

**Antonio Lucio Rodrigues Alves Filho**

**DETERMINAÇÃO DA VIDA INFINITA EM FADIGA DO AÇO ESTRUTURAL**

**DIN 34CrNiMo6**

**DETERMINATION OF FATIGUE LIMIT OF DIN 34CrNiMo6 STRUCTURAL  
STEEL**

**PROJETO DE GRADUAÇÃO**

Projeto apresentado como requisito para obtenção de  
grau de Bacharel pelo Programa de  
Graduação em Engenharia Mecânica do  
Departamento de Engenharia Mecânica da PUC-Rio.

**Orientador**

Marcos Venicius Soares Pereira

**Rio de Janeiro**

**Julho de 2015**

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus por ter me dado saúde e força para superar as dificuldades.

Aos meus pais e irmãos, pelo amor, incentivo e apoio incondicional.

A esta Universidade, seu corpo docente, direção e administração que contribuíram para a manutenção e aprimoramento da reconhecida excelência de ensino.

Ao meu orientador Marcos Venicius Soares Pereira, pelo suporte no pouco tempo que lhe coube, pelas suas correções e incentivos.

Aos amigos, pelos bons momentos.

E a todos que direta ou indiretamente fizeram parte da minha formação, o meu muito obrigado.

# RESUMO

---

O aço DIN 34CrNiMo6 é um aço de baixa liga e alta resistência, similar ao SAE 4340. Como o nome já diz, essa classificação é dada para os aços que tem pouco teor de liga e altos limites de resistência. A diferença desse aço para a maioria dos aços de alta resistência é que além dessa propriedade, possui elevada tenacidade à fratura.

Também possui boa temperabilidade, ou seja, elevada profundidade de penetração de transformação martensítica ao longo de seu eixo, de forma que este tenha alta dureza não só na parte mais externa de sua estrutura, mas também em profundidades mais interiores. Seus principais elementos de liga são Cr, Ni e Mo, enquanto que seus últimos dois dígitos (40) se referem à porcentagem de carbono que o aço contém, em centésimos.

Por esse tipo de aço ser muito utilizado em componentes mecânicos, como eixos e virabrequins, é importante fazer um estudo de fadiga nesse material para prever sua vida útil em serviço e evitar falhas catastróficas.

Esse estudo foi feito baseado na metodologia S-N para se determinar o limite de fadiga do aço, admitindo-se vida infinita em  $10^7$  ciclos. Para isso, foram realizados ensaios de fadiga rotativa em corpos de prova cilíndricos padronizados e submetidos a carregamentos cíclicos totalmente reversíveis. Com os resultados obtidos, é possível ajustar uma curva S-N para os pontos experimentais condizente com a curva de Wöhler e determinar o limite de resistência à fadiga do aço estrutural DIN 34CrNiMo6.

**Palavras-chave: aço DIN 34CrNiMo6, curva S-N, limite de fadiga.**

# ABSTRACT

---

DIN 34CrNiMo6 is a high-strength low-alloy steel, similar to SAE 4340. As the name says, this term is given to steels which contain low alloy level and high-strength limit. The advantage this steel has in relation to others high-strength steels is that it has also a high fracture resistance.

This steel has good hardenability too, which means, high depth intrusion of martensitic transformation over its axis, in a way that not only the external part become hard, but also the innermost parts. The main alloy elements are Cr, Ni and Mo, while its two last digits (40) refer to the percentage of carbon that the steel contains, in hundredths.

Because this type of steel is very used in mechanical components, such as axis and crankshaft, it is important to study fatigue in this material to predict its service life and avoid catastrophic failures.

This study was made based on the S-N methodology to determine the fatigue limit of DIN 34CrNiMo6 steel, admitting its infinite life equal to  $10^7$  cycles. For this purpose, rotating beam fatigue tests were made on standard cylindrical specimens submitted to totally reversible cyclical loads. With the results, it is possible to adjust a S-N curve to experimental points befitting to Wöhler's curve and determine the endurance limit of the structural steel DIN 34CrNiMo6.

**Keywords: DIN 34CrNiMo6 steel, S-N curve, fatigue limit.**

# ÍNDICE DE TABELAS

---

Tabela 1: Limites mínimos (linha superior) e máximos (linha inferior) da composição química do aço 34CrNiMo6 [10] .....	13
Tabela 2: Concentração em peso dos principais componentes químicos do aço 34CrNiMo6.....	13
Tabela 3: Valores do limite de escoamento $S_E$ e resistência à ruptura $S_R$ do aço 34CrNiMo6.....	14
Tabela 4: Tabela de conversão de tensões no Sistema Internacional para momentos fletores no Sistema Inglês.....	19
Tabela 5: Tensão, momento fletor e número de ciclos associados a cada corpo de prova (CP)...	24

# ÍNDICE DE FIGURAS

---

Figura 1: Virabrequim (Fonte: DEQM PUC-Rio) .....	2
Figura 2: Ensaio de líquido penetrante no componente que falhou (Fonte: DEQM PUC-Rio).....	3
Figura 3: Curva S-N traçada a partir dos resultados dos ensaios de fadiga axial de um aço AISI 4130 normalizado, que mostra sua resistência à fadiga $S_e$ [3].....	6
Figura 4: Curva tensão-deformação que exhibe a região hachurada linear elástica, onde o método S-N é válido [6] .....	7
Figura 5: Curva S-N no formato log-log .....	9
Figura 6: Comparação entre aço e alumínio no comportamento a fadiga através de uma curva S-N [4] .....	10
Figura 7: Resultados experimentais do ensaio de flexão rotativa do aço A-517 em uma curva S-N [1] .....	12
Figura 8: Esquema do corpo de prova cilíndrico utilizado nos ensaios. ....	14
Figura 9: Corpo de prova cilíndrico típico utilizado nos ensaios de fadiga rotativa.....	15
Figura 10: Esquema da máquina RBF-200 utilizada nos ensaios .....	16
Figura 11: Exemplificação do carregamento do corpo de prova durante ensaios de fadiga por flexão rotativa [11] .....	17
Figura 12: Detalhe da régua de calibração de momento fletor da máquina e seu peso móvel.....	20
Figura 13: Contador de ciclos da máquina .....	20
Figura 14: Máquina RBF-200 utilizada nos ensaios de fadiga rotativa .....	21
Figura 15: Corpo de prova fraturado ao fim de um ensaio de fadiga.....	21
Figura 16: Carregamento cíclico do tipo $R=-1$ no ensaio da tensão $\sigma=675\text{MPa}$ em função do tempo .....	23

Figura 18: Curva S-N experimental do aço DIN 34CrNiMo6 (SAE 4340).....26

Figura 19: Curvas S-N experimental e previstas pelos modelos de Juvinall e Manson.....27

# SUMÁRIO

---

RESUMO .....	i
ABSTRACT .....	ii
ÍNDICE DE TABELAS.....	iii
ÍNDICE DE FIGURAS .....	iv
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
2.1 O ESTUDO DE WÖHLER .....	4
2.2 FADIGA .....	5
2.3 LIMITE DE RESISTÊNCIA À FADIGA.....	5
2.4 MÉTODO S-N.....	6
2.5 CURVA DE WÖHLER.....	8
3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	13
3.1 MATERIAL.....	13
3.2 CORPOS DE PROVA.....	14
3.3 MÁQUINA DE FADIGA E ENSAIOS .....	15
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	23
5. CONCLUSÕES.....	28
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	29

# 1. INTRODUÇÃO

---

O estudo da iniciação de trincas em materiais estruturais é requisito fundamental para evitar falhas catastróficas que em engenharia podem levar a perdas de vidas, recursos materiais e tempo. Um estudo prévio pode evitar que se utilizem fatores de segurança exagerados, fazendo com que o projeto seja confiável e economicamente viável.

As estruturas submetidas a solicitações mecânicas elevadas geralmente são as que desempenham papéis mais importantes, seja na indústria automobilística, aeronáutica ou em componentes específicos como turbinas ou virabrequins. A complexidade dos carregamentos que essas estruturas estão submetidas podem produzir fraturas catastróficas, a partir de estudos mal realizados pelo fabricante ou uma má operação executada pelo usuário. Pelo alto preço dos materiais e elevado custo de montagem dessas estruturas, estudos são necessários. Desses estudos, a previsão da vida útil de um material é um dos mais utilizados.

Na Figura 1, é possível ter ideia da dimensão do componente mecânico em estudo que está sujeito a carregamentos cíclicos durante praticamente toda a sua vida. Como já observado, esse componente possui elevado custo de aquisição, montagem e operação. Trata-se de um virabrequim com alguns números bem significativos: 6 toneladas, 7 metros de comprimento e custo em torno de €600 mil.



Figura 1: Virabrequim (Fonte: DEQM PUC-Rio)

Um eixo similar falhou de maneira inesperada e, por sorte, a falha não foi catastrófica a ponto de causar perda de vidas. Porém, essa falha pode desencadear outras falhas, pois esta altera o comportamento do eixo em operação, aumentando o atrito e levando a um consequente superaquecimento dos mancais, o que faz com que o sistema de segurança do motor desligue.

A Figura 2 mostra o resultado de um ensaio não-destrutivo de líquido penetrante realizado no eixo que falhou. É possível observar a presença de trincas que foram iniciadas por tensões cíclicas que geraram a falha do eixo por fadiga.

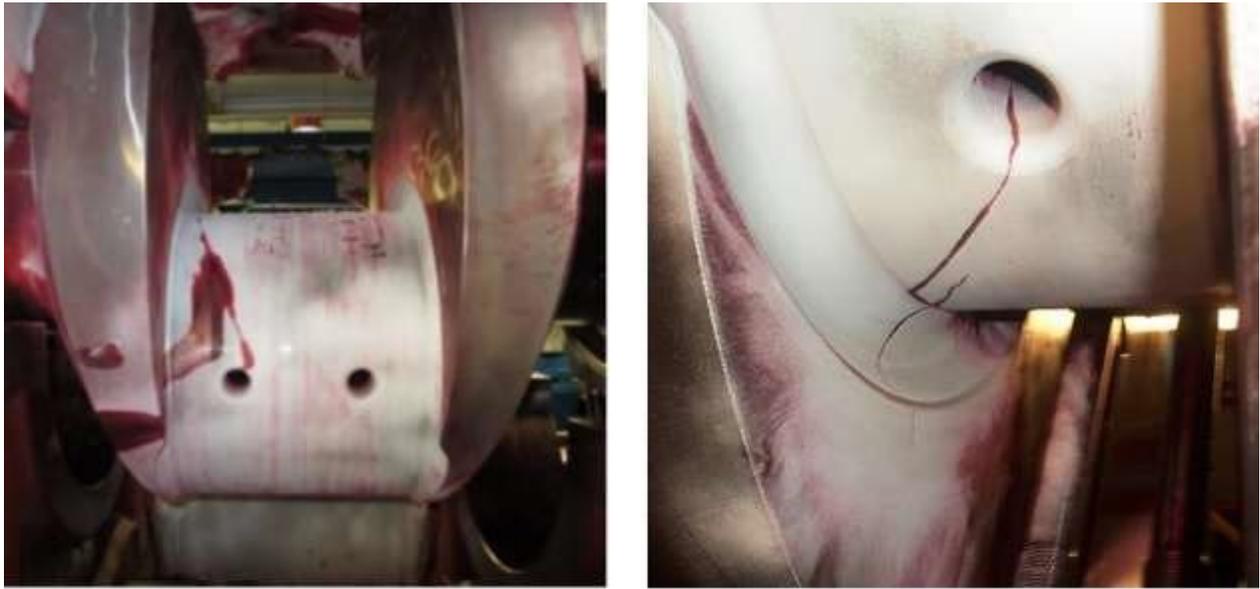


Figura 2: Ensaio de líquido penetrante no componente que falhou (Fonte: DEQM PUC-Rio)

Sendo assim, é necessário que o projeto seja tolerante a danos e uma investigação deve ser feita para determinar parâmetros que contribuam para o desempenho da estrutura sem comprometer sua integridade estrutural.

Dentro do presente estudo, então, foi determinada a vida infinita do aço DIN 34CrNiMo6, um aço similar ao SAE 4340. Essa determinação foi feita a partir de ensaios de flexão rotativa de corpos de prova desse material, com o subsequente levantamento da curva S-N do aço em questão, que permitirá determinar experimentalmente o seu limite de resistência à fadiga.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

---

### 2.1 O ESTUDO DE WÖHLER

Segundo Schütz [2], August Wöhler (1819-1914) desenvolveu no fim da década de 1850 estudos de fadiga através da medição das cargas em serviço que atuavam nos eixos de trilhos com um *strain-gage* desenvolvido por ele mesmo. Com esse estudo, era possível medir apenas o número de ciclos por viagem destes trilhos e, comparando ao número de ciclos total desses eixos, ele notou que o número de ciclos por viagem era muito baixo se comparado em toda a sua vida.

Com isso, surgiu sua motivação em construir, no início da década seguinte, uma máquina que retratasse de maneira mais fiel como o eixo era solicitado em serviço, com tensões atuando durante todo o tempo, como se o eixo estivesse sendo solicitado em várias viagens seguidas. Com tensões axiais, de flexão e de torção, ele se utilizou de corpos de prova sem entalhes e com entalhes (notando seus efeitos) e chegou a diversas conclusões como: a amplitude das tensões sendo o mais importante parâmetro na vida do material; as tensões médias influenciando na vida do material; fatores de segurança sendo diferentes para componentes diferentes.

Certamente Wöhler pode ser nomeado o pai da fadiga, pois além de todas essas constatações já citadas, outros procedimentos foram realizados e percebidos por ele, como descreve Castro & Meggiolaro [1]: utilização de corpos de prova de flexão rotativa para fazer os primeiros estudos com o método S-N; consideração da vida em fadiga ser medida por números

de ciclos e controlada por  $\Delta\sigma$ ; projeção da vida infinita de componentes mecânicos; materiais testados previamente antes de serem utilizados em estruturas.

## 2.2 FADIGA

Castro & Meggiolaro [1] definem fadiga como “um tipo de mecanismo de falha mecânica caracterizado pela geração e/ou propagação paulatina de uma trinca até a eventual fratura da peça, causadas primariamente pela variação temporal das cargas que atuam na peça”. A geração das trincas resulta do movimento cíclico das discordâncias, logo é causada por deformações plásticas variáveis.

Esse mecanismo de falha pode acarretar em iniciação de trincas e causar fratura do material. O processo de fadiga consiste em três estágios:

- Dano inicial de fadiga que leva a uma iniciação de trinca
- Propagação da trinca até atingir tamanho crítico
- Fratura repentina da seção transversal remanescente

Apenas será considerado o primeiro estágio de fadiga, onde o material está prestes a iniciar uma trinca.

## 2.3 LIMITE DE RESISTÊNCIA À FADIGA

Com uma gama de tensões  $\Delta\sigma$  atuando permanentemente no ponto crítico da peça de forma senoidal, após um certo tempo, ocorrerá a fratura do material. Wöhler notou através de seus ensaios que para uma dada tensão  $\sigma$  havia uma vida correspondente  $N$  e, com esses dados, obteve a chamada curva S-N ou curva de Wöhler. Nessa curva, em formato log-log, é possível

visualizar que a partir de um dado ciclo  $N$  (no “joelho” da curva), esta se torna horizontal para os aços e isso ocorre por volta de  $N=10^6$  e  $N=10^7$  ciclos [3]. No presente estudo, definiu-se vida infinita em  $N=10^7$  ciclos.

É justamente nessa região horizontal da curva, como mostrado na Figura 3, que se obtém o chamado limite de resistência à fadiga do material: a tensão abaixo da qual o material não sofrerá falha por fadiga através de carregamentos cíclicos. [4]

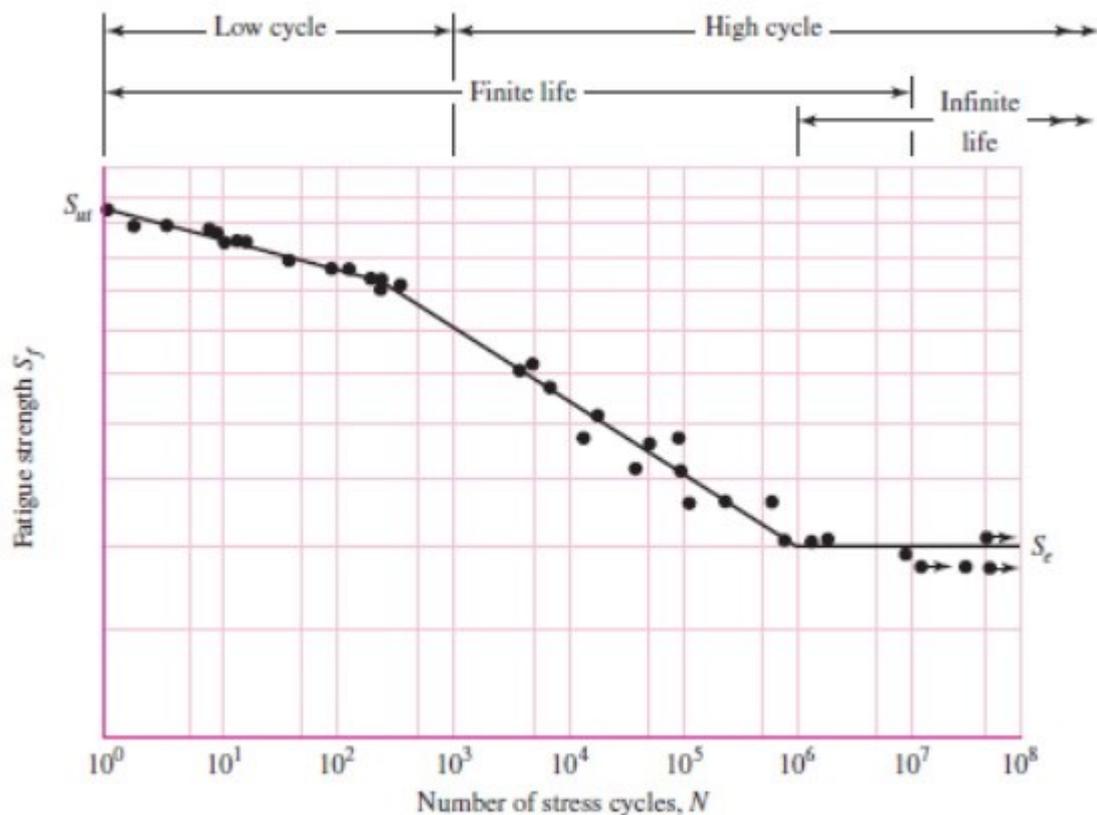


Figura 3: Curva S-N traçada a partir dos resultados dos ensaios de fadiga axial de um aço AISI 4130 normalizado, que mostra sua resistência à fadiga  $S_e$  [3]

## 2.4 MÉTODO S-N

Utilizado para prever a iniciação de trinca por fadiga quando as tensões atuantes no ponto crítico da peça são menores do que a resistência ao escoamento cíclico do material, o método S-N é o mais simples dentre os utilizados nos três estágios do processo de fadiga citados anteriormente. Sua metodologia é de fato muito útil, pois modela bem a resistência à fadiga de componentes que serão solicitados em toda sua vida sob tensões abaixo da tensão de escoamento, ou seja, no regime linear elástico da curva tensão-deformação, como mostrado na Figura 4, a seguir.

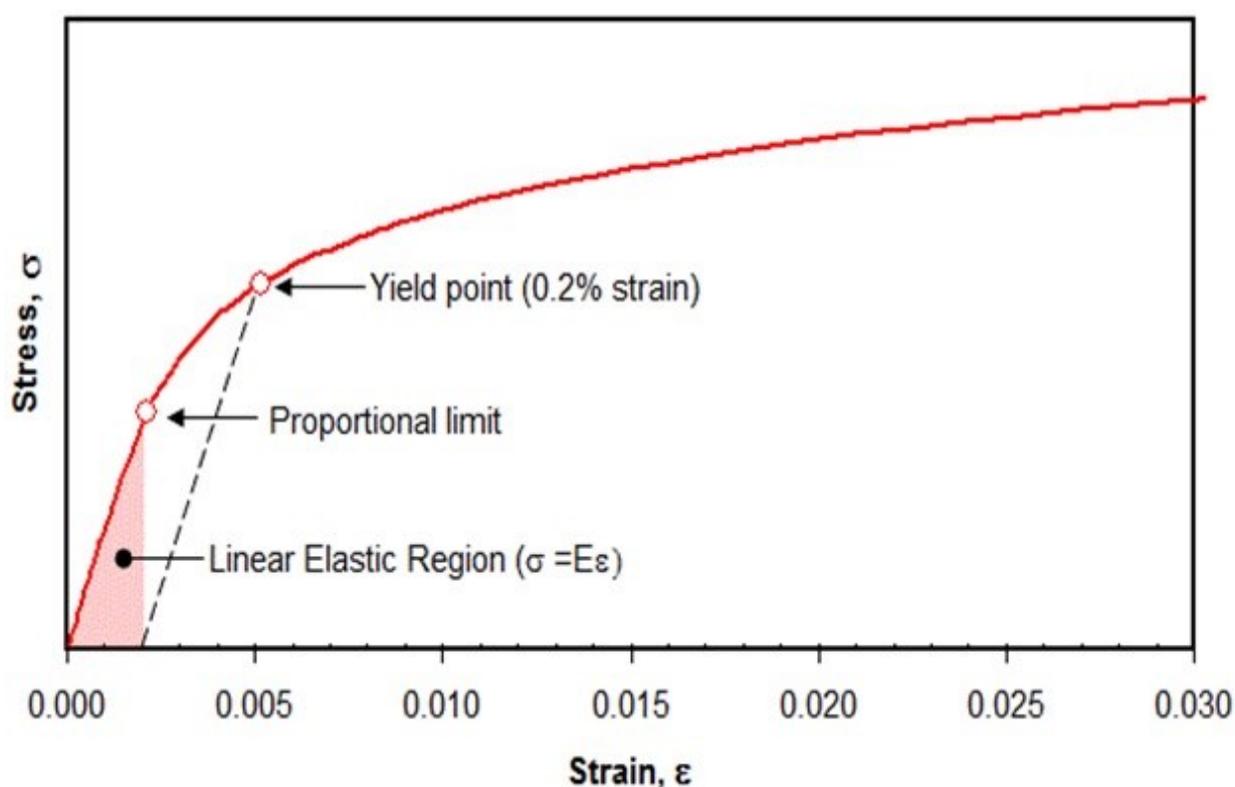


Figura 4: Curva tensão-deformação que exhibe a região hachurada linear elástica, onde o método S-N é válido [6]

A região linear elástica da curva tensão-deformação justifica a simplicidade do método S-N, pois respeita a linearidade da relação entre as duas grandezas sem deixar de ser

conservador, o que é bom em um projeto de engenharia. Esse conservadorismo acaba suprimindo o fato de a modelagem ser menos complexa do que a utilizada pelo método  $\epsilon$ -N, por exemplo.

A filosofia do método também permite reproduzir em corpos de prova menores, mais baratos e simples, o que acontece em uma estrutura complexa quando solicitada em serviço durante sua vida útil. A já citada simplicidade e confiabilidade do método faz com que este seja muito utilizado até hoje apesar de algumas restrições e limitações, tais como:

- Mecânica simples e dependente de parâmetros empíricos
- Considera apenas o regime elástico
- Não reconhece a presença de trincas, principal causa das falhas por fadiga

Essas características do método permitem que o estudo ocorra de maneira economicamente viável, já que os corpos de prova utilizados nos ensaios substituem e retratam bem o que ocorre na prática, ou seja, no eixo do virabrequim de um motor a diesel.

## 2.5 CURVA DE WÖHLER

Schütz [2] menciona em seu artigo que a partir da realização de seus experimentos, Wöhler organizou seus resultados em forma de tabelas. Seu sucessor, Spangenberg, foi quem de fato traçou seus resultados como curvas. As curvas S-N são assim chamadas de curva de Wöhler, então, desde 1936.

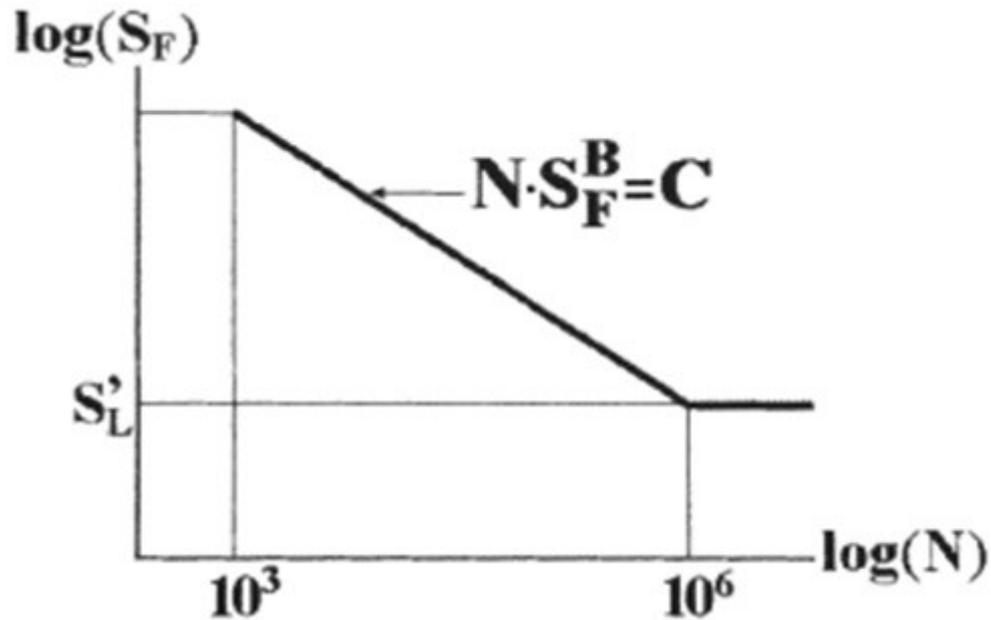


Figura 5: Curva S-N no formato log-log

A curva no seu formato log-log é uma reta (Figura 5) e foi ideia do norte-americano Basquin, que representou os eixos em  $\log \sigma$  (ordenada) e  $\log N$  (abscissa). Além disso, apresentou sua relação parabólica como:

$$NS_F^B = C \quad (1)$$

Apesar da representação parabólica ter sido ideia de Basquin, a curva oriunda da equação (1) é mais usualmente conhecida como “curva de Wöhler”. A configuração dessa curva (Figura 5) permite se perceber que com o aumento do número de ciclos  $N$ , a resistência à fadiga  $S_F$  tende a decrescer até atingir o limite de resistência à fadiga do material. Os parâmetros  $B$  e  $C$  da equação (1) são chamados de expoente e coeficiente de Wöhler, respectivamente.

O aço além de ser um material muito acessível, possui também propriedades mecânicas que o fazem ter infinitas aplicações na engenharia em lugar de outros materiais. Pode-se citar como exemplo duas vantagens do aço em relação ao alumínio: possui maior resistência à fadiga, além de um limite de fadiga bem definido (Figura 6).

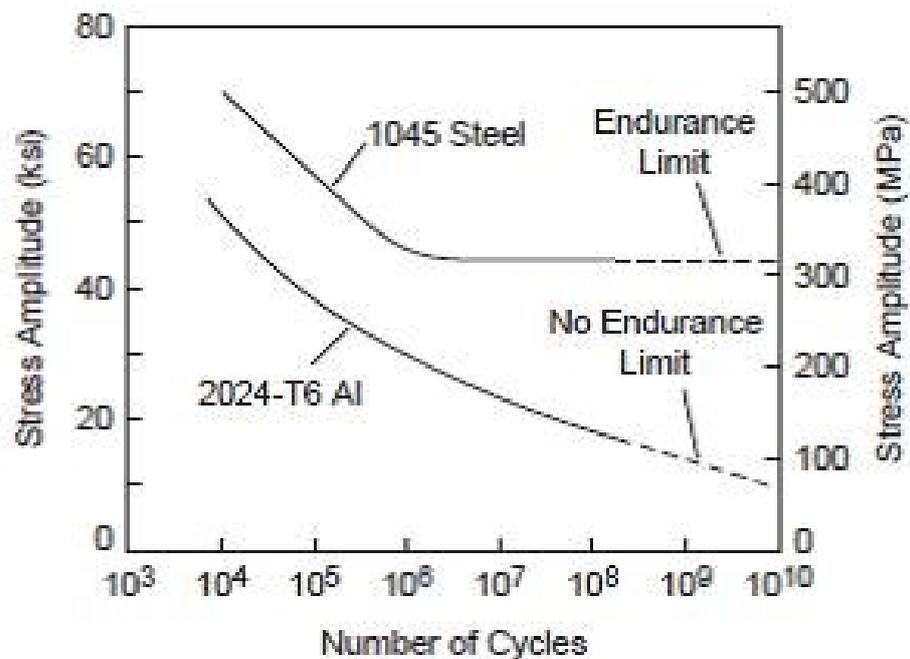


Figura 6: Comparação entre aço e alumínio no comportamento a fadiga através de uma curva S-N [4]

Em caso de não haver resultados experimentais de ensaios de fadiga confiáveis, é possível se estimar o limite de fadiga do aço utilizando a estimativa proposta por Juvinall [7] através das equações que relacionam a resistência à fadiga  $S_F$ , em  $10^3$  ciclos, e o limite de fadiga do material  $S'_L$ , em  $10^6$  ciclos, com a resistência à ruptura  $S_R$ :

$$S_F(10^3) = 0,9.S_R \quad (2)$$

Se o aço possui resistência à ruptura menor que 700 MPa, ou seja,  $S_R < 1400 \text{ MPa}$ ,  
Juvinall propõe:

$$S'_L(10^6) = 0,5.S_R \quad (3)$$

Já se o aço possuir  $S_R \geq 1400 \text{ MPa}$ , então:

$$S'_L(10^6) = 700 \text{ MPa} \quad (4)$$

A estimativa de Juvinall [7], de modo geral, é boa para uma primeira aproximação, mas possui uma falha conceitual na região de baixo ciclo, compreendida entre  $10^3$  e  $10^6$  ciclos. Isso ocorre, segundo Castro & Meggiolaro [1,8], porque no banco de dados do programa **ViDa**, desenvolvido pelos próprios autores, é possível verificar que cerca de 6180 dos 7270 metais listados possuem um valor de  $S_E$  (limite de escoamento) abaixo da estimativa de  $0,9.S_R$  utilizada por Juvinall. Ou seja, com esse valor acima do limite de escoamento do aço, este passa a operar no regime plástico e conflitar com a consideração de que o aço trabalha, no modelo S-N, dentro da região elástica da curva tensão-deformação. A estimativa de Manson [9] para o modelo  $\varepsilon$ -N, feita dois anos antes da publicação de Juvinall, é de  $S_F(10^3) = 0,76.S_R$  e

estatisticamente modela melhor a resistência à fadiga em 1000 ciclos. Já a estimativa de Juvinal de  $S_F(10^6) = 0,5 \cdot S_R$  será preservada.

A determinação do limite de resistência à fadiga do aço 34CrNiMo6 é dada na região de alto ciclo. Com isso, através de um ajuste aos pontos experimentais, obtém-se uma curva S-N parecida com a que mostra a Figura 7, o que permite visualizar a vida infinita em fadiga  $S'_L$ .

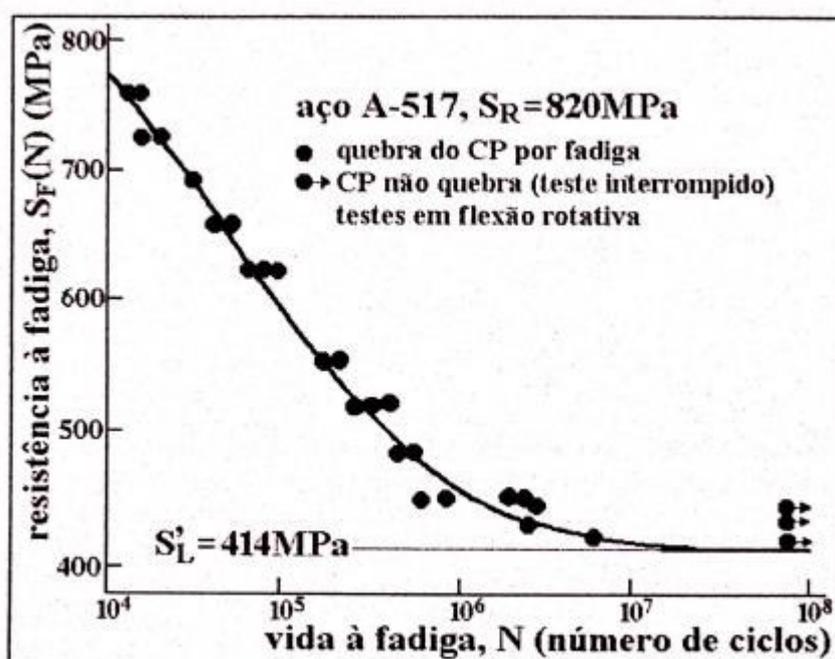


Figura 7: Resultados experimentais do ensaio de flexão rotativa do aço A-517 em uma curva S-N [1]

### 3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

---

#### 3.1 MATERIAL

A Tabela 1 indica a variação admissível dos principais elementos de liga do aço 34CrNiMo6, enquanto que a composição exata do material em estudo se encontra na Tabela 2.

C (%)	Si (%)	Mn (%)	Cr (%)	Ni (%)	Mo (%)
0,38	0,15	0,60	0,80	1,65	0,20
0,43	0,30	0,80	1,10	2,00	0,30

Tabela 1: Limites mínimos (linha superior) e máximos (linha inferior) da composição química do aço 34CrNiMo6 [10]

A Tabela 2 a seguir mostra a concentração em peso de alguns componentes desse material.

C (%)	Si (%)	Mn (%)	Cr (%)	Ni (%)	Mo (%)	Fe (%)
0,38	0,21	0,52	1,51	1,75	0,24	95,1

Tabela 2: Concentração em peso dos principais componentes químicos do aço 34CrNiMo6

Duas importantes propriedades mecânicas desse material são mostradas na Tabela 3 a seguir.

<b>DIN 34CrNiMo6</b>	
<b>LIMITE DE ESCOAMENTO (<math>S_E</math>)</b>	760 MPa
<b>RESISTÊNCIA À RUPTURA (<math>S_R</math>)</b>	900 MPa

Tabela 3: Valores do limite de escoamento  $S_E$  e resistência à ruptura  $S_R$  do aço 34CrNiMo6

## 3.2 CORPOS DE PROVA

Os corpos de prova utilizados nos ensaios de fadiga rotativa do tipo cilíndrico foram usinados segundo a norma ASTM E739-10 e com as dimensões apresentadas na Figura 8 abaixo. Na sequência, uma foto em perspectiva do corpo de prova cilíndrico (Figura 9).

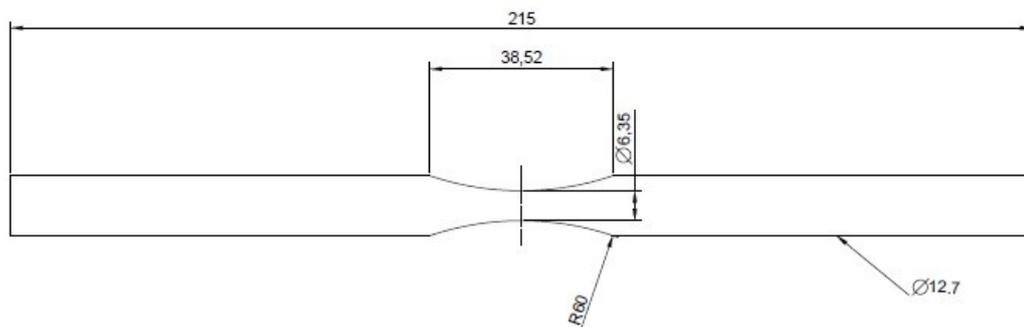


Figura 8: Esquema do corpo de prova cilíndrico utilizado nos ensaios.



Figura 9: Corpo de prova cilíndrico típico utilizado nos ensaios de fadiga rotativa

### 3.3 MÁQUINA DE FADIGA E ENSAIOS

A máquina utilizada nos ensaios de fadiga rotativa foi uma RBF-200, como mostra o esquema da Figura 10 abaixo.

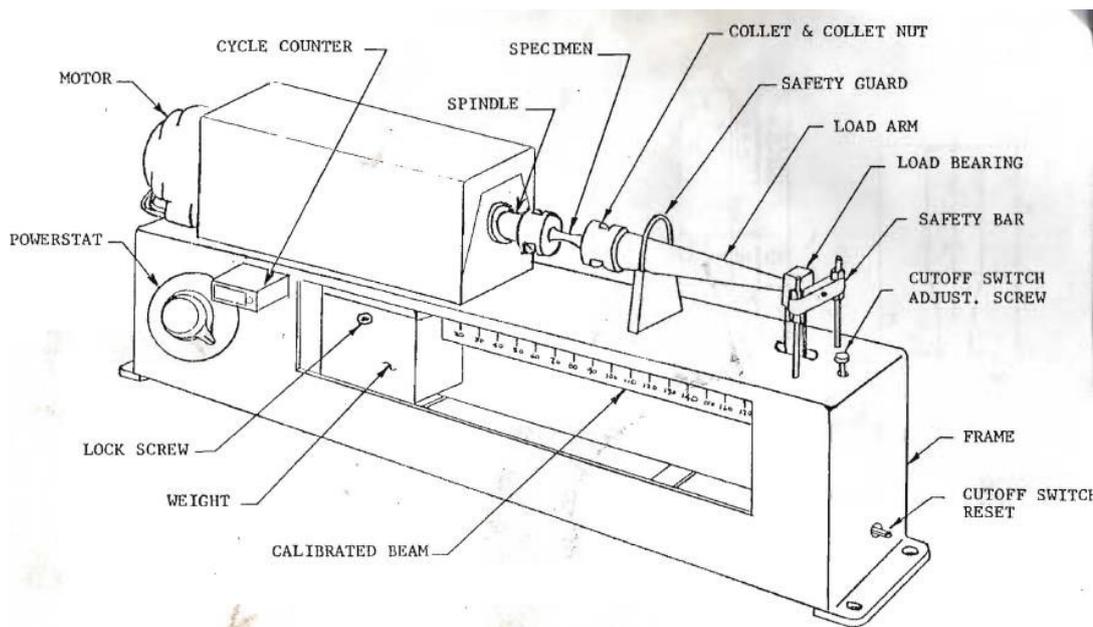


Figura 10: Esquema da máquina RBF-200 utilizada nos ensaios

Essa máquina funciona da seguinte maneira: com o corpo de prova (SPECIMEN) fixo em suas duas extremidades, ajusta-se na régua calibrada (CALIBRATED BEAM) o momento fletor correspondente a uma dada tensão  $\sigma$ . A partir disso, o potenciômetro (POWERSTAT) é ajustado a uma frequência de ensaio grande o suficiente para não se produzir vibrações no corpo de prova. O contador de ciclos (CYCLE COUNTER) começa então a trabalhar e só pára ao final do ensaio, quando o corpo de prova se rompe por fadiga ou quando atinge a vida infinita determinada no estudo de  $N=10^7$  ciclos.

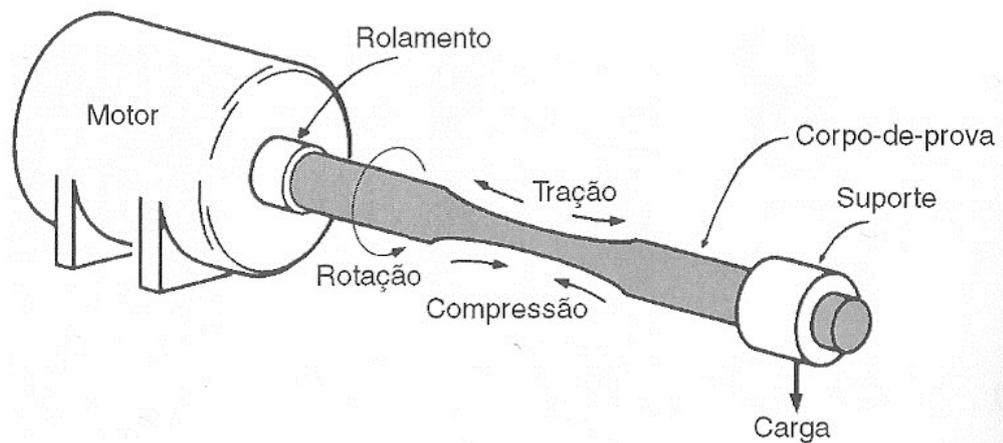


Figura 11: Exemplificação do carregamento do corpo de prova durante ensaios de fadiga por flexão rotativa [11]

Na Figura 11 podemos entender o funcionamento do ensaio. O corpo de prova, além de sofrer tração em cima e compressão embaixo, também está sujeito a movimento de rotação. Isso faz com que o ponto que está ora superior, ora inferior esteja num primeiro momento em tração e após isso em compressão. É essa alternância de tensões que faz resultar na fadiga rotativa do corpo de prova.

Para o estudo, foram requeridas tensões  $\sigma$ , em MPa, na qual o ensaio estaria submetido. Como a máquina opera com escala e unidades de momento (e não tensão), além de estar no Sistema Inglês de unidades, é preciso fazer conversões para obter resultados correspondentes as tensões desejadas. Sabe-se o diâmetro  $d$  (mm) da seção transversal crítica do corpo de prova, e sabe-se que, para uma dada tensão  $\sigma$  (MPa), existe um momento fletor  $M$  associado a essa tensão, que é facilmente encontrado através da relação:

$$M = \frac{\sigma \pi d^3}{32} \quad (5)$$

Com essa relação, se tem um momento fletor  $M$  associado com unidade em  $N.mm$ , que não é a unidade em que a máquina opera,  $lbf.in$ . Para isso, são necessários dois fatores de conversão:

$$1 \text{ in} = 25,4 \text{ mm} \quad (6)$$

$$1 \text{ lbf} = 4,45 \text{ N} \quad (7)$$

Usando tais fatores de conversão para a tensão em momento fletor, do Sistema Internacional para o Sistema Inglês, obtém-se a Tabela 4 mostrada adiante.

$\sigma$ (MPa)	$M$ (lbf.in)
675	150
585	130
540	120
495	110
450	100

405	90
360	80

Tabela 4: Tabela de conversão de tensões no Sistema Internacional para momentos fletores no Sistema Inglês

De posse da Tabela 4, o peso móvel que se situa abaixo da régua de calibração de momento fletor (Figura 12) pode ser ajustado em um momento fletor  $M$  correspondente a tensão  $\sigma$  desejada no ensaio. Com isso, ao final do ensaio é possível visualizar no contador (Figura 13) duas possibilidades: no caso de fratura, quantos ciclos o corpo de prova leva para fraturar naquela tensão; no caso de não fratura, se o corpo de prova atingiu os  $10^7$  ciclos admitidos, o que significa que pode-se interromper o ensaio e decretar vida infinita a este.



Figura 12: Detalhe da régua de calibração de momento fletor da máquina e seu peso móvel



Figura 13: Contador de ciclos da máquina

Abaixo, uma foto da máquina RBF-200 que foi utilizada em todos os ensaios de fadiga do estudo (Figura 14) e de uma amostra do corpo de prova rompido na máquina (Figura 15).

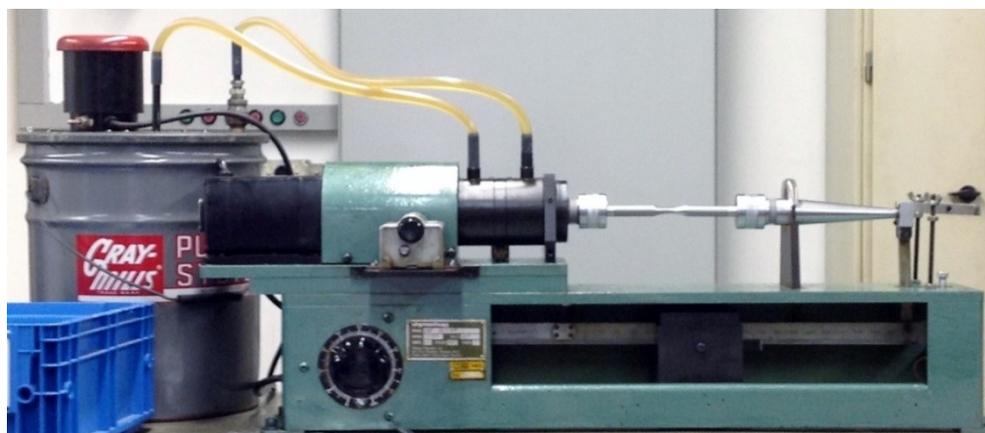


Figura 14: Máquina RBF-200 utilizada nos ensaios de fadiga rotativa



Figura 15: Corpo de prova fraturado ao fim de um ensaio de fadiga

Vale ressaltar também que os corpos de prova foram sujeitos a carregamentos do tipo tração-compressão, conforme exemplificado na Figura 11, resultantes do ensaio de fadiga com tensão alternada reversa, caracterizado por  $R = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}} = -1$ , onde R é a razão entre tensões, estabelecida entre as tensões mínima e máxima atuantes durante o ensaio.

Para citar como exemplo, nos ensaios de fadiga da primeira tensão a sua amplitude foi de  $\sigma = 675\text{MPa}$  e a velocidade de rotação da máquina foi de  $\omega = 628\text{rad/s} \approx 6000\text{ rpm}$ . Para ilustrar, tem-se o gráfico da Figura 16, que mostra de forma mais clara que os carregamentos trativos e compressivos foram simétricos ( $R = -1$ ) e fazendo com que a tensão média ( $\sigma_m$ ) fosse nula, ou seja, nesse caso as tensões médias não influenciam na fadiga do material.

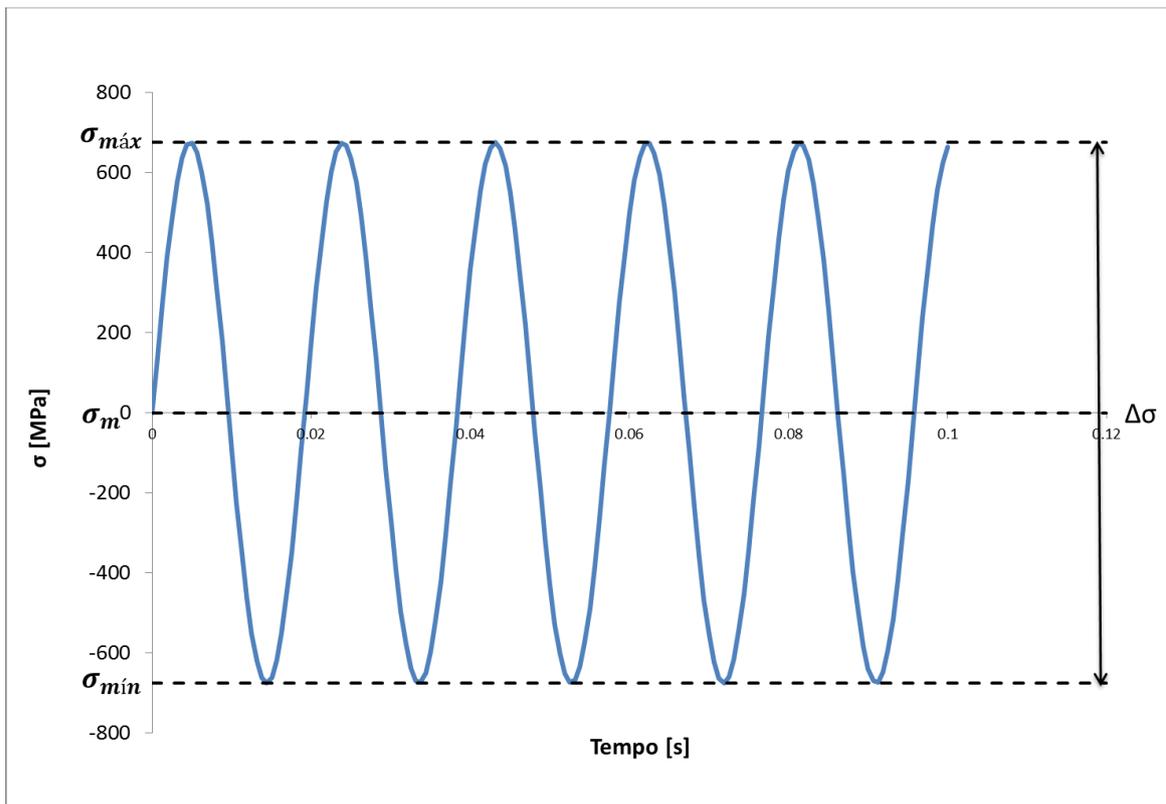


Figura 16: Carregamento cíclico do tipo  $R=-1$  no ensaio da tensão  $\sigma=675$ MPa em função do tempo

Como esse tipo de carregamento ocorre na mesma amplitude de tensão, tanto mínima quanto máxima, a seção transversal crítica do corpo de prova fica sujeita durante todo o ensaio a uma alternância entre tensões de tração e compressão.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

---

Com os devidos momentos associados às tensões na máquina, foi possível obter para cada amostra ensaiada um número de ciclo correspondente  $N$ , como apresentado na Tabela 5 abaixo.

$\sigma$ (MPa)	M (lbf.in)	N (ciclos)	CP
675	150	1.67E+04	1
		1.61E+04	2
		1.55E+04	3
		1.62E+04	4
585	130	5.30E+04	5
		5.43E+04	6
		7.65E+04	7
		5.63E+04	8
540	120	1.42E+05	9
		1.27E+05	10
		1.23E+05	11
		1.30E+05	12
495	110	1.85E+05	13
		3.35E+05	14
		2.71E+05	15
		3.48E+05	16
450	100	9.96E+05	17
		3.21E+05	18
		2.26E+05	19
		4.23E+05	20
405	90	1.01E+06	21
		9.44E+05	22
		2.24E+05	23
		3.01E+05	24
360	80	1.00E+07	25
		1.00E+07	26
		1.00E+07	27
		1.00E+07	28

Tabela 5: Tensão, momento fletor e número de ciclos associados a cada corpo de prova (CP)

Pela Tabela 5 pode-se notar que foram ensaiados quatro corpos de prova para cada nível de tensão, espaçados de maneira uniforme a partir da primeira tensão em intervalos de 45 MPa. Como foram 7 tensões diferentes ensaiadas, utilizaram-se 28 corpos de prova ao todo. Os ciclos grifados em vermelho indicam que os corpos de prova atingiram  $10^7$  ciclos sem fratura.

A resistência à fadiga foi determinada considerando que todos os corpos de prova fraturaram antes de  $N=10^7$  ciclos. Quando os ensaios foram feitos em  $\sigma = 360\text{MPa}$ , todos os corpos de prova não fraturaram e, por 100% desse total não falhar em  $10^7$  ciclos, determinou-se que essa tensão corresponde a vida infinita do material.

Com os valores de tensão e seus respectivos números de ciclos  $N$  necessários para fraturar o corpo de prova, foi possível construir uma curva S-N do aço DIN 34CrNiMo6 através de um ajuste de potência para os pontos experimentais, de modo a encontrar a curva que mais se aproxima desses pontos, como mostra o gráfico da Figura 17: Curva S-N experimental do aço DIN 34CrNiMo6 (SAE 4340).

A partir dos dados que geraram curva, pode-se determinar a equação da curva de Wöhler e prever pelo modelo qual seria a vida infinita do aço em  $N=10^7$  ciclos.

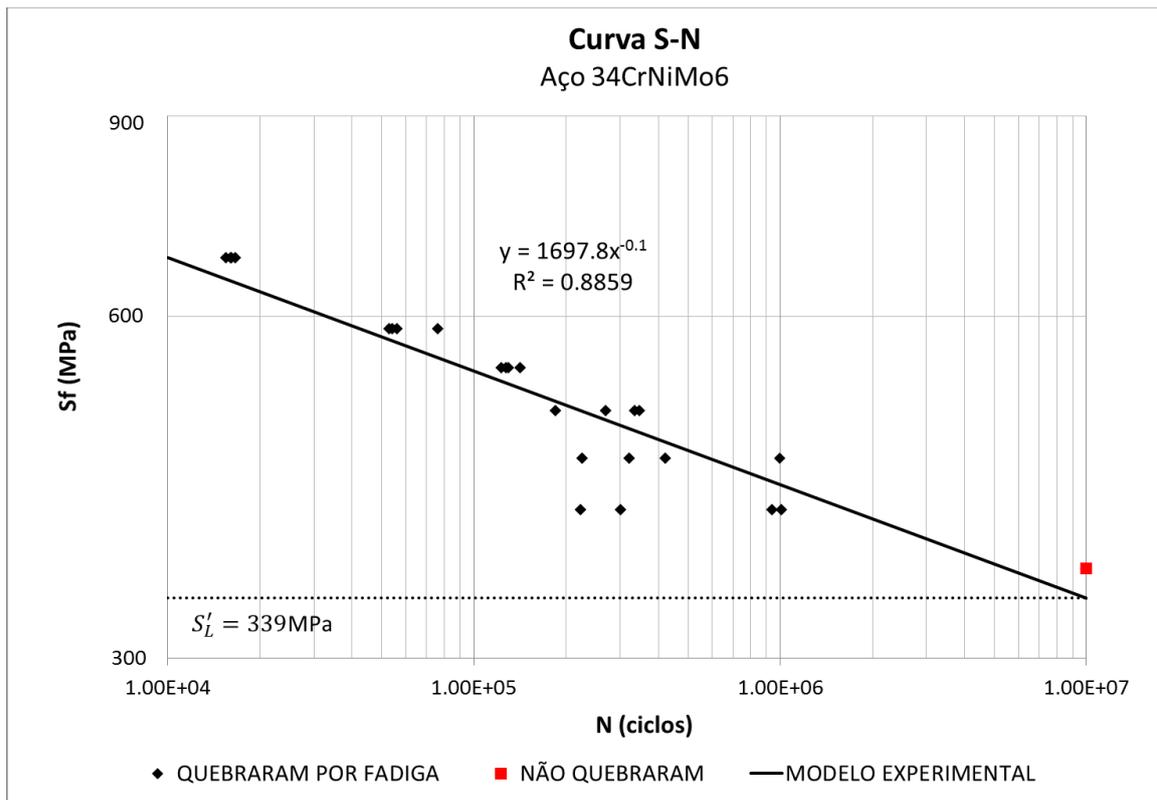


Figura 17: Curva S-N experimental do aço DIN 34CrNiMo6 (SAE 4340)

O programa Excel fornece a equação da curva em forma de potência, assim como o ajuste da sua linha de tendência. Fazendo as conversões adequadas para o formato da equação de Basquin, ou seja, encontrando o expoente B e o coeficiente C, se obtém a equação da curva ajustada como:

$$N \cdot S_F^{10,0} = 1,99 \cdot 10^{32} \quad (8)$$

Para efeito de comparação com a previsão de Jvinall [7], a curva S-N ajustada do aço DIN 34CrNiMo6 em  $N=10^6$  ciclos tem resistência à fadiga de  $S_F(10^6) = 426\text{MPa} = 0,47.S_R$ . Em contrapartida, Jvinall prevê  $0,5.S_R = 450\text{MPa}$  em  $N=10^6$  ciclos. Isso significa que o valor de resistência à fadiga do aço DIN 34CrNiMo6 pelo modelo experimental é 5% menor do que a previsão de Jvinall (e Manson) em  $10^6$  ciclos.

A seguir, um gráfico que ilustra melhor as previsões de Jvinall e Manson, em relação ao modelo feito a partir dos dados experimentais.

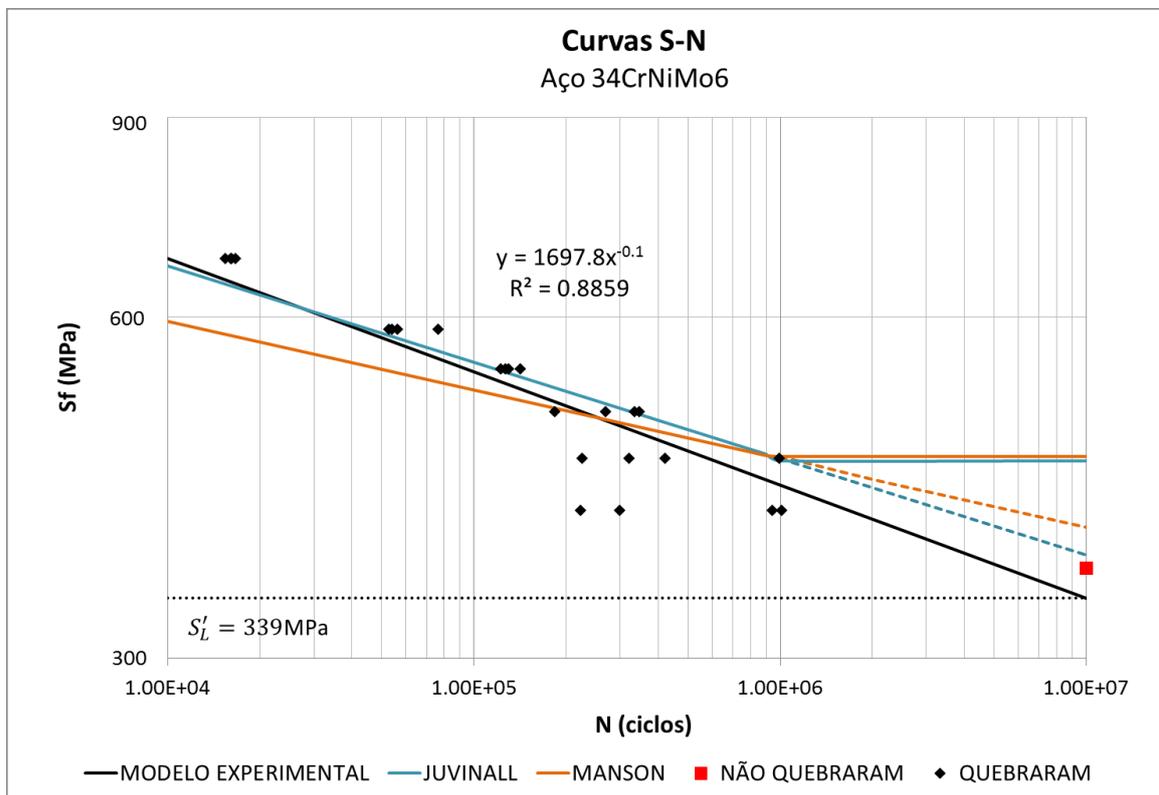


Figura 18: Curvas S-N experimental e previstas pelos modelos de Jvinall e Manson

A equação da curva de Jvinall é:

$$N.S_F^{11,75} = 1,52.10^{37} \quad (9)$$

Já a de Manson:

$$N.S_F^{16,49} = 5,91.10^{49} \quad (10)$$

Como se observa na Figura 18, em  $N \geq 10^6$  ciclos, ambos os modelos, tanto de o de Juvinall como o de Manson, fizeram previsões pouco conservadoras em relação ao experimento. A curva preta, respectiva aos dados experimentais, se encontra abaixo das curvas azul e laranja, dos modelos de Juvinall e Manson, respectivamente. Em outras palavras, sem dados experimentais, os dois modelos fazem previsões que poderiam comprometer a integridade em serviço de componentes mecânicos fabricados com o aço DIN 34CrNiMo6 sob condições cíclicas de carregamento, dado que sua vida infinita em  $N=10^7$  ciclos é experimentalmente menor do que a prevista por esses autores.

Juvinall foi mais conservador do que Manson para  $N=10^7$  ciclos: 370MPa contra 391MPa. Em números, Juvinall estima cerca de 3% acima do valor definido de vida infinita ( $\sigma=360$ MPa) e Manson, 9%. Pelo modelo ajustado, tem-se que em  $N=10^7$  ciclos, o limite de resistência à fadiga é  $\sigma=339$ MPa (Figura 17 e Figura 18).

## **5. CONCLUSÕES**

---

Os resultados mostram que, apesar existirem modelos matemáticos, como aqueles de Juvinall e Manson, os ensaios são muito importantes quando a finalidade do estudo é algo prático e que se aplica a casos específicos dentro da engenharia. Os modelos de Juvinall e Manson foram extrapolados e não previam, a princípio, a vida infinita em  $N=10^7$  ciclos. Além disso, esses modelos foram pouco conservadores e poderiam prejudicar a vida em serviço de uma estrutura feita do aço DIN 34CrNiMo6 na ausência de resultados experimentais.

O ideal é que se ensaie o tanto de amostras quanto forem necessárias a fim de se determinar experimentalmente, de maneira precisa, o limite de resistência à fadiga. Contudo, a usinagem dos corpos de prova é cara e demorada e por esse motivo não foi possível realizar mais do que os 28 ensaios nesse estudo.

## **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

---

- [1] – Castro, J.T.P.; Meggiolaro, M.A., “Técnicas e Práticas de Dimensionamento Estrutural sob Cargas Reais de Serviço”, vol. I e II, 2009.
- [2] – Schütz, W., “A history of fatigue”, Engineering Fracture Mechanics, vol. 54, nº. 2, 1996, p. 263-300.
- [3] – Budynas, RG; Nisbett, J.K., “Shigley’s Mechanical Engineering Design”, McGraw-Hill, 8ª edição, 2006.
- [4] – Campbell, F.C., “Elements of Metallurgy and Engineering Alloys”, ASM International, 2008.

- [5] – ASM International Handbook Committee, “Properties and Selection: Irons, Steels, and High-Performance Alloys”, vol.1, ASM International, 1990.
- [6] – [http://www.fea-optimization.com/ETBX/hooke\\_help.html](http://www.fea-optimization.com/ETBX/hooke_help.html)
- [7] – Juvinall, R.C., “Stress, Strain & Strength”, McGraw-Hill, 1967.
- [8] – Castro, J.T.P.; Meggiolaro, M.A., “Avaliação das estimativas dos parâmetros SN e  $\epsilon$ N no projeto à fadiga”, II Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, 2002.
- [9] – Manson, S.S., “Fatigue: A Complex Subject - Some Simple Approximations”, Experimental Mechanics, Vol. 5, No. 4, pp. 193-226, 1965.
- [10] – <http://www.ggdmetals.com.br/aco-construcao-mecanica/sae-4340/>
- [11] – Garcia, A.; Spim, J.A; Santos, C.A. – “Ensaio dos Materiais”, Livros Técnicos e Científicos, Rio de Janeiro, 2000.