

ASSOCIAÇÃO EDUCACIONAL DOM BOSCO
FACULDADE DE ENGENHARIA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

FABRICIO SEIXAS FRUCTUOSO MENDES DE CARVALHO
GABRIEL GUSTAVO MACIEL DOMINGOS

ANÁLISE DE DURABILIDADE DE COMPONENTES AUTOMOTIVOS

Resende
2021

Fabricio Seixas Frutuoso Mendes de Carvalho
Gabriel Gustavo Maciel Domingos

ANÁLISE DE DURABILIDADE DE COMPONENTES AUTOMOTIVOS

Monografia apresentada à Associação Educacional Dom Bosco, Faculdade de Engenharia de Resende, Curso de Bacharelado em Engenharia Mecânica como requisitos parcial para obtenção do Grau de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. MSc. Juliano C. da Silva Filho

Resende
2021

Catálogo na fonte
Biblioteca Central da Associação Educacional Dom Bosco – Resende-RJ

C331 Carvalho, Fabricio Seixas Frutuoso Mendes de
Análise de durabilidade de componentes automotivos / Fabricio Seixas Frutuoso Mendes de Carvalho; Gabriel Gustavo Maciel Domingos - 2021.
38f.

Orientador: Juliano Carvalho da Silva Filho

Trabalho de conclusão de curso apresentado como requisito parcial à finalização do curso de Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia de Resende da Associação Educacional Dom Bosco.

1. Engenharia. 2. Componentes automotivos. 3. Indústria automotiva. 4. Fadiga mecânica. 5. Durabilidade mecânica. I. Domingos, Gabriel Gustavo Maciel. II. Silva Filho, Juliano Carvalho da. III. Faculdade de Engenharia de Resende. IV. Associação Educacional Dom Bosco. V. Título.

CDU 531.453(043)

**FABRICIO SEIXAS FRUCTUOSO MENDES DE CARVALHO
GABRIEL GUSTAVO MACIEL DOMINGOS**

ANÁLISE DE DURABILIDADE DE COMPONENTES AUTOMOTIVOS

Monografia apresentada à Associação Educacional Dom Bosco, Faculdade de Engenharia de Resende, Curso de Bacharelado em Engenharia Mecânica como requisitos parcial para obtenção do Grau de Bacharel em Engenharia Mecânica.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Juliano C. da Silva Filho
Orientador

Prof. Diego da Silva Carvalho
Convidado

Prof. Said Morais Sirio Rocha
Convidado

Resende
2021

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos familiares e amigos pelo apoio prestado. A Volkswagen Caminhões e Ônibus pelos dados utilizados no trabalho. Ao Sr. Mário Prado, Supervisor da Engenharia de Pré Desenvolvimento, pela atenção dedicada.

Este trabalho contou com o apoio da seguinte entidade:
VWCO - Volkswagen Caminhões e Ônibus

*“Se eu vi mais longe, foi por estar sobre ombros de gigantes.”
(Isaac Newton)*

RESUMO

Os testes de durabilidade são aplicados com o objetivo de reproduzir as condições de serviço e garantir a segurança e funcionalidade dos componentes mecânicos. Na indústria automotiva, o campo de provas é largamente utilizado para validação estrutural do chassi, bem como de todas as estruturas que compõem o veículo, como por exemplo, suspensão, cabina, sistema de direção, exaustão, entre outros. O campo de provas é composto por diversos eventos que permitem a customização de um teste acelerado para cada tipo de veículo e aplicação. Esse trabalho propõe a aplicação da teoria clássica de fadiga para previsão da vida a partir da análise experimental de tensões. Os dados experimentais foram obtidos em um componente estrutural durante a passagem de um veículo pesado em quatro eventos da pista de durabilidade. Para contagem dos ciclos de fadiga foi utilizado o método de *Rainflow* simplificado e posteriormente a regra de Palmgreen-Miner foi utilizada para determinação do dano acumulado e do número de repetições necessárias para falha do material em cada evento.

PALAVRAS-CHAVE: Fadiga, Durabilidade, Estimativa da Vida.

ABSTRACT

Durability tests are applied to reproduce services conditions and to guarantee the safety and functionality of mechanical components. In the automotive industry, the testing field is broadly used for structural validation of chassis, as well all the structures that compound the vehicle, such as suspension, cab, steering system, exhaust, and many others. The test field is composed by several events that allow the customization of an accelerated test for each kind of vehicle and application. This paper proposes an application of the classical theory of fatigue for a forecast of life from the experimental tensions analysis. The experimental data were obtained in a structural component during the passage of a heavy vehicle in four durability track events. For the count of the fatigue cycles has been used the simplified Rainflow method and posteriorly the Palmgren-Miner rule was used for the determination of the accumulated damage and of the number of necessary repetitions to the material failure on each event.

KEYWORD: Fatigue, Durability, Life estimate.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1	Superfície de fratura à fadiga de um eixo submetido a carregamento de flexão	16
Figura 2	Ciclo de tensão e os parâmetros importantes à análise de fadiga	16
Figura 3	Gráfico de amplitude variável	17
Figura 4	Contagem de ciclos pelo método Rainflow - analogia com as gotas de chuvas caindo sobre o telhado	18
Figura 5	Regras para obtenção dos ciclos	18
Figura 6	Ciclo variando de -2 a 6	19
Figura 7	Terceiro item extraído, variando de -4 a 2	19
Figura 8	Quarto ciclo extraído, variando de -6 a 6	19
Figura 9	Quinto ciclo extraído, variando de 10 a -6	19
Figura 10	Sexto ciclo extraído, variando de 12 a -10	20
Figura 11	Curva esquemática de fadiga para aço	21
Figura 12	Curva esquemática de fadiga para aço	23
Figura 13	Efeito da tensão média na vida em fadiga	24
Figura 14	Diagrama de Haigh para as equações de Goodman e Gerber	25
Figura 15	Carregamento de dano Linear	26
Figura 16	Curva S-N esquemática com amplitude constante para aço e sujeita a carregamento com amplitude variável	26
Figura 17	Históricos de tensão obtidos na pista de durabilidade	30
Figura 18	Critério para correção do ciclo de tensão com tensão média diferente de zero	31
Figura 19	Fluxograma para contabilização do dano	32
Figura 20	Contagem <i>Range Pair</i>	34

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resultados da aplicação do método de contagem “Rainflow” dos 3 Pontos.	20
Tabela 2 – Estimativa para S_{1000}	22
Tabela 3 – Fatores de confiabilidade Cr.	22
Tabela 4 – Coeficientes para determinar o fator acabamento superficial	23
Tabela 5 – Propriedades Mecânicas	28
Tabela 6 – Valores de máximo e mínimo de tensão para os eventos A, B, C e D	33
Tabela 7 – Dano acumulado para os eventos da pista de durabilidade.	33

LISTA DE SÍMBOLOS

ΔS	Variação de tensão
S_{max}	Tensão Máxima
S_{min}	Tensão Mínima
$S_a; \sigma_a$	Amplitude de tensão
$S'_a; \sigma'_a$	Amplitude de tensão equivalente, ou completamente reversível
S_m	Tensão média
S_u	Resistência à tração
σ_f	Tensão verdadeira de fratura
S_{be}	Limite de fadiga à flexão (bending)
S_b	Limite de fadiga
A	Constante do material, valor de intersecção com o eixo das cordenadas.
b	Expoente de resistência à fadiga (ou inclinação), ou coeficiente de Basquim
k	Fator de inclinação da curva S-N, ou <i>Slope factor</i>
C_L	Fator de carregamento
C_D	Fator de tamanho da peça
C_S	Fator de acabamento da superfície
C_R	Fator de confiabilidade
C_s	Resistência de tração do material
D	Dano por Fadiga
n	Número de repetições do ciclo de tensão
N_f	Número de repetições para falha
D_{PM}	Valor crítico do dano de Palmgreen-Miner

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
2	JUSTIFICATIVA	13
3	OBJETIVO	14
4	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	15
4.1	Fadiga	15
4.2	Ciclo de Carregamento	15
4.3	Contagem de Ciclos - RainFlow	16
4.4	Curva S-N	20
4.4.1	Estimativa da Curva S-N	21
4.4.2	Influência da Tensão Média	24
4.5	Acumulo de Dano Linear	25
4.6	Pista de Durabilidade	27
5	MATERIAIS E MÉTODOS	28
5.1	Definição do Material	28
5.2	Histórico de tensão	29
5.3	Contagem de Ciclos	31
5.4	Efeito da Tensão Média	31
5.5	Acúmulo de Dano	31
6	RESULTADOS E DISCUSSÕES	33
6.1	Contagem de Ciclos	33
6.2	Estimativa da Vida	33
7	CONCLUSÃO	35
	REFERÊNCIAS	36

1 INTRODUÇÃO

Fadiga é uma forma de falha mecânica verificada em elementos e componentes mecânicos sujeitos a ciclos de tensão ou deformação. Este fenômeno é de importância crucial na concepção de máquinas e estruturas, pois é possível a ocorrência da falha em um nível de tensão inferior ao limite de resistência à tração ou ao limite de resistência ao escoamento do material. A necessidade de previsão e prevenção de falhas mecânicas estimulou pesquisas sobre o fenômeno, fazendo com que atualmente seja possível utilizar modelos confiáveis na estimativa da resistência à fadiga do componente estrutural.

Estudos mostram que 99% das falhas se dão por falhas de fadiga. Essa análise é realizada a partir do cálculo de dano em comparação a teste e aplicação. A solução de problemas reais que envolvem a engenharia é bastante dependente da criação de padrões de comportamento que foram acumulados a partir de testes de fadiga em vários materiais, sob diferentes condições e sujeitos a diversos tipos de carregamento. Para a aplicação destes métodos é necessário primeiramente fazer a caracterização mecânica do material, onde serão avaliadas as condições de fabricação e funcionamento do componente. A avaliação auxiliará da identificação das propriedades do material e dos fatores agravantes ao fenômeno de fadiga, como por exemplo, tensões residuais e concentradores de tensão. Após à caracterização mecânica, uma avaliação dos carregamentos atuantes no componente auxilia na identificação de outros fatores importantes ao fenômeno, como por exemplo, a razão entre os carregamentos.

Neste sentido, a fim de colaborar com a formação do acervo bibliográfico referente à fadiga, o objetivo do presente trabalho é a determinação da resistência à fadiga do aço NBR 6656 LNE 380 a fim de aplicar tensões para entender qual a estimativa de vida.

2 JUSTIFICATIVA

O fenômeno de fadiga é o principal motivo das falhas estruturais de componentes automotivos, e vem sendo largamente estudado. Durante o desenvolvimento, os veículos são exaustivamente testados em campo de provas para garantir a durabilidade e segurança em serviço. Assim, a previsão da vida através de dados virtuais ou experimentais em veículos desenvolvidos para protótipos, é necessária para antecipação das falhas e redução dos custos de desenvolvimento. Nesse contexto, o trabalho mostrará um estudo de caso com uma abordagem clássica do tema.

3 OBJETIVO

Este trabalho objetiva realizar a análise de fadiga uniaxial de um componente submetido a quatro eventos do campo de provas, de modo a determinar o dano total acumulado e a vida para cada evento através da análise experimental de tensões.

4 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

4.1 FADIGA

Dowling (2013) considera uma das formas mais comuns de falha mecânica, a fadiga. É a exposição do material onde passa por inúmeras repetições, sofrendo um “cansaço”, podendo assim sofrer uma possível ruptura da peça, ou causar deformações e danos irreversíveis. Essa peça irá sofrer um acúmulo de danos devido a um intenso processo de carregamentos cíclicos, variável ou não ao longo do tempo, ao passo que se inicia por uma pequena trinca no material que surge ao longo do tempo devido as tensões alternadas. O processo de fadiga pode ser modelado na ocorrência de diferentes estágios, sendo: nucleação de trinca, trincas por fadigas e fratura.

Para Llano-Vizcaya et al. (2006) esse processo é dado pela deformação plástica localizada. Conforme as deformações no concentrador de tensão oscilam, pode ocorrer escoamento localizados neste ponto. A deformação plástica localizada causa distorções e criam bandas de deslizamento devido as tensões de cisalhamento. Ao passo que os ciclos de tensões ocorrem, essas bandas de deslizamento se formam como trincas microscópicas. Para os materiais menos dúcteis, o desenvolvimento de trincas é observado com mais facilidade, sendo mais sensíveis a entalhe.

A propagação da trinca já nucleada, para Suresh (1998), evolui para alguns grãos o que costuma denominar-se estágio de iniciação, e a seguir, pode entrar em um estágio de propagação macroscópica. O crescimento da trinca se deve a tensão de tração e a trinca propaga-se ao longo dos planos normais aos de tensão máxima de tração. Os ciclos crescem a uma taxa de aproximadamente 10^{-7} até 10^{-4} mm de propagação de trinca, um número baixo, mas ao passo que os ciclos aumentam, tornam-se significativas.

A Figura 1 apresenta uma superfície de fratura à fadiga de um eixo submetido a carregamento de flexão. Segundo Suresh (1998) e Llano-Vizcaya et al. (2006) a região que aparenta estar polida em torno da trinca frequentemente exibe marcas semelhante deixadas pelas ondas do mar, e por isso são chamadas de marcas de praia. Essas marcas surgem devido aos ciclos de início e parada de crescimento da trinca.

4.2 CICLO DE CARREGAMENTO

O ciclo de carregamento esquemático para análise de fadiga é apresentado na Figura 2.

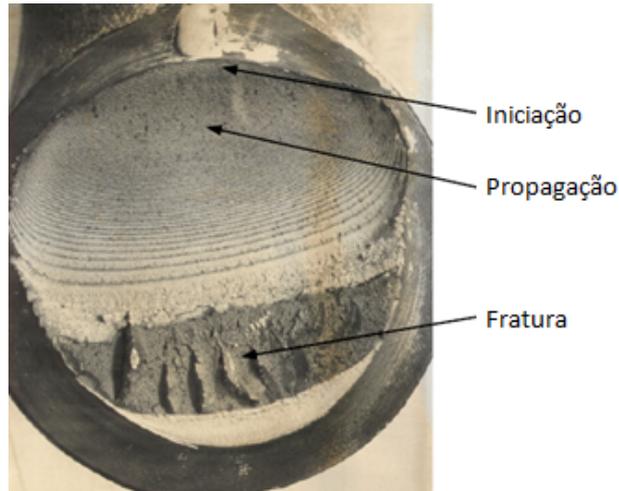
A variação da tensão, chamada “*range stress*” resulta da diferença entre o valor de máximo e mínimo. A metade da variação é chamada de tensão alternada ou amplitude de tensão

$$S_a = \frac{\Delta S}{2} = \frac{S_{max} - S_{min}}{2} \quad (1)$$

A média do ciclo é chamada de tensão média.

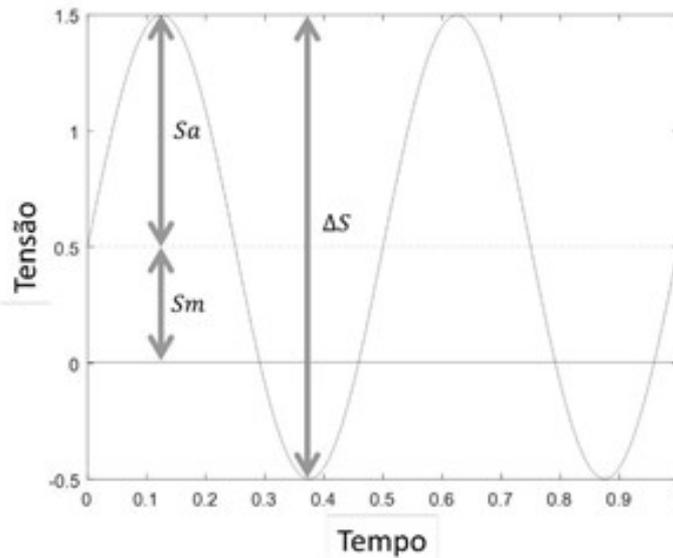
$$S_m = \frac{S_{max} + S_{min}}{2} \quad (2)$$

Figura 1 – Superfície de fratura à fadiga de um eixo submetido a carregamento de flexão



Fonte: Adaptado de [Draper \(2011\)](#)

Figura 2 – Ciclo de tensão e os parâmetros importantes à análise de fadiga



Fonte: [Filho \(2018\)](#)

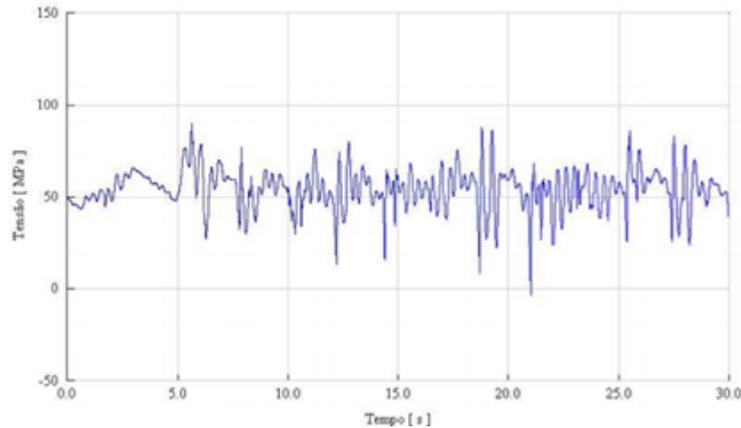
4.3 CONTAGEM DE CICLOS - RAINFLOW

Para ciclos de tensões constantes com ou sem uma carga média, a contagem de seus ciclos é simples. Entretanto, a contagem é complexa para ciclos com amplitude variável. A [Figura 3](#) mostra um histórico de tensão com amplitude variável.

O método de Rainflow é utilizado para a contagens de ciclos variáveis ([MATSUISHI; ENDO, 1968](#)). Este método foi desenvolvido baseado na analogia à chuva caindo sobre o telhado de um pagode (casa de orações de vários andares no oriente) e escorrendo para as bordas do telhado. A [Figura 4](#) ilustra as gotas caindo sobre o telhado.

Este método de contagem de ciclos usa três pontos consecutivos em uma história de carregamento para determinar se um ciclo foi ou não formado. A [Figura 5](#) mostra as regras que identificam os dois possíveis ciclos em uma história de tensão com amplitude variável. Os 3 pontos consecutivos de

Figura 3 – Gráfico de amplitude variável



Fonte: [Heringer \(2014\)](#)

tensão (S_1, S_2, S_3) definem duas variações consecutivas, a saber: $\Delta S_1 = S_1 - S_2$ e $\Delta S_2 = S_2 - S_3$. Se $\Delta S_1 \leq \Delta S_2$, um ciclo de carregamento extraído, variando de S_1 a S_2 . Caso contrário, nenhum ciclo é formado. Este método requer que a história de tensão seja rearranjada de modo a conter somente picos e vales, e inicia com o pico mais alto ou o vale mais profundo, aquele que for maior em valor absoluto. Então a regra de identificação de ciclos é aplicada para checar cada três pontos consecutivos. Os dois pontos formando um ciclo são descartados da história, e os pontos remanescentes são conectados entre si. O procedimento é repetido até que não reste nenhum evento de carregamento. [\(LEE et al., 2005\)](#)

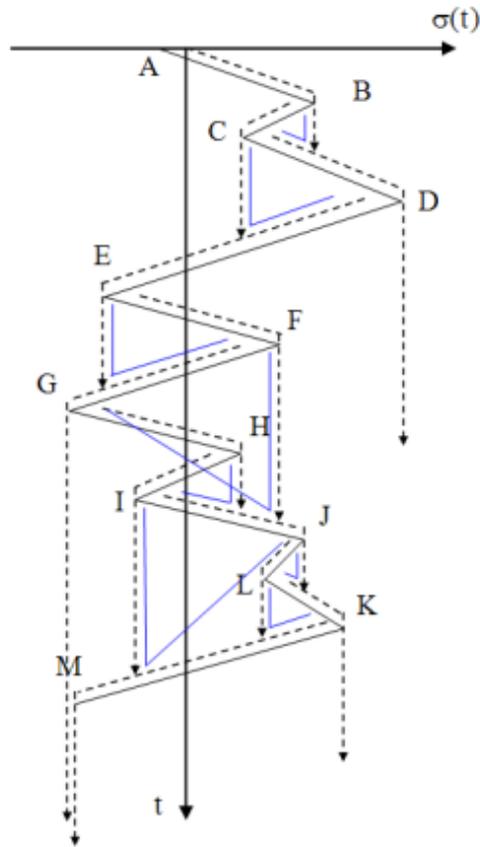
A melhor maneira de entender o funcionamento do método para [Lee et al. \(2005\)](#) é através de um exemplo prático. O objetivo é empregar o método “Rainflow” de 3 pontos para determinar o número de ciclos presentes na história de carregamento mostrada na [Figura 4](#).

Para [Lee et al. \(2005\)](#) inicialmente, a história de carregamento é rearranjada de modo que inicie com o máximo pico ou o vale mais profundo, qual deles seja maior. No carregamento apresentado o máximo pico tem intensidade 12, a qual é maior em magnitude absoluta que o máximo vale (igual a 10). Então, a parcela da história de carregamento que antecede o pico de 12 é retirada do início e superposta ao final do carregamento, como mostrado na [Figura 6](#). A nova história de carregamento inclui novamente o pico de 12 no final, fechando o maior “loop” e sendo assim conservativo. Após rearranjar a história de carregamento, inicia-se a extração dos ciclos, empregando-se segmentos de 3 pontos consecutivos, conforme descrito anteriormente na [Figura 4](#). Assim, o segmento inicial formado pelos pontos 12, -2 e 6 não gera um ciclo. O primeiro ciclo extraído será formado pelos pontos consecutivos -2, 6, -8. Neste caso, forma-se o ciclo de -2 a 6, conforme mostrado na [Figura 6](#). Este ciclo é extraído da história de carregamento, a qual é modificada ligando-se o ponto anterior a -2 (ou seja, o ponto 12) ao ponto posterior a 6 (ou seja, o ponto -10), conforme indicado pela linha tracejada, também na [Figura 6](#).

O mesmo processo é repetido até que todos os ciclos sejam identificados. Esta repetição é ilustrada na sequência de figuras iniciando com a [Figura 6](#) e continuando com as [Figura 7](#), [Figura 8](#), [Figura 9](#) e [Figura 10](#). Sempre que um ciclo é extraído, o ponto imediatamente anterior ao primeiro ponto retirado é conectado ao ponto imediatamente posterior ao segundo ponto retirado.

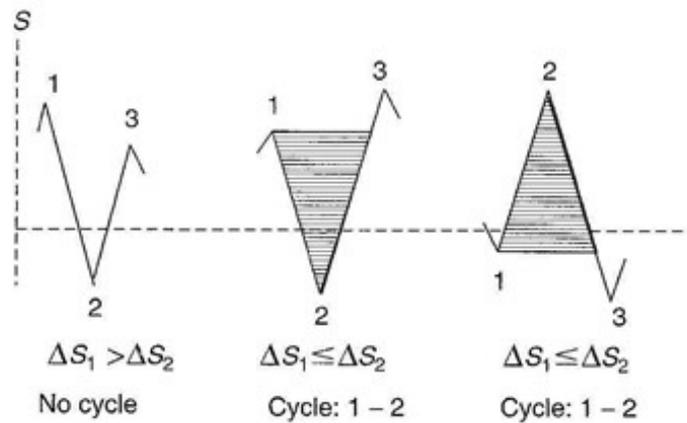
Os resultados da contagem de ciclos são mostrados na [Tabela 1](#). Esses resultados podem ser

Figura 4 – Contagem de ciclos pelo método Rainflow - analogia com as gotas de chuvas caindo sobre o telhado



Fonte Heringer, 2014

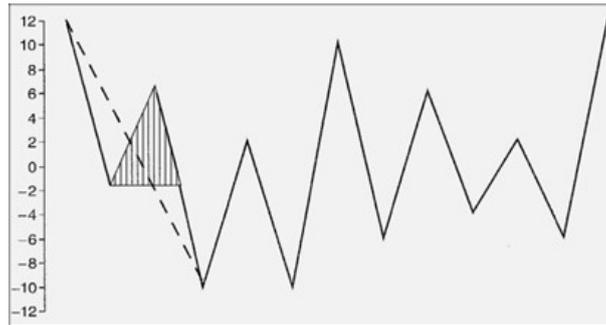
Figura 5 – Regras para obtenção dos ciclos



Fonte: Adaptado de [Lee et al. \(2005\)](#)

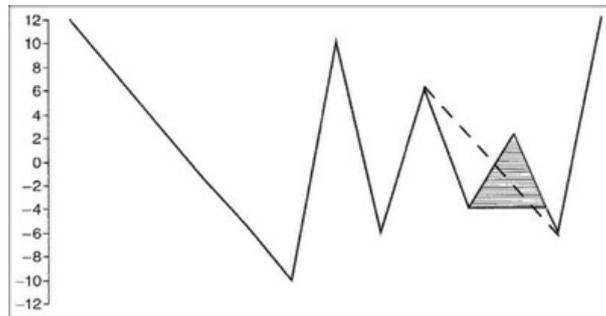
empregados para gerar histórias de carregamento em previsão de vida (cálculo de dano acumulado) empregando-se os modelos conhecidos, bem como na realização de ensaios de laboratório. ([LEE et al., 2005](#))

Figura 6 – Ciclo variando de -2 a 6



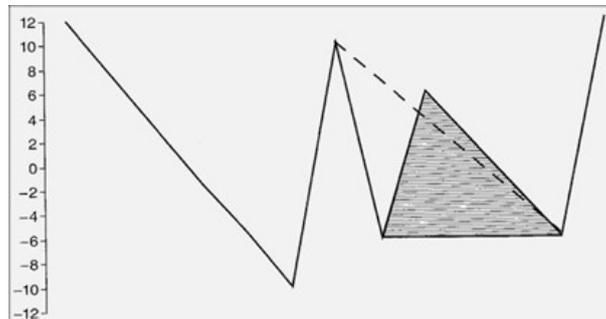
Fonte: [Lee et al. \(2005\)](#)

Figura 7 – Terceiro item extraído, variando de -4 a 2



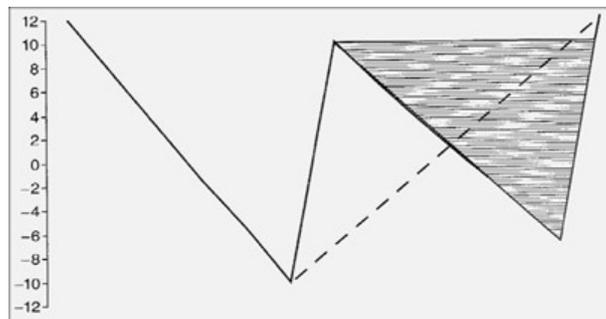
Fonte: [Lee et al. \(2005\)](#)

Figura 8 – Quarto ciclo extraído, variando de -6 a 6.



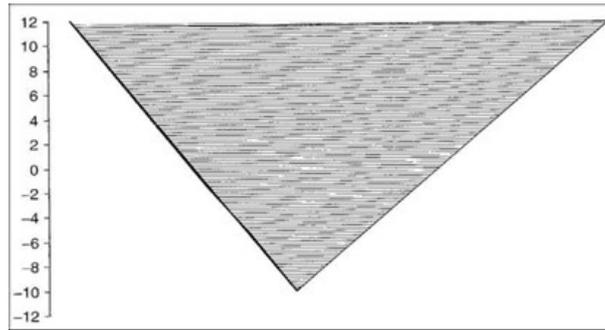
Fonte: [Lee et al. \(2005\)](#)

Figura 9 – Quinto ciclo extraído, variando de 10 a -6



Fonte: [Lee et al. \(2005\)](#)

Figura 10 – Sexto ciclo extraído, variando de 12 a -10.



Fonte: Lee et al. (2005)

Tabela 1 – Resultados da aplicação do método de contagem “Rainflow” dos 3 Pontos.

Nu. de Ciclos	S1	S2	Faixa	
1	-2	6	8	2
1	-10	2	12	-4
1	-4	2	6	-1
1	-6	6	12	0
1	10	-6	16	2
1	12	-10	22	1

Fonte: Lee et al. (2005)

4.4 CURVA S-N

Em um teste de fadiga é observado um número de ciclos para ocorrência da fratura do corpo de prova para diferentes níveis de tensão. A relação entre o nível de tensão, alternada ou range, e o número de ciclos para ocorrência da falha é apresentada em um gráfico conforme esquematizado na [Figura 11](#), também chamado de curva S-N. As curvas S-N são obtidas em condições controladas e são padronizados pela norma *ASTM E466-82: Conducting Constant Amplitude Axial Fatigue tests Metallic Materials*.

Os eixos do gráfico são a tensão de amplitude σ_a , que também é chamado de S_a , e o número de ciclos até a falha por fadiga do material N_f . Para tais testes, é considerado $\sigma_m = 0$.

A estatística dos dados de fadiga aplicado nas curvas S-N apresentam um resultado de confiabilidade de 50% afirma [Lee et al. \(2005\)](#).

As curvas S-N podem ser divididas em três regiões em um gráfico log-log, classificadas como: fadiga de baixo ciclo, fadiga de alto ciclo, e limite de fadiga, como apresentado na [Figura 11](#).

A curva S-N é representada pela [Equação 3](#), também chamada de equação de Basquin.

$$S_a = \sigma'_f (2N_f)^b \quad (3)$$

A [Equação 3](#) também pode ser apresentada como:

$$S_a = A(N_f)^B \quad (4)$$

ou

$$N_f = \left(\frac{S_a}{A} \right)^{\frac{1}{B}} \quad (5)$$

Em que:

$$A = 2\sigma_f'; B = b \quad (6)$$

Onde σ_f e b' são propriedades intrínsecas ao material.

O inverso da inclinação da curva, denominado fator de inclinação, é designado por k e expresso pela [Equação 7](#).

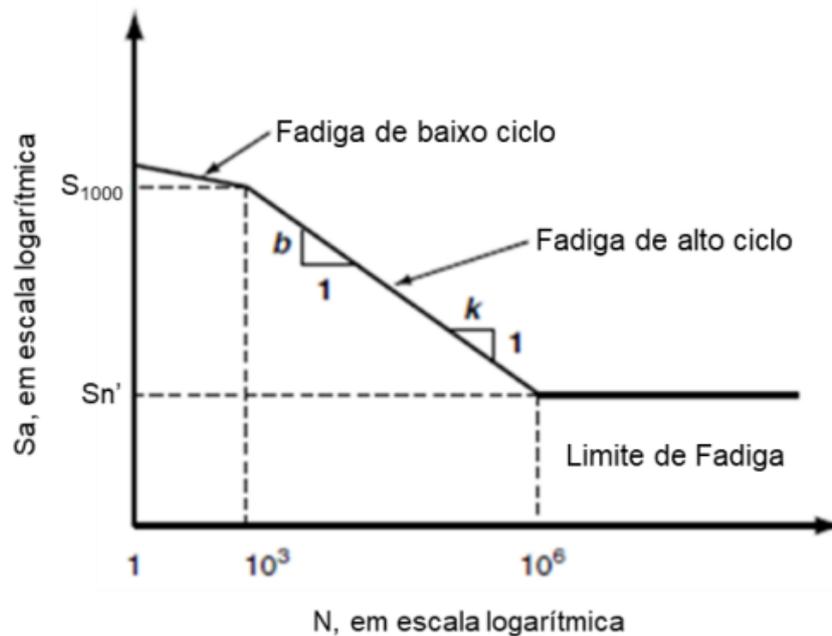
$$k = -\frac{1}{b} \quad (7)$$

4.4.1 Estimativa da Curva S-N

Para os aços, considera-se que os valores de tensão S_a que representam a resistência à fadiga em, 10^3 e 10^6 ciclos definem uma curva S-N. Esses valores serão designados, respectivamente, por S_{1000} , e S_{be} . Neste último, o índice “be” refere-se à flexão (bending).

A [Figura 11](#) ilustra a Curva de Fadiga para o aço:

Figura 11 – Curva esquemática de fadiga para aço



Fonte: Adaptado de [Lee et al. \(2005\)](#)

Muitos anos de experiência acumulada permitiram a proposição de relações empíricas para relacionar a resistência à fadiga com o limite de resistência à tração do material, S_u . Essas relações não têm fundamentação científica, mas constituem ferramentas simples e úteis ao engenheiro, que possibilitam estimar a vida em fadiga de componentes na região de alto ciclo. Para o aço, pode-se estimar a curva S-N na região de alto ciclo por meio das estimativas da resistência à fadiga correspondentes

às vidas de 10^3 e 10^6 ciclos. Além disso, se o componente ou condição de carregamento em questão for diferente das condições padronizadas do ensaio S-N, é necessário aplicar fatores de correção (ou fatores de modificação), relacionados ao tipo de carregamento C_L , tamanho da peça C_D , acabamento da superfície C_S , existindo também um fator relacionado ao nível de confiabilidade C_R . Neste trabalho serão utilizados os fatores de acabamento superficial e confiabilidade. A metodologia proposta para estimar a curva S-N baseia-se no conhecimento da resistência à tração do material. Caso não seja possível realizar ensaios de tração para determinar S_u , está também poderá ser estimada, com base em medidas de dureza, por exemplo. O primeiro ponto a ser estimado é a resistência à fadiga em 10^3 ciclos, ou seja, o valor de S_{1000} . Empiricamente, este valor fica em 90% de S_u para flexão e 75% de S_u , se o carregamento for axial. Para carregamentos em torção, o valor de S_{1000} é estimado como 90% da resistência ao cisalhamento do material (obtida num ensaio de torção). Esta última depende do material e pode ser aproximada como 80%, 70% ou 130% da resistência à tração para aços, metais não ferrosos e ferro fundido, respectivamente. As estimativas para S_{1000} são sumarizadas na Tabela [Tabela 2](#). No entanto, devido à dispersão estatística do comportamento em fadiga, o valor estimado de S_{1000} para a curva básica deve ser modificado para levar em conta o nível de confiabilidade desejado. É claro que, sem dispor dos resultados de ensaios de fadiga, não é possível realizar uma análise estatística rigorosa. No entanto, fatores de correção para diferentes níveis de confiabilidade podem ser aplicados para modificar o valor de S_{1000} e S_e , esses fatores de correção sugeridos são apresentados na [Tabela 3](#). É importante salientar que os mesmos fatores de correção para o nível de confiabilidade aplicam-se também às estimativas do limite de fadiga em 10^6 ciclos. [Lee et al. \(2005\)](#)

Tabela 2 – Estimativa para S_{1000}

Tipos de Materiais	Tipo de carregamento	S_{1000}
Alumínio	Curvatura	$0.9 \times S_u$
Alumínio	Axial	$0.75 \times S_u$
Aço	Torsão	$0.9 \times S_{ur} = 0,72 \times S_u$
Não ferrosos	Torsão	$0.9 \times S_{ur} = 0,63 \times S_u$
Ferro Fundido	Torsão	$0.9 \times S_{ur} = 0,17 \times S_u$

Fonte: [Lee et al. \(2005\)](#)

A [Tabela 3](#) mostra os Fatores de confiabilidade:

Tabela 3 – Fatores de confiabilidade C_r .

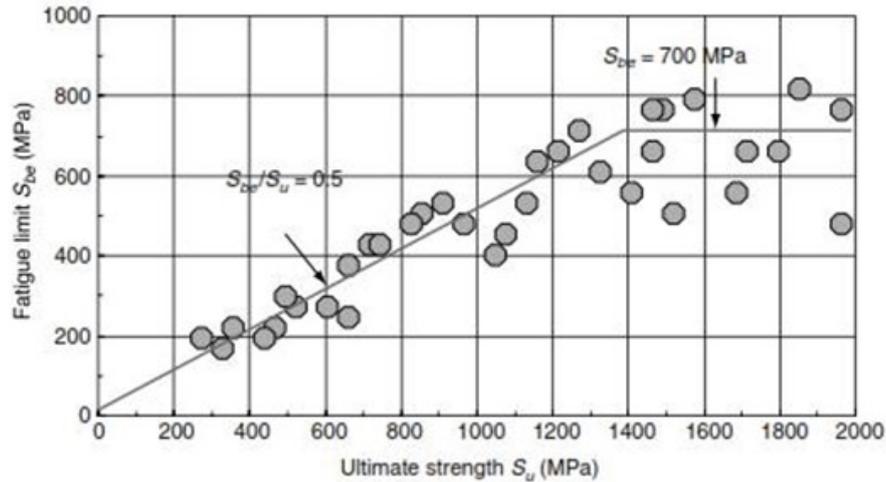
Confiabilidade	C_r
0.50	1.000
0.90	0.897
0.95	0.868
0.99	0.814
0.999	0.753
0.9999	0.702
0.99999	0.659
0.99999	0.620

Fonte: [Lee et al. \(2005\)](#)

O segundo ponto a ser estimado é o limite de fadiga a 10^6 ciclos. A [Figura Figura 12](#) mostra

a relação entre o limite de fadiga em flexão rotativa S_{be} e o limite de resistência à tração para aços, indicando um valor de aproximadamente 0,5 se o aço tem resistência à tração menor que 1.400 MPa. Para aços com resistência à tração acima de 1.400 MPa, o limite de fadiga pode ser estimado como 700 MPa. A condição microestrutural do material também afeta a relação entre o limite de fadiga e a resistência à tração.

Figura 12 – Curva esquemática de fadiga para aço



Fonte: Adaptado de Lee et al. (2005)

O fator de acabamento superficial pode ser determinado em função do processo de fabricação e da resistência a tração do material, conforme apresentado na Equação 8 para valores de resistência à tração em MPa. Os coeficientes da Equação 8 são apresentados na Tabela 4.

$$C_s = A(S_u)^B \quad (8)$$

Tabela 4 – Coeficientes para determinar o fator acabamento superficial

Acabamento superficial	A	B
Retificado	1.58	-0.085
Usinado ou estirado a frio	4.51	-0.265
Laminado a quente	57.7	-0.718
Forjado	272	-0.995

Fonte: Budynas, Nisbett et al. (2011)

O limite de fadiga S_e pode então ser estimado modificando a estimativa do limite de fadiga em flexão rotativa com os fatores de correção já citados, conforme mostrado na Equação 9. Lembre-se que esses fatores são valores empíricos, que usualmente variam entre 0 e 1.

$$S_e = S_{be} \cdot C_L \cdot C_S \cdot C_D \cdot C_R \quad (9)$$

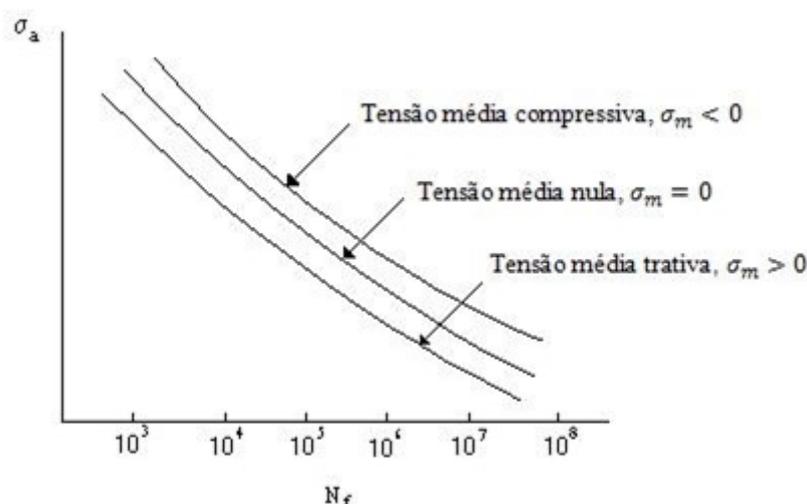
Uma interpretação do limite de fadiga, considerando o dano em fadiga para carregamentos de amplitude constante, pode ser dada da seguinte forma: Após nuclear devido ao carregamento cíclico, uma micro trinca cresce até o tamanho da ordem de um grão, quando então um contorno de grão irá impedir o

crescimento subsequente. Se o contorno de grão não constitui uma barreira suficientemente forte, a micro trinca eventualmente irá propagar e se tornar uma macro trinca, podendo levar à falha. Se o contorno de grão se constitui numa barreira forte o suficiente, a micro trinca não cresce. A amplitude mínima da tensão necessária para que a trinca supere esta barreira e continue a crescer é o limite de fadiga do material. A relação entre o limite de fadiga e o limite de resistência à tração pode ser examinada de uma perspectiva microscópica. Para aços de média e alta resistência nos quais os defeitos (ou seja, inclusões, carbeto, nódulos de grafite, porosidade) são menores que o tamanho de grão, as trincas nucleiam e são barradas pelos contornos de grão. Neste caso, o limite de fadiga cresce de forma aproximadamente linear com o limite de resistência à tração. Quando um valor crítico da resistência à tração é atingido, o limite de fadiga ou permanece constante ou diminui com o aumento da resistência à tração. Este fenômeno é atribuído aos defeitos do material. Por exemplo, a têmpera de um aço de alta resistência para produzir um alto desempenho com relação ao desgaste pode introduzir micro trincas e promover o trincamento intergranular, que são detrimetos para o limite de fadiga. Lee et al. (2005)

4.4.2 Influência da Tensão Média

A alteração a resistência a fadiga de um material ocorre pela presença de uma tensão média. Se uma tensão média não nula e positiva age sobre um componente mecânico, e esta é sobreposta a uma componente de tensão alternada, a resistência à fadiga do material é reduzida de forma significativa, pois a tensão média atuará abrindo trincas presentes. Caso contrário, com uma tensão média não nula e negativa agindo sobre um componente mecânico, a resistência à fadiga do material é aumentada, pois a tensão média atuará fechando trincas presentes, diz Dowling (2013). O efeito da tensão média é apresentado de forma ilustrativa na Figura 13.

Figura 13 – Efeito da tensão média na vida em fadiga



Fonte: Araujo, 2020

Modelos empíricos foram propostos por Goodman e Gerber mostrado nas Equação 10 e Equação 11 para se correlacionar a amplitude completamente reversível de um ensaio de fadiga com o caso em que exista uma tensão alternada combinada com uma tensão média diferente de zero. Assim, pode-se obter uma tensão alternada corrigida S'_a , equivalente à tensão completamente reversível.

A [Equação 10](#) apresenta o modelo de Goodman modificado.

$$S'_a = \frac{S_a}{1 - \frac{S_m}{\sigma_u}} \quad (10)$$

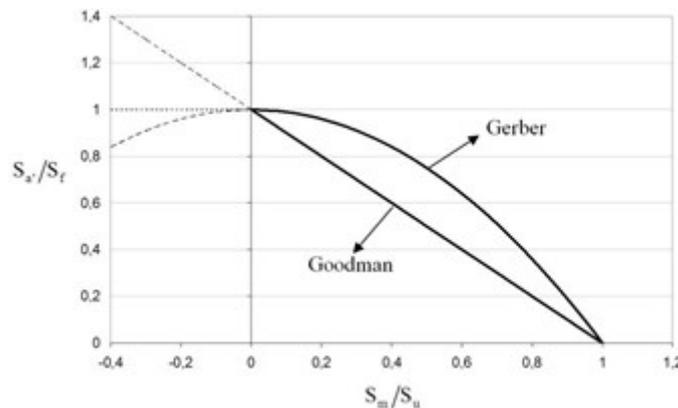
A proposta de Gerber é apresentado na [Equação 11](#).

$$S'_a = \frac{S_a}{1 - \left(\frac{S_m}{\sigma_u}\right)^2} \quad (11)$$

Onde S_m é tensão média do ciclo de carregamento e S_u é o limite de resistência a tração do material.

A [Figura 14](#) ilustra o diagrama de Haigh para as equações de Goodman e Gerber.

Figura 14 – Diagrama de Haigh para as equações de Goodman e Gerber



Fonte: Souza, 2011

4.5 ACUMULO DE DANO LINEAR

A regra de acúmulo de dano linear de Palmgreen–Miner propõe que a falha por fadiga ocorrerá quando o somatório do dano gerado por cada carregamento atingir um valor de dano crítico (D_{PM}) conforme na [Figura 15](#).

O dano por fadiga D apresentado na [Equação 12](#) é a relação entre o número de repetições de uma tensão alternada constante n e o número necessário para ocorrência da falha N_f observado na curva $S - N$. ([LEE et al., 2005](#))

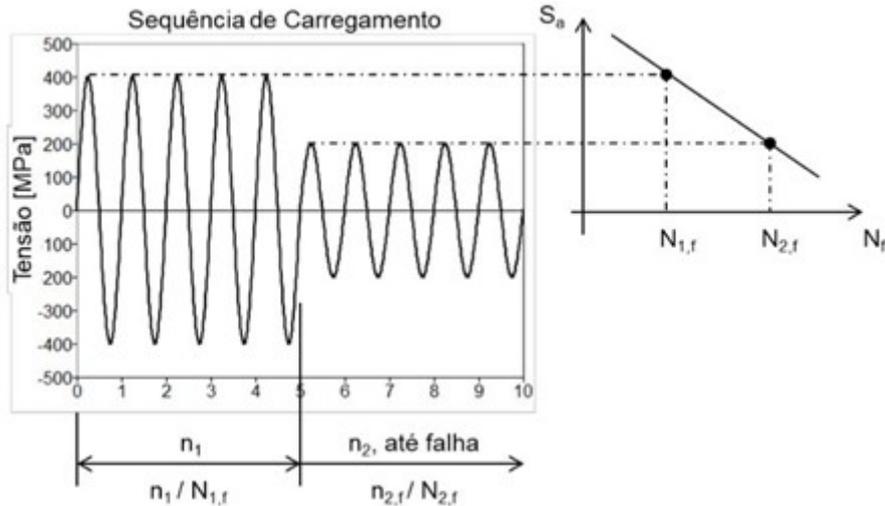
$$D = \frac{n}{N_f} \quad (12)$$

Para uma sequência de carregamentos, o dano gerado para cada carregamento é irreversível e acumulativo.

A regra de Miner afirma que a somatória dos danos é expressa segundo a equação:

$$D = \sum \frac{n}{N_f} \quad (13)$$

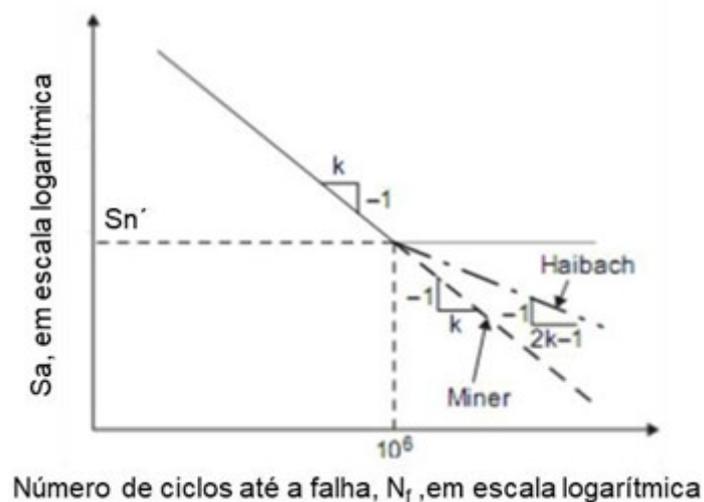
Figura 15 – Carregamento de dano Linear



Fonte: Adaptado de [Lee et al. \(2005\)](#)

Caso o dano acumulado exceda o valor de dano crítico D_{PM} , a falha é caracterizada. Para contabilizar a influência negativa das sobrecargas periódicas, os modelos de Miner e Miner-Haibach propõem uma extensão da curva S-N, conforme a [Figura 16](#). Desta forma todas as amplitudes de tensão acumulam dano. ([LEE et al., 2005](#))

Figura 16 – Curva S-N esquemática com amplitude constante para aço e sujeita a carregamento com amplitude variável.



Fonte: Adaptado de [Lee et al. \(2005\)](#)

O valor limite da resistência à fadiga se dá pela curva S-N, assim ciclos com tensões alternadas inferiores ao limite de fadiga podem tornar-se prejudiciais, caso algumas das amplitudes de tensões subsequentes excedam o limite de fadiga original. A partir deste conceito de falha, Miner estabeleceu limitações e suposições para execução dos testes. Com relação à quantificação do dano, a suposição estabelecida é que o começo de uma trinca, quando observado, é considerado uma falha.

Esta regra linear, de extrema simplicidade, pode ser verificada em grande parte dos casos. Entretanto, não pode ser generalizada, pois a hipótese de acúmulo linear de dano não é verdadeira para

alguns casos. Resultados experimentais mostram que a ordem de aplicação dos blocos de carregamento afeta o somatório das frações de vida em fadiga.

A estimativa de vida à vida é representada pela [Equação 14](#). A vida é interpretada como o número de repetições do histórico de tensão, ou evento, para ocorrência da falha. A vida pode ser facilmente convertida em tempo, ou distancia, em função das características do evento.

$$L = \frac{1}{D} \quad (14)$$

4.6 PISTA DE DURABILIDADE

([DAKIN et al., 2001](#)) define que durabilidade é a capacidade de um produto, sob condições operacionais, realizar sua função sem degradação. Define ainda que confiabilidade é a probabilidade de que um produto desempenhe sua função atendendo ou excedendo a expectativa do cliente, e completa com o conceito de qualidade, que é o atendimento às necessidades do cliente sob um custo que é considerado seu valor.

As práticas atuais das fabricantes de veículos envolvem simulações, testes e construção de protótipos para simular condições severas e adversas e verificar sua capacidade de suportar as forças aplicadas pelos diferentes obstáculos e terrenos pelos quais ele deve transitar durante sua vida útil. Nesse tipo de teste, observa-se com mais atenção especialmente componentes de motores, suspensão e chassis.

Pistas de testes ou também chamadas de campos de prova, criam as situações extremas de carga em que o veículo vai ser submetido em aplicação, como por exemplo, estradas públicas e estradas não pavimentadas. O veículo deve percorrer determinadas distâncias em pistas feitas com obstáculos e pavimentos padronizados de forma a levá-lo à falha por fadiga em um percurso muito inferior aquele necessário para levá-lo à falha em condições normais, constituindo um caso de fadiga acelerada.

Por não haver um padrão para esses testes realizados internamente por cada fabricante, é normal que cada marca tenha um padrão de pista de testes projetada para o tipo específico de cliente que cada marca busca atender. Também é normal na fase de testes que marcas avaliem o comportamento de concorrentes, o que torna possível que veículos de outras marcas possam não suportar as condições impostas em pistas de teste de uma concorrente.

O Brasil é um país com diversos tipos de pistas e relevos onde encontramos asfalto de boa e de péssima qualidade, estradas pavimentadas e não pavimentadas (lama e todo tipo de buracos, costelas, lombadas e etc). A interação do veículo com tais tipos de terreno leva a solicitações de natureza estocástica com altos picos de solicitação e impõe um risco de falha prematura por sobrecarga. Os métodos estatísticos para calcular a probabilidade de interferência entre a solicitação e a resistência do veículo, e tais métodos podem ser empregados neste caso para garantir que a confiabilidade quanto à falha por sobrecarga mantenha-se dentro de um nível aceitável durante o processo de fadiga acelerada.

5 MATERIAIS E MÉTODOS

5.1 DEFINIÇÃO DO MATERIAL

O material escolhido para a simulação foi o LNE380 conforme norma ABNT NBR6656. A norma ABNT NBR6656 estabelece os requisitos para encomenda, fabricação e fornecimento de bobinas e chapas de aço laminadas a quente, de aço-carbono e aço de baixa liga, para aplicações em peças de conformabilidade crítica, nas quais requisitos especiais de propriedades mecânicas e de soldabilidade são fundamentais, como longarinas, travessas e suportes. NBR6656 (2016) As propriedades mecânicas do aço LNE380 são apresentadas na Tabela 5.

Tabela 5 – Propriedades Mecânicas

Grau	Lim. de escoamento [MPa]	Lim. de resistência [MPa]	Alongamento mín. [%]
LNE380	380 a 530	460 a 600	23

Fonte: NBR6656 (2016)

A curva S-N foi estimada em função do limite mínimo de resistência do material e dos fatores modificadores de confiabilidade e acabamento superficial. Foi utilizado um *script* em C++ para definir a curva S-N do material e as constante do material.

O fator de confiabilidade foi obtido para uma confiabilidade de 95% conforme Tabela 3.

$$C_r = 0.868 \quad (1)$$

O fator de acabamento superficial foi definido conforme Equação 8 em função do limite mínimo de resistência do material.

$$C_r = 0.707 \quad (2)$$

A amplitude de tensão em MPa para 10^6 ciclos foi estimada conforme Equação 9.

$$S_e = 141.1 \quad (3)$$

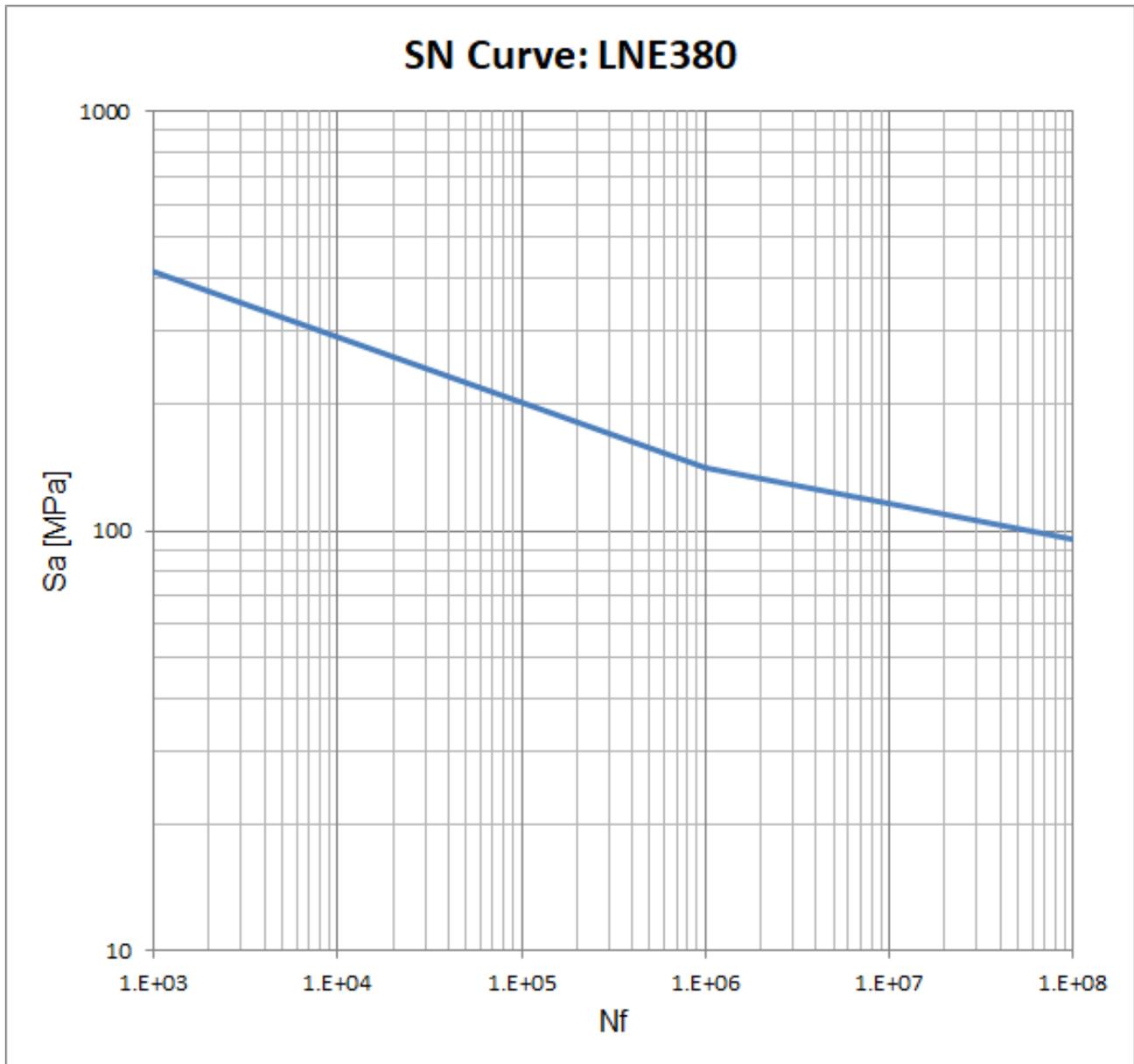
A amplitude de tensão em MPa para 10^3 ciclos foi estimada em 90% do valor mínimo de resistência a tração multiplicado pelo fator de confiabilidade, como indicado Tabela 2.

$$S_{1000} = 359.3 \quad (4)$$

As constantes de b, k e A para o primeiro trecho da curva são:

$$b_1 = -\frac{1}{3} \cdot \log \left(\frac{S_{1000}}{S_{10^6}} \right) = -0.135; \quad k_1 = 7.4 \quad (5)$$

$$A_1 = \frac{(S_{1000})^2}{S_{10^6}} = 915.1 MPa \quad (6)$$



Fonte: Próprio autor

O modelo de Miner-Haibach foi considerado para estimar a curva após o limite de resistência a fadiga para carregamento com amplitude constante. As constantes de b , k e A para o segundo trecho da curva são:

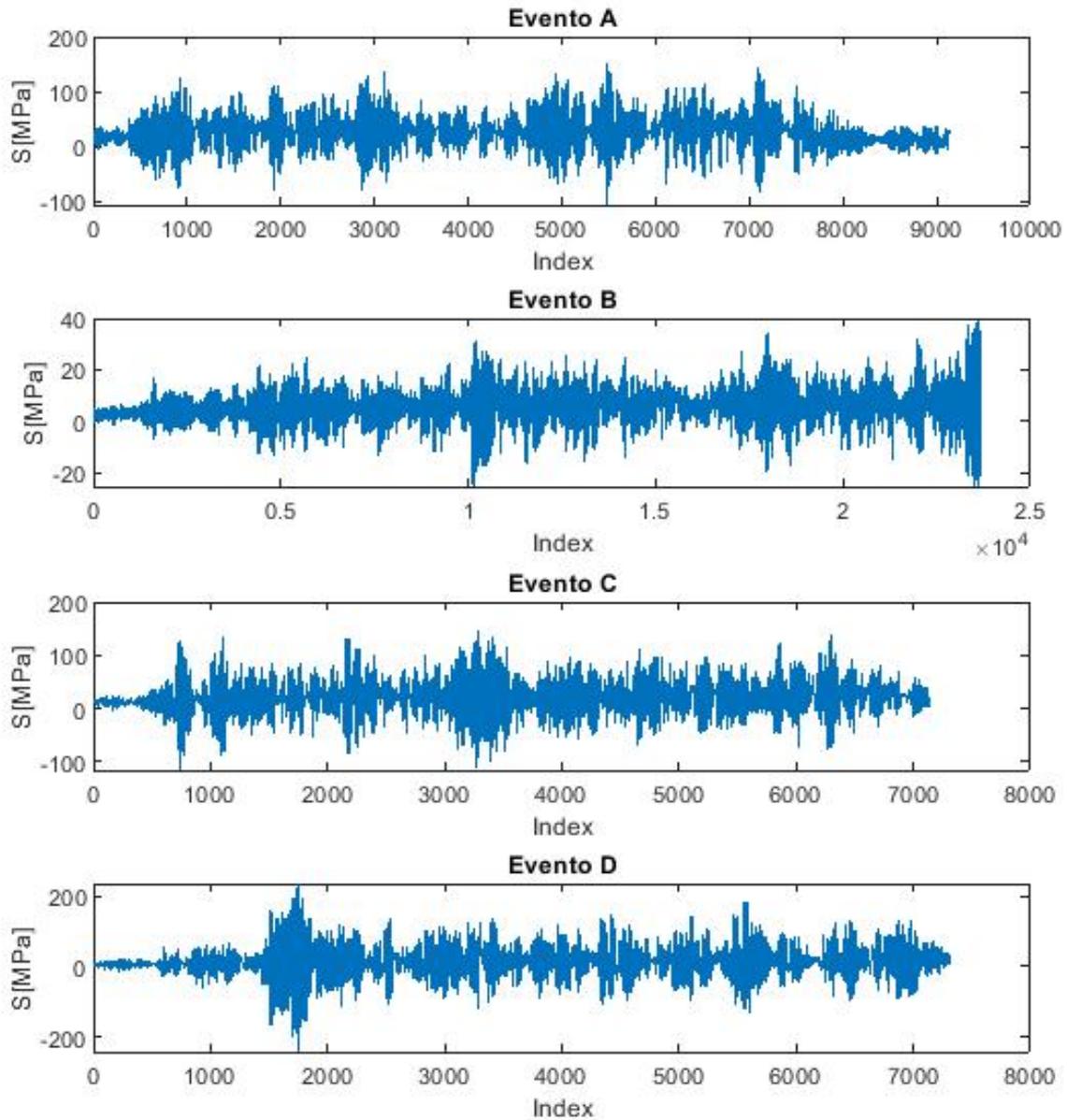
$$b_2 = -0.0725; k_2 = 13.8 \quad (7)$$

$$A_2 = \frac{S_e}{(10^6)^{b_2}} = 384.6 \text{ MPa} \quad (8)$$

5.2 HISTÓRICO DE TENSÃO

Para o desenvolvimento das análises de fadiga foi realizada uma aquisição de dados de deformação, através de extensômetros, em um suporte agregado ao chassi de um veículo pesado. A aquisição de

Figura 17 – Históricos de tensão obtidos na pista de durabilidade



Fonte: Próprio autor.

dados foi realizada durante a passagem do veículo em 4 eventos do campo de provas da Volkswagen Caminhões e Ônibus. Após o teste, o histórico de deformação observado no extensômetro foi convertido em histórico de tensão através da multiplicação do sinal de deformação pelo módulo de elasticidade do aço (210GPa).

Os eventos foram nomeados como evento A, B, C e D, e o histórico de tensão observado em cada evento é apresentado na [Figura 17](#).

5.3 CONTAGEM DE CICLOS

A contagem de ciclos foi realizada através do método de *Rainflow* simplificado. Foi utilizado um *script* em C++ (FILHO, 2018). C++ é uma linguagem de programação compilada multi-paradigma e de uso geral, sendo bastante usada na academia por seu grande desempenho e base de utilizadores.

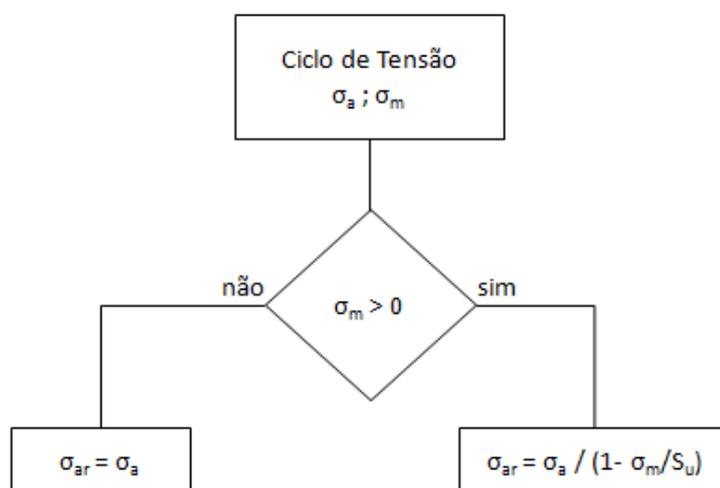
O código utilizado extrai os picos e vales do sinal, classifica o sinal conforme um número determinado de classes e aplica o método de *Rainflow* simplificado para contar os ciclos de tensão, indicando para cada ciclo que compõe o histórico, os valores de amplitude de tensão, tensão média e número de repetição. Para simplificar análise dos ciclos, o resultado da contagem foi apresentada em um gráfico 2D conhecido *Range Pair*, esse gráfico apresenta o range de cada ciclo de tensão contido no histórico e o número de repetições de forma acumulativa.

5.4 EFEITO DA TENSÃO MÉDIA

Para ciclos com tensão média diferente de zero é necessário determinar um ciclo de tensão equivalente com tensão média igual a zero, de forma viabilizar a comparação com a curva S-N.

Foi considerado o modelo de Goodman modificado para obtenção da amplitude de tensão equivalente para um ciclo com tensão média maior que zero. Para ciclos com tensão média compressiva essa correção não foi aplicada, dessa forma, foi considerado uma variação mais conservadora do método de Goodman modificado, a qual não considera o benefício de uma tensão média compressiva sobre a vida, neste caso, a tensão alternada equivalente é considerada igual a tensão alterna para o ciclo com tensão média compressiva. O critério para correção do efeito da tensão média é apresenta na [Figura 18](#).

Figura 18 – Critério para correção do ciclo de tensão com tensão média diferente de zero.



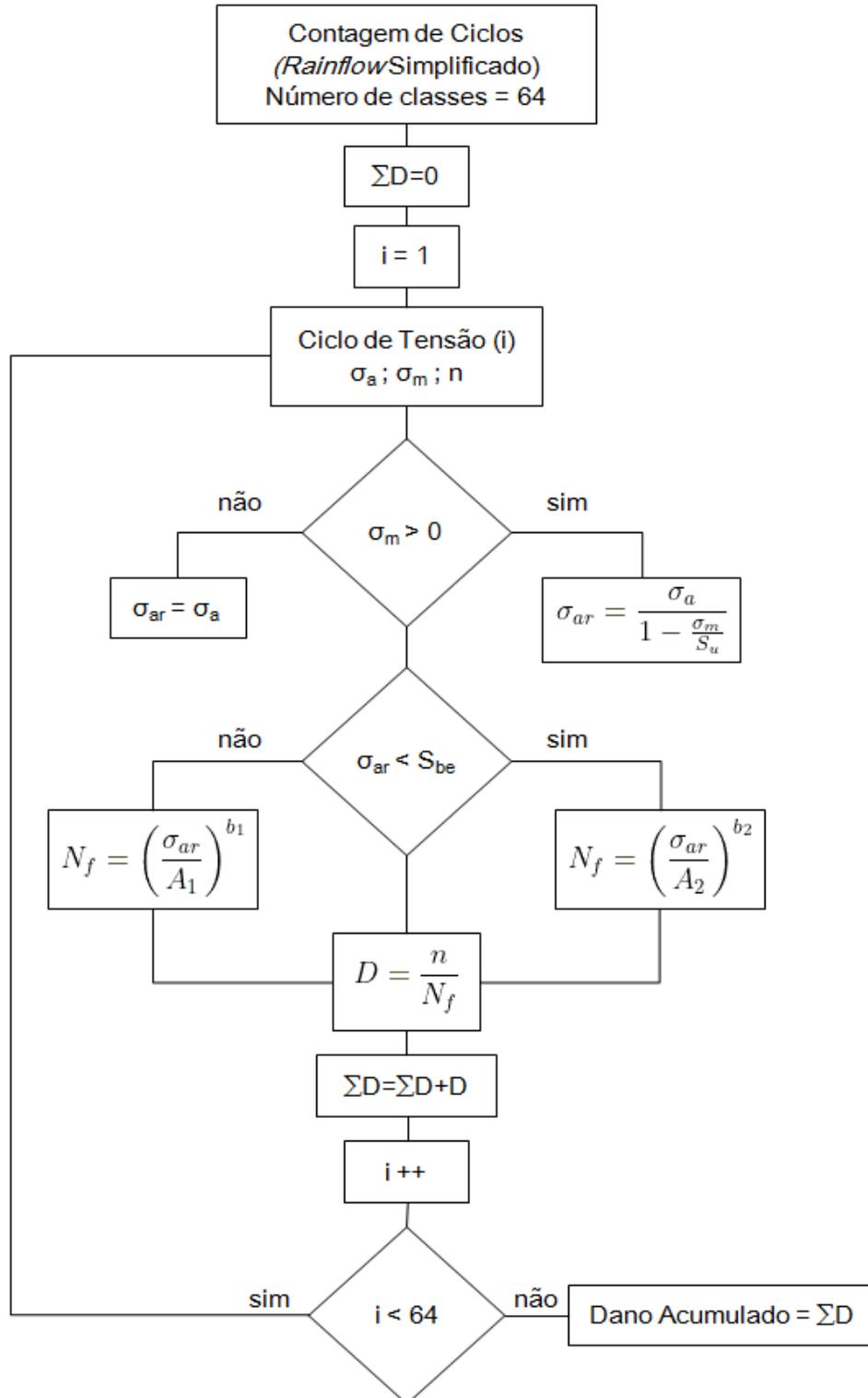
Fonte: Próprio autor

5.5 ACÚMULO DE DANO

Foi utilizado um *Script* em C++ para aplicação do modelo linear de acúmulo de dano de Palmgreen-Miner. O número de repetições necessárias para falha foi determinado para cada ciclo de tensão

formado durante a contagem de ciclos. Em seguida, foi contabilizado o dano de cada ciclo utilizando a [Equação 12](#). Foi considerado um dano crítico de 1 para caracterizar a falha do material. O fluxograma para contabilização do dano é apresentado na [Figura 19](#).

Figura 19 – Fluxograma para contabilização do dano.



Fonte: Próprio autor

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1 CONTAGEM DE CICLOS

A [Tabela 6](#) apresenta os valores de máximo e mínimo de tensão para os eventos A, B, C e D.

Tabela 6 – Valores de máximo e mínimo de tensão para os eventos A, B, C e D

Evento	Tensão Máxima [MPa]	Tensão Mínima [MPa]
A	149.3	-111.1
B	24.4	-13.9
C	143.6	-119.9
D	235.3	-274.9

Fonte: Próprio autor.

As tensões máximas e mínimas para todos os eventos considerados estão abaixo do limite de escoamento do material, e portanto estão contidas no regime elástico, essa condição é necessária para aplicação da abordagem S-N.

O *Range Pair* para os eventos A, B, C e D são apresentadas na [Figura 20](#). A análise da [Figura 20](#) indica que o evento D apresenta o maior range de tensão e praticamente envelope os demais eventos, exceção feita para os ciclos de baixa amplitude, ou range. Assim, é dito que o evento D é mais severo que os demais eventos. O evento A apresenta o maior número de ciclos acumulado, no entanto, o incremento de ciclos é observado para ciclos de baixa amplitude e que não contribuem para acúmulo de dano. A comparação entre os eventos pode ser melhor estabelecida através do cálculo da vida, ou número de repetições necessárias para a falha do material em cada evento.

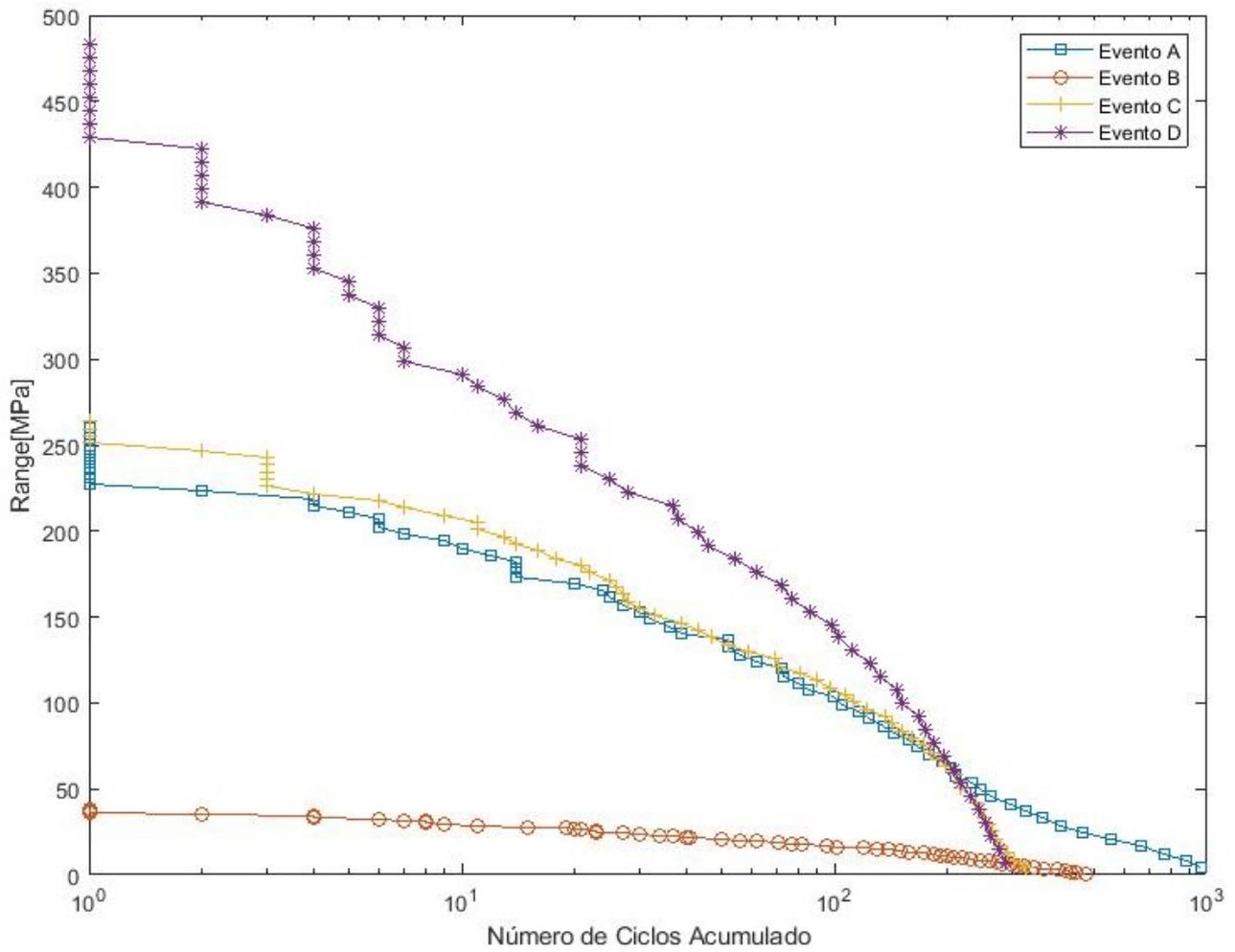
6.2 ESTIMATIVA DA VIDA

Os resultados de dano acumulado em uma passagem e o número de repetições para a ocorrência da falha em cada evento são apresentados na [Tabela 7](#). O evento D é o mais severo e representa uma vida de 457 repetições, ou seja, são necessárias 457 repetições do evento D para ocorrência da falha. Os eventos A, B e C geram pouco dano e portanto apresentam maior vida.

Tabela 7 – Dano acumulado para os eventos da pista de durabilidade.

Evento	Dano Acumulado	L
A	3.24E-06	3.09E5
B	2.37E-12	-
C	4.26E-06	2.35E5
D	2.19E-03	4.57E2

Fonte: Próprio autor.

Figura 20 – Contagem *Range Pair*

Fonte: Próprio autor.

7 CONCLUSÃO

Através da análise experimental de tensões e da curva S-N estimada para o material foi possível prever a vida do componente para cada evento da pista de durabilidade. As previsões de vida são importantes para tomada de decisão em relação a modificação do projeto ou sequência do teste de durabilidade. O dano acumulado pelo componente é extremamente sensível a curva do material, neste trabalho a curva foi estimada conforme referência bibliográfica e na opinião dos autores é uma curva conservadora e pode ser utilizada no sentido da segurança. Entretanto é recomendado levantar experimentalmente as curvas S-N para um dimensionamento mais adequado e otimizado dos componentes. É importante ressaltar que o teste de durabilidade é uma composição de eventos, assim, o dano acumulado no teste é obtido pela soma dos valores de dano acumulado em cada evento. Para futuros trabalhos, a análise do dano acumulado para uma aplicação específica do veículo pode ser realizada, bem como o dimensionamento do teste de durabilidade considerando os eventos disponíveis no campo de provas.

REFERÊNCIAS

- BUDYNAS, R. G.; NISBETT, J. K. et al. **Shigley's mechanical engineering design**. [S.l.]: McGraw-Hill New York, 2011. v. 9.
- DAKIN, J. et al. **Analytical Methods for Durability in the Automotive Industry-The Engineering Process, Past, Present and Future**. [S.l.], 2001.
- DOWLING, N. E. **Mechanical Behavior of Materials eBook: International Edition**. [S.l.]: Pearson Higher Ed, 2013.
- DRAPER, J. **Modern Metal Fatigue Analysis**. [S.l.: s.n.], 2011.
- FILHO, J. C. da S. **Avaliação Numérica de Componentes Sujeitos à Fadiga por Solicitações Aleatórias: Uma Abordagem Nos Domínios do Tempo e da Frequência**. Volta Redonda, Rio de Janeiro - Brasil: [s.n.], 2018.
- HERINGER, A. M. Aplicação da teoria de fadiga para a previsão de vida de componentes estruturais veiculares. SAE International, 2014.
- LEE, Y.-L. et al. **Fatigue testing and analysis: theory and practice**. [S.l.]: Butterworth-Heinemann, 2005. v. 13.
- LLANO-VIZCAYA, L. D. et al. Multiaxial fatigue and failure analysis of helical compression springs. **Engineering failure analysis**, Elsevier, v. 13, n. 8, p. 1303–1313, 2006.
- MATSUISHI, M.; ENDO, T. Fatigue of metals subject to varying stress, paper presented to japan soc. **Mech. Engrs, Jukvoka, Japan**, 1968.
- NBR6656, A. B. N. T. Bobinas e chapas laminadas a quente de aço acalmado com características especiais de propriedades mecânicas, conformabilidade e soldabilidade. Rio de Janeiro, Brasil, 2016.
- SURESH, S. **Fatigue of materials**. [S.l.]: Cambridge university press, 1998.