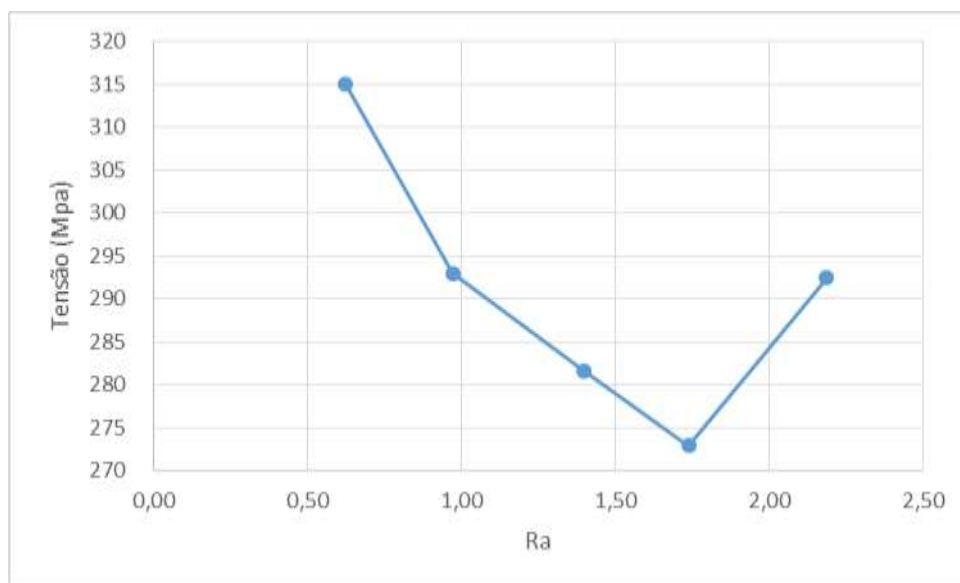


Gráfico 2 – Curva de tensão de fadiga em função da rugosidade.

Para auxiliar na análise dos dados, foi traçado o diagrama de Wöhler (Gráfico 3) que mostra os valores médios dos ciclos antes da falha para cada uma das tensões estudadas e esboça para cada uma das curvas de Ra estudado.

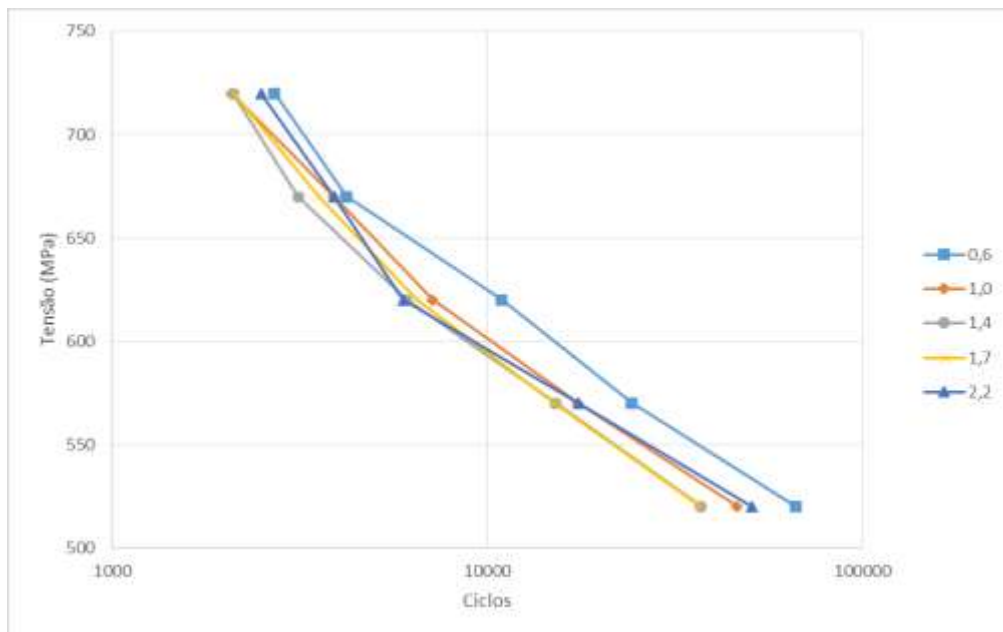


Gráfico 3 – Curvas de tensão de fadiga por número de ciclos para cada valor de Ra estudado.

Pode-se observar no Gráfico 2 que há uma correlação entre o limite de fadiga e a rugosidade superficial dos ensaios, porém há uma incoerência no valor de tensão que corresponde à rugosidade de Ra de 2,2. Com essa dispersão, o ponto será suprimido para as análises futuras.

Para obter um estudo mais detalhado do efeito da rugosidade na tensão limite de fadiga, tentou-se quantificar o comportamento utilizando os dados das tensões médias que foram obtidas no Gráfico 2. Realizou-se dois ajustes: uma função exponencial e outra polinomial de segundo grau, o Gráfico 4 e o Gráfico 5 mostram o ajuste realizado com a sua respectiva função e o R^2 da mesma.

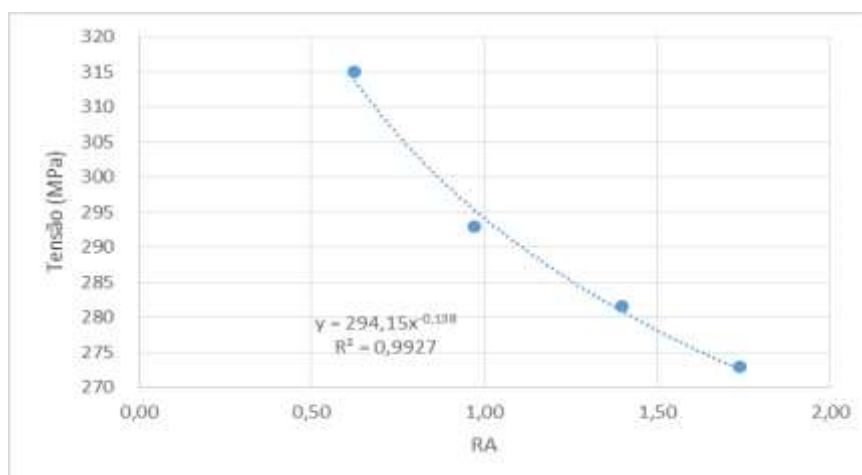


Gráfico 4 - Limite de Fadiga em Função do Ra afustado por uma função polinomial de 2º grau.

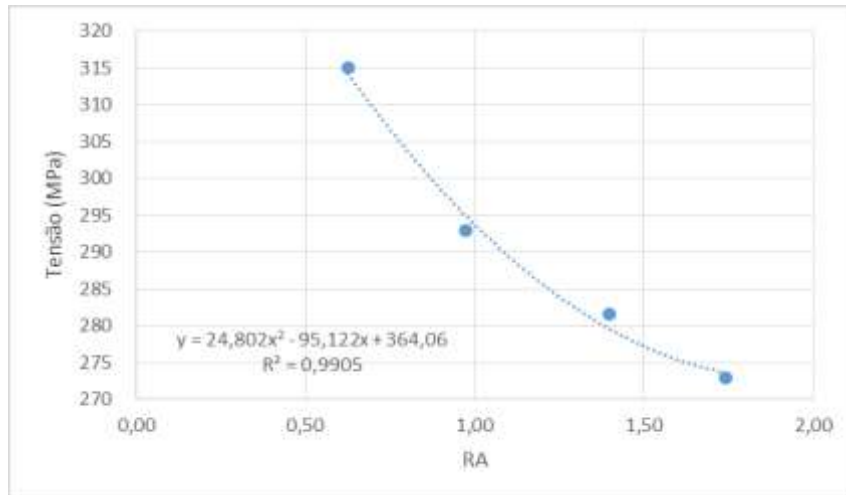


Gráfico 5 - Limite de Fadiga em Função do Ra ajustado por uma função exponencial.

Analisando as duas curvas, pode-se observar que, em ambas as situações, a função ajustada possui uma boa confiabilidade devido ao seu R^2 estar próximo de 1 e com característica decrescente, diminuindo a tensão de fadiga quando se aumenta o valor de Ra. Porém não se pode concluir qual função descreve melhor a tensão de fadiga devido à escassez de pontos de Ra estudados.

Comparando esses resultados com as equações que são atualmente utilizadas para corrigir a tensão de fadiga teórica para as condições reais. Utilizando a Tabela 1 para aplicar a Equação 3, determinando o C_{superf} e aplicando-o na Equação 1, obtemos a tensão de fadiga nas condições reais.

Como o material utilizado para os ensaios é um aço AISI 1045, a sua resistência à ruptura é $S_{ut} = 690$ Mpa e a sua tensão de fadiga $S_f = 0,5 S_{ut} = 345$ Mpa. Utilizando os coeficientes da Tabela 1 para material usinado (tipicamente $Ra = 1,6$), obtemos o $C_{superf} = 0,798$. Aplicando a Equação 1 com todos os outros coeficientes igual a 1 (carregamento fletor, diâmetro de 6,35 mm, temperatura ambiente e confiabilidade de 50%), obtemos que a tensão de fadiga real é:

$$C_{superf} = 4,51 \cdot S_{ut}^{-0,265} = 4,51 \cdot 690^{-0,265} = 0,798$$

$$S_f = C_{carreg} C_{tam} C_{superf} C_{temp} C_{conf} S_f' = 1 \cdot 1 \cdot 0,798 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 345 = 275,3 \text{ MPa}$$

Comparando esse valor com a tensão limite de fadiga encontrada para $Ra = 1,6$ usando as funções propostas nesse estudo tem-se:

- Função polinomial $S_f = 275,4$ Mpa.
- Função exponencial $S_f = 275,7$ Mpa.

Vê-se que os valores de S_f obtidos neste estudo estão coerentes com a recomendação de Shigley e Mischke.

Conclusões

Observamos que a rugosidade superficial influencia na tensão de fadiga, isto se deve à maior concentração de tensões provocado pelo processo de manufatura do material, também é causado

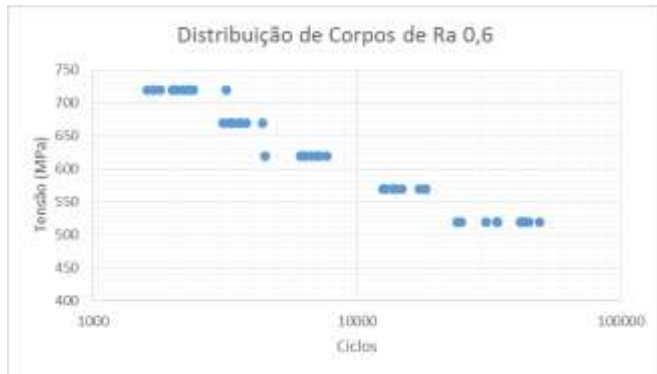
pela maior probabilidade do material já ter uma trinca superficial que fará a com que o material falhe com uma tensão menor.

Apesar de uma das classificações de Ra estudado sair do comportamento esperado, o comportamento do limite de tensão de fadiga em função do Ra possui um padrão que pode ser descrito por uma função.

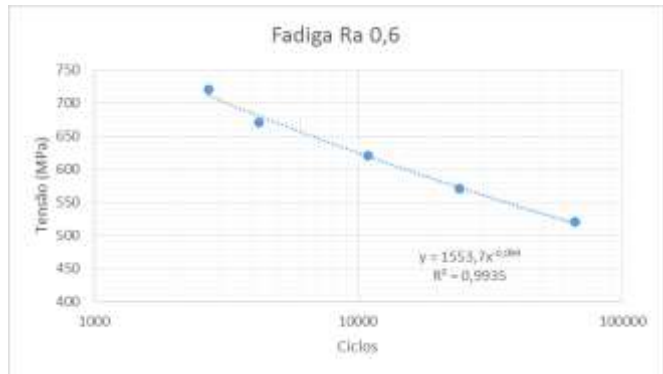
Referências Bibliográficas

- Juvinall, R. C. (2000). *Fundamentals of Machine Component Design* (3ª ed.). John Wiley & Sons, INC.
- Norton, R. L. (2004). *Projetos de Máquinas* (2ª ed.). Bookman.
- Budynas, R. G.;Nisbett, J. K. (2011). *Elementos de Máquinas de Shigley* (8ª ed.) McGraw Hill.
- Material Didático EMC 301 Construção de Máquinas da Escola de Engenharia Mauá. (EEM/CEUN-IMT)

Anexo A: Diagramas de distribuição e gráficos da média do número de ciclos para cada Ra estudado.

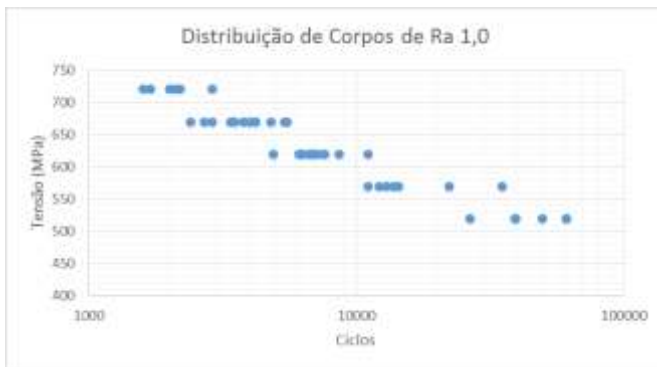


(a)

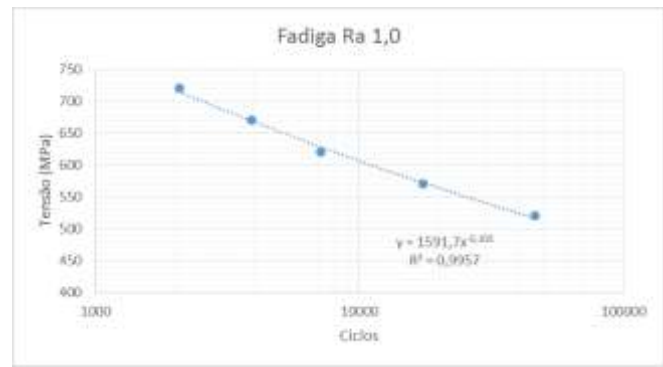


(b)

Diagrama de distribuição dos corpos de prova (a) e gráfico da média de cada uma das tensões estudadas (b) com ajuste exponencial para os corpos de Ra 0,6.

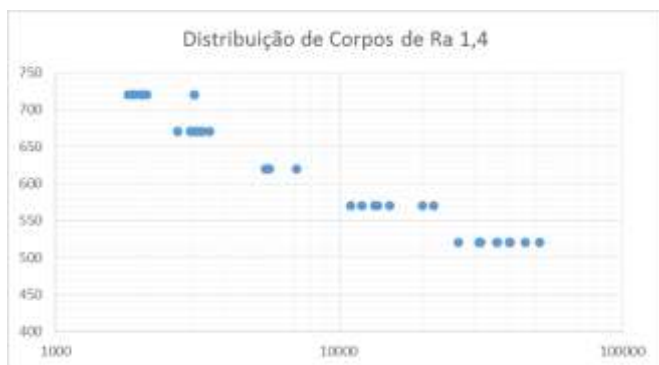


(c)

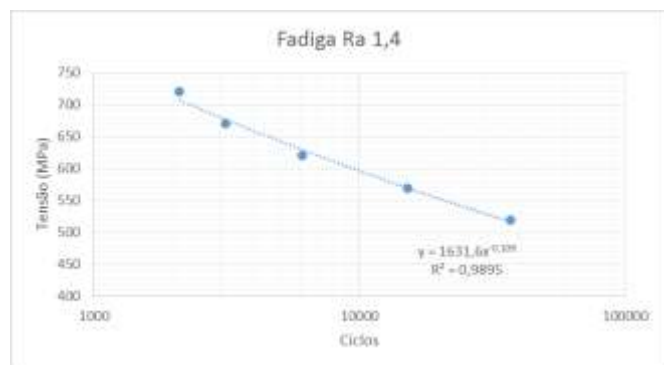


(b)

Diagrama de distribuição dos corpos de prova (a) e gráfico da média de cada uma das tensões estudadas (b) com ajuste exponencial para os corpos de Ra 1,0.

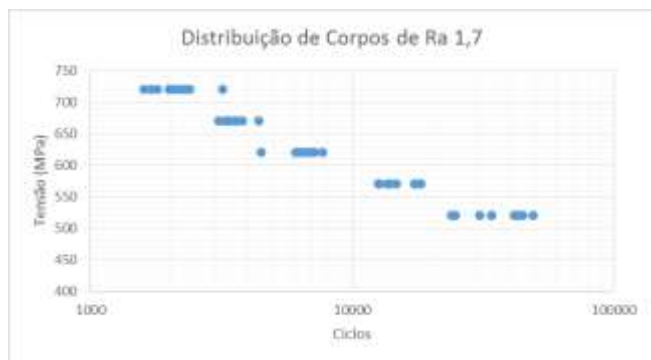


(b)

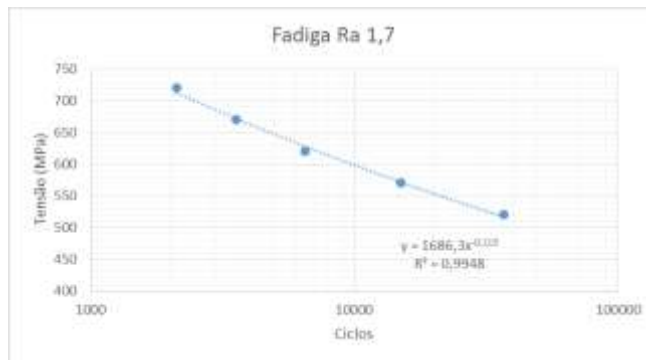


(b)

Diagrama de distribuição dos corpos de prova (a) e gráfico da média de cada uma das tensões estudadas (b) com ajuste exponencial para os corpos de Ra 1,4.



(e)

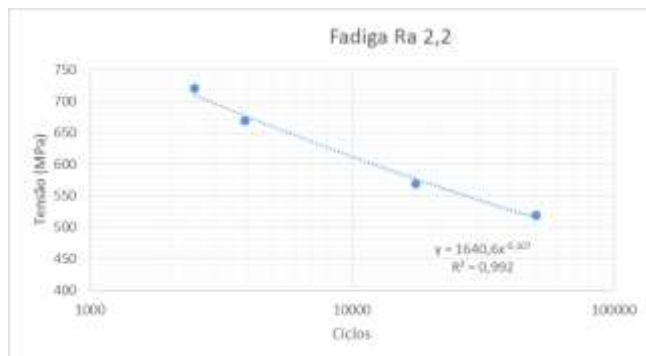


(b)

Diagrama de distribuição dos corpos de prova (a) e gráfico da média de cada uma das tensões estudadas (b) com ajuste exponencial para os corpos de Ra 1,7.



(d)



(b)

Diagrama de distribuição dos corpos de prova (a) e gráfico da média de cada uma das tensões estudadas (b) com ajuste exponencial para os corpos de Ra 2,2.