

AVALIAÇÃO À FADIGA BASEADA EM VÁRIOS MÉTODOS DE DANO E CURVAS DE PROJETO DE UMA PONTE FERROVIÁRIA

JOÃO NUNO SILVA

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de
MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS

Orientador: Professor Doutor Rui Artur Bártolo Calçada

Coorientadores: Doutor José António Fonseca de Oliveira Correia
Mestre António Manuel de Barros Figueiredo da Silva Mourão

SETEMBRO DE 2022

MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2021/2022

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

✉ m.ec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

✉ feup@fe.up.pt

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado em Engenharia Civil - 2021/2022 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2022.*

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.

Aos meus Pais, ao meu irmão e à Kiki

*“Life is so short you can't waste even a day subscribing to what someone thinks you can do
versus knowing what you can do “*

Virgil Abloh

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus orientadores, os Professores Doutores Rui Calçada e José Correia, em primeiro lugar a nível profissional por todo o conhecimento partilhado comigo e pela sua disponibilidade ao longo destes meses, e em segundo lugar a nível pessoal por todas as orientações dadas para o futuro com o intuito de potenciar o meu progresso.

Agradeço à minha família por todo o apoio dado, especialmente aos meus pais por me terem proporcionado toda a estabilidade necessária para eu ultrapassar esta etapa.

Agradeço aos meus amigos da faculdade por todas as horas partilhadas a estudar na véspera dos exames e por juntos termos conseguido alcançar a última etapa. Agradeço também aos meus amigos designados por “PVZ SOUL” pelo apoio dado ao longo dos anos e pela descontração proporcionada nas nossas saídas.

Agradeço à Kiki por me ter acompanhado ao longo desta etapa e por me ter ajudado nas fases menos positivas e com menos motivação que ultrapassei.

Agradeço ao co-orientador Engenheiro António Mourão pelo fornecimento de ferramentas de cálculo essenciais para a investigação do caso prático, por todo o conhecimento sobre o tema partilhado comigo e pela ampla disponibilidade ao longo da execução do trabalho.

Agradeço às Infraestruturas de Portugal pelo fornecimento de informação sobre a Ponte das Várzeas, essencial para o desenvolvimento deste projeto.

RESUMO

As pontes ferroviárias metálicas são parte importante da rede de caminhos-de-ferro do país e apresentam em geral uma idade já considerável, sendo por isso o fenómeno da fadiga algo a ter conta para prever danos estruturais consequentes do volume de tráfego pesado ferroviário. É através desta previsão que se pode perceber como proteger e reabilitar estas infraestruturas.

As ameaças à integridade estrutural provocadas por fadiga ocorrem principalmente junto às ligações metálicas e para avaliar o dano é necessário recorrer a abordagens propostas pela comunidade científica. É nesta filosofia que começa este trabalho, pretendendo perceber dentro das abordagens globais ou locais que existem qual é a mais adequada para cada caso de estudo.

Na avaliação deste fenómeno de degradação estrutural é recorrente a utilização de curvas de fadiga, mais conhecidas por curvas S-N. Estas relacionam a vida à fadiga com a gama de tensão nominal, sendo esta relação linear numa escala logarítmica. Para obter estas curvas é necessário realizar uma análise probabilística da resistência à fadiga das ligações estruturais, a qual pode considerar vários modelos e padrões de probabilidade. Tendo em conta o caso de estudo focado neste trabalho – Ponte das Várzeas – os modelos probabilísticos para avaliação da resistência à fadiga de ligações rebitadas de corte simples e corte duplo (tipologia comum na Ponte das Várzeas e em outras pontes metálicas portuguesas e europeias) que esta investigação aborda são: os modelos normativos da ISO12107 e AASHTO; modelo de Castillo & Fernández-Canteli; e o modelo de Weibull de 2 parâmetros. Nesta análise probabilística, além de comparar os modelos mencionados foi também comparada a análise seguindo uma regressão linear clássica e uma regressão linear ortogonal, aspirando a demonstrar que a regressão ortogonal pode ser mais promissora para a avaliação do dano à fadiga de estruturas metálicas existentes.

Com base na análise probabilística realizada, avaliou-se a acumulação de danos num detalhe crítico da Ponte das Várzeas, através do método da acumulação de dano por fadiga seguindo a regra de Palmgren-Miner. Esta abordagem foi aplicada usando as curvas de resistência à fadiga baseadas na distribuição de Weibull, na distribuição normal (ISO12107) e no modelo de Castillo & Fernández-Canteli, com o objetivo comparar e discutir resultados sobre a vida útil da estrutura em causa.

PALAVRAS-CHAVE: Pontes Ferroviárias, Fadiga, Modelação Probabilística, Acumulação de Dano, Regressão Ortogonal.

ABSTRACT

Metal railway bridges are an important part of the country's railway network and generally are quite old, so the phenomenon of fatigue is something to be considered to predict structural damage resulting from the volume of heavy rail traffic. It is through this forecast that one can understand how to protect and rehabilitate the infrastructure.

The threats to structural integrity caused by fatigue occurs mainly near metallic connections and to evaluate the damage it is necessary to resort to approaches proposed by the scientific community. It is in this philosophy that this work begins, with the ambition to perceive within the global or local approaches that there is, which is the most suitable for each case study.

In the evaluation of this phenomenon of structural degradation, it is recurrent the use of fatigue curves, better known as S-N curves. These ones relate the fatigue life to the nominal stress range, being this relationship linear on a logarithmic scale. In order to obtain these curves, it is necessary to perform a probabilistic analysis of the fatigue resistance of the structure, which may consider various models and probability patterns. In the case study – Várzeas bridge – for fatigue damage assessment of the critical locations, the probabilistic fatigue models for evaluating the fatigue resistance of riveted connections (Common typology in Ponte das Várzeas, and in other Portuguese and European metal bridges) addressed are the following: the standard models ISO12107 and AASHTO; model of Castillo & Fernández-Canteli; and the 2-parameter Weibull model. In the probabilistic analysis, in addition to comparing the models described, the analyses following a classical linear regression with an orthogonal linear regression were also compared, aiming to demonstrate that orthogonal regression is more promising in the case of already existing structures.

Based on probabilistic analyses carried out, the damage accumulation in a critical detail of the Várzeas bridge, was evaluated using the fatigue damage accumulation method following the Palmgren-Miner rule. This approach was applied using the fatigue strength curves based on the Weibull distribution, normal distribution (ISO12107), and the Castillo & Fernández-Canteli model, with the objective of comparing and discussing results about the useful life of the structure in question.

KEYWORDS: Railway Bridges, Fatigue, Probabilistic Modeling, Damage Accumulation, Orthogonal Regression.

AGRADECIMENTOS	I
RESUMO	III
ABSTRACT	V
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 MOTIVAÇÃO	1
1.2 OBJETIVOS	2
1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	3
2 RESISTÊNCIA À FADIGA E AVALIAÇÃO DE DANO... 5	
2.1 FENÓMENO DE FADIGA.....	5
2.2 ESTÁGIOS DE FADIGA	6
2.3 ABORDAGENS GLOBAIS E LOCAIS DE FADIGA.....	7
2.3.1 ABORDAGEM GLOBAIS	8
2.3.2 ABORDAGENS LOCAIS.....	9
2.3.3 ABORDAGENS BASEADA NA ESCALA-DE-GRÃO.....	12
2.4 MODELAÇÃO PROBABILÍSTICA DA RESISTÊNCIA À FADIGA	13
2.4.1 INTRODUÇÃO.....	13
2.4.2 ISO12107	14
2.4.3 ASTM E739	16
2.4.4 LEI DE BASQUIN BASEADA NA DISTRIBUIÇÃO DE WEIBULL	17
2.4.5 MODELO CASTILLO & FERNÁNDEZ-CANTELI.....	20
2.4.6 MODELAÇÃO PROBABILÍSTICA BASEADA NA INFERÊNCIA BAYESIANA.....	22
2.4.7 AASHTO.....	23
2.5 CRITÉRIOS DE PROJETO À FADIGA.....	24
2.5.1 INTRODUÇÃO.....	24
2.5.2 CURVAS S-N DE PROJETO	24
2.5.3 MÉTODOS DE PROJETO À FADIGA.....	27
3 MODELAÇÃO PROBABILÍSTICA DA RESISTÊNCIA À FADIGA DE LIGAÇÕES REBITADAS	31
3.1 INTRODUÇÃO.....	31
3.2 PROPRIEDADES DO MATERIAL METÁLICO – PONTE VÁRZEAS	31
3.2.1 COMPOSIÇÃO QUÍMICA	31
3.2.2 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO.....	32
3.2.3 DUREZA	34

3.2.4 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO DA LIGAÇÃO REBITADA.....	35
3.2.5 RESISTÊNCIA À FADIGA DA LIGAÇÃO REBITADA	36
3.3 MODELAÇÃO PROBABILÍSTICA DA LIGAÇÃO REBITADA EM ESTUDO	37
3.3.1 ANÁLISE DE REGRESSÃO.....	37
3.3.2 ISO12107	41
3.3.3 DISTRIBUIÇÃO DE WEIBULL	43
3.3.4 MODELO CASTILLO & FERNÁNDEZ-CANTELLI (CFC)	47
3.3.5 CURVAS S-N DA NORMA AASHTO	49
3.3.6 DISCUSSÃO DE RESULTADOS	51
3.3.7 MODELOS PROBABILÍSTICOS COM DADOS TARAS & GREINER E OUTRAS PONTES	52
4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DA ACUMULAÇÃO DE DANO POR FADIGA.....	55
4.1 INTRODUÇÃO.....	55
4.2 HISTÓRIA DAS TENSÕES PARA OS DETALHES EM ESTUDO	57
4.3 APLICAÇÃO DO MÉTODO DE ACUMULAÇÃO DE DANO (MAD).....	59
4.3.1 MAD & ISO12107	61
4.3.2 MAD & DISTRIBUIÇÃO DE WEIBULL	63
4.3.3 MAD & CFC	65
4.3.4 MAD & AASHTO	66
4.4 DISCUSSÃO DE RESULTADOS	66
5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	69
5.1 CONCLUSÃO	69
5.2 TRABALHOS FUTUROS.....	70
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	71

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Ponte Hasselt Road.....	2
Figura 2 - Ponte Silver Bridge.....	2
Figura 3 - Diferentes estágios de fadiga (Schijve, 2003)	6
Figura 4 - Evolução do comprimento das fendas com o número de ciclos para vários níveis de tensão.....	7
Figura 5 - Taxa de propagação de fendas vs. gama do fator de intensidade de tensões.....	7
Figura 6 - Representação da Curva S-N (Correia J. , 2014).....	8
Figura 7 - Curva S-N de uma abordagem local baseada na Tensão (Correia, 2018)	10
Figura 8 - Curva deformação vs. Vida (Correia, 2018).....	11
Figura 9 - Curva Energia vs. Vida (Correia, 2018)	12
Figura 10 - Mapa EBSD da estrutura granular.....	13
Figura 11 - Orientações dos grãos.....	13
Figura 12 - Malha obtida por elementos finitos	13
Figura 13 - Distribuição da vida em fadiga para determinadas tensões (ISO12107, 2012)	15
Figura 14 - Curva P-S-N obtida usando a norma ISO12107 (Mohabeddine, et al., 2021)	15
Figura 15 - Representação da curva de probabilidade dependente do fator de forma (Haghighi, 2020)	18
Figura 16 - Curva P-S-N obtida usando a distribuição de Weibull de dois parâmetros.....	18
Figura 17 - Curvas de Percentil.....	21
Figura 18 - Curva P-S-N obtida usando o modelo CFC.....	21
Figura 19 - Gráfico acíclico direcionado (DAG)	23
Figura 20 - Resistência nominal à fadiga das categorias de detalhes especificadas na AASHTO LRFD (AASHTO, 2005).....	24
Figura 21 - Curvas S-N de projeto de acordo com a norma (EN 1993-1-9, 2010)	26
Figura 22 - Comparação de várias curvas de projeto S-N (Horas, 2021).....	26
Figura 23 - Histórico de tensão	29
Figura 24 - Histórico de tensões equivalentes em termos de ciclos reversos.....	29
Figura 25 - Processo de cálculo do dano estrutural (EN 1993-1-9, 2010)	30
Figura 26 - Geometria do detalhe estrutural (Sousa, 2020)	33
Figura 27 - Geometria de uma amostra da ligação rebitada das pontes das Várzeas (Sousa, 2020)	35
Figura 28 - Regressão linear seguindo uma distribuição normal (Wicklin, 2015).....	37
Figura 29 - Exemplo de uma linha obtida por regressão linear (Wikipédia, 2019)	38
Figura 30 – Modelo que procura minimizar distâncias verticais (Long & Teetor, 2019).....	38

Figura 31 - Modelo que procura minimizar distâncias horizontais (Long & Teetor, 2019)	38
Figura 32 - Regressão clássica dos mínimos quadrados	39
Figura 33 - Modelo que procura minimizar distâncias ortogonais (Long & Teetor, 2019)	40
Figura 34 - Regressão ortogonal	40
Figura 35 - Curvas de fadiga: ISO12107 & Regressão normal.....	41
Figura 36 - Curvas de fadiga: ISO12107 & Regressão ortogonal.....	42
Figura 37 - Curvas de fadiga: CLR vs OLR segundo ISO12107 (2012).....	43
Figura 38 - Método de distribuição de Weibull com uma CLR.....	44
Figura 39 - Curvas de fadiga: distribuição de Weibull & Regressão normal.....	44
Figura 40 - Método de distribuição de Weibull com uma OLR.....	45
Figura 41 - Distribuição de Weibull & Regressão ortogonal	46
Figura 42 - Curvas de fadiga: CLR vs OLR seguindo uma distribuição de Weibull.....	47
Figura 43 - Curva Probabilística do modelo CFC.....	49
Figura 44 - Curvas por Categoria de detalhe da norma AASHTO (AASHTO, 2005).....	50
Figura 45 - Curvas de fadiga: Distribuição de Weibull vs. ISO12107.....	51
Figura 46 - Curvas de fadiga – comparação entre as várias abordagens.....	52
Figura 47 - Resultados dos testes de fadiga adquiridos em ligações rebitadas (Taras and Greiner,2010).....	53
Figura 48 - Representação dos testes de fadiga, não normalizados, incluindo run-outs (Taras and Greiner, 2010)	53
Figura 49 - Curvas ISO12107 e Weibull com dados de todas as pontes.....	54
Figura 50 - Perspetiva global da Ponte das Várzeas	55
Figura 51 - Alçado da Ponte das Várzeas (Horas, 2021)	56
Figura 52 - Planta parcial do contraventamento inferior (lado esquerdo) e planta parcial do contraventamento superior (lado direito) (Horas, 2021).....	56
Figura 53 - Planta parcial do contraventamento de lacete (lado esquerdo) e planta parcial da via-férrea (lado direito) (Horas, 2021)	56
Figura 54 - Ligações dos nós da Ponte das Várzeas (Horas, 2021)	56
Figura 55 - Tensões obtidas em cada elemento.....	58
Figura 56 - Histórico de tensão do comboio tipo 5	58
Figura 57 - Exemplo de dados introduzidos no FDT	60
Figura 58 - Exemplo do "Rainflow-Counting" no FDT.....	60
Figura 59 - Exemplo do cálculo do dano por fadiga	61

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Principais causas de dano ocorrido em estruturas metálicas.....	1
Tabela 2 - Composição química para os aços de média resistência e ferros pudelados (Sousa, 2020)	32
Tabela 3 - Percentagens da composição química da amostra, (Bruno Sousa, 2020)	32
Tabela 4 - Propriedades das amostras do material da Ponte das Várzeas (Sousa, 2020)	33
Tabela 5 - Comparação das propriedades do material da Ponte das Várzeas e propriedades do material de outras pontes metálicas (Sousa, 2020).....	34
Tabela 6 - Número da amostra e dureza medida	34
Tabela 7 - Comparação dos valores de dureza entre a Ponte das Várzeas e as outras pontes antigas	35
Tabela 8 - Lista das amostras usadas nos testes monotónicos (Sousa, 2020)	35
Tabela 9 - Área medida para cada amostra (Sousa, 2020)	36
Tabela 10 - Força aplicada em cada amostra e respetiva tensão (Sousa, 2020)	36
Tabela 11 - Resultados da vida da fadiga dos testes experimentais (Sousa, 2020).....	36
Tabela 12 Parâmetros m e $\Delta\sigma_c$ da curva de fadiga obtidos com base na norma ISO12107.....	42
Tabela 13 - Dados dos ciclos vs tensão.....	43
Tabela 14 - Parâmetros m e $\Delta\sigma_c$ da curva de fadiga obtidos com base na distribuição de Weibull	47
Tabela 15 - Dados de fadiga introduzidos no ProFatigue.	48
Tabela 16 - Constante A para várias categorias de detalhe (AASHTO, 2005).	50
Tabela 17 - Parametros m e $\Delta\sigma_c$ de curvas de fadiga de projeto obtidos com base em dados de fadiga de ligações rebitadas de várias pontes metálicas.....	54
Tabela 18 - Cenário de tráfego padrão de fadiga de acordo o Anexo D da EN 1991-2 (2017) ..	57
Tabela 19 - Cenário de tráfego pesado de fadiga de acordo com o Anexo D da EN 1991-2 (2017)	57
Tabela 20 - Ciclos de tensão	59
Tabela 21 - Dano obtido por MAD e curva de fadiga de projeto na norma ISO12107 utilizando uma regressão linear clássica num cenário de tráfego padrão (2012)	62
Tabela 22 - Dano obtido por MAD e curva de fadiga de projeto na norma ISO12107 utilizando uma regressão linear clássica num cenário de tráfego pesado (2012).....	62
Tabela 23 - Dano obtido por MAD e curva de fadiga de projeto na norma ISO12107 utilizando uma regressão linear ortogonal num cenário de tráfego padrão (2012)	63
Tabela 24 - Dano obtido por MAD e curva de fadiga de projeto na norma ISO12107 utilizando uma regressão linear ortogonal num cenário de tráfego padrão (2012)	63
Tabela 25 - Dano obtido por MAD e curva de fadiga de projeto com base na distribuição de Weibull, utilizando uma regressão linear clássica num cenário de tráfego padrão.....	64

Tabela 26 - Dano obtido por MAD e curva de fadiga de projeto com base na distribuição de Weibull, utilizando uma regressão linear clássica num cenário de tráfego pesado.....	64
Tabela 27 - Dano obtido por MAD e curva de fadiga de projeto com base na distribuição de Weibull, utilizando uma regressão linear ortogonal num cenário de tráfego padrão	65
Tabela 28 - Dano obtido por MAD e curva de fadiga de projeto com base na distribuição de Weibull, utilizando uma regressão linear ortogonal num cenário de tráfego pesado.....	65
Tabela 29 - Dano obtido por MAD e curva de fadiga de projeto da norma AASHTO, num cenário de tráfego padrão (AASHTO, 2005)	66
Tabela 30 - Dano obtido por MAD e curva de fadiga de projeto da norma AASHTO, num cenário de tráfego pesado (AASHTO, 2005).....	66
Tabela 31 - Discussão de Resultados do Dano ao fim de 100 anos	67
Tabela 32 - Parâmetros da curva S-N proposta para ligações rebitadas de pontes antigas (Horas, 2021)	67
Tabela 33 - <i>D</i> 100 do elemento 1770 segundo a análise (Horas, 2021)	67

SÍMBOLOS, ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS

ASTM - *American Society for Testing and Materials*

ISO – *International Organization for Standardization*

EN - *European Standards*

CFC - Castillo e Fernández-Canteli

CDF - *Cumulative Distribution Function*

CFRP - *Carbon Fiber Reinforced Polymer*

MAD - Método Acumulativo de dano

MLM - *Maximum Likelihood Method*

LSM - *Least Squares Method*

WLSM - *Weighted Least Squares Method*

MM - *Method of Moments*

MCMC - Markov Chain Monte Carlo

EBS – *Eletron Backscatter Diffraction*

HV- *Vickers Hardness*

Núm – Número

% - Percentagem

E - Módulo de Young

N – Número de ciclos

σ – Tensão

α_i – Evolução do comprimento de uma fenda de dimensão inicial

da – Derivada do comprimento da fenda

dN – Derivada do número de ciclos

N_f – Número de ciclos na fratura

a_f – Comprimento da fenda na fratura

Δ – Gama/Intervalo

K – Fator de Intensidade de tensão aplicado

S-N – Curva Tensão (S) vs Número de ciclos (N)

Log – Logaritmo

A e B – Parâmetros da regressão linear

m e C – Constantes da curva S-N

σ'_f – Coeficiente de resistência à fadiga

- b – Expoente de resistência à fadiga
 σ_m – Tensão média
 σ_{max} – Tensão máxima
 ε – Deformação
 ΔW^p – Energia de deformação plástica por ciclo
 ΔW – Energia de deformação total por ciclo
exp – Expoente
 $P(x)$ – Função da Probabilidade
 μ_x – Média de x
 σ_x – Desvio Padrão de x
 $\hat{}$ - Estimativa
 $\bar{}$ - Média
 α_W – Parâmetro de escala de Weibull
 β – Parâmetro de forma de Weibull
M1 e M2 – Primeiros momentos da População
 $f(y|\theta, v)$ – Primeiro estágio de verossimilhança
 $f(\theta|v)$ – Segundo estágio de densidade
 θ e v – Parâmetros e hiperparâmetros de verossimilhança
 $f(\cdot)$ – Funções de distribuição
Nr – Número de ciclos até á falha
 γ_{Ff} – Fator parcial de segurança para a carga da fadiga
 λ – Fator equivalente de dano por fadiga relacionado a 2×10^6 ciclos
 ϕ_2 – Fator dinâmico
 Σ - Somatório
 \int - Integral
 D - Dano
 F – Força
 A – Área
 C – Carbono
MN – Manganês
Si – Silício
P – Fósforo
S – Enxofre

1

INTRODUÇÃO

1.1 MOTIVAÇÃO

As estruturas metálicas sinalizaram a revolução industrial do século XVIII por toda a Europa, fenómeno que levou à industrialização do aço e à introdução de caminhos-de-ferro por todo o Continente. A construção de pontes metálicas e os desenvolvimentos tecnológicos nessa área foram fortemente impulsionados por este contexto. Em Portugal, as pontes metálicas apresentam na sua maioria uma idade significativa, sendo por isso o estudo e a investigação sobre a vida útil de cada uma um assunto que merece ser focado para evitar danos estruturais ou colapso estrutural. Um dos fenómenos que se destaca como uma das principais causas do dano nas estruturas metálicas durante a sua vida útil é o fenómeno da fadiga. A Tabela 1 demonstra o que foi afirmado, revelando outras causas que podem danificar este tipo de estruturas, tendo sido retirada da publicação “*Assessment of Existing Steel Structures: Recommendations for Estimation of Remaining Fatigue Life*”, 2008.

Tabela 1 - Principais causas de dano ocorrido em estruturas metálicas

Causa do dano	Total		Edifícios		Pontes		Máquinas	
	Núm.	%	Núm.	%	Núm.	%	Núm.	%
Resistência estática	161	29.7	102	33.6	19	14.8	40	36
Estabilidade	87	16	62	20.4	11	8.6	14	12.6
Fadiga	92	16.9	8	2.6	49	38.3	35	31.5
Movimento de corpo rígido	44	8.1	25	8.2	2	1.6	17	15.3
Deformação elástica	15	2.8	14	4.6	1	0.8	0	0
Fratura frágil	15	2.8	9	3	5	3.9	1	0.9
Ambientais	101	18.6	59	19.4	41	32	1	0.9
Ações térmicas	23	4.2	23	7.6	0	0	0	0
Outras	5	0.9	2	0.7	0	0	3	2.7
Total	543	100	304	100	128	100	111	100

O dano por fadiga vai-se acumulando ao longo da vida operacional da estrutura, sendo particularmente relevante em pontes ferroviárias devido à maior magnitude dos carregamentos, especialmente quando

estas se situam em linhas com grande volume de tráfego de mercadorias. Com o crescimento das velocidades de circulação e das cargas ferroviárias, assim como do aumento da frequência de carregamentos, verificam-se maiores ciclos de tensão e em maior número, sendo por isso necessário desenvolver metodologias e abordagens para avaliar a vida útil de fadiga destas estruturas. Quando o fenómeno da fadiga não é considerado convenientemente pode levar a danos irreversíveis na estrutura, e em casos extremos ao colapso da mesma. Exemplos deste tipo de ocorrência foram verificados na Ponte de Hasselt Road na Bélgica em 1938 (Figura 1) e na Ponte Silver Bridge nos Estados Unidos da América em 1967 (Figura 2).



Figura 1 - Ponte Hasselt Road



Figura 2 - Ponte Silver Bridge

1.2 OBJETIVOS

Esta dissertação de mestrado tem como principal objetivo analisar a avaliação do dano causado nas estruturas metálicas devido à fadiga, em particular no caso de estudo da Ponte das Várzeas, sendo a quantificação do dano por fadiga realizado usando diferentes modelos probabilísticos. No desfecho deste estudo, o objetivo é comparar os resultados derivados dos diferentes modelos probabilísticos utilizados, demonstrando que apesar de certas abordagens mais conservativas indicarem uma vida útil mais limitada é possível através de outros métodos verificar que a estrutura apresenta um limite de tempo em serviço superior sem dano por fadiga a afetar a sua integridade.

1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A presente dissertação é desenvolvida ao longo de quatro capítulos, os quais são focados em tópicos essenciais para o cumprimento dos objetivos definidos.

O Capítulo 2, nomeado de “Resistência à Fadiga e Avaliação de Dano”, é o capítulo onde são apresentados os conceitos teóricos necessários para o desenvolvimento da investigação. Em primeiro lugar, definindo o que é o fenómeno da fadiga e os seus estágios, em segundo lugar, demonstrando as abordagens existentes na literatura científica para avaliação à fadiga e quais são as vantagens e desvantagens da utilização de cada. Após estas temáticas, são ainda apresentados vários modelos e normas utilizados para modelação probabilística da resistência à fadiga. Por último, são retratados os critérios de projeto à fadiga, especificando quais são os métodos de projeto propostos no Eurocódigo, fazendo referência também às curvas de projeto.

No seguimento das bases teóricas apresentadas no capítulo anterior, o Capítulo 3, intitulado de “Modelação Probabilística da Resistência à fadiga de Ligações Rebitadas”, inicia-se com a apresentação das propriedades do material metálico da Ponte das Várzeas e finaliza-se com a modelação probabilística das curvas de fadiga utilizando 4 modelos diferentes com uma análise de regressão linear e uma ortogonal, seguida da respetiva discussão de resultados.

O Capítulo 4, nomeado de “Análise e Discussão da Acumulação de Dano por Fadiga”, começa com uma descrição da Ponte das Várzeas para contextualizar o caso em estudo, seguindo-se a apresentação dos modelos de carga utilizados para definir o volume de tráfego e o respetivo histórico de tensões. Com base nas modelações probabilísticas definidas no Capítulo 3, é aplicado o método de acumulação de dano finalizando este capítulo com uma discussão de resultados.

Finalmente, as conclusões gerais e trabalhos futuros são apresentados no capítulo 5.

2

RESISTÊNCIA À FADIGA E AVALIAÇÃO DE DANO

2.1 FENÓMENO DE FADIGA

O fenómeno de fadiga corresponde a um estado limite do material no qual este perde a capacidade de resistir às ações cíclicas aplicadas. Em estruturas metálicas, este fenómeno acontece quando devido a carregamento cíclicos persistentes surgem fissuras por fadiga ao nível microscópico, as quais se podem desenvolver para um nível macroscópico e posteriormente para a rotura da estrutura. A perda de resistência do material deve-se ao facto deste já não apresentar um comportamento elástico-linear, ou seja, a cada ciclo de carga e descarga o material já apresenta deformações que não são totalmente recuperadas.

O dano por fadiga é acumulado ao longo da vida operacional da estrutura, sendo um processo comum em pontes ferroviárias, uma vez que estas podem estar sujeitas a uma grande intensidade de tráfego pesado. Como já referido, este fenómeno se não for tido em conta pode afetar a integridade de uma estrutura, provocando danos irreversíveis e numa situação mais extrema pode levar ao colapso total do sistema estrutural.

Existe um conjunto de fatores que podem influenciar o dano por fadiga, entre os quais:

- Nível de força estática;
- A ductilidade;
- As condições de limpeza do aço;
- As tensões residuais;
- As condições de acabamento superficiais;
- Os ambientes agressivos.

A fadiga é considerada como a principal responsável pela ocorrência de danos severos em estruturas como as pontes metálicas (ver Tabela 1). Para prevenir e proteger as estruturas deste fenómeno é necessário realizar uma boa avaliação do dano acumulado e da respetiva vida útil. Uma estimativa fidedigna de dano requer uma adequada avaliação dos ciclos de tensão ocorridos no passado, no presente e os que se preveem que ocorram no futuro. Dado o contexto atual e as políticas de mobilidade em vigor, a previsão para o futuro é que haja uma maior degradação, ou seja um aumento de ciclos de tensão e respetivas amplitudes provocadas pelo aumento das cargas dos comboios e respetiva velocidade de circulação, assim como pelo crescimento do volume de tráfego.

2.2 ESTÁGIOS DE FADIGA

O fenómeno de degradação do material por fadiga pode ser dividido em dois estágios do ponto de vista técnico, sendo que a divisão em três fases também é habitual. O primeiro estágio é caracterizado pela iniciação de uma dada fenda, e o segundo pela respetiva propagação na qual pode estar incluída a terceira fase que é a rotura final, ou seja a propagação instável da fenda até à rotura. Na Figura 3 é apresentado um esquema ilustrativo das fases deste fenómeno:

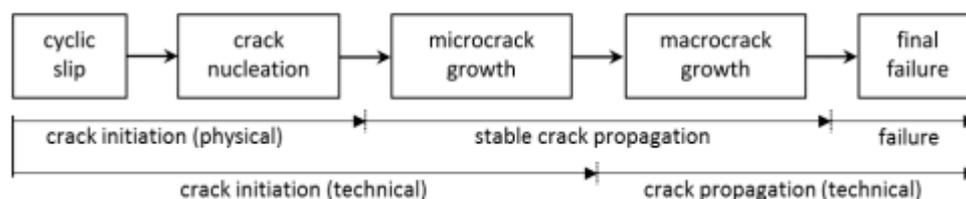


Figura 3 - Diferentes estágios de fadiga (Schijve, 2003)

A fase de iniciação de fendas é desenvolvida numa escala microscópica, ocorrendo o aparecimento de microfissuras e respetiva propagação, não sendo estas suficientes grandes para serem visíveis a olho nu. Como é ilustrado na Figura 3, a sequência de acontecimentos neste estágio inicia-se pelo deslizamento à escala do grão, ocorrendo, portanto, à escala atómica. De seguida, verifica-se a fissuração nuclear, na qual se acumulam quantidades suficientes de discordâncias, permitindo a separação dos planos cristalinos. Por último, este estágio termina com o crescimento das microfissuras provenientes da fissuração nuclear.

Posteriormente, a fase de propagação divide-se em propagação estável e em propagação instável, desenvolvendo-se numa escala macroscópica. Após a propagação estável da fenda, segue-se a propagação instável que conduz à rotura por fadiga.

A Figura 4 ilustra o efeito do nível de tensão no crescimento de fendas de fadiga. Para o efeito, representa-se a evolução do comprimento de uma fenda de dimensão inicial (a_i), com o número de ciclos (N), para três níveis de tensão distintos, σ_1 , σ_2 e σ_3 , com $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$. Da observação das curvas conclui-se que, para um determinado comprimento de fenda (a), a taxa de propagação das fendas (declive das curvas, $da/dN \approx \Delta a/\Delta N$) é superior para as tensões mais elevadas. O número de ciclos, até à fratura, N_f , é menor para as tensões mais elevadas. O comprimento de fenda final aquando da fratura, a_c , é maior para as tensões mais elevadas.

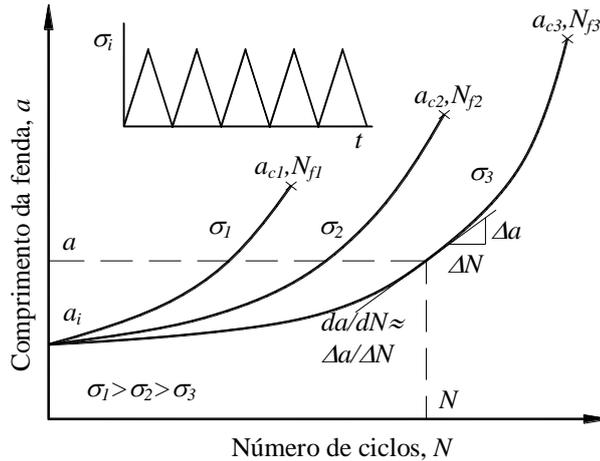


Figura 4 - Evolução do comprimento das fendas com o número de ciclos para vários níveis de tensão

As curvas da Figura 4 não são adequadas para a fase de projeto, excetuando quando estas condições são precisamente as mesmas verificadas nos ensaios usados na determinação das referidas curvas. A forma mais comum de apresentação dos resultados dos ensaios de propagação de fendas é a representação da taxa de propagação das fendas (da/dN) em função da gama do fator de intensidade de tensão aplicado (ΔK), como se representa esquematicamente na Figura 5, com ambos os eixos em escala logarítmica.

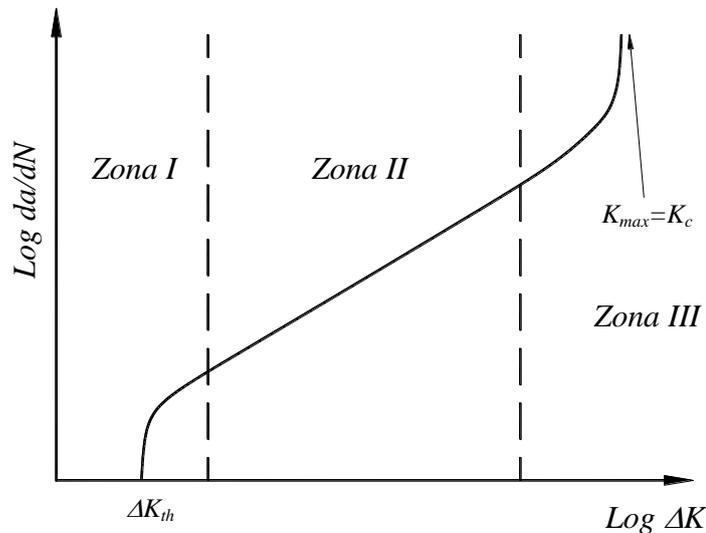


Figura 5 - Taxa de propagação de fendas vs. gama do fator de intensidade de tensões

2.3 ABORDAGENS GLOBAIS E LOCAIS DE FADIGA

Existem várias abordagens e metodologias para a avaliação à fadiga. Apesar da abordagem global ser a mais utilizada, esta apresenta algumas desvantagens relacionadas com a forma de abordar as características geométricas locais, a ação das cargas variáveis e as propriedades do material. Por conseguinte, a normalização da análise por elementos finitos e o aumento da eficiência computacional tem levado a uma crescente implementação de abordagens locais para análise da fadiga. Além disso, a abordagem local tem a vantagem de, graças ao desenvolvimento de ferramentas numéricas, permitir analisar a iniciação e progressão de fissuras em pontes existentes.

2.3.1 ABORDAGEM GLOBAIS

A abordagem global, passa pela análise de uma curva S-N, as quais foram propostas para a previsão da vida à fadiga tendo em conta as fases de iniciação e propagação das fissuras por fadiga. Essas curvas foram baseadas em dados experimentais para previsão da vida à fadiga de estruturas e componentes metálicos. As curvas S-N, ou também apelidadas de curvas de fadiga, relacionam o intervalo de tensão $\Delta\sigma$ com a vida de fadiga N_f (número de ciclos) e são geralmente expressas em escala logarítmica, como está demonstrado nas Equações 2.1 e 2.2:

$$\log N_f = A + B \times \log \Delta\sigma \quad \text{Eq. 2.1}$$

ou,

$$\Delta\sigma^m \times N_f = C \quad \text{Eq. 2.2}$$

onde “ m ” e “ C ” são constantes e podem ser determinadas com base nos parâmetros “ A ” e “ B ” da regressão linear,

$$C = 10^A \quad \text{Eq. 2.3}$$

$$m = -B \quad \text{Eq. 2.4}$$

Na Figura 6 está um exemplo de uma curva S-N, em escala logarítmica.

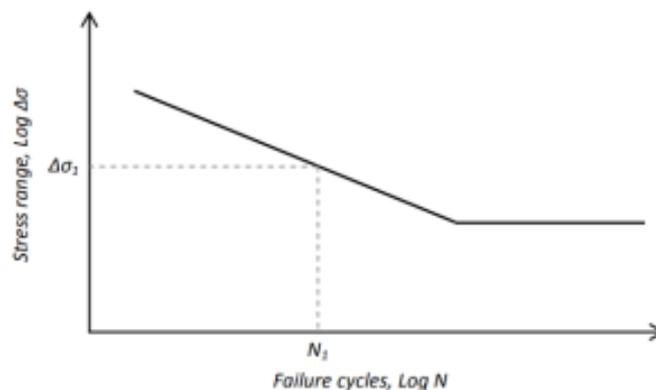


Figura 6 - Representação da Curva S-N (Correia J. , 2014)

Para descrever a resposta cíclica de um determinado detalhe estrutural são adotados vários modelos de resistência à fadiga baseados nas curvas S-N com várias formulações da função, dos quais se apresentam alguns de seguida:

Modelo de Wöhler (1870),

$$\log N = A - B\Delta\sigma \quad \text{Eq. 2.5}$$

Modelo de Basquin (1910),

$$\log N = A - B(\log \Delta \sigma) \quad \text{Eq. 2.6}$$

Modelo de Weibull (1949),

$$\log(N + D) = A - B \log\left(\frac{\Delta \sigma - \Delta \sigma_0}{\Delta \sigma_{st} - \Delta \sigma_0}\right) \quad \text{Eq. 2.7}$$

Modelo de Stüssi (1955),

$$\log N = A - B \cdot \log\left(\frac{\Delta \sigma - \Delta \sigma_0}{\Delta \sigma_{st} - \Delta \sigma_0}\right) \quad \text{Eq. 2.8}$$

Modelo de Kohout and Věchet (2001),

$$\log\left(\frac{\Delta \sigma}{\Delta \sigma_\infty}\right) = \log\left(\frac{N + N_1}{N + N_2}\right) \quad \text{Eq. 2.9}$$

Modelo de Castillo & Canteli (2001),

$$N_i = \exp\left(\log N_0 + \frac{\lambda + \delta(-\log(1 - p))^{1/\beta}}{\log \Delta \sigma - \log \Delta \sigma_0}\right) \quad \text{Eq. 2.10}$$

2.3.2 ABORDAGENS LOCAIS

As abordagens locais foram propostas para determinar o período de vida útil à fadiga dos materiais, sujeitos a cargas em certas condições. Existem vários métodos incluídos neste tipo de abordagem, podendo ser divididos em três categorias: i) tensão; ii) deformação; e iii) energia; sendo que todos eles usam parâmetros de dano por fadiga para correlacionar os resultados do ensaio de fadiga e são frequentemente aplicados para modelar a iniciação de fissuras por fadiga.

2.3.2.1 Abordagens baseadas na tensão

A abordagem baseada na tensão usa a amplitude de tensão aplicada para prever o número de ciclos até à falha (Correia, 2018). Esta metodologia é a mais utilizada dentro das abordagens locais por ser de fácil utilização e por já existir uma bibliografia considerável sobre as propriedades de fadiga dos materiais. Geralmente, este tipo de métodos é usado apenas para ciclos de fadiga altos, uma vez que para ciclos de fadiga baixos a relação tensão-deformação torna-se não linear. A definição das curvas S-N é feita com base em fórmulas empíricas derivadas de dados experimentais. Basquin (1910) propôs a seguinte relação entre a amplitude de tensão $\Delta \sigma/2$ e o número de ciclos até a fadiga, N_f :

$$\frac{\Delta\sigma}{2} = (\sigma'_f) \times N_f^b \quad \text{Eq. 2.11}$$

Onde:

$\Delta\sigma$ - Gama de tensões;

σ'_f - Coeficiente de resistência à fadiga; e

b - Expoente de resistência à fadiga.

Morrow (1965) e Morrow e Socie (1981) sugeriram a alteração da fórmula de Basquin (1910) visto que em detalhes não soldados o efeito do nível de tensão é relevante, algo que não se verifica em detalhes soldados devido às tensões residuais. Com base nesta sugestão foi introduzido na equação 2.11 o efeito da tensão média que reduz o coeficiente de resistência à fadiga.

$$\frac{\Delta\sigma}{2} = (\sigma'_f - \sigma_m) \times N_f^b \quad \text{Eq. 2.12}$$

Onde:

σ_m - Tensão média;

Na Figura 7, está um exemplo de uma curva S-N segundo esta abordagem.

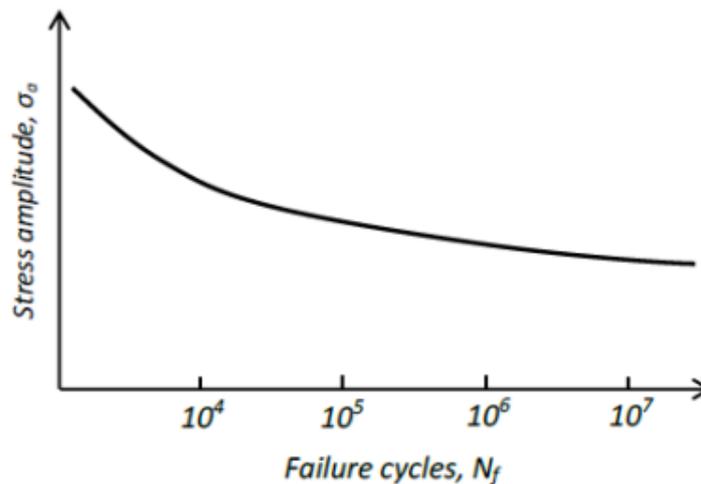


Figura 7 - Curva S-N de uma abordagem local baseada na Tensão (Correia, 2018)

2.3.2.2 Abordagens baseadas na deformação

A abordagem baseada na deformação tem várias aplicações na análise de fadiga, especialmente para cálculo de iniciação de fissuras por fadiga (Correia, 2018). Um aspeto a ter em conta nos materiais de engenharia que estão expostos a temperaturas ambientes é o ciclo de endurecimento e amolecimento do material até se aproximar de uma condição estável, assim, ao contrário dos métodos de tensão, esta abordagem considera a deformação plástica que pode ocorrer na zona da formação da fenda (Morrow e Socie, 1981). A abordagem baseada na deformação, ao invés de utilizar as curvas S-N, recorre a uma curva deformação-vida útil. Seguindo os princípios desta abordagem foram propostas várias correlações, apresentadas nas Equações 2.13 e 2.14:

- Morrow or Coffin-Manson,

$$\varepsilon_a = \varepsilon_a^E + \varepsilon_a^P = \frac{\sigma'_f}{E} (2N_f)^b + \varepsilon'_f (2N_f)^c \quad \text{Eq. 2.13}$$

- Smith-Watson-Topper,

$$\sigma_{max} \times \varepsilon_a = SWT = (\sigma'_f)^2 \times (2N_f)^{2b} / E + \sigma'_f \times \varepsilon'_f \times (N_f)^{b+c} \quad \text{Eq. 2.14}$$

Na Figura 8 está um exemplo de uma curva deformação vs. vida útil, utilizada nesta abordagem, com referência as retas da deformação plástica e elástica, em escala logarítmica.

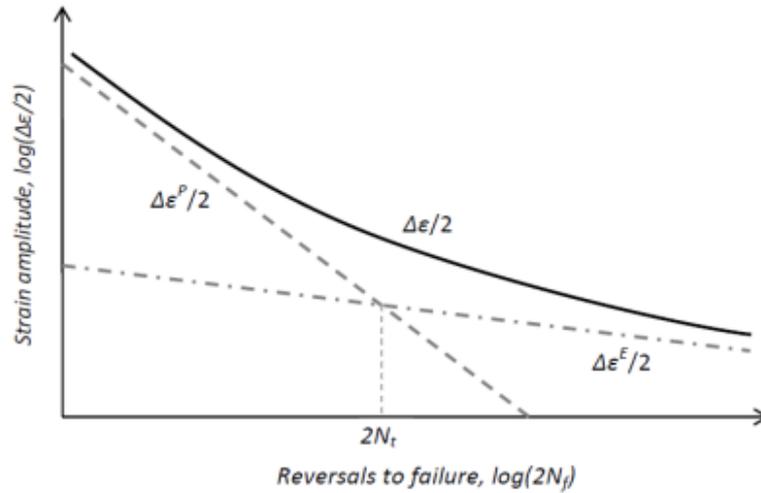


Figura 8 - Curva deformação vs. Vida (Correia, 2018)

2.3.2.3 Abordagens baseadas na energia

As abordagens baseadas na energia são recentes e utilizam a energia como parâmetros de caracterização da fadiga, podendo ser usadas em ciclos de fadiga altos e baixos, relacionando a tensão, deformação e o processo de dano por fadiga. Este método é apoiado na suposição de que o dano por fadiga está diretamente relacionado à área sob as curvas de tensão resultantes do carregamento cíclico, sendo esta última relacionada com a deformação plástica originada durante um ciclo de carga, que por sua vez se relaciona com o dano por fadiga.

De acordo com Correia (2014), para grandes deformações plásticas é habitual falar na densidade de energia de deformação plástica por ciclo (ΔW^P). No caso de deformações pequenas, foi verificado que para grandes ciclos a energia de deformação plástica é bastante reduzida para obter uma resposta.

No seguimento desta abordagem, foi proposto um modelo por Ellyn e Kujawski (1985), que usa a energia de deformação total por ciclo, ΔW :

$$\Delta W = \frac{1}{2} \Delta W^P + \frac{1}{2} \Delta \sigma \Delta \varepsilon \quad \text{Eq. 2.15}$$

Onde,

$\Delta \sigma$ – Gama de tensões; e

$\Delta \varepsilon$ - Gama de deformações.

No caso de considerar o efeito da tensão média, Ellyn e Kujawski propõe a soma da densidade das energias de deformação à tração e plástica por ciclo.

$$\Delta W^t = \Delta W^P + \frac{\sigma_{m\acute{a}x}^2}{2E} \quad \text{Eq. 2.16}$$

Onde,

$\sigma_{m\acute{a}x}$ – Tensão máxima; e

ΔW^t – Deformação à tração;

Na Figura 9, apresenta-se um exemplo de uma curva utilizada nesta abordagem que relaciona a energia com a vida útil, em escala logarítmica.

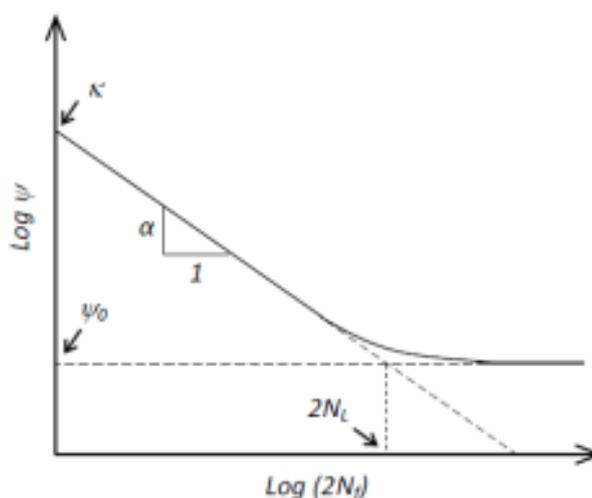


Figura 9 - Curva Energia vs. Vida (Correia, 2018)

2.3.3 ABORDAGENS BASEADA NA ESCALA-DE-GRÃO

A abordagem baseada na escala-de-grão é recente e pretende corrigir alguns erros que as outras abordagens desprezam. A iniciação de fissuras é um processo muito lento e contínuo que ocorre em várias gamas de comprimento numa escala microscópica. Por outro lado, a propagação das fissuras ocorre numa escala microscópica e numa macroscópica, sendo que uma análise seguindo uma escala mesoscópica é a mais razoável para avaliação da fadiga. A abordagem multiestágio à escala-de-grão é proposta para analisar a sensibilidade da microestrutura à formação e crescimento de fissuras. As fissuras de fadiga formam-se em grãos com orientação favorável ou em cooperação com campo de escoamento fortemente localizado.

A microestrutura de materiais policristalinos é caracterizada pela forma e orientação cristalográfica dos grãos e pelas interfaces intergranulares que desempenham um papel muito importante na sua micromecânica. Várias técnicas computacionais foram desenvolvidas para a análise de materiais policristalinos em microescala com o objetivo de estudar a sua mecânica, o seu dano e o seu comportamento à falha.

Seguindo esta abordagem, o processo inicia-se na análise microscópica de um grão obtido do material em estudo, no qual primeiramente se identifica o mapa da sua estrutura e, através de modelos computacionais, obtém-se as tais orientações dos grãos e de seguida a malha de elementos finitos da

estrutura granular. Este processo das orientações dos grãos é baseado na localização de vazios presentes em cada interface intergranular, o que origina concentrações de tensões diferentes devido ao fator de concentração de tensão. É com este campo de concentrações diferentes presentes no material e a presença de vazios nas interfaces que a formação de microfissuras se inicia, o que origina ainda um campo de tensões mais elevado em torno destas microfissuras.

Nas Figuras 10 a 12, está exemplificada esta abordagem para criar uma malha de elementos finitos da microestrutura do material, utilizada por Shiwen Wang, Weimin Zhuang, Jian Cao, Jianguo Lin publicada com o título *Micro-mechanics, Modeling for Micro-forming Processes* (Wang, Zhuang, Cao, & Lin, 2015).



Figura 10 - Mapa EBSD da estrutura granular

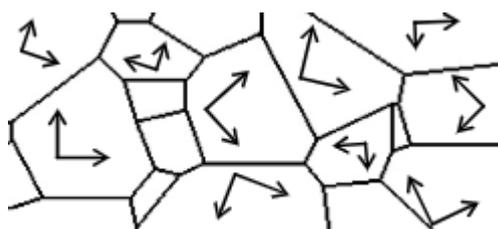


Figura 11 - Orientações dos grãos

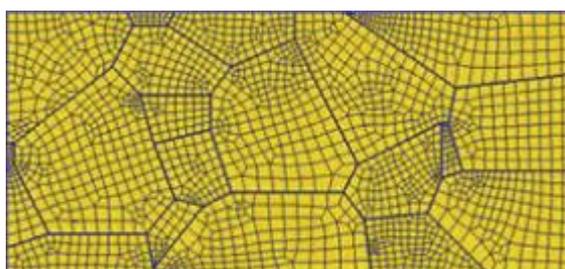


Figura 12 - Malha obtida por elementos finitos

2.4 MODELAÇÃO PROBABILÍSTICA DA RESISTÊNCIA À FADIGA

2.4.1 INTRODUÇÃO

Com o desenvolvimento contínuo da construção de infraestruturas, nomeadamente das estruturas metálicas, a falha por fadiga é uma das preocupações a ter em conta. Atualmente, para se avaliar este fenómeno são utilizadas curvas de resistência à fadiga previamente derivadas de um grande número de testes a certas geometrias de detalhes estruturais. Nas referidas curvas, a relação vida da fadiga e a faixa de tensão é descrita por um limite linear em espaço logarítmico, mais conhecida por curva S-N.

A análise probabilística da resistência à fadiga pode ser feita com base em recomendações normativas e modelação probabilística com o objetivo de obter curvas S-N de projeto. Neste capítulo não só irão ser analisadas as abordagens probabilísticas das normas ISO12107 (2012) e ASTM E739 (2015), como também serão abordados o modelo de probabilidade popular na previsão da fadiga, o Castillo & Fernández-Canteli, o modelo probabilístico seguindo uma distribuição de Weibull, e as curvas S-N de projeto incluídas na norma Americana AASHT. Além destes modelos e/ou abordagens, também será considerado o modelo Bayesiano, o qual considera a mediana da tensão na vida à fadiga. Para definir um modelo probabilístico, o primeiro passo é selecionar e/ou obter os dados experimentais. Os resultados probabilísticos dependem do número de dados experimentais disponíveis.

2.4.2 ISO12107

O modelo ISO12107 apresenta métodos para o planeamento experimental de ensaios de fadiga e a análise estatística dos dados resultantes. O objetivo é determinar as propriedades de fadiga dos materiais com um alto grau de confiança, considerando um número admissível de amostras. Segundo esta norma, este modelo fornece a análise das propriedades de vida à fadiga em vários níveis de tensão usando uma relação que pode aproximar linearmente a resposta do material em coordenadas apropriadas. O termo “tensão” nesta norma pode ser substituído por “deformação”, tal como os métodos descritos podem ser válidos para a análise das propriedades da vida de fadiga em função da deformação.

Esta norma propõe um modelo de limites lineares que é relativamente fácil de implementar na prática. O modelo é modificado para determinar um limite de fadiga inferior usando métodos estatísticos e assumindo que o logaritmo da vida à fadiga segue uma distribuição normal com variação constante. A probabilidade acumulada de falha da estrutura pode ser gerada pela seguinte equação:

$$P(x) = \frac{1}{\sigma_x \sqrt{2\pi}} \int_{-inf}^x \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{x - u_x}{\sigma_x}\right)^2\right] dx \quad \text{Eq. 2.17}$$

onde, $x = \log N$, e u_x e σ_x são a média e o desvio padrão de x , respetivamente. Esta expressão traduz a proporção da população que falha em vidas menores ou iguais a x .

Para determinar a relação linear entre a tensão e o número de ciclos, com objetivo de determinar a vida à fadiga para um determinado intervalo tensão, é utilizada a lei de Basquin (Eq 2.18):

$$\log N = \log C + m \times \log \Delta \sigma \quad \text{Eq. 2.18}$$

Para obter as curvas probabilísticas S-N correspondentes a uma certa probabilidade de falha é usada a Equação 2.19.

$$\hat{x}_{(P,1-\alpha,v)} = \hat{b} - \hat{a}y - k_{(P,1-\alpha,v)} \sigma_x \sqrt{1 + \frac{1}{n} + \frac{(y - \hat{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y})^2}} \quad \text{Eq. 2.19}$$

onde, $K_{(P,1-\alpha,v)}$ é o limite de tolerância unilateral para a distribuição normal e σ_x é o desvio padrão da amostra do logaritmo da vida à fadiga. O termo dentro da raiz é um fator de correção que depende do número de testes. Quando o número de testes é grande o suficiente, o termo de correção é próximo de 1 e pode ser negligenciado.

A distribuição da vida à fadiga para determinadas tensões, representada como uma curva S-N em escala logarítmica está exemplificada na Figura 13.

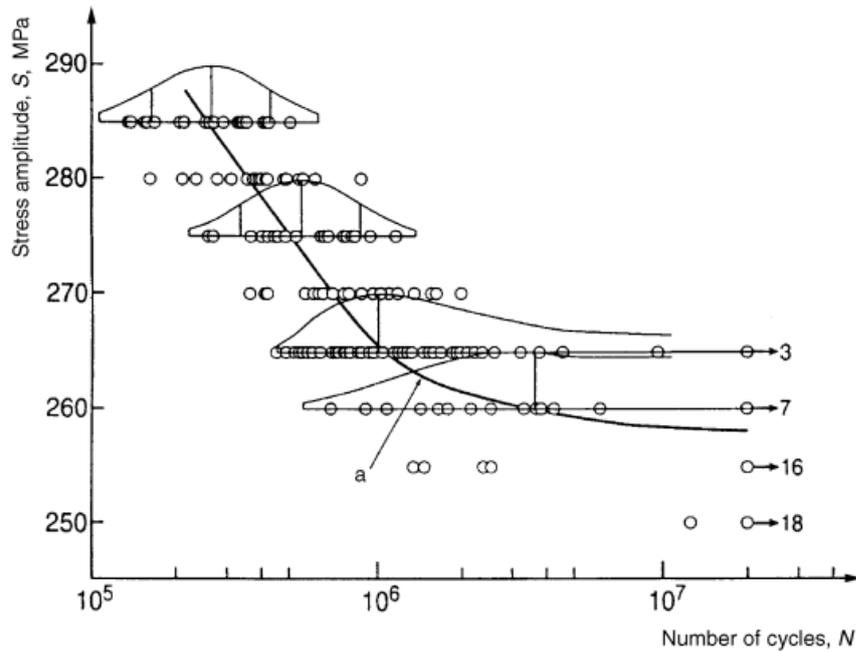


Figura 13 - Distribuição da vida em fadiga para determinadas tensões (ISO12107, 2012)

onde, a variável y é dependente de x , o que significa que o número de ciclos até à falha da estrutura depende da faixa de tensão aplicada, σ_x . Para um determinado período de tensão, o número de ciclos segue uma distribuição normal ao longo do eixo x .

Na Figura 14, apresentam-se exemplos de curvas S-N obtidas segundo a norma ISO12107 (2012), considerando uma probabilidade de falha de 5% e um intervalo de confiança de 75%. Estes exemplos foram retirados do artigo “Probabilistic S-N curves for CFRP retrofitted steel details “ (Mohabeddine, et al., 2021). Neste caso, os autores utilizaram o modelo probabilístico ISO12107, para avaliar o comportamento à fadiga de detalhes estruturais reforçados com CFRP.

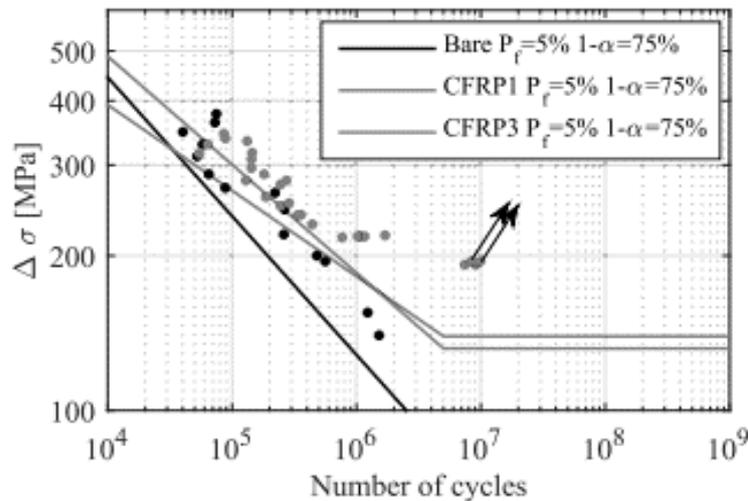


Figura 14 - Curva P-S-N obtida usando a norma ISO12107 (Mohabeddine, et al., 2021)

2.4.3 ASTM E739

A ASTM E739 é uma norma para análise estatística da curva S-N linearizada e para a curva ε -N, cobrindo apenas estas duas curvas que podem ser razoavelmente aproximadas por uma linha reta, em escala logarítmica. Dado que a curva S-N e a relação ε -N é aproximada por uma linha reta apenas dentro de um intervalo específico de tensão ou deformação, visto que a distribuição real da vida à fadiga é desconhecida, não é recomendado que essa curva seja extrapolada fora do intervalo de teste ou estimada abaixo do quinto percentil ($P=0.05$).

Para o caso em que a vida à fadiga pertence a uma amostra aleatória, para todo o intervalo de x usado no teste, a relação S-N ou ε -N é descrita pelo modelo linear $Y = A + BX$. Assim sendo, a análise estatística seguindo esta norma começa com a estimativa dos parâmetros do modelo linear A e B da seguinte forma:

$$\hat{A} = \bar{Y} - \hat{B}\bar{X} \quad \text{Eq. 2.20}$$

$$\hat{B} = \frac{\sum_{i=1}^k (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sum_{i=1}^k (X_i - \bar{X})^2} \quad \text{Eq. 2.21}$$

onde, o símbolo “^” indica estimativa e o símbolo “-” indica a média.

A expressão recomendada para o cálculo da estimativa da variância da distribuição normal é a seguinte:

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{\sum_{i=1}^k (Y_i - \bar{Y})^2}{k - 2} \quad \text{Eq. 2.22}$$

onde, $\hat{Y}_i = \hat{A} + \hat{B}X_i$ e “K-2” é o número de graus de liberdade estatísticos de uma amostra de tamanho k . Para entalhes e juntas é geralmente razoável uma suposição constante da variância, desde que o número de ciclos até à falha não ultrapasse os 10^6 .

Os estimadores \hat{A} e \hat{B} são normalmente distribuídos com os valores esperados A e B , respetivamente, mediante o intervalo de confiança estabelecido. Os intervalos de confiança hiperbólicos da curva mediana S-N podem ser cálculos de acordo com:

$$\hat{A} + \hat{B}X \pm \sqrt{2F_p} \hat{\sigma} \left[\frac{1}{K} + \frac{(X_i - \bar{X})^2}{\sum_{i=1}^k (X_i - \bar{X})^2} \right]^{0.5} \quad \text{Eq. 2.23}$$

onde, F_p é dada em função de duas entradas de graus de liberdade estatísticos $n_1 = 1$ e $n_2 = k - 2$ e pelo intervalo de confiança definido.

Os intervalos de confiança superiores a aproximadamente 0.95 não são recomendados, visto que a relação mediana S-N ou ε -N é apenas aproximada por uma reta linear dentro de um intervalo específico de tensão ou deformação.

Ao realizar o teste para avaliar a adequação do modelo linear, se o programa de testes for planeado de forma que haja mais de um valor observado de Y em alguns dos níveis x_i em que $i \geq 3$, então um teste estatístico para a linearidade pode ser feito com base na distribuição F da Tabela 2 do ASTM E39-91 (2009).

Supondo que os testes de fadiga são conduzidos em “ l ” níveis diferentes de X e que os valores replicados m_i são observados em cada X_i , então a hipótese de linearidade é rejeitada quando o valor calculado usando a Equação 2.24 excede o F_p .

$$\frac{\sum_{i=1}^l m_i (\widehat{Y}_i - \bar{Y}_l)^2 / (l - 2)}{\sum_{i=1}^l \sum_{j=1}^{m_i} (\widehat{Y}_{ij} - \bar{Y}_l)^2 / (k - l)} \quad \text{Eq. 2.24}$$

2.4.4 LEI DE BASQUIN BASEADA NA DISTRIBUIÇÃO DE WEIBULL

Ao contrário das normas ISO12107 (2012) e ASTM E739 (2015), que utilizam uma relação linear (lei de Basquin) baseada numa distribuição normal, existe uma alternativa em que a curva S-N pode ser definida por modelos de regressão linear (lei de Basquin) com base na distribuição estatística de dois parâmetros de Weibull. Parâmetros estes que podem ser estimados através do:

- Método de máxima verossimilhança (MLM);
- Método dos mínimos quadrados lineares (LSM);
- Método dos mínimos quadrados lineares ponderados (WLSM); ou
- Método dos momentos (MM).

A distribuição de Weibull é a distribuição mais recomendada para correlacionar dados de fadiga enviesados. A função de distribuição cumulativa (CDF) da distribuição de Weibull de dois parâmetros é dada pela Equação 2.25.

$$P(N_{norm}) = 1 - e^{-\left(\frac{N_{norm}}{\alpha w}\right)^{\beta w}} \quad \text{Eq. 2.25}$$

onde,

N_{norm} – Número normalizado de ciclos;

αw – Parâmetro de escala de Weibull; e,

β – Parâmetro de forma de Weibull;

Com,

$$N_{norm} = \frac{N_f}{\bar{N}} \quad \text{Eq. 2.26}$$

onde, \bar{N} é o número estimado de ciclos até a falha obtido usando a curva S-N média.

Ao alterar o valor do parâmetro de forma “ β ”, as curvas da densidade de probabilidade podem-se alongar ou comprimir horizontalmente. Se “ β ” estiver entre 3 e 4, a distribuição de Weibull tende a aproximar-se da distribuição normal, e quando “ β ” tende para infinito, a distribuição aproxima-se da distribuição Gumbel (Haghighi, 2020). Na Figura 15 está ilustrado a influência do parâmetro de forma.

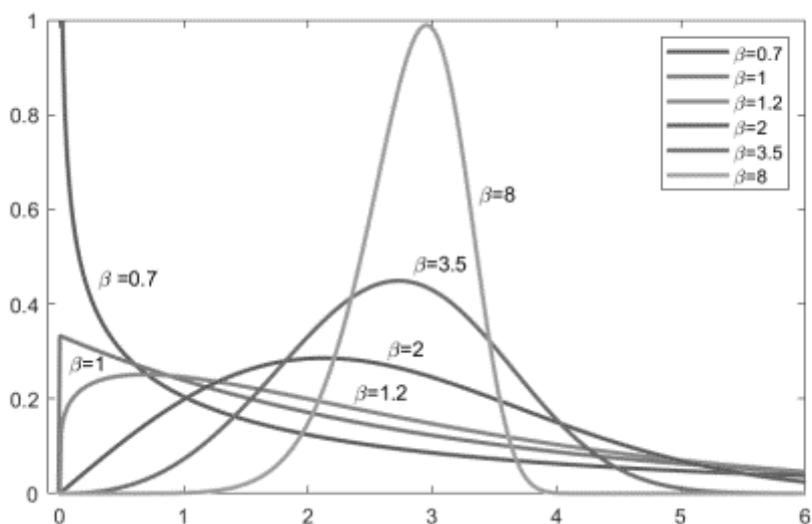


Figura 15 - Representação da curva de probabilidade dependente do fator de forma (Haghighi, 2020)

Na Figura 16 é apresentado um exemplo de curvas S-N obtidas segundo a distribuição de Weibull de dois parâmetros, considerando uma probabilidade de falha de 5% e um intervalo de confiança de 75%. Este exemplo foi retirado do artigo “*Probabilistic S-N curves for CFRP retrofitted steel details*” (Mohabeddine, et al., 2021). Neste caso, os autores utilizaram a distribuição de Weibull de dois parâmetros para avaliar o comportamento à fadiga de detalhes estruturais reforçados com CFRP.

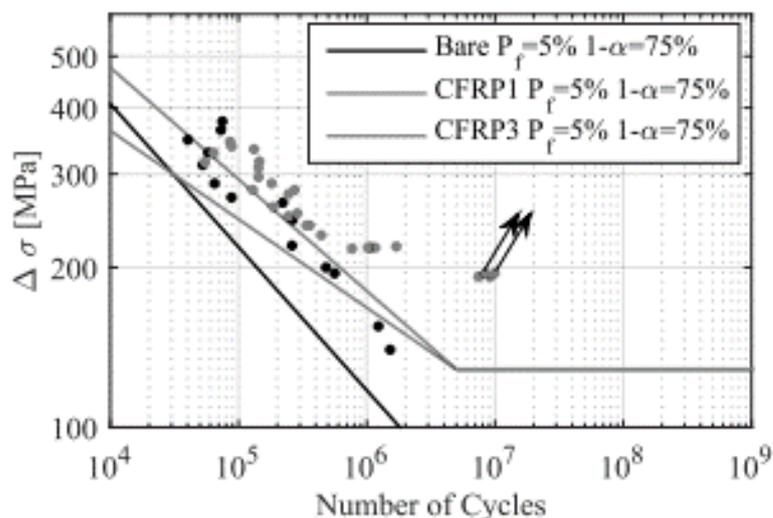


Figura 16 - Curva P-S-N obtida usando a distribuição de Weibull de dois parâmetros

2.4.4.1 Método de máxima verossimilhança (MLM);

Este método de estimação é bastante popular dentro da comunidade científica, uma vez que é versátil e confiável. Quando aplicada neste enquadramento origina a equação 2.27 de verossimilhança da distribuição Weibull (Correia & Veljković, 2022):

$$L(\alpha w, \beta w | N) = \prod_{i=1}^n f(N_i | \alpha w, \beta w) = \prod_{i=1}^n \left[\frac{\beta w}{\alpha w \beta w} N_i^{\beta w - 1} \exp \left\{ - \left(\frac{N_i}{\alpha w} \right)^{\beta w} \right\} \right] \quad \text{Eq. 2.27}$$

2.4.4.2 Método dos mínimos quadrados lineares (LSM);

Segundo Correia & Veljković (2022), este método segue a sequência que se descreve. Em primeiro lugar, o logaritmo permite estabelecer um modelo linear em que $X = \ln N_i$ e $Y = \ln(-\ln(1 - P(N_i)))$.

$$\ln(-\ln(1 - P(N_i))) = \alpha w \ln(N_i) - \alpha w \ln(\beta w) \quad \text{Eq. 2.28}$$

Em segundo, a otimização do método aplicando a equação 2.29.

$$\min QQ = \sum_{i=1}^n [Y_i - (\alpha w X_i - \alpha w \ln \beta w)]^2 \quad \text{Eq. 2.29}$$

Por último, a estimação dos parâmetros de Weibull é realizada com as derivadas parciais de QQ, apresentadas nas Equações 2.30 e 2.31.

$$\alpha w = \frac{n \sum_{i=1}^n X_i Y_i - \sum_{i=1}^n X_i \sum_{i=1}^n Y_i}{\sum_{i=1}^n X_i^2 - (\sum_{i=1}^n X_i)^2} \quad \text{Eq. 2.30}$$

$$\beta w = \exp \left(\frac{\sum_{i=1}^n Y_i - \alpha w \sum_{i=1}^n X_i}{n \alpha w} \right) \quad \text{Eq. 2.31}$$

2.4.4.3 Método dos mínimos quadrados lineares ponderados (WLSM);

O método de estimação de mínimos quadrados lineares ponderados atribui diferentes relevâncias para cada elemento do conjunto de dados. A aproximação de pesos, W_i , é modelado com uma função polinomial (Eq. 2.32) que depende dos valores estimados da função probabilidade acumulada $P(N_i)$ (Correia, 2022).

$$W_i = -0.076 + 3.610P(N_i) - 6.867P(N_i)^2 + 13.54P(N_i)^3 - 9.231P(N_i)^4 \quad \text{Eq. 2.32}$$

O método de otimização segue a mesma estratégia do método linear dos mínimos quadrados apresentado anteriormente. Neste caso, os valores dos parâmetros de Weibull são obtidos pelas Equações 2.23 e 2.24.

$$\alpha w = \frac{\sum_{i=1}^n W_i n \sum_{i=1}^n W_i X_i Y_i - \sum_{i=1}^n W_i X_i \sum_{i=1}^n W_i Y_i}{\sum_{i=1}^n W_i \sum_{i=1}^n W_i X_i^2 - (\sum_{i=1}^n W_i X_i)^2} \quad \text{Eq. 2.33}$$

$$\beta w = \exp \left(\frac{\sum_{i=1}^n W_i Y_i - \alpha w \sum_{i=1}^n W_i X_i}{\alpha w \sum_{i=1}^n W_i} \right) \quad \text{Eq. 2.34}$$

2.4.4.4 Método dos momentos (MM)

Segundo Correia & Veljković (2022), o método dos momentos é um dos métodos de estimação mais antigos e, de acordo com este, a estimativa dos parâmetros de distribuição depende de momentos de amostragem correspondentes aos dados experimentais. Os momentos de amostragem são determinados usando a Equação 2.35.

$$u_k = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n N_i^k \quad \text{Eq. 2.35}$$

Para N como variável independente e identicamente distribuída, os dois primeiros momentos da população ($M1$, $M2$) são suficientes para estimar os parâmetros de distribuição Weibull e podem ser calculados através das Equações 2.36 e 2.37.

$$M1 = \alpha w \Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta w}\right) \quad \text{Eq. 2.36}$$

$$M2 = \alpha w^2 \Gamma\left(1 + \frac{2}{\beta w}\right) \quad \text{Eq. 2.37}$$

2.4.5 MODELO CASTILLO & FERNÁNDEZ-CANTELI

Castillo & Fernández-Canteli (2001) propuseram um modelo probabilístico baseado nas distribuições de Weibull ou Gumbel para níveis de tensão constantes e variáveis, sendo recomendado para regime de ciclo médio a alto, apresentando a capacidade de capturar bem as transições entre fadiga de baixo e alto ciclo. A principal diferença desta abordagem em relação à distribuição de Weibull anteriormente apresentada são os parâmetros considerados, uma vez que Castillo & Fernández-Canteli, além dos parâmetros de escala e de forma, apresentam um parâmetro de localização. A função de distribuição de probabilidade acumulada do modelo CFC é dada pela Equação 2.38.

$$F(\log N_f; \log \Delta \sigma) = p = 1 - \exp \left\{ - \left[\frac{(\log N_f - B)(\log \Delta \sigma - C) - \lambda}{\delta} \right]^\beta \right\} \quad \text{Eq. 2.38}$$

Com $(\log N - B)(\log \Delta \sigma - C) \geq \lambda$, “ p ” é a probabilidade de falha.

Os parâmetros deste modelo são:

B – Valor limite da vida útil ($\log N$);

C – Limite de resistência do parâmetro de dano ($\log \Delta \sigma$);

δ – Parâmetro de escala;

β – Parâmetro de forma; e

λ - Parâmetro de localização.

Para estimar os parâmetros B e C é utilizado o método dos mínimos quadrados restritos, usando-se o método de máxima verossimilhança para os avaliar parâmetros β , λ e δ .

Relativamente ao parâmetro de dano, este pode ser baseado nas formulações de tensão ou de deformação, no trabalho plástico ou na densidade de energia de deformação. Para cada parâmetro de dano, o campo probabilístico é apresentado usando curvas de percentil correspondentes para probabilidades de falha de 1%, 5%, 50%, 95% e 99%, representadas na Figura 17 em escala logarítmica.

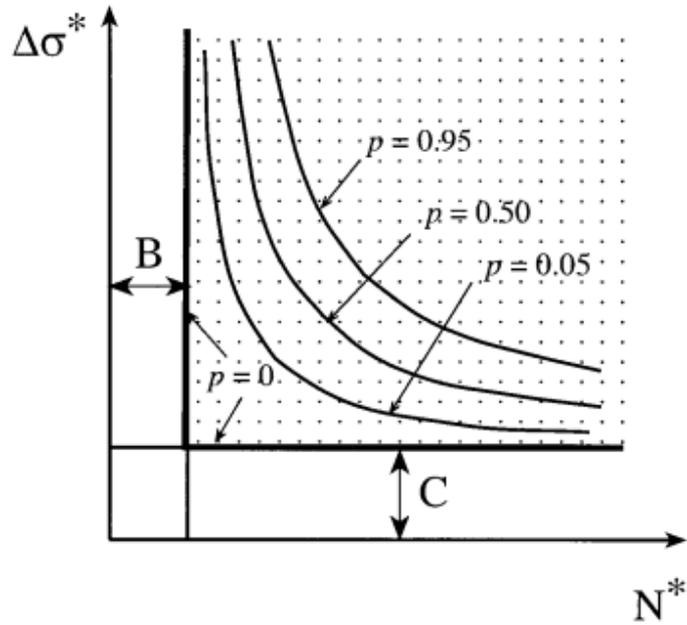


Figura 17 - Curvas de Percentil

Para obter uma estimativa da curva probabilística S-N pode ser usada a Equação 2.39.

$$\log(\Delta\sigma/\Delta\sigma_0) = \left(\frac{\lambda + \delta(-\log(1 - P)^{1/\beta})}{\log(N/N_0)} \right) \quad \text{Eq. 2.39}$$

com, $0 \leq p \leq 1$

Na Figura 18 está um exemplo de curvas S-N obtidas segundo o modelo CFC, considerando uma probabilidade de falha de 5% e um intervalo de confiança de 75%. A figura foi retirada do artigo “Probabilistic S-N curves for CFRP retrofitted steel details” (Mohabeddine, et al., 2021). Neste caso, os autores utilizaram o modelo probabilístico CFC, para avaliar o comportamento à fadiga de detalhes estruturais reforçados com CFRP.

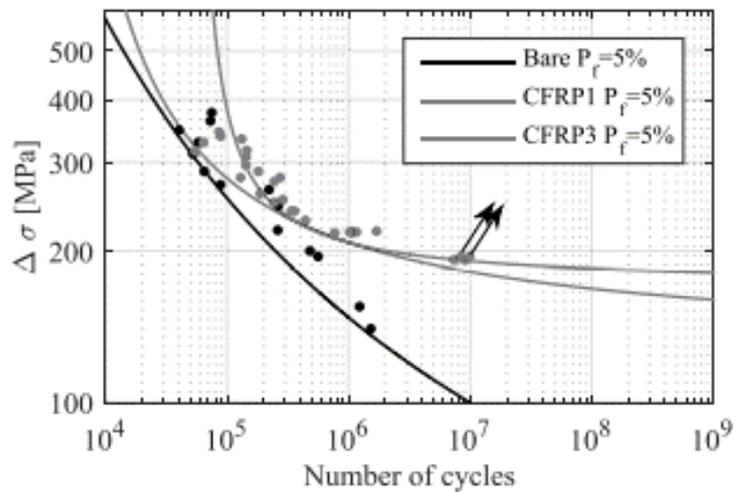


Figura 18 - Curva P-S-N obtida usando o modelo CFC

2.4.6 MODELAÇÃO PROBABILÍSTICA BASEADA NA INFERÊNCIA BAYESIANA

De acordo com a modelação Bayesiana, os parâmetros dentro dos modelos são considerados variáveis aleatórias e, portanto, possuem distribuições de probabilidade conhecidas com distribuições prévias. Dois tipos de abordagem bastantes distintos que seguem esta filosofia são a distribuição Bayesiana hierárquica e a distribuição Bayesiana empírica.

Comparando a modelação Bayesiana empírica, para o qual a distribuição prévia é fixada antes de quaisquer dados serem observados, com a modelação Bayesiana hierárquica, esta última oferece muitas vantagens. A modelação Bayesiana empírica falha em considerar o erro de estimação dos hiperparâmetros e também não indica como incorporar o erro de estimação dos hiperparâmetros na análise por si só, enquanto na modelação Bayesiana hierárquica a análise incorpora tais erros automaticamente. Além disso a teoria empírica Bayesiana requer a resolução de equações de verossimilhança, enquanto a abordagem Bayesiana hierárquica requer integração numérica, por exemplo, através de métodos como do Markov Chain Monte Carlo (MCMC).

A modelação Bayesiana baseada em MCMC pode estimar parâmetros de acordo com os dados dos testes e obter os resultados de probabilidade de resistência à fadiga e da vida útil de fadiga.

Como resultado desta diferença entre abordagens, a abordagem hierárquica é mais comum e mais utilizada para construir modelos complexos especificando uma série de distribuições condicionais mais simples. Depois de ignorar a constante de normalização $f(y)$, o modelo bayesiano hierárquico pode ser definido pela Equação 2.40.

$$f(v, \theta|y) \propto f(y|\theta, v)f(\theta|v)f(v) \quad \text{Eq. 2.40}$$

onde,

$f(y|\theta, v)$ – Primeiro estágio de verossimilhança;

$f(\theta|v)$ – Segundo estágio de densidade;

θ e v – Parâmetros e Hiperparâmetros de verossimilhança de distribuições anteriores, respetivamente; e

$f(\cdot)$ – Funções de distribuição.

Segundo Liu, Lu, & Hoogenboom, no manuscrito “*Hierarchical Bayesian fatigue data analysis*” publicado em 2017, através da modelação Bayesiana é possível estimar as curvas S-N. Se o erro aleatório for levado em consideração a equação da relação de Basquin, $N_i - S_i$, pode ser expressa da seguinte forma:

$$N_i = AS_i^{-B} \varepsilon_i \quad \text{Eq. 2.41}$$

onde, ε_i representa a aleatoriedade no nível de tensão S_i , compreendendo o efeito aleatório dos materiais e o erro aleatório nas observações. Com o objetivo de ter uma transformação logarítmica, a Equação 2.41 transforma-se na equação 2.42.

$$\log_{10}N_i = \log_{10}A - B\log_{10}S_i + \delta_i \quad \text{Eq. 2.42}$$

As variáveis aleatórias δ_i na Equação 2.42 podem ser de uma distribuição normal, de uma distribuição de Weibull, ou de uma distribuição seguindo a mistura Gaussiana. Como exemplo, para aplicar o modelo Bayesiano hierárquico é utilizada uma distribuição normal, assumido que $\delta_i = \sigma_i e_i$, sendo que σ_i é o

desvio padrão da vida à fadiga em escala logarítmica sob o nível de tensão S_i e $e_i \sim \mathcal{N}(0,1)$. Seguindo a sugestão proposta e publicada no manuscrito “*A Bayesian analysis of fatigue data*” (Guida & Penta, 2010), $u_i = \log_{10} S_i$ e $\bar{u} = (1/n) \sum_i^n \log_{10} S_i$, então:

$$y_i = \alpha + \beta x_i + \mathcal{N}(0, \sigma_i^2) \tag{Eq. 2.43}$$

onde, $y_i = \log_{10} N_i$, $x_i = u_i - \bar{u}$, $\alpha = \log_{10} A - B\bar{u}$ e $\beta = -B$. Para a análise estatística é conveniente reescrever a Equação 2.43 para uma distribuição normal com média $\mu = \alpha + \beta x_i$ e variância σ_i^2 . A qual pode ser expressa pela Equação 2.44.

$$y_{ij} \sim \mathcal{N}(\alpha + \beta x_i, \sigma_i^2) \tag{Eq. 2.44}$$

onde, y_{ij} é a observação número j do nível de tensão número i .

O gráfico acíclico direcionado (DAG) da estrutura hierárquica utilizado neste modelo está demonstrado na Figura 19. Nesta representação, as variáveis são dispostas numa série de níveis, com os dados localizados centralmente no interior e os hiperparâmetros localizados externamente. As setas representam dependências de variáveis que são consideradas independentes em cada nível. Os dados conhecidos são colocados na caixa e as variáveis desconhecidas são colocadas nos círculos.

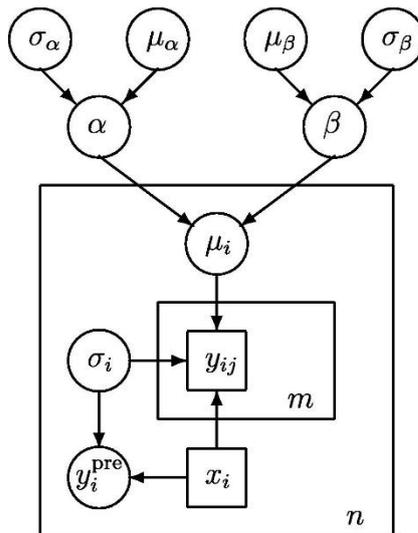


Figura 19 - Gráfico acíclico direcionado (DAG)

2.4.7 AASHTO

AASHTO é uma norma americana criada para avaliar a falha por fadiga de estruturas metálicas. Na avaliação da fadiga esta norma divide-se em oito detalhes construtivos (A, B, B', C, C', D, E, E') que se encontram em ordem crescente de resistência à fadiga (como exemplificado na Figura 20). Cada curva consiste numa resistência limitada por uma reta de inclinação variável seguida por uma linha reta horizontal, representando o limite de fadiga de amplitude constante. Essas curvas de limite de resistência são estabelecidas por meio de testes e representam uma probabilidade de 5% de falha por fadiga. A região de vida infinita representada pelo limite não é baseada estatisticamente devido a um número menor de testes de vida longa, embora a combinação de carga fadiga tenha sido estabelecida para fornecer um comportamento seguro para vida infinita (AASHTO, 2005).

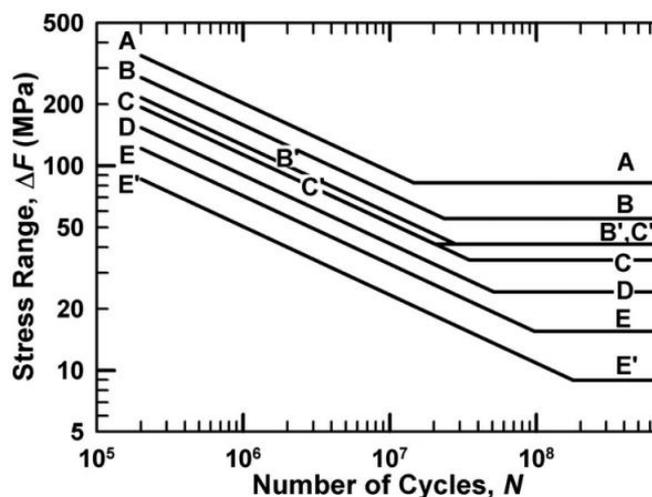


Figura 20 - Resistência nominal à fadiga das categorias de detalhes especificadas na AASHTO LRFD (AASHTO, 2005)

Noutro código de projeto americano, AREMA (2014), a categoria D é sugerida para ligações rebitadas, possuindo também esta norma as mesmas categorias de detalhe da AASHTO (2005).

A categoria de detalhe D é uma transição entre detalhes influenciados por descontinuidades (A a C') e aqueles dominados pela geometria e concentração de tensões (D, E e E'), incluindo detalhes como furos abertos em perfis de aço e certos detalhes de conexão galvanizados e aparafusados. É proposto para conexões com início de fissura na seção transversal líquida, apresentando uma resistência de aproximadamente 71 MPa para os 2 milhões de ciclos (definição análoga ao Eurocódigo).

2.5 CRITÉRIOS DE PROJETO À FADIGA

2.5.1 INTRODUÇÃO

As estruturas de Engenharia Civil, mais especificamente as pontes, estão sujeitas a ciclos de carga variáveis durante a sua vida útil. Conseqüentemente, os componentes estruturais dessas estruturas podem acumular danos por fadiga, interferindo potencialmente no desempenho estrutural. Para poder avaliar este fenómeno é preciso recorrer a certas metodologias apresentadas em códigos de projeto como o Eurocódigo 3 (parte 1-9), Lei de Dano Palmgren-Miner e Curvas S-N de detalhes estruturais, as quais são capazes de estimar a vida útil ou vida de projeto para os detalhes estruturais. Para recorrer a estas metodologias é necessário usar catálogos de curvas S-N pré-existentis obtidas para certas geometrias. Segundo o Eurocódigo as curvas S-N de projeto são organizadas em diferentes categorias, onde cada categoria de detalhe é identificada pela sua gama de tensão a 2 milhões de ciclos.

2.5.2 CURVAS S-N DE PROJETO

Segundo Carlos Souto, José Correia, et al. (2019), as curvas S-N são usadas para a previsão da vida à fadiga de detalhes estruturais sujeitos a carregamentos cíclicos aleatórios. Essas curvas de fadiga são obtidas com base em dados experimentais, permitindo a avaliação de dano à fadiga de estruturas e componentes metálicos, recorrendo à lei de Palmgren-Miner. As curvas S-N, ou também apelidadas de curvas de fadiga, relacionam o intervalo de tensão $\Delta\sigma$ com a vida da fadiga N_F e são expressas numa escala logarítmica. O limite de fadiga de amplitude constante, $\Delta\sigma_D$, refere-se ao nível de tensão abaixo do qual um número infinito de carregamentos pode ser aplicado sem causar falha se em nenhum

momento $\Delta\sigma_D$ for ultrapassado. Nos códigos de projeto, este limite de fadiga é considerado o nível de tensão para o número de ciclos de 5×10^6 . Por outro lado, quando $\Delta\sigma > \Delta\sigma_D$ em algum momento, o limite de fadiga é definido aos 100 milhões de ciclos pelo $\Delta\sigma_L$.

De acordo com as normas EN1993-1-9, as curvas S-N de projeto para carga de amplitude constante são dadas pelas Equações 2.45 e 2.46:

Para $m = 3$ e $N \leq 5 \times 10^6$,

$$\Delta\sigma_r^m \times N_R = \Delta\sigma_c^m \times 2 \times 10^6 \quad \text{Eq. 2.45}$$

$$\Delta\sigma_D = \left(\frac{2}{5}\right)^{\frac{1}{3}} \times \Delta\sigma_c \quad \text{Eq. 2.46}$$

E, dadas pelas Equações 2.47 e 2.48, caso seja carga de amplitude variável:

Para $m = 3$ e $N \leq 5 \times 10^6$,

$$\Delta\sigma_r^m \times N_R = \Delta\sigma_c^m \times 2 \times 10^6 \quad \text{Eq. 2.47}$$

Para $m = 5$ e $5 \times 10^6 \leq N \leq 1 \times 10^8$,

$$\Delta\sigma_r^m \times N_R = \Delta\sigma_D^m \times 5 \times 10^6 \quad \text{Eq. 2.48}$$

$$\Delta\sigma_L = \left(\frac{5}{100}\right)^{\frac{1}{5}} \times \Delta\sigma_D \quad \text{Eq. 2.49}$$

onde:

m – Inclinação inversa da curva S-N;

N_R – Número de ciclos até à falha;

$\Delta\sigma_c$ – Valor de referência da resistência à fadiga com N_c igual a 2 milhões de ciclos;

$\Delta\sigma_D$ – Limite de fadiga para bandas de tensão de amplitude constante com N_D igual a 5 milhões de ciclos; e

$\Delta\sigma_L$ – Limite de fadiga para bandas de tensão com N_l igual a 100 milhões de ciclos;

Na Figura 21, apresenta-se um exemplo de curvas S-N de projeto tirada da norma EN1993-1-9 (2010), na qual contém legenda para alguns dos parâmetros acima referidos.

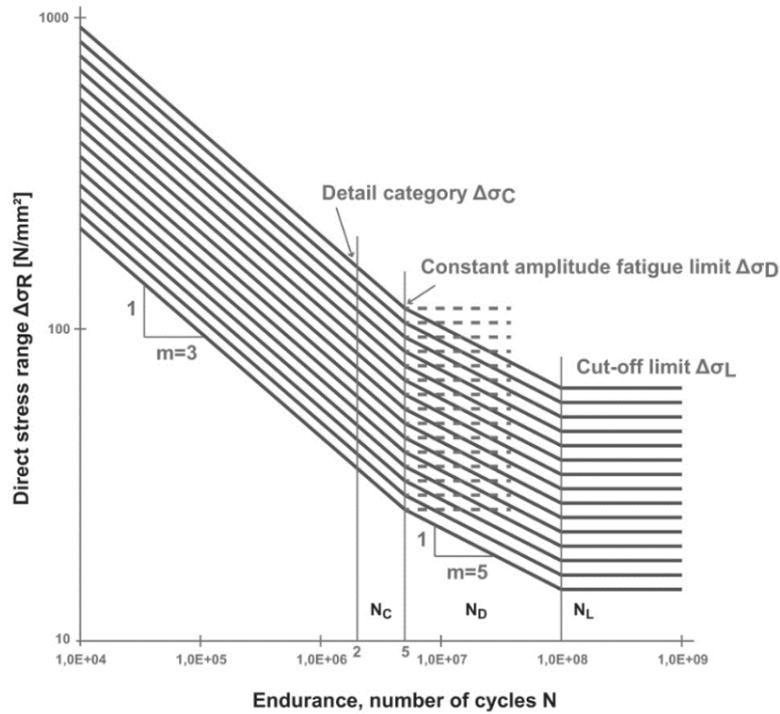


Figura 21 - Curvas S-N de projeto de acordo com a norma (EN 1993-1-9, 2010)

Na Figura 22, são apresentados exemplos de curvas S-N de projeto para o caso da Ponte das Várzeas, tendo sido retiradas da publicação “*Integrated Methodology For Fatigue Life Prediction Of Existing Metallic Railway Bridge*” (Horas, 2021), na qual são comparadas diferentes curvas de projetos obtidas de diferentes metodologias disponíveis na literatura.

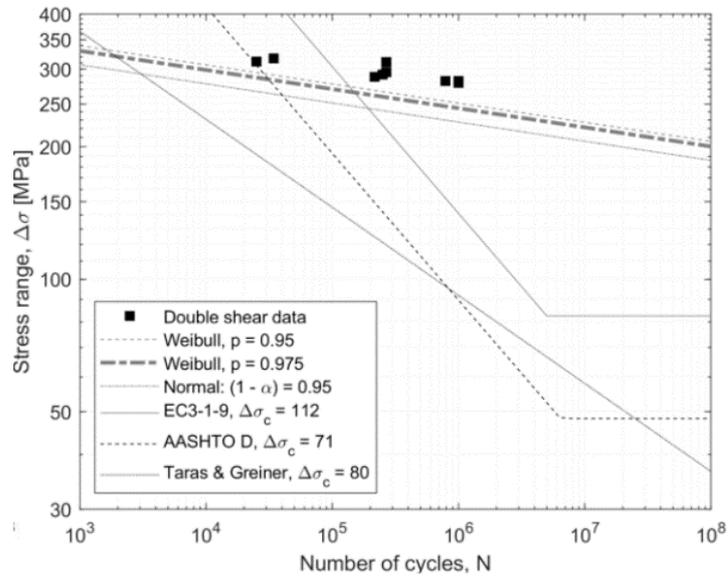


Figura 22 - Comparação de várias curvas de projeto S-N (Horas, 2021)

2.5.3 MÉTODOS DE PROJETO À FADIGA

Segundo o Eurocódigo para avaliar a fadiga de pontes podem ser aplicados dois métodos: i) o método de dano equivalente, mais conhecido como método do coeficiente λ ; e ii) o método de acumulação de dano. De seguida, estes dois métodos são apresentados assim como o conceito de tensão equivalente.

2.5.3.1 Tensões Equivalente

A abordagem das tensões equivalentes é utilizada quando o dano por fadiga é causado por um número de blocos de carregamento com amplitudes constantes, em que estes passam a ser representados por um intervalo de tensão equivalente. Inerentemente, um intervalo de tensão equivalente é um intervalo de amplitude constante, e aplica-se com o mesmo número total de ciclos dos blocos de carregamento ($\sum n_i$), causando por definição o mesmo dano total que todos os ciclos aplicados.

Se por exemplo for assumido uma curva S-N com uma inclinação constante, a expressão para o intervalo de tensão equivalente pode ser a apresentada na Equação 2.50, para qualquer espectro de carga.

$$\Delta\sigma_E = \left[\frac{\sum_{i=1}^n n_i \times \Delta\sigma_i^m}{\sum_{i=1}^n n_i} \right]^{\frac{1}{m}} \quad \text{Eq. 2.50}$$

A gama de tensão equivalente, $\Delta\sigma_E$, depende apenas do espectro de carga de fadiga e da constante de inclinação da curva S-N (m). Assim, conhecer $\Delta\sigma_E$ facilita a escolha direta de uma categoria de detalhe que terá uma resistência à fadiga adequada.

Método do dano equivalente

A verificação da fadiga baseada no método do coeficiente lambda proposto no Eurocódigo adota um conceito de tensão equivalente, onde as tensões obtidas de modelos de carga sugeridos na EN 1991-2 (2006) são modificados com vários fatores lambda (λ) de forma a relacionarem o intervalo de tensão atuante com os 2 milhões de ciclos, $\Delta\sigma_{E2}$. Esta transformação de $\Delta\sigma_E$ para $\Delta\sigma_{E2}$ pode ser facilmente obtida através da Equação 2.51 (EN 1993-2, 2006):

$$\frac{\Delta\sigma_{E2}^m}{2 * 10^6} = \frac{\Delta\sigma_E^m}{N} \quad \text{Eq. 2.51}$$

Com isto, a verificação à fadiga é reduzida a uma comparação direta entre a gama de tensão equivalente a 2 milhões de ciclos e a classe de fadiga (ou resistência à fadiga) do detalhe, como está demonstrado na Equação 2.52, com os fatores parciais omitidos por simplicidade:

$$\Delta\sigma_{E,2} \leq \Delta\sigma_c \quad \text{Eq. 2.52}$$

Desenvolvendo a expressão, o controlo da resistência à fadiga baseia-se no condicionamento inferior ou igual do intervalo de tensão máximo ao intervalo de tensão característico do detalhe. A Equação 2.53 permite verificar a fadiga segundo este método (EN 1993-2, 2006):

$$\gamma_{Ff} \times \lambda \times \phi_2 \times \Delta_{FLM} \leq \frac{\Delta\sigma_c}{\lambda_{mf}} \quad \text{Eq. 2.53}$$

onde:

γ_{Ff} – Fator parcial de segurança para a carga da fadiga;

- λ – Fator equivalente de dano por fadiga relacionado a 2×10^6 ciclos;
 ϕ_2 – Fator de amplificação dinâmico;
 Δ_{FLM} – Intervalo de tensão devido à fadiga do modelo de carga;
 $\Delta\sigma_c$ – Intervalo de tensão de referência da resistência à fadiga;
 λ_{max} – Fator máximo equivalente de dano tendo em conta o limite de fadiga; e
 λ_{mf} - Fator parcial de segurança para a resistência à fadiga.

O valor λ é obtido através da Equação 2.54:

$$\lambda = \lambda_1 \times \lambda_2 \times \lambda_3 \times \lambda_4 \leq \lambda_{max} \quad \text{Eq. 2.54}$$

onde:

- λ_1 – Fator de vão tendo em conta o comprimento do vão e o tipo de estrutura;
 λ_2 – Fator de volume tendo em conta o volume de tráfego;
 λ_3 – Fator de tempo tendo em conta a vida de projeto da ponte; e
 λ_4 – Fator de faixa tendo em conta que existe tráfego em mais do que uma faixa.

2.5.3.2 Método da acumulação de dano

O método de acumulação de dano usando a regra de Palmgren-Miner consiste na relação entre o número de ciclos de tensão (n) e número total de ciclos de tensão até à falha (N). Neste método são utilizadas as curvas S-N que representam a relação entre o intervalo de tensão e o número total de ciclos até à falha, ou seja, um certo detalhe com uma determinada resistência à fadiga (representada por uma curva S-N) falhará após N ciclos de tensão (EN 1993-2, 2006).

$$D = \frac{n}{N} \quad \text{Eq. 2.55}$$

Para uma interpretação simplificada da Equação 2.55, considerando um bloco de carga, tem-se:

$$D = 1 \text{ quando } n = N$$

$$D < 1 \text{ quando } n < N$$

Seguindo o mesmo raciocínio, se o detalhe for submetido a um número i de blocos de carregamento, cada um com tensão de amplitude constante, $\Delta\sigma_i$, repetidos um dado número de vezes, n_i , então o dano acumulado total no detalhe será a soma dos danos causados pelos blocos de carregamento individuais (Equação 2.56).

$$D = \sum_i D_i = \sum_i \frac{n_i}{N_i} = \frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} + \frac{n_3}{N_3} + \frac{n_4}{N_4} \dots + \frac{n_i}{N_i} \quad \text{Eq. 2.56}$$

No anexo A do EN1993-1-9 (CEN, 2010c), são sugeridas várias etapas necessárias para calcular o dano acumulado por fadiga:

1. Após a definição dos cenários de tráfego, determinação dos eventos de carregamento;

2. Cálculo do histórico de tensão ao longo do tempo nos detalhes críticos;
3. Contagem dos ciclos de tensão usando o algoritmo do fluxo de chuva ou do reservatório, definindo a relação entre n_i e respectivo $\Delta\sigma_i$;
4. Identificação da curva S-N aplicável; e
5. Determinação dos danos acumulados.

A contagem dos ciclos de tensão usando o algoritmo do fluxo de chuva baseia-se na redução do espectro da tensão variável a um conjunto equivalente às reversões da tensão simples. Estas reversões são os mínimos e os máximos locais onde a inclinação da tensão muda de sinal.

Para a aplicação deste algoritmo é necessário que um gráfico de tensão vs. o tempo seja girado a 90 graus, de modo que o eixo de tensão seja horizontal e o eixo do tempo seja vertical. Após o gráfico obter esta nova configuração, este é comparado a um telhado, e é com base nesta metáfora que a contagem se inicia. Se a contagem começar do lado positivo (pico), uma gota de chuva imaginária é colocada no telhado mais alto e começa a escorrer pelos telhados. O meio ciclo é contado quando a gota de chuva imaginária cai de um telhado e passa por um vale que é menor que o vale atual de onde a gota caiu. O intervalo do meio ciclo contado é igual ao valor absoluto da diferença entre os valores de tensão onde a gota de chuva começou e terminou. A aplicação deste método está ilustrada nas Figuras 23 e 24 (Souto C. D., Correia, Jesus, & Calçada, 2019):

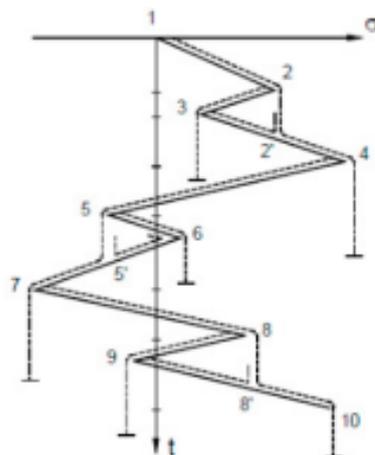


Figura 23 - Histórico de tensão

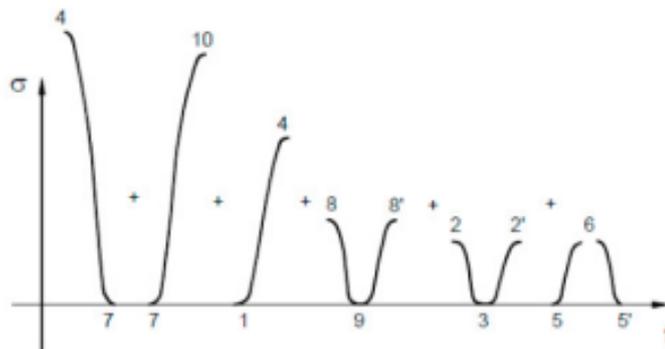
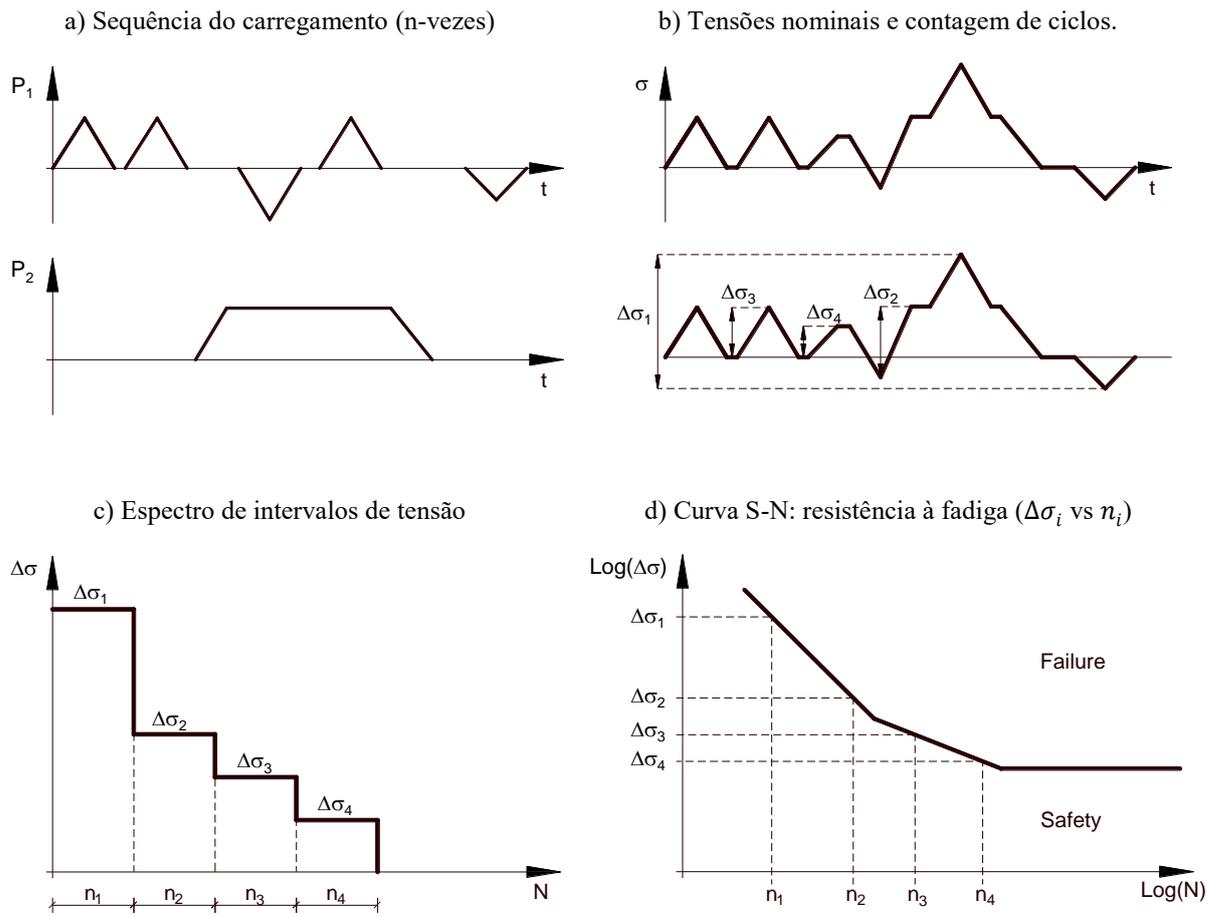


Figura 24 - Histórico de tensões equivalentes em termos de ciclos reversos

O processo de cálculo do dano estrutural apresentado pode ser resumido pela seguinte sequência, ilustrada com a Figura 25 (EN 1993-1-9, 2010).



e) Acumulação do dano

$$\sum \frac{n_i}{N_i} \leq D_L$$

Figura 25 - Processo de cálculo do dano estrutural (EN 1993-1-9, 2010)

3

MODELAÇÃO PROBABILÍSTICA DA RESISTÊNCIA À FADIGA DE LIGAÇÕES REBITADAS

3.1 INTRODUÇÃO

A estrutura metálica analisada neste trabalho é a Ponte das Várzeas, e, portanto, as propriedades do seu material são apresentadas. Para caracterizar as propriedades de um material metálico como é o caso recorreu-se aos seguintes conceitos: composição química; resistência à tração; dureza; resistência à tração monotónica da ligação rebitada; e por fim, à resistência à fadiga da ligação rebitada. Na parte final deste capítulo, são realizadas modelações probabilísticas seguindo a norma ISO12107 (2012), a distribuição de Weibull e o modelo de Castillo & Fernández-Canteli para a definição das curvas S-N de projeto, usando dados experimentais obtidos para uma ligação rebitada de corte duplo concebida com material extraído da Ponte das Várzeas e outros dados similares de várias ligações rebitadas conseguidas com material de várias pontes.

3.2 PROPRIEDADES DO MATERIAL METÁLICO – PONTE VÁRZEAS

3.2.1 COMPOSIÇÃO QUÍMICA

A composição química dos materiais metálicos de elementos estruturais retirados da ponte objeto de estudo foi avaliada com recurso à análise de espectrometria de emissão de faísca, sendo este um método bastante usado para o efeito. A preferência por este método deve-se ao seu rápido tempo de análise e precisão.

Na Tabela 2 são apresentados os valores da composição química considerados comuns para aços de média resistência e ferros pudelados, sendo estes últimos comuns em pontes centenárias rebitadas. Também na Tabela 2, apresentam-se os resultados da composição química para materiais metálicos usados em pontes metálicas antigas portuguesas, incluindo a Ponte das Várzeas. Comparando os dados desta tabela é possível afirmar que o material da Ponte das Várzeas se assemelha à composição química do material da Ponte de Trezói, tendo sido ambas construídas na mesma época, pelo mesmo construtor, pertencendo o seu material à família dos aços macios. A entidade responsável descreveu o material utilizado como um aço St 37-2. Na Tabela 2 está demonstrado o material da Ponte das Várzeas atende ao percentual máximo dos valores das propriedades do aço St 37-2 dados pela norma DIN 17100.

Tabela 2 - Composição química para os aços de média resistência e ferros pudelados (Sousa, 2020)

Material	Período	C (%)	Mn (%)	Si (%)	P (%)	S (%)
Ferro Pudelado	Antes de 1900	Máx. 0.08	0.4	n/a	0.6	0.04
Aços Macios	Depois de 1900	0.02-0.15	0.2-0.5	Variável	0.03-0.06	8.6
Eiffel (PT)	1878	0.81	2.71	0.24	<0.15	<0.15
Luiz I	1886	0.72	2.09	0.34	<0.15	<0.15
Fão	1892	0.09	0.13	0.06	0.14	0.007
Pinhão	1903-1906	0.06	0.34	<0.01	0.04	0.03
Trezói	1956	0.06	0.34	0.03	0.02	0.02
Várzeas	1958	0.04	0.29	0.01	0.024	0.008
St 37-2	-	Máx. 0.17	-	-	Máx. 0.05	Máx. 0.05

Relativamente à Ponte das Várzeas, o estudo sobre a sua composição química foi feito usando uma amostra de um elemento estrutural secundário extraído da estrutura avaliada com recurso à espectrometria de emissão de faíscas, algo que permitiu obter a percentagem de componentes químicos, como apresentado na Tabela 3 (Sousa, 2020).

Tabela 3 - Percentagens da composição química da amostra, (Bruno Sousa, 2020)

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	Co
%	.0378	0.108	.286	.0236	.0083	.0265	.0063	.0458	.0050	.0249
	Cu	Nb	Ti	V	W	Pb	Sn	As	Zr	Bi
%	.0465	.0041	.0010	.0023	.0056	.0062	.0045	.0154	.0023	.0044
	Ca	Ce	Sb	Se	Te	Ta	B	Zn	La	Fe
%	.0006	.0035	.0073	.0035	.0064	.0962	.0018	.0049	<.0003	99.3

3.2.2 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO

A caracterização do comportamento mecânico monotónico através de ensaios de tração, corresponde a uma caracterização essencial que deve ser executada de acordo com as recomendações da norma EN 10002-1 (2006). A dimensão dos provetes foi definida em função do material disponível da Ponte das Várzeas. Para a execução do ensaio é proposto pelo menos 5 repetições para os ensaios de tração. Na Figura 26 está ilustrado a geometria do provete que foi sujeito aos ensaios, onde as medidas estão representadas em milímetros.

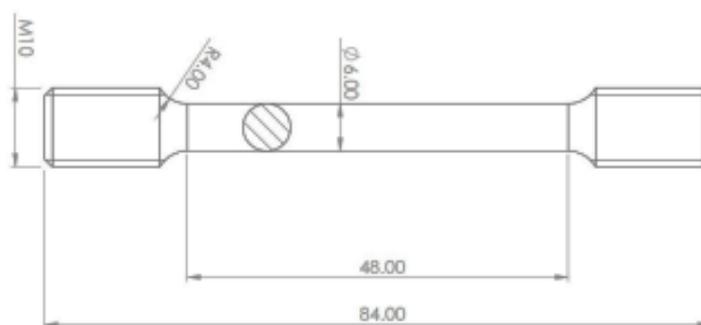


Figura 26 - Geometria do detalhe estrutural (Sousa, 2020)

De acordo com o Bruno Sousa (Sousa, 2020), foram ensaiadas 5 amostras, das quais foram retirados os respetivos resultados e correspondentes propriedades para o material da Ponte das Várzeas, apresentadas na Tabela 4, onde f_u – Tensão de rotura (Mpa); f_y – Tensão de cedência (Mpa); E – Módulo de Young (Gpa); A-Extensão após rotura (%); Z - Coeficiente de estrição (%).

Tabela 4 - Propriedades das amostras do material da Ponte das Várzeas (Sousa, 2020)

	(GPa)	(mm^2)	(MPa)		%	
	E	Área da Secção	$\sigma_{y_{inf}}$	σ_u	A	Z
T1	203	29.90	267	382	-	59
T2	247	29.46	263	353	-	75
T3	204	29.80	253	367	39	56
T4	217	30.19	269	379	35	53
T5	209	29.66	267	366	39	55
Média	216	29.80	264	369	38	59
Desvio Padrão	16.97	0.24	5.74	10.36	1.81	8.00

Na Tabela 5, são apresentados os resultados dos testes monotónicos do material retirado da Ponte das Várzeas e de materiais de outras pontes metálicas portuguesas com objetivo de ser possível efetuar uma comparação das suas propriedades.

Tabela 5 - Comparação das propriedades do material da Ponte das Várzeas e propriedades do material de outras pontes metálicas (Sousa, 2020)

Material	Período	(MPa)		(GPa)	(%)	
		f_y	f_u	E	A	Z
Ferro Pudelado	Antes de 1900	220-280	330-400	170-200	<25	-
Aços Macios	Depois de 1900	250-300	340-450	200-220	25-35	-
Eiffel (PT)	1878	292.38	341.75	193.1	8.14	11.6
Luiz I	1886	302.6	396.6	192.7	21.2	27.18
Fão	1892	219.9	359.33	198.7	23.13	13.06
Pinhão	1903-1906	305.89	361.06	210.68	33.19	70.97
Trezói	1956	398.33	473.33	198.49	23	66.33
Várzeas	1958	264	369	208	38	60

3.2.3 DUREZA

O material retirado da Ponte das Várzeas foi submetido ao teste de dureza de Vickers, de acordo com os procedimentos da norma (NF EN 1090-2, 2018), aplicando 10 Kg de força durante 10 segundos e medindo o respetivo recuo da ponta de diamante na superfície da amostra.

Os valores de dureza podem ser considerados para obter estimativas aproximadas de resistência final do material metálico, usando tabelas convencionais de conversão apenas para ter um valor de referência.

De acordo com (Sousa, 2020) foram realizados ensaios em 5 amostras em que se obteve os resultados apresentados na Tabela 6, onde HV- Dureza de Vickers; L – Longitudinal; T – Transversal.

Tabela 6 - Número da amostra e dureza medida

Número do ensaio	1	2	3	4	5
Localização	L Flange	T Flange	L Web	T Web	L Corner
HV	128	126	124	142	109
Média			.0010		
Cov			Sb		

Os valores da dureza obtidos para o material da Ponte das Várzeas foram comparados com os valores da dureza de Vickers medidos para os materiais de pontes ferroviárias metálicas portuguesas publicados por Jesus et al., (2011); Correia et al., (2008); Figueiredo et al., (2006); Figueiredo et al., (2004); Jorge et al., (2006), sendo todos estes valores apresentados na Tabela 7 de acordo com os procedimentos da norma (NF EN 1090-2, 2018).

Tabela 7 - Comparação dos valores de dureza entre a Ponte das Várzeas e as outras pontes antigas

Material	Direção	Núm. Amostra/ total de ensaios	HV	MPa
Luiz I	Diagonal	3 / 50	161	508
Fão	Diagonal	2 / 22	63	-
Pinhão	Diagonal	3 / 40	108	355
Trezói	Bracing	3 / 40	136	448
Várzeas	Bracing	5 / 15	126	414

3.2.4 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO DA LIGAÇÃO REBITADA

Para avaliar a resistência à tração do material metálico da Ponte das Várzeas, foi executado um ensaio de tração em dois espécimes. As amostras submetidas tinham a geometria de rebites de corte duplo, apresentando-se com dois planos de corte, algo que permite suportar o dobro da força de tração, sendo a probabilidade de falha menor. A geometria destas amostras está ilustrada na Figura 27, onde as medidas do provete estão representadas em milímetros.

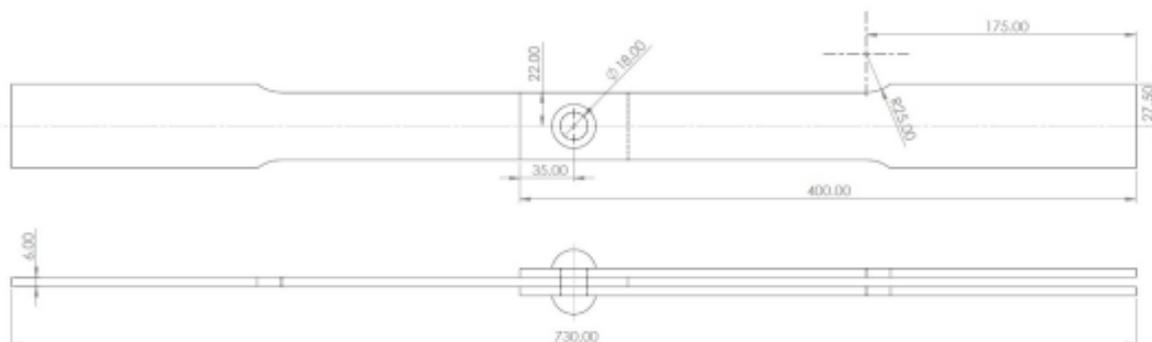


Figura 27 - Geometria de uma amostra da ligação rebitada das pontes das Várzeas (Sousa, 2020)

De acordo com Bruno Sousa (Sousa, 2020), os valores dos resultados deste ensaio para as duas amostras e correspondentes áreas brutas e líquidas da secção estão apresentados na Tabela 8, onde A_{net} - Área considerando um diâmetro fixo de 18mm; A - Percentagem de alongamento na rotura; f_y - Tensão que limita o comportamento elástico; f_u - Tensão de rotura.

Tabela 8 - Lista das amostras usadas nos testes monotónicos (Sousa, 2020)

Núm	Nome	(KN)		(mm^2)		(MPa)		(%)
		F		A_{gross}	A_{net}	A_{net}/A_{gross}	.0265	.0063
1	G4	64	161	272	0.59	303	398	11.6
2	P4	62	150	254	0.59	317	385	10
Média		63	156	263	0.59	310	392	10.8

3.2.5 RESISTÊNCIA À FADIGA DA LIGAÇÃO REBITADA

Para realizar a avaliação da resistência à fadiga da ligação rebitada foi necessário recorrer a vários ensaios de fadiga, sendo estes realizados com uma carga senoidal cíclica aplicada a 3Hz. De acordo com Bruno Sousa (Sousa, 2020), o procedimento destes ensaios é descrito de seguida: primeiro teste de fadiga foi realizado com uma carga máxima aplicada aproximadamente a 85% do valor final da resistência à tração monotónica. Outro teste foi realizado no mesmo intervalo de carga dando um valor similar de número de ciclos. Em seguida foram ensaiados 3 testes com intervalos de carga maior, por causa dos resultados distintos obtidos. Com um intervalo de carga menor que o primeiro, o “run-out” foi alcançado para 1 milhão de ciclos para ambos os testes.

Cada amostra de ligação rebitada por duplo corte foi medida na placa do meio na secção bruta para calcular a respetiva área líquida de secção, pois esta é considerada a secção crítica onde ocorre a falha. Cada faixa de tensão líquida foi calculada de acordo com cada área líquida da amostra para preservar adequadamente o valor real do intervalo de tensão.

Os resultados e propriedades das amostras obtidos por Bruno Sousa (Sousa, 2020) através deste procedimento são apresentados nas Tabelas 9 a 11.

Tabela 9 - Área medida para cada amostra (Sousa, 2020)

Núm	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Nome	B1	B4	F4	E2	N4	D1	I3	G1	H4
A_{gross} (mm ²)	264	267.79	263.4	268.4	267.79	261.6	264	272.8	267.79
A_{net} (mm ²)	156	157.99	155.4	158.6	157.99	153.6	156	161.2	157.99

Tabela 10 - Força aplicada em cada amostra e respetiva tensão (Sousa, 2020)

Núm	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Nome	B1	B4	F4	E2	N4	D1	I3	G1	H4
F_{min} (KN)	6.3	6.3	7.2	7.1	6.8	5.9	6	6.6	6.3
F_{max} (KN)	54.2	54.2	59.3	59.2	58.7	51.5	51.9	56.7	53.2
F_{med} (KN)	23.95	23.95	26.05	26.05	25.95	22.8	22.95	25.05	23.45
ΔF (KN)	47.9	47.9	52.1	52.1	51.9	45.6	45.9	50.1	46.9
$\Delta\sigma_{net}$ (MPa)	307	303	335	328	328	297	294	311	297
$\Delta\sigma_{gross}$ (MPa)	181	179	198	194	194	174	174	185	175

Tabela 11 - Resultados da vida da fadiga dos testes experimentais (Sousa, 2020)

Núm	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Nome	B1	B4	F4	E2	N4	D1	I3	G1	H4
R	0.116	0.116	0.121	0.120	0.116	0.115	0.116	0.116	0.118
$\Delta\sigma_{net}$ (MPa)	292	288	318	312	312	282	280	295	282
N	250030	216540	34440	268660	25110	1 M	1 M	267663	786602

As variáveis apresentadas na Tabela 11 têm o significado seguinte:

$\Delta\sigma_{net}$ – Valor normalizado (usando a equação de normalização de razão nula de Taras e Greiner) da faixa de tensão na secção líquida de cada amostra;

R – Razão de tensão aplicada; e,

N – Número de ciclos até à falha.

Os resultados da vida da fadiga dos testes experimentais (Tabela 11), serão utilizados como dados para obter as curvas de projeto.

3.3 MODELAÇÃO PROBABILÍSTICA DA LIGAÇÃO REBITADA EM ESTUDO

3.3.1 ANÁLISE DE REGRESSÃO

Para a modelação probabilística à fadiga da ligação rebitada em estudo foi necessário recorrer a análise de regressões para obter curvas de fadiga. No presente caso prático foram adotadas duas diferentes análises de regressão. Primeiramente, foi utilizada uma regressão linear clássica entre as variáveis e em segundo lugar uma regressão linear ortogonal. Em cada uma destas análises será também utilizada duas diferentes distribuições, a distribuição normal seguindo a norma ISO12107 (2012) e a distribuição de Weibull. Na Figura 28 é exemplificado o caso em que se assume uma distribuição normal (2012) seguindo uma regressão linear.

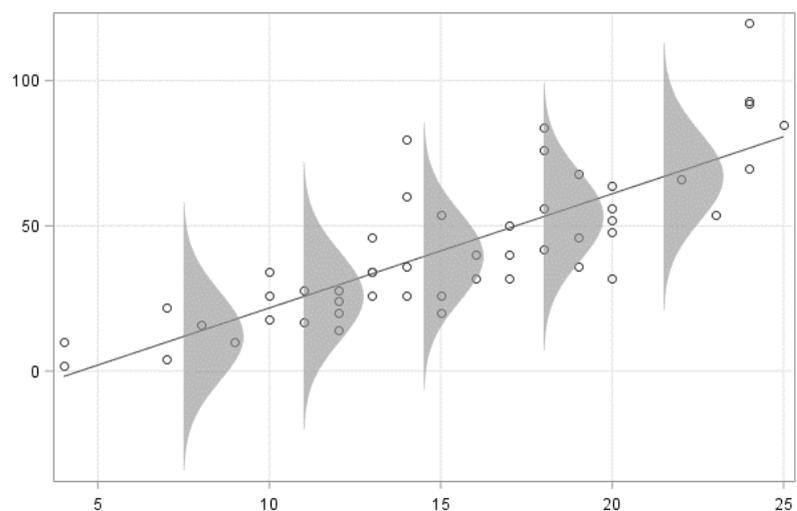


Figura 28 - Regressão linear seguindo uma distribuição normal (Wicklín, 2015)

3.3.1.1 Regressão Linear

A regressão linear é um método que procura encontrar tendência nos dados, tentando linearizar as variáveis. Num gráfico com um eixo X e um eixo Y, a variável X é chamada de variável independente e a variável Y é chamada de variável dependente. O que a regressão linear simples faz é traçar a reta em que a variável independente X vai contra a variável dependente Y. Como o nome indica, a regressão linear entre duas variáveis pode ser descrita por uma linha reta como está exemplificado na Figura 29.

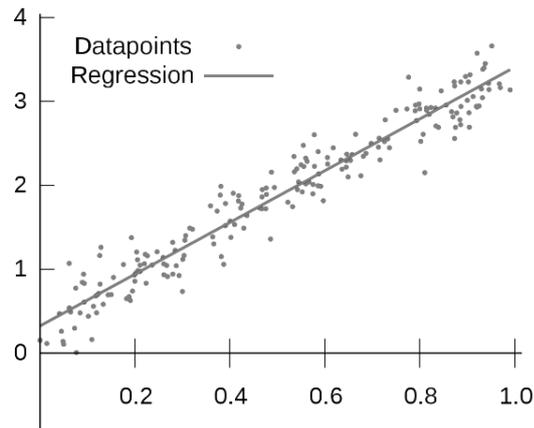


Figura 29 - Exemplo de uma linha obtida por regressão linear (Wikipédia, 2019)

A Regressão linear também é caracterizada pela assimetria provocada entre as variáveis, e nas seguintes figuras estão exemplificados casos em que o modelo tenta minimizar as distâncias verticais, em y, (Figura 30) e por outro lado tenta minimizar distâncias horizontais, em x (Figura 31).

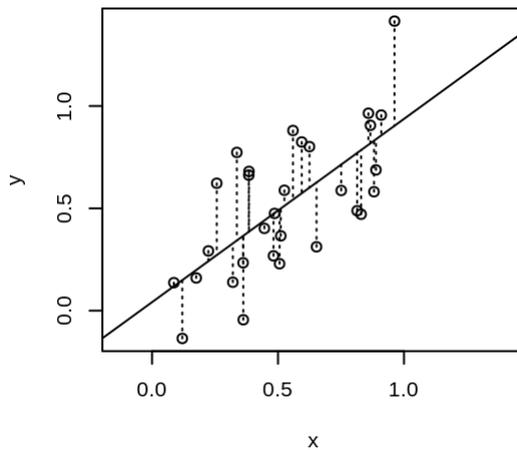


Figura 30 – Modelo que procura minimizar distâncias verticais (Long & Teetor, 2019)

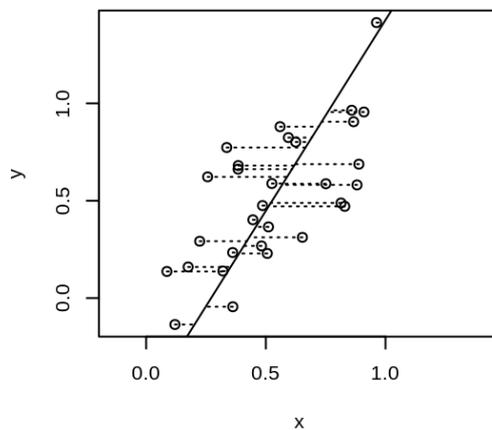


Figura 31 - Modelo que procura minimizar distâncias horizontais (Long & Teetor, 2019)

Determinar a equação que define a relação entre os dados através da regressão linear é um passo importante para se poder fazer previsões. Seguindo a filosofia apresentada, a equação para definir uma função linear tem a forma de $Y = A + bX$, na qual Y é a variável dependente e X a variável independente, b é a inclinação da linha e a é a interceção da linha como eixo y . Para definir os termos a e b e obter a função linear é necessário utilizar as Equações 3.1 e 3.2.

$$a = \frac{(\sum y)(\sum x^2) - (\sum x)(\sum xy)}{n(\sum x^2) - (\sum x)^2} \quad \text{Eq. 3.1}$$

$$b = \frac{n(\sum xy) - (\sum x)(\sum y)}{n(\sum x^2) - (\sum x)^2} \quad \text{Eq. 3.2}$$

Na regressão linear clássica para minimizar a soma dos erros quadrados considera-se a Equação 3.3.

$$E_{CLS} = \sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - bx_i - a)^2 \quad \text{Eq. 3.3}$$

Na Equação 3.3, $\varepsilon_i = y_i - Y_i = (y_i - bx_i - a)$ é o desvio vertical do ponto para a linha (Calzada & Scariano, 2003), conforme está representado na Figura 32.

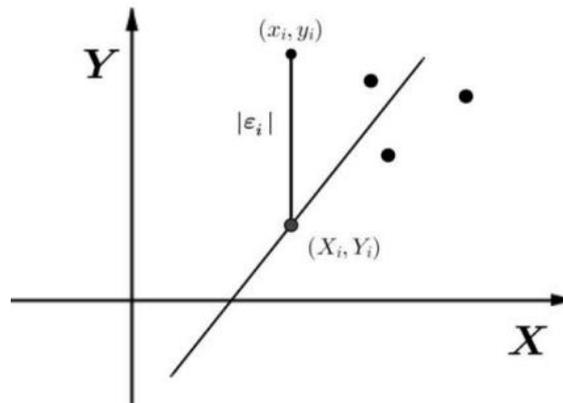


Figura 32 - Regressão clássica dos mínimos quadrados

3.3.1.2 Regressão Ortogonal

Ao contrário da regressão linear simples, anteriormente abordada, a regressão ortogonal é um modelo que relaciona as variáveis X e Y de forma simétrica. Seguindo este modelo as distâncias minimizadas são as distâncias ortogonais dos pontos dos dados até à linha da regressão. Como se trata de uma situação simétrica se as variáveis forem invertidas, as distâncias minimizadas não serão alteradas. Na Figura 33, está apresentado um exemplo deste modelo.

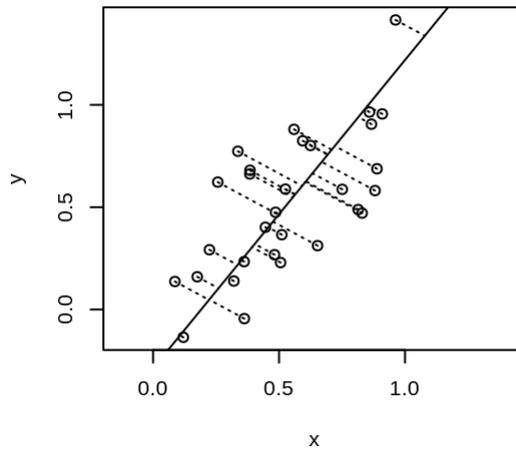


Figura 33 - Modelo que procura minimizar distâncias ortogonais (Long & Teetor, 2019)

Tal como na regressão linear clássica definir a equação da função linear ($Y = a + bX$) é essencial para se poder fazer previsões. No entanto, na regressão ortogonal o cálculo da inclinação da reta (b) e da interseção da linha no eixo y (a) é realizado através de formulações diferentes propostas por Keles e Altun (2016) e definidas das Equações 3.4 e 3.5.

$$a = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n} - \frac{b \sum_{i=1}^n x_i}{n} \tag{Eq. 3.4}$$

$$b = \frac{[(\sum_{i=1}^n x_i)^2 - (\sum_{i=1}^n y_i)^2 - n(\sum_{i=1}^n x_i^2 - \sum_{i=1}^n y_i^2)]}{2[n \sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i]} + \frac{\sqrt{[(\sum_{i=1}^n x_i)^2 - (\sum_{i=1}^n y_i)^2 - n(\sum_{i=1}^n x_i^2 - \sum_{i=1}^n y_i^2)]^2 + 4[n \sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i]^2}}{2[n \sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i]} \tag{Eq. 3.5}$$

No caso da regressão ortogonal para minimizar a soma dos erros quadrados entre os pontos dos dados e a linha de regressão, é utilizada a Equação 3.6.

$$E_{OR} = \sum_{i=1}^n d_i^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(y_i - bx_i - a)^2}{b^2 + 1} \tag{Eq. 3.6}$$

Na expressão 3.6 d_i é o desvio médio perpendicular à linha da regressão (Calzada & Scariano, 2003); conforme está representado na Figura 34.

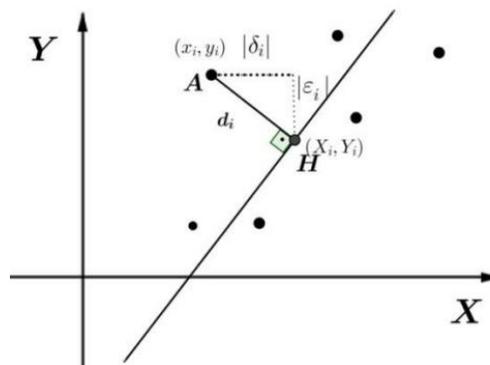


Figura 34 - Regressão ortogonal

3.3.2 ISO12107

O modelo probabilístico seguindo a norma ISO12107 (ISO12107, 2012) foi utilizado para a análise probabilísticas das curvas de fadiga com base nos dados da ligação rebitada de corte duplo – testada a partir do material da Ponte das Várzeas. Para este modelo foram realizadas duas experiências uma em que a curva probabilística segue uma regressão linear normal (CLR), e outra em que a curva segue uma regressão linear ortogonal (OLR). Os dados inseridos para a obtenção destas duas curvas são expostos na Tabela 12.

Na Figura 35, está representada a curva que adota uma regressão linear normal e na Figura 36 a curva que adota a regressão linear ortogonal, ambas traçadas em escala logarítmica para uma probabilidade de falha de 5% e um intervalo de confiança de 75%. Na Tabela 12 são apresentados os declives, m , e as respectivas tensões que definem a categoria de detalhe de cada curva, $\Delta\sigma_c$.

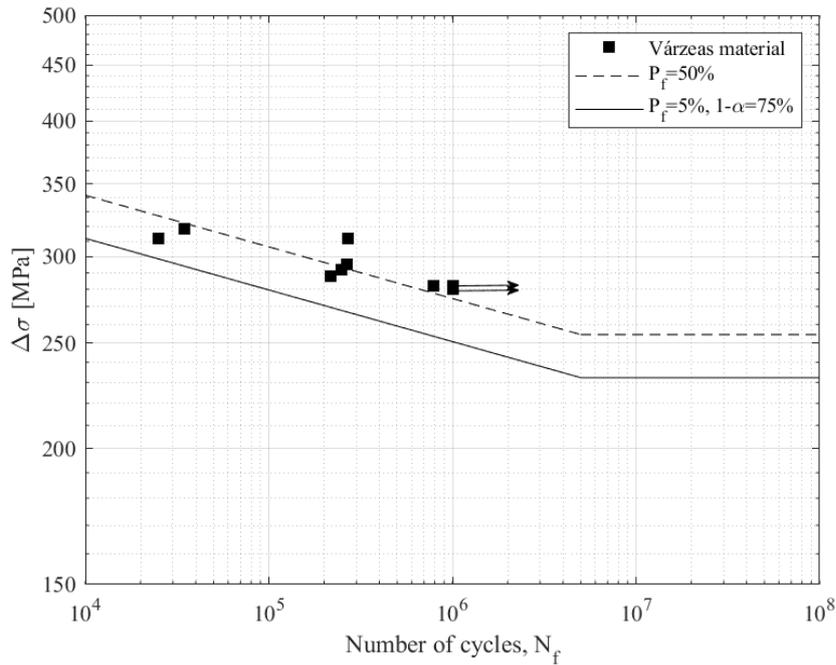


Figura 35 - Curvas de fadiga: ISO12107 & Regressão normal

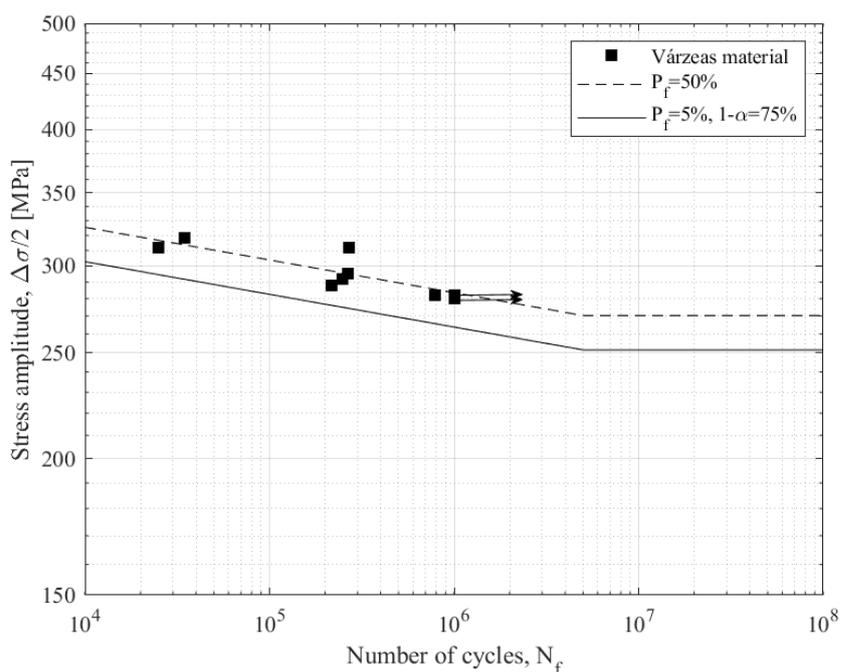


Figura 36 - Curvas de fadiga: ISO12107 & Regressão ortogonal

Tabela 12 Parâmetros m e $\Delta\sigma_c$ da curva de fadiga obtidos com base na norma ISO12107

Normal		Ortogonal	
m	$\Delta\sigma_c$ (MPa)	m	$\Delta\sigma_c$ (MPa)
21,0882	242,6006	33,4431	258,3914

Na Figura 37 estão demonstradas as duas curvas de fadiga obtidas, em escala logarítmica, de onde se pode concluir, com o auxílio da Tabela 12, que a curva probabilística que segue o método da norma ISO12107 (2012) e adotando uma regressão linear normal (CLR) é a mais conservativa, apresentando uma tensão na categoria do detalhe inferior.

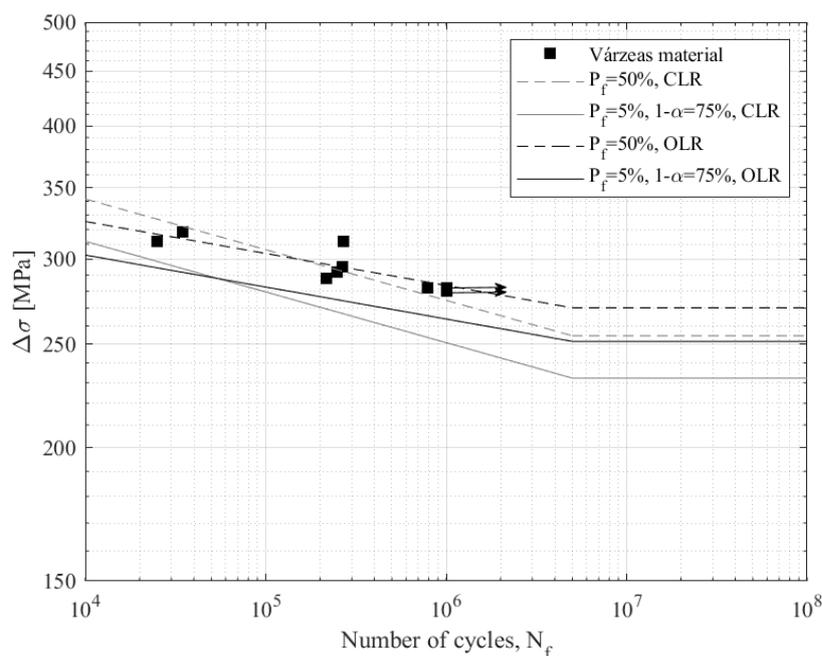


Figura 37 - Curvas de fadiga: CLR vs OLR segundo ISO12107 (2012)

3.3.3 DISTRIBUIÇÃO DE WEIBULL

O modelo probabilístico seguindo uma distribuição de Weibull foi utilizado para a análise probabilística das curvas de fadiga com base nos dados de fadiga da ligação rebitada de corte duplo, concebida a partir do material da Ponte das Várzeas. Em primeiro lugar, foi realizado um caso em que a curva probabilística foi adotada segundo uma regressão linear normal (CLR), como é bastante usual na comunidade científica. Em segundo lugar, a curva foi obtida segundo uma regressão ortogonal (OLR), modelo menos vulgar, mas com potencial nesta área de investigação. Em ambos, foi analisado a estimativa dos parâmetros “A” e “B”, segundo os quatros métodos já referenciados no Secção 2.4.4. Os dados utilizados para aplicação deste modelo são os apresentados na Tabela 13, tendo em conta que existem “run-outs” (sombreado), os respetivos resultados não foram considerados.

Tabela 13 - Dados dos ciclos vs tensão

Ciclos	250030	216540	34440	268660	25110	10000000	10000000	267663	786602
Tensão	292	288	318	312	312	282	280	295	282

Para uma regressão normal, conclui-se que o método dos mínimos quadrados lineares (LSM) à semelhança do método de máxima verossimilhança (MLM), é os mais conservativos numa primeira fase. No entanto, numa fase em que o número de ciclos já é superior o método dos mínimos quadrados lineares ponderados apresenta-se com o mais conservativo (Figura 38)

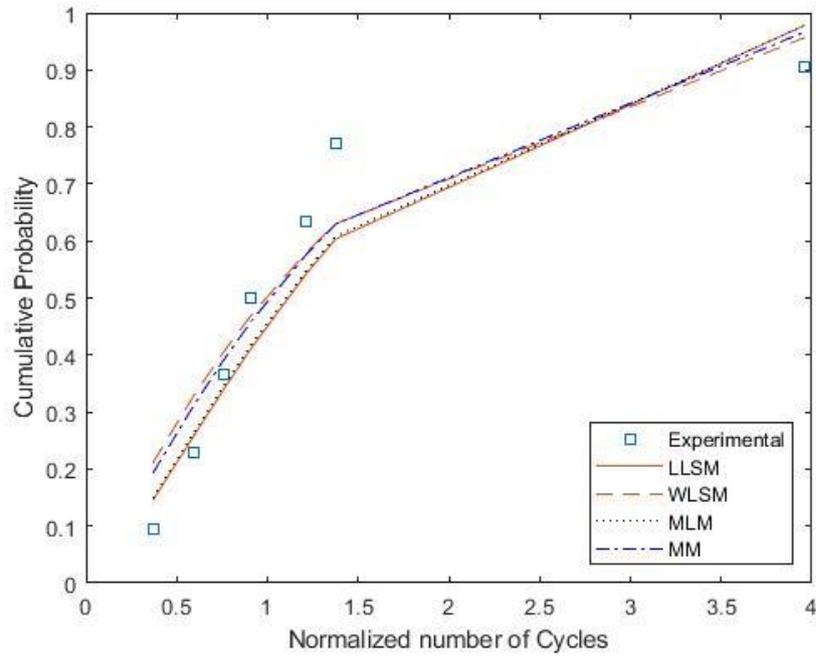


Figura 38 - Método de distribuição de Weibull com uma CLR

Na Figura 39, está demonstrado o resultado das curvas probabilísticas, em escala logarítmica, para uma probabilidade de falha (P_f) igual a 50% e a 5%, tendo a última apresentado três níveis de confiança.

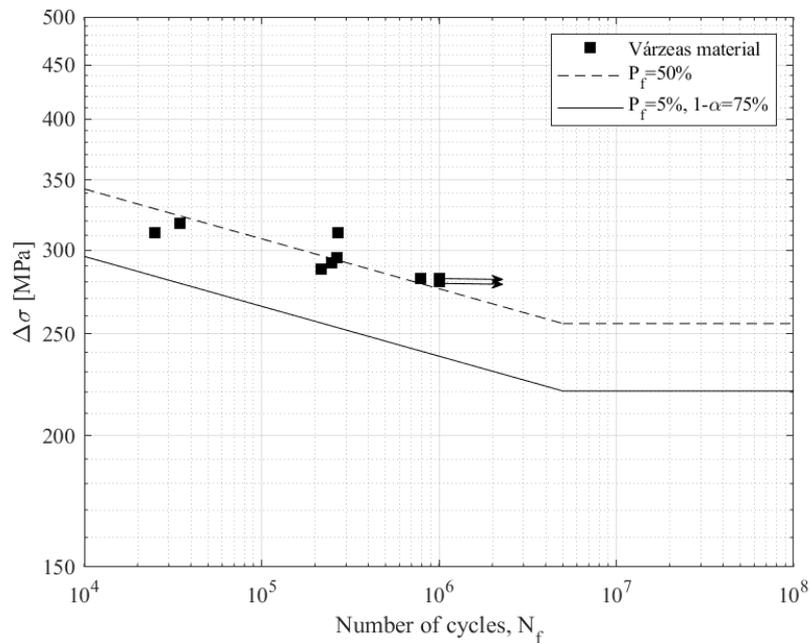


Figura 39 - Curvas de fadiga: distribuição de Weibull & Regressão normal

Adotando um modelo de regressão ortogonal, as diferenças em relação a um modelo de regressão normal começam logo nos resultados dos modelos de estimação dos parâmetros “A” e “B”. Como é possível

através da observação da Figura 40, o método mais conservativo numa primeira fase foi método dos mínimos quadrados lineares (LSM), à semelhança do método de máxima verossimilhança (MLM); numa segunda fase, o mais conservativo foi o método dos mínimos quadrados lineares ponderados (WLSM).

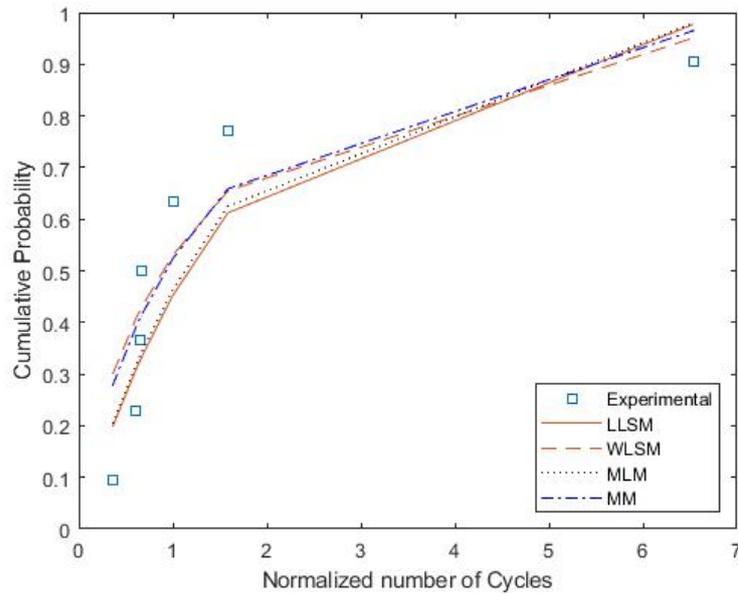


Figura 40 - Método de distribuição de Weibull com uma OLR

Na Figura 41, está demonstrado o resultado das curvas probabilísticas, em escala logarítmica, para uma probabilidade de falha (P_f) igual a 50% e a 5%, tendo a última apresentado três níveis de confiança.

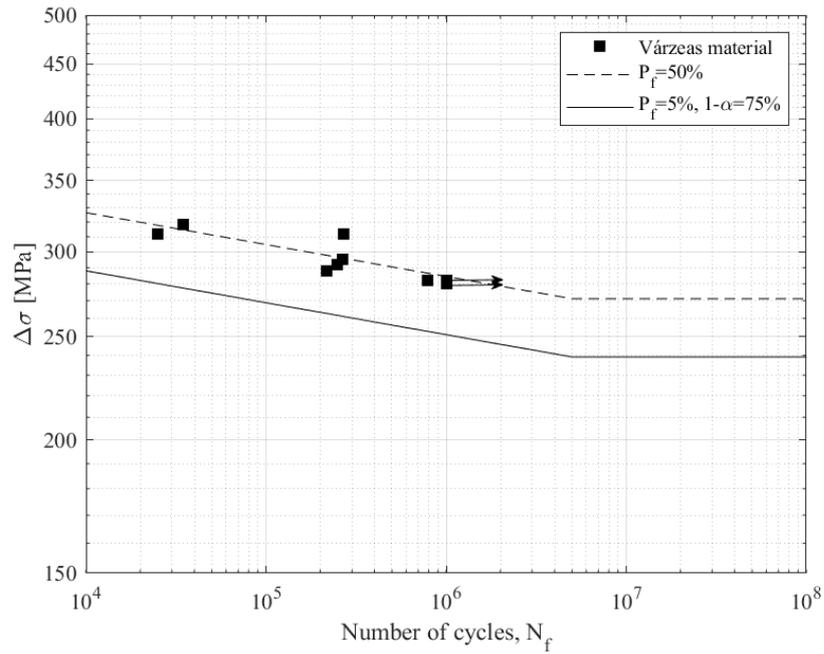


Figura 41 – Distribuição de Weibull & Regressão ortogonal

Comparando as curvas probabilísticas do modelo de regressão normal (CLR) com as do modelo de regressão ortogonal (OLR), ambas representadas na Figura 42 em escala logarítmica, e com o auxílio da Tabela 14, é possível concluir que neste caso a curva probabilística adotando a distribuição de Weibull e um modelo de regressão normal é mais conservativo, apresentando uma tensão para a categoria de detalhe mais baixa, apesar de haver uma faixa de tensões iniciais que se sobrepõe a curva probabilística obtida por regressão ortogonal.

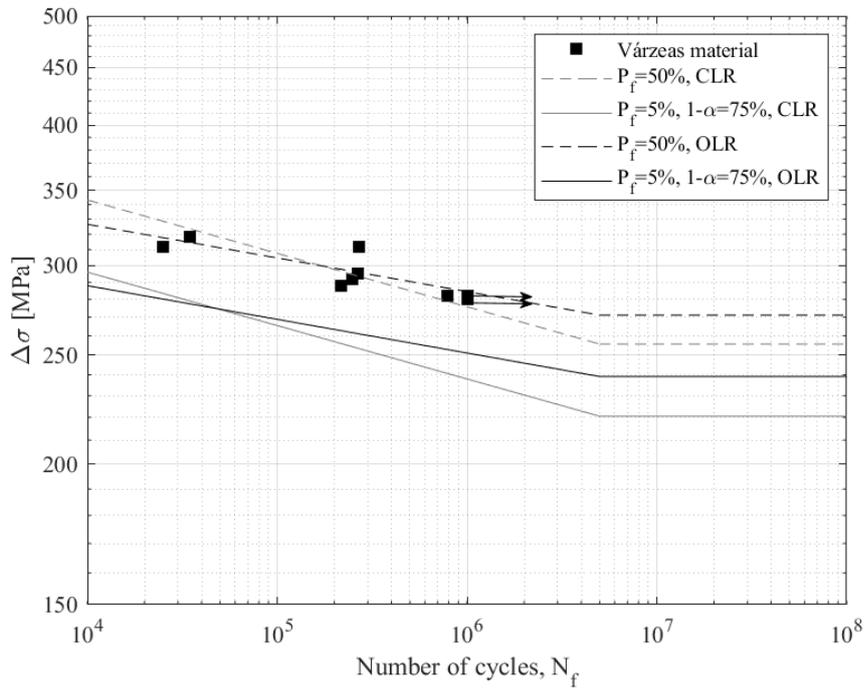


Figura 42 - Curvas de fadiga: CLR vs OLR seguindo uma distribuição de Weibull

Tabela 14 - Parâmetros m e $\Delta\sigma_c$ da curva de fadiga obtidos com base na distribuição de Weibull

Normal		Ortogonal	
m	$\Delta\sigma_c$ (Mpa)	m	$\Delta\sigma_c$ (Mpa)
21,0882	230,2829	33,4431	245,7979

3.3.4 MODELO CASTILLO & FERNÁNDEZ-CANTELLI (CFC)

A aplicação deste modelo na obtenção do campo probabilístico para o caso de estudo foi feita através do programa “ProFatigue”. Este programa foi desenvolvido pelos autores do modelo para facilitar a sua aplicação e através dele é possível estimar os parâmetros do modelo para quaisquer dados de fadiga, permitindo uma previsão probabilística do tempo de vida em função da faixa de tensão para um nível de tensão fixo.

Em primeiro lugar, para obter a curvas probabilísticas é necessário introduzir os dados experimentais obtidos para a ligação de corte duplo da Ponte das Várzeas. Dados esses que contêm o número de ciclos e a tensão correspondente, especificando os casos em que é considerado um “Run-out”, e a dimensão do provete utilizado que é 760 mm. (Tabela 15).

Tabela 15 - Dados de fadiga introduzidos no ProFatigue.

No. de ciclos	$\Delta\sigma$ (MPa)	L (mm)	<i>Run-out</i>	Vida esperada (ciclos)
786602	282	760		
216540	288	760		
250030	292	760		
267663	295	760		
25110	312	760		
268660	312	760		
34440	318	760		
1000000	280	760	R	3.166e+86
1000000	282	760	R	6.222e+09

Após a introdução dos dados, a extração das curvas probabilísticas é imediata sendo que o resultado obtido é apresentado na Figura 43, em escala logarítmica, para probabilidades de falha (P_f) de 5%, 50% e 95%, considerando os seguintes parâmetros estimados:

- Beta (β) = 1.20;
- $B = 10.03$ (22690 ciclos);
- $C = 5.63$ (279.90 MPa);
- Delta (δ) = 0.04;
- Lambda (λ) = 0.00.

Como já foi explicado na Secção 2.4.5, o parâmetro B é traduzido na Figura 43 como uma assíntota vertical da curva, representando o parâmetro C a assíntota horizontal.

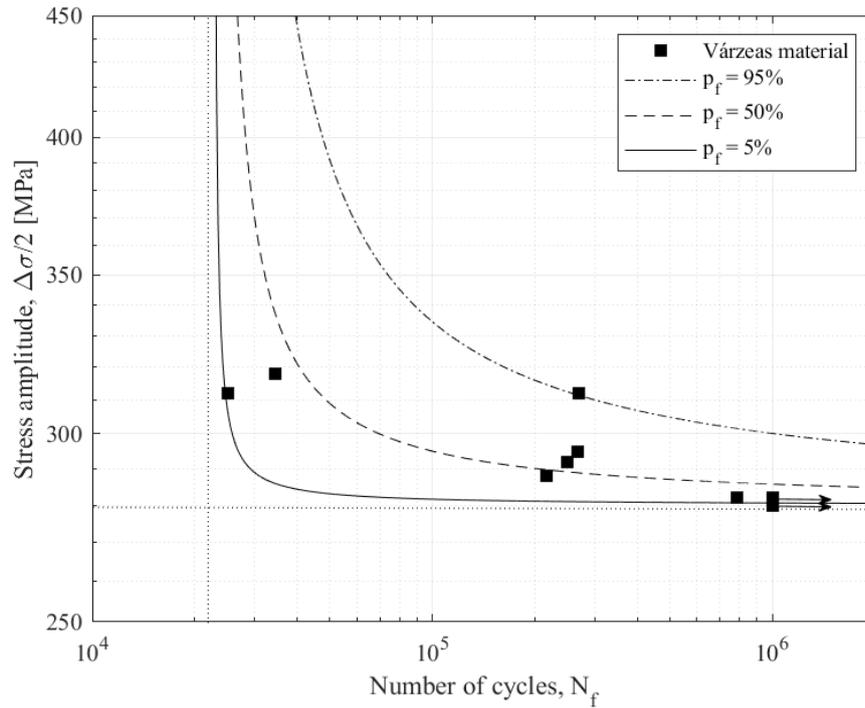


Figura 43 - Curva Probabilística do modelo CFC

3.3.5 CURVAS S-N DA NORMA AASHTO

A curva de projeto segundo a norma americana é obtida com base na Equação 3.7. Sendo o caso de estudo ligações rebitadas de duplo corte a categoria de detalhe utilizada para obter a curva de fadiga foi a categoria D, já apresentada na Secção 2.4.7.

$$(\Delta F)_n = \left(\frac{A}{N}\right)^{\frac{1}{3}} \quad \text{Eq. 3.7}$$

Na Equação 3.7, o A é uma constante que depende da categoria de detalhe e é retirada da Tabela 16, ΔF é a amplitude constante da tensão, N é o número ciclos que se pretende obter para posteriormente ser calculado o dano. As curvas S-N por categoria de detalhe são traçadas com base nestes dados e seguindo a Equação 3.7 (Figura 44).

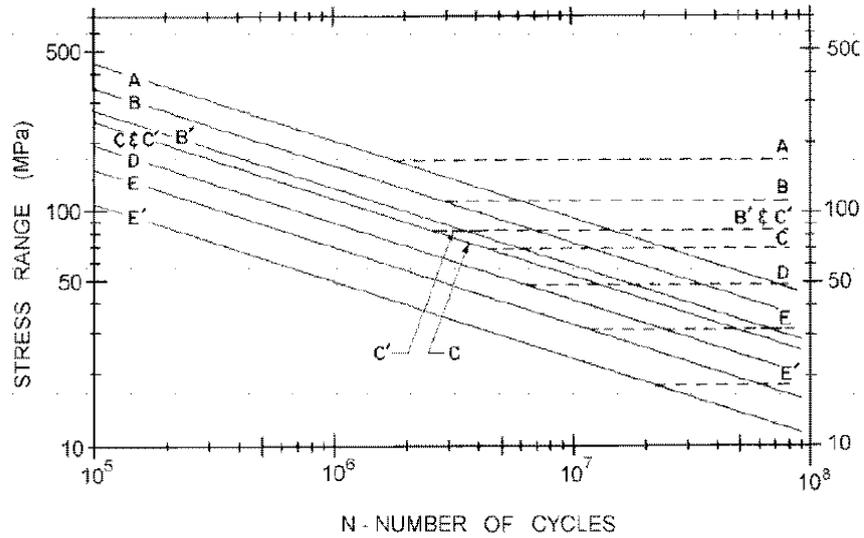


Figura 44 - Curvas por Categoria de detalhe da norma AASHTO (AASHTO, 2005)

Tabela 16 - Constante A para várias categorias de detalhe (AASHTO, 2005).

Categoria de detalhe	Constante, $A \times 10^{11} (MPa^3)$
A	82,0
B	39,3
B'	20,0
C	14,4
C'	14,4
D	7,21
E	3,61
E'	1,28
M 164M (A 325M) Parafusos em tensão axial	5,61
M 253M (A 490M) Parafusos em tensão axial	10,3

Para a avaliação da acumulação de dano por fadiga de localizações críticas da Ponte metálica rebitada das Várzeas (caso de estudo em análise), é necessário o número de ciclos relacionados com a vida à fadiga correspondente a cada ciclo de tensão obtido para os cenários de tráfego padrão e pesado (Horas, 2021), calculado no capítulo 4.3.4 através da equação 3.7.

3.3.6 DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Em primeiro lugar, comparou-se apenas os modelos probabilísticos seguindo uma distribuição de Weibull e a distribuição proposta na norma ISO12107 (2012), ambos colocados em duas situações, uma com uma regressão linear normal (CLR) e outra com uma regressão linear ortogonal (OLR). Na Figura 45 estão apresentadas as curvas correspondentes a estes casos, em escala logarítmica, e é possível concluir que um modelo probabilístico seguindo a distribuição de Weibull é mais conservativo do que o modelo da norma ISO12107 (2012).

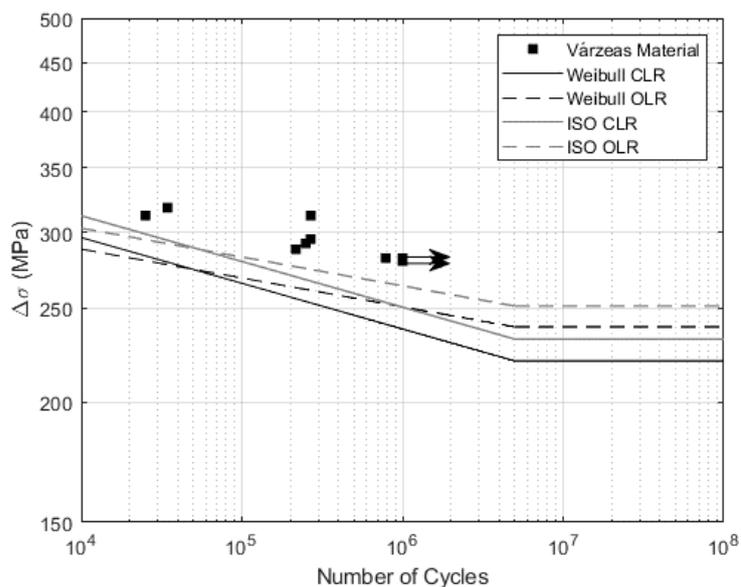


Figura 45 - Curvas de fadiga: Distribuição de Weibull vs. ISO12107

Em segundo lugar, comparou-se além dos dois modelos anteriores, os modelos CFC seguindo a norma AASHTO. Na Figura 46, estão apresentados os 4 modelos, em escala logarítmica, dois deles com as variantes da regressão normal (CLR) e ortogonal (OLR), e é possível constatar diferenças significativas entre a curva de fadiga da AASHTO (AASHTO, 2005) e as curvas de fadiga obtidas com base nos modelos estudados, sendo a primeira mais conservativa. De salientar, na Figura 46, a assíntota horizontal do modelo CFC, designada por parâmetro C , é abordada na Secção 3.3.4.

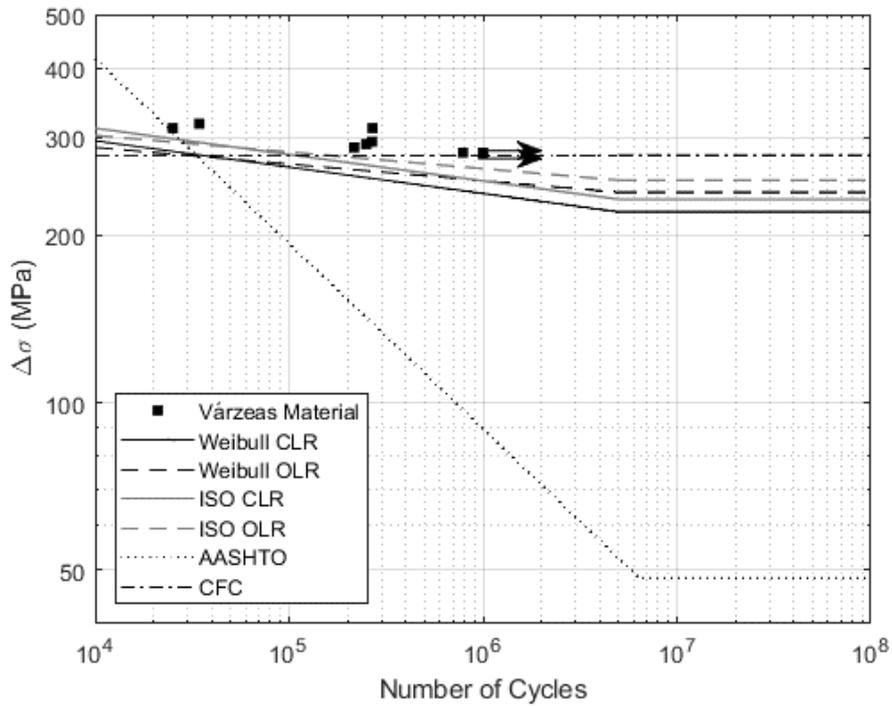


Figura 46 - Curvas de fadiga – comparação entre as várias abordagens.

3.3.7 MODELOS PROBABILÍSTICOS COM DADOS TARAS & GREINER E OUTRAS PONTES

Taras & Greiner (2010,a) fizeram uma contribuição substancial para os dados de fadiga de ligações rebitadas adquiridos, testando diferentes tipos de ligações rebitadas. Os autores usaram um procedimento de normalização para obter intervalos de tensão corrigidos para rácio tensão igual a zero ($R = 0$) (Equação 3.8).

$$\Delta\sigma_{norm} = \frac{\Delta\sigma}{f(R_\sigma)} \quad \text{Eq. 3.8}$$

Onde, $\Delta\sigma$ é a faixa de tensão aplicada durante o teste experimental e $f(R_\sigma)$ é uma função definida que considera a tensão e as propriedades do material de acordo com os dados da ponte em causa. A totalidade dos dados é composta por 170 testes com falhas e 49 run-outs (Taras and Greiner, 2010,a). Os dados considerados na figura 47 tem origem em publicações de diversos autores. Na figura 48, estes dados são representados por categoria de acordo com Taras and Greiner (2010,a).

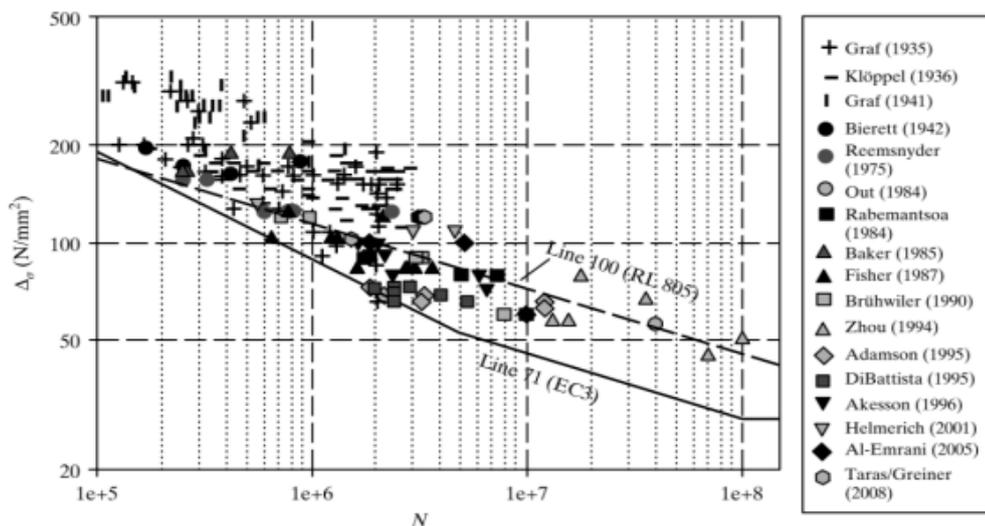


Figura 47 - Resultados dos testes de fadiga adquiridos em ligações rebitadas (Taras & Greiner, 2010)

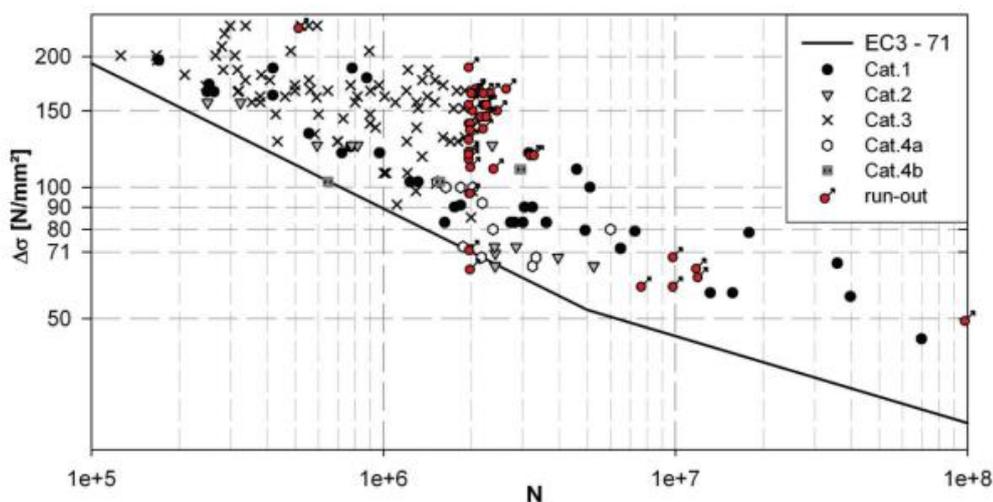


Figura 48 - Representação dos testes de fadiga, não normalizados, incluindo run-outs (Taras & Greiner, 2010)

Com base nos dados dos testes de fadiga Taras & Greiner (2010,a), e considerando também dados de fadiga de ligações rebitadas de corte duplo de pontes metálicas portuguesas, nomeadamente Várzeas, Fão e Viana, foram aplicados os modelos probabilísticos seguindo a norma ISO12107 (2012) e a distribuição de Weibull, considerando também as análises de regressão linear (CLR) e regressão ortogonal (OLR). Na Figura 49, estão representadas curvas obtidas com todos estes dados incorporados, em escala logarítmica, e posteriormente na Tabela 17 são apresentadas as características das curvas, nomeadamente o declive, m , e a categoria de detalhe, $\Delta\sigma_c$.

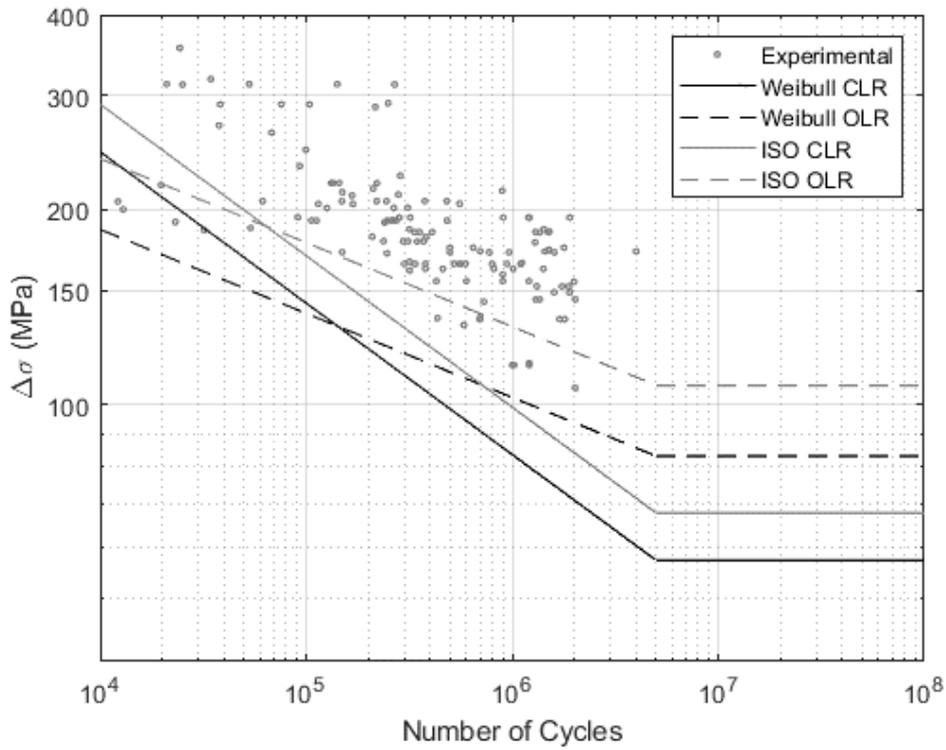


Figura 49 - Curvas ISO12107 e Weibull com dados de todas as pontes

Tabela 17 - Parâmetros m e $\Delta\sigma_c$ de curvas de fadiga de projeto obtidos com base em dados de fadiga de ligações rebitadas de várias pontes metálicas

ISO12107			
Regressão Linear Normal (CLR)		Regressão Linear Ortogonal (OLR)	
m	$\Delta\sigma_c$ (MPa)	m	$\Delta\sigma_c$ (MPa)
4,2719	84,0986	7,7028	120,4258
Weibull			
Regressão Linear Normal (CLR)		Regressão Linear Ortogonal (OLR)	
m	$\Delta\sigma_c$ (MPa)	m	$\Delta\sigma_c$ (MPa)
4,2719	71,0491	7,7028	93,6208

4

ANÁLISE E DISCUSSÃO DA ACUMULAÇÃO DE DANO POR FADIGA

4.1 INTRODUÇÃO

Como já referenciado ao longo do documento, o caso de estudo desta investigação é sobre a Ponte das Várzeas. Esta é uma das pontes ferroviárias metálicas construídas após a segunda guerra mundial como parte de um plano de investimento para recuperar a economia europeia. A ponte referida é caracterizada por ser uma estrutura metálica rebitada inaugurada em 1958 (Figura 50), pertencendo à linha ferroviária da Beira Alta, que faz a ligação entre Portugal e Espanha, e localiza-se no concelho da Mealhada.



Figura 50 - Perspetiva global da Ponte das Várzeas

Esta estrutura metálica tem um comprimento total de 281 metros e está dividida em três vãos centrais de 60 metros e dois vãos extremos de 50 metros. O sistema estrutural é composto por: duas treliças Warren invertidas ligadas por carlingas, materializando em conjunto o tabuleiro que suporta a via férrea; três níveis de contraventamento horizontal que ligam os elementos longitudinais (inferior, superior e de lacete); contraventamentos transversais que ligam as treliças invertidas; quatro treliças trapezoidais de diferentes alturas que compõem os pilares; e um pilar de alvenaria na extremidade Oeste e um encontro de alvenaria na extremidade Este. No lado Oeste, a ligação entre a Ponte das Várzeas e a estação Luso é feita por um vão simplesmente apoiado de 20 metros. Nas Figuras 51, 52 e 53 são apresentados desenhos estruturais gerais da estrutura, em metros (m).

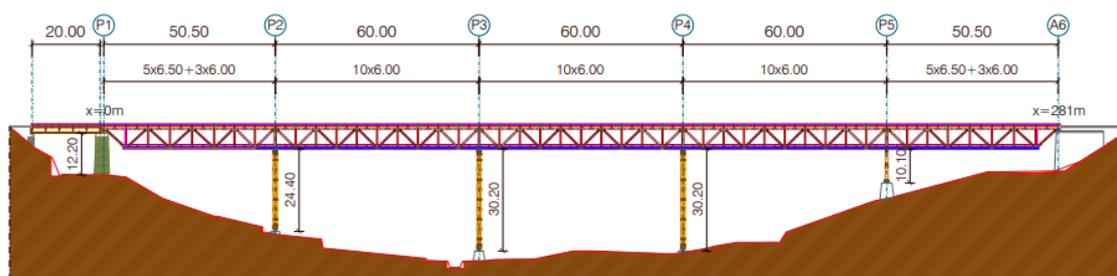


Figura 51 - Alçado da Ponte das Várzeas (Horas, 2021)

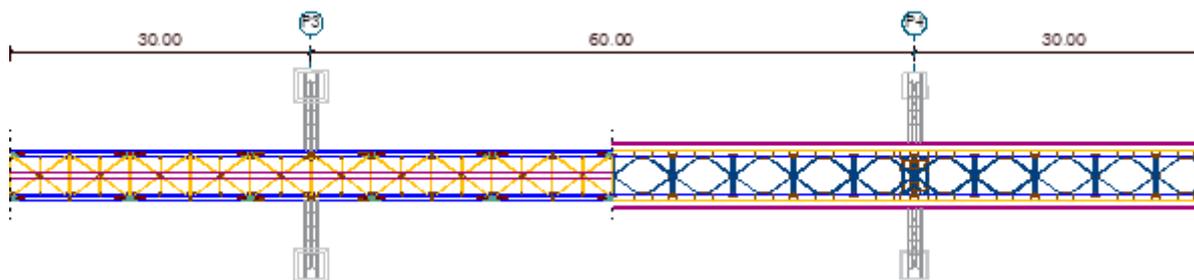


Figura 52 - Planta parcial do contravento inferior (lado esquerdo) e planta parcial do contravento superior (lado direito) (Horas, 2021)

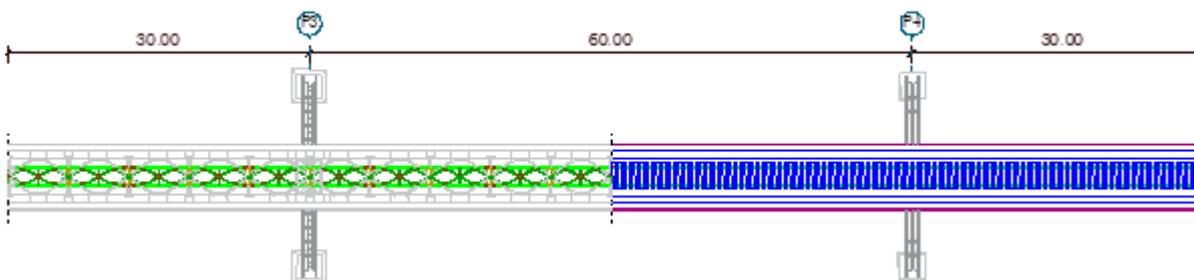


Figura 53 - Planta parcial do contravento de lacete (lado esquerdo) e planta parcial da via-férrea (lado direito) (Horas, 2021)

No que diz respeito às dimensões principais da estrutura, as duas treliças Warren invertidas têm uma altura de 5,95 m e são afastadas entre si de 4,40 m. Os primeiros e últimos cinco módulos são de 6,50 m, enquanto os restantes têm 6,00 m de comprimento. Os pilares metálicos têm alturas variáveis entre os 9,90 m e 30,10 m, sendo que o de alvenaria atinge os 12,50 m.

As ligações nodais apresentadas na Figura 54 demonstram a complexidade geométrica desta estrutura, podendo-se verificar o tipo de algumas ligações rebitadas existentes.



Figura 54 - Ligações dos nós da Ponte das Várzeas (Horas, 2021)

Os apoios são metálicos e permitem rotações livres no plano longitudinal da ponte. No lado Oeste, o deslocamento longitudinal também é livre, permitindo acomodar deslocamentos causados por forças horizontais, tais como forças de tração e travagem. Por outro lado, nos restantes apoios, o deslocamento longitudinal é limitado. No entanto, devido à flexibilidade dos pilares da estrutura metálica, o encontro do lado Este absorve a maioria das forças causadas por deformações horizontais.

4.2 HISTÓRIA DAS TENSÕES PARA OS DETALHES EM ESTUDO

Nesta investigação foram considerados cenários de tráfego padrão e pesado, uma vez que são compatíveis com o tipo de tráfego real que circula na Ponte das Várzeas. A carga de fadiga do cenário de tráfego padrão é composta por 8 tipos de comboios diferentes, com um número total de 67 passagens de comboio por dia. Este cenário de tráfego contém tanto comboios de passageiros como comboios de mercadorias com cargas por eixo que variam entre 70 kN e 225 kN. O cenário de tráfego padrão recomendado na norma EN 1991-2 (2017) é apresentado na Tabela 18.

Tabela 18 - Cenário de tráfego padrão de fadiga de acordo o Anexo D da EN 1991-2 (2017)

Tipo de Comboio	N.º de Comboios [por dia]	Peso do Comboio [toneladas]	Volume de Tráfego [10 ⁶ toneladas/ano]
1	12	663	2.9
2	12	530	2.32
3	5	940	1.72
4	5	510	0.93
5	7	2160	5.52
6	12	1431	6.27
7	8	1035	3.02
8	6	1035	2.27
Total	67		24.95

O cenário de tráfego pesado normativo usado para avaliações à fadiga consiste em 4 tipos de comboios padrão, com um número total de 51 comboios por dia. As cargas por eixo dos comboios deste cenário de tráfego têm até 250 kN, sendo as características dos comboios apresentadas na tabela 19.

Tabela 19 - Cenário de tráfego pesado de fadiga de acordo com o Anexo D da EN 1991-2 (2017)

Tipo de Comboio	N.º de Comboios [por dia]	Peso do Comboio [toneladas]	Volume de Tráfego [10 ⁶ toneladas/ano]
5	6	2160	4.73
6	13	4131	6.79
11	16	1135	6.63
12	16	1135	6.63
Total	51		24.78

O histórico de tensões foi obtido para as ligações rebitadas agrupadas em 14 tipos de ligação, sendo avaliadas tensões nos pontos relacionados com os rebites, como exemplificado na figura 55.

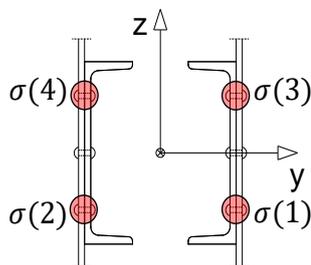


Figura 55 - Tensões obtidas em cada elemento

De forma a calibrar, otimizar e validar os modelos numéricos desenvolvidos, foram realizadas várias campanhas experimentais *in situ*. Após análises numéricas, identificou-se o tipo de ligação entre a diagonal e o gusset como crítica à fadiga, merecendo por isso uma análise mais detalhada. Dentro deste tipo de ligações, o detalhe localizado à entrada da ponte do lado Oeste, identificado no modelo número com o elemento finito 1770, foi avaliado neste trabalho. Na figura 56 está representado o histórico de tensão do comboio de fadiga tipo 5 após processamento no programa FDT (ver secção 4.3), e na tabela 20 os respetivos ciclos de tensão mais relevantes.

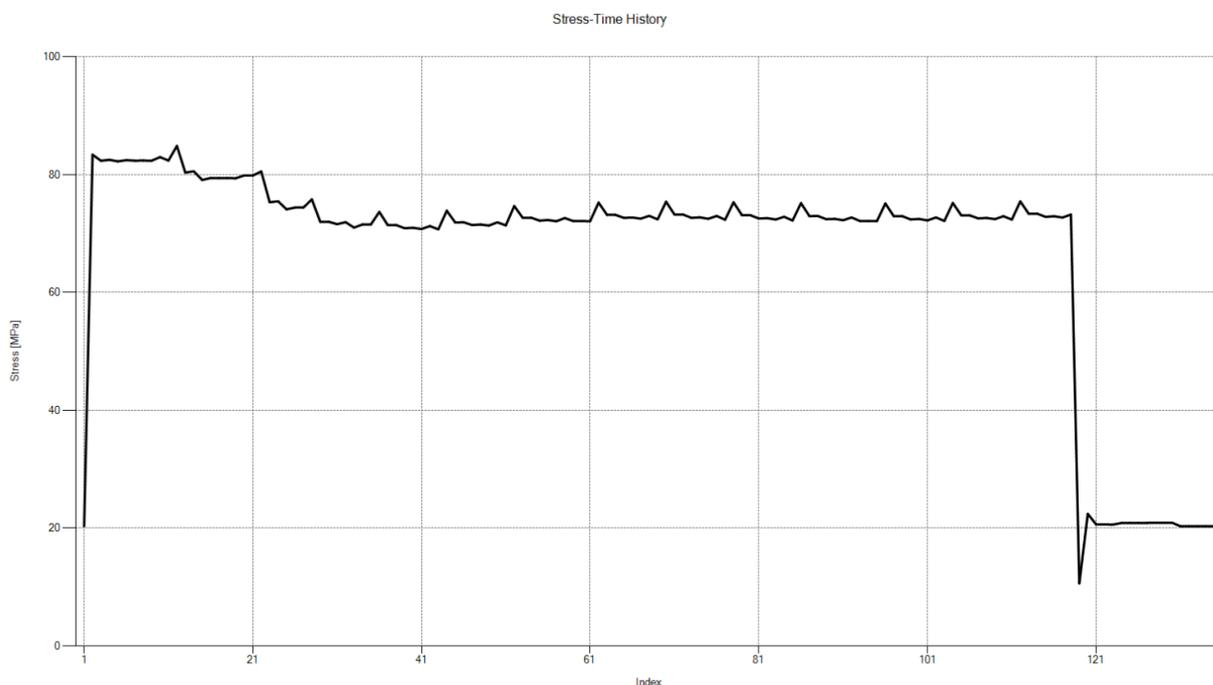


Figura 56 - Histórico de tensão do comboio de fadiga tipo 5 obtido no programa FDT

Tabela 20 - Ciclos de tensão para o comboio de fadiga tipo 5

$\Delta\sigma$ (MPa)	Ciclos
74,273	0,5
64,58306	0,5
11,79163	0,5

Na tabela 20, apenas se apresentam os três meios ciclos de tensão de maior magnitude, dado que para valores inferiores considera-se que não surgem danos por fadiga relevantes, mesmo não desprezando o limite de truncatura.

4.3 APLICAÇÃO DO MÉTODO DE ACUMULAÇÃO DE DANO (MAD)

A aplicação do método de acumulação de dano foi realizada através do programa “Fatigue Damage Tool (FDT), (Souto C. D., Correia, Jesus, & Calçada, 2020) que permite calcular o dano pretendido, aplicando a regra de Palmgren-Miner. O programa FDT funciona de acordo com o exemplificado nas Figuras 57, 58 e 59. Na primeira página é necessário introduzir os dados relativos ao caso em estudo. Os parâmetros a serem inseridos são:

1. “Stress type” - Este parâmetro indica se estamos a lidar com gamas de tensão direta ou de corte.
2. “Slope of fatigue strength curve” - Este parâmetro indica ao FDT para usar 1 ou 2 inclinações (declives) para as curvas de resistência à fadiga. O usuário também pode escolher entre os valores de inclinação estabelecidos do Eurocódigo 3 ou inserir valores personalizados para os declives.
3. “Partial factor for fatigue strength” - Este parâmetro é um fator de segurança. A categoria de detalhe especificada deve ser dividida por este parâmetro, fazendo com que o cálculo do dano em um detalhe seja mais fraco, ou seja, fazendo os cálculos para o detalhe original mais seguro. O usuário pode escolher entre os métodos de avaliação estabelecidos e as consequências de falha do Eurocódigo 3 ou inserir um valor personalizado para o fator de segurança.
4. “Detail category” - Este parâmetro é a designação numérica dada a um determinado detalhe construtivo. A categoria de detalhe indica a resistência à fadiga de referência em MPa. O FDT também produzirá o limite de fadiga, $\Delta\sigma_D$, e o limite de corte, $\Delta\sigma_L$, que posteriormente será utilizado no cálculo do dano por fadiga.
5. “Partial safety factor for fatigue loading” - Este parâmetro é um fator de segurança. As gamas de tensão calculadas serão multiplicadas por este parâmetro, de modo que o cálculo do dano seja feito em faixas de tensão mais severas, levando a cálculos mais seguros.
6. “Number of repetitions” - Este parâmetro é o número de vezes que o histórico de tensão-tempo é repetido durante a vida útil do detalhe construtivo.
7. “Stress-time history” - O histórico tensão-tempo do detalhe construtivo deve ser inserido, composto apenas por picos e vales. O FDT pode converter qualquer dado do espectro inserido em picos e vales se for necessário.

No presente caso de estudo as opções selecionadas serão um “Stress Type” – Direct; um “Slope of Fatigue Strength Curve, m” - Double, EC3 e um “Partial Factor for Fatigue Strength” - 1. Relativamente à categoria de detalhe, esta é variável consoante o modelo probabilístico utilizado, mas sempre correspondente ao valor para 2 milhões de ciclos, tal como o número de repetições por ano que está

dependente de um tráfego padrão ou pesado. Na opção “Stress-Time History” serão utilizados os históricos de tensão obtidos nos dois cenários de tráfego.

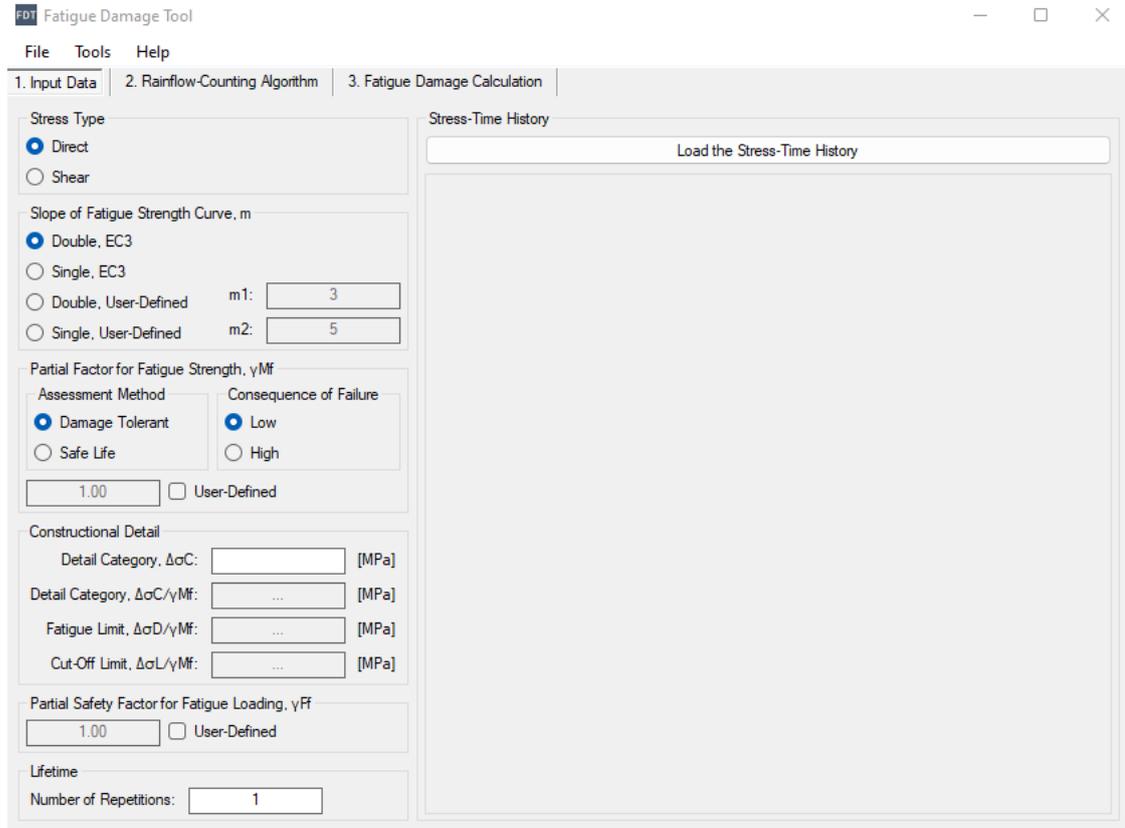


Figura 57 - Exemplo de dados introduzidos no FDT

A segunda página do FDT corresponde a aplicação do algoritmo “Rainflow-counting”, na qual o programa irá organizar as gamas de tensões por ciclos como está exemplificado na Figura 58.

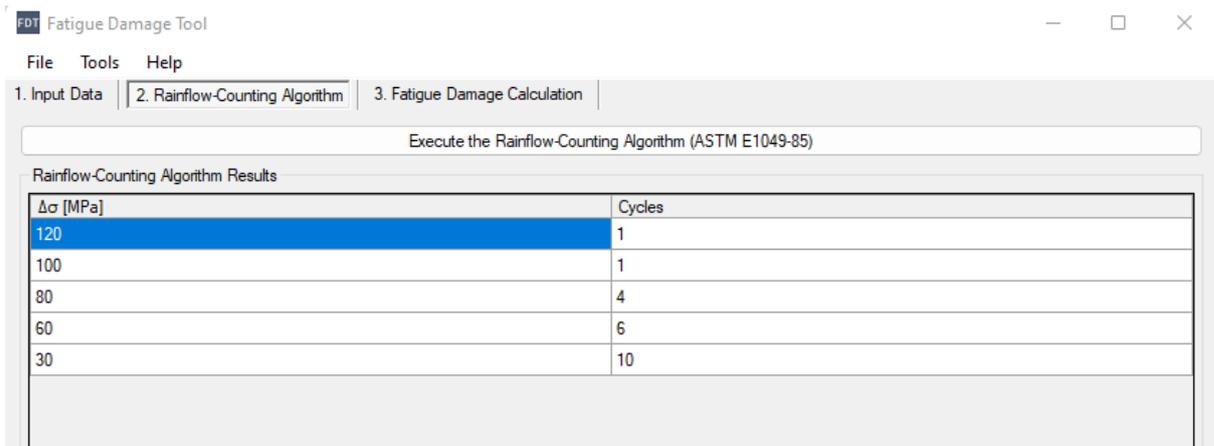


Figura 58 - Exemplo do "Rainflow-Counting" no FDT

Na terceira página do FDT, o cálculo do dano por fadiga através da regra de Palmgren-Miner é apresentado para cada intervalo de tensão considerado (Figura 59).

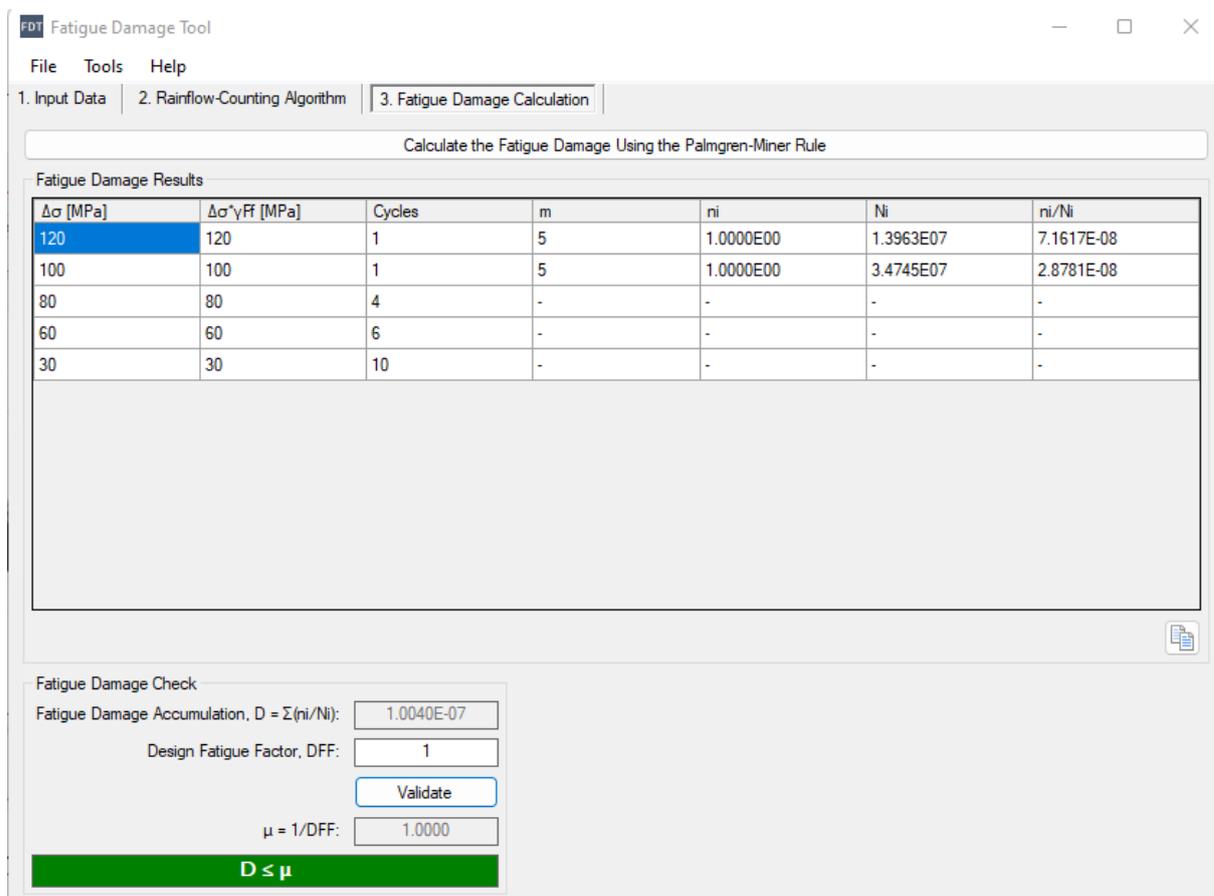


Figura 59 - Exemplo do cálculo do dano por fadiga

4.3.1 MAD & ISO12107

O método acumulação de dano por fadiga (MAD) aplicado, utilizando a curva de fadiga de projeto obtida com base na norma ISO12107 (ISO12107, 2012), para os dados de fadiga de ligações rebitadas com material da Ponte das Várzeas (*ISO & CLR*: $m = 21.1$, $\Delta\sigma_c = 242.6\text{MPa}$; *ISO & OLR*: $m = 33.44$, $\Delta\sigma_c = 258.4\text{MPa}$), foi realizado segundo o FDT para quatro casos. Um par de casos em que é adotada uma regressão linear normal (CLR) em que o valor da categoria do detalhe dá 242.6006 MPa e assumindo um número de repetições de tráfego padrão e tráfego pesado, e um segundo par de casos em que é adotada uma regressão ortogonal (OLR) em que o valor da categoria no detalhe dá 258.3914 MPa, assumindo na mesma os dois tipos de tráfego. Tendo em conta o histórico de tensões da Tabela 20, conclui-se que nenhum histórico apresenta ciclos de tensão suficientemente elevados para provocar quaisquer danos, para a curva S-N de projeto obtida com base nos dados de fadiga da ligação rebitada de corte duplo da ponte das Várzeas.

Uma vez que, na experiência apresentada no parágrafo anterior, o dano tende para zero ($\rightarrow 0$), foi realizado um segundo caso de estudo, desta vez com inclusão de mais dados de fadiga de ligações rebitadas de outras pontes Portuguesas (Fão, Viana) da mesma categoria da Ponte das Várzeas, e ainda, dados de fadiga de Taras & Greiner. O objetivo com este caso estudo é obter curvas S-N de projeto tendo por base uma amostra maior de dados (*ISO & CLR*: $m = 4.27$, $\Delta\sigma_c = 84.1\text{MPa}$;

ISO & OLR: $m = 7.70, \Delta\sigma_c = 120.4MPa$). Nas Tabelas 21 e 22 é apresentado o dano ao fim de 100 anos, utilizando o cenário de tráfego padrão e tráfego pesado, respetivamente, ambos seguindo uma regressão linear clássica e o modelo probabilístico ISO12107.

Tabela 21 - Dano obtido por MAD e curva de fadiga de projeto na norma ISO12107 utilizando uma regressão linear clássica num cenário de tráfego padrão (2012)

Tráfego padrão						
Tipo de Comboio	N.º de Comboios por dia	N.º de Comboios por ano	Categoria de detalhe	m	Dano por ano	Dano ao fim de 100 anos
1	12	4380	84,0986	3	→0	→0
2	12	4380	84,0986	3	→0	→0
3	5	1825	84,0986	3	→0	→0
4	5	1825	84,0986	3	→0	→0
5	7	2555	84,0986	3	7,29E-04	0,072929
6	12	4380	84,0986	3	→0	→0
7	8	2920	84,0986	3	→0	→0
8	6	2190	84,0986	3	→0	→0
					Total	0,072929

Tabela 22 - Dano obtido por MAD e curva de fadiga de projeto na norma ISO12107 utilizando uma regressão linear clássica num cenário de tráfego pesado (2012)

Tráfego pesado						
Tipo de Comboio	N.º de Comboios por dia	N.º de Comboios por ano	Categoria de detalhe	m	Dano por ano	Dano ao fim de 100 anos
5	6	2190	84,0986	3	6,25E-04	0,06251
6	13	4745	84,0986	3	→0	→0
11	16	5840	84,0986	3	→0	→0
12	16	5840	84,0986	3	→0	→0
					Total	0,06251

No caso de ser utilizado uma curva de projeto que segue uma regressão linear ortogonal e o modelo probabilísticos ISO12107, os resultados para os cenários de tráfego padrão e pesado estão apresentados, nas Tabelas 23 e 24, respetivamente.

Tabela 23 - Dano obtido por MAD e curva de fadiga de projeto na norma ISO12107 utilizando uma regressão linear ortogonal num cenário de tráfego padrão (2012)

Tráfego padrão						
Tipo de Comboio	N.º de Comboios por dia	N.º de Comboios por ano	Categoria de detalhe	m	Dano por ano	Dano ao fim de 100 anos
1	12	4380	120,4258	3	→0	→0
2	12	4380	120,4258	3	→0	→0
3	5	1825	120,4258	3	→0	→0
4	5	1825	120,4258	3	→0	→0
5	7	2555	120,4258	3	→0	→0
6	12	4380	120,4258	3	→0	→0
7	8	2920	120,4258	3	→0	→0
8	6	2190	120,4258	3	→0	→0
					Total	→0

Tabela 24 - Dano obtido por MAD e curva de fadiga de projeto na norma ISO12107 utilizando uma regressão linear ortogonal num cenário de tráfego pesado (2012)

Tráfego pesado						
Tipo de Comboio	N.º de Comboios por dia	N.º de Comboios por ano	Categoria de detalhe	m	Dano por ano	Dano ao fim de 100 anos
5	6	2190	120,4258	3	→0	→0
6	13	4745	120,4258	3	→0	→0
11	16	5840	120,4258	3	→0	→0
12	16	5840	120,4258	3	→0	→0
					Total	→0

Comparando os danos obtidos nas Tabelas 23 e 24, verifica-se que o dano ao fim de 100 anos tende para zero ($\rightarrow 0$) para ambos cenários de tráfego, por outro lado os danos obtidos nas Tabelas 21 e 22 já apresentam valores acima de 0, apesar de serem insignificativos. Analisando os resultados em termos de grandeza, apesar da magnitude desprezável para o efeito, no caso em que se utiliza uma regressão linear clássica, o tráfego padrão provocaria um dano ligeiramente superior, dado que este seria apenas induzido pelo comboio de fadiga tipo 5 e a respetiva frequência é superior no cenário de tráfego em causa.

4.3.2 MAD & DISTRIBUIÇÃO DE WEIBULL

O método acumulação de dano por fadiga (MAD) aplicado, utilizando a curva de fadiga de projeto obtida com base na distribuição de Weibull (dados de fadiga de ligações rebitadas com material extraído da Ponte das Várzeas (*Weibull & CLR*: $m = 21.1, \Delta\sigma_c = 230.3MPa$; *Weibull & OLR*: $m = 33.44, \Delta\sigma_c = 245.8MPa$), foi realizado segundo o FDT para quatro casos. Um par de casos em que é adotada uma regressão linear normal (CLR) em que o valor da categoria no detalhe 230.2829 MPa e assumindo um número de repetições de tráfego padrão e tráfego pesado, e um segundo par de casos em

que é adotada uma regressão ortogonal (OLR) em que o valor da categoria no detalhe dá 245.7979 MPa, assumindo na mesma os dois tipos de tráfego. Tendo em conta o histórico de tensões da Tabela 21, conclui-se que nenhum histórico apresenta ciclos de tensão suficientemente elevados para provocar quaisquer danos na estrutura da ponte das Várzeas.

Uma vez que o dano foi nulo na experiência anterior, foi realizado um segundo caso estudo, desta vez com a adição de dados de outras pontes da mesma categoria de que a das Várzeas e com adição dos dados de Taras & Greiner (*Weibull & CLR*: $m = 4.27, \Delta\sigma_c = 71.05\text{MPa}$; *Weibull & OLR*: $m = 7.70, \Delta\sigma_c = 93.6\text{MPa}$). O objetivo com este caso estudo é baixar a curva S-N para obter categorias de detalhe inferiores e conseqüentemente ser possível avaliar e comparar os danos. Nas Tabelas 25 e 26 é apresentado o dano ao fim de 100 anos, utilizando o cenário de tráfego padrão e tráfego pesado, respetivamente, ambos seguindo uma regressão linear clássica e o modelo probabilístico com base na distribuição de Weibull.

Tabela 25 - Dano obtido por MAD e curva de fadiga de projeto com base na distribuição de Weibull, utilizando uma regressão linear clássica num cenário de tráfego padrão

Tráfego padrão						
Tipo de Comboio	N.º de Comboios por dia	N.º de Comboios por ano	Categoria de detalhe	m	Dano por ano	Dano ao fim de 100 anos
1	12	4380	71,0491	3	→0	→0
2	12	4380	71,0491	3	→0	→0
3	5	1825	71,0491	3	→0	→0
4	5	1825	71,0491	3	→0	→0
5	7	2555	71,0491	3	1,21E-03	0,12095
6	12	4380	71,0491	3	→0	→0
7	8	2920	71,0491	3	3,11E-04	0,031055
8	6	2190	71,0491	3	→0	→0
					Total	0,152005

Tabela 26 - Dano obtido por MAD e curva de fadiga de projeto com base na distribuição de Weibull, utilizando uma regressão linear clássica num cenário de tráfego pesado

Tráfego pesado						
Tipo de Comboio	N.º de Comboios por dia	N.º de Comboios por ano	Categoria de detalhe	m	Dano por ano	Dano ao fim de 100 anos
5	6	2190	71,0491	3	1,04E-03	0,10367
6	13	4745	71,0491	3	→0	→0
11	16	5840	71,0491	3	7,70E-04	0,077008
12	16	5840	71,0491	3	→0	→0
					Total	0,180678

No caso de ser utilizado uma curva de projeto que segue uma regressão linear ortogonal e o modelo probabilísticos com base na distribuição de Weibull, os resultados para os cenários de tráfego padrão e pesado estão apresentados nas Tabelas 27 e 28, respetivamente.

Tabela 27 - Dano obtido por MAD e curva de fadiga de projeto com base na distribuição de Weibull, utilizando uma regressão linear ortogonal num cenário de tráfego padrão

Tráfego padrão						
Tipo de Comboio	N.º de Comboios por dia	N.º de Comboios por ano	Categoria de detalhe	m	Dano por ano	Dano ao fim de 100 anos
1	12	4380	93,6208	3	→0	→0
2	12	4380	93,6208	3	→0	→0
3	5	1825	93,6208	3	→0	→0
4	5	1825	93,6208	3	→0	→0
5	7	2555	93,6208	3	3,19E-04	0,031894
6	12	4380	93,6208	3	→0	→0
7	8	2920	93,6208	3	→0	→0
8	6	2190	93,6208	3	→0	→0
					Total	0,031894

Tabela 28 - Dano obtido por MAD e curva de fadiga de projeto com base na distribuição de Weibull, utilizando uma regressão linear ortogonal num cenário de tráfego pesado

Tráfego pesado						
Tipo de Comboio	N.º de Comboios por dia	N.º de Comboios por ano	Categoria de detalhe	m	Dano por ano	Dano ao fim de 100 anos
5	6	2190	93,6208	3	2,73E-04	0,027338
6	13	4745	93,6208	3	→0	→0
11	16	5840	93,6208	3	→0	→0
12	16	5840	93,6208	3	→0	→0
					Total	0,027338

Comparando os danos obtidos nas Tabelas 25, 26, 27 e 28, verifica-se que o dano ao fim de 100 anos utilizando uma regressão linear clássica é mais desfavorável em ambos cenários de tráfego. Confrontando os cenários de tráfego, nota-se que o cenário de tráfego pesado apresenta valores de dano superiores.

4.3.3 MAD & CFC

O método acumulação de dano por fadiga (MAD) aplicado, utilizando a curva de fadiga de projeto obtida com base no modelo probabilístico CFC ($\beta = 1.20, \delta = 0.04, \lambda = 0.00, N_0 = 22690, \Delta\sigma_0 = 279.9\text{MPa}$), com base em dados de fadiga de ligações rebitadas com material extraído da Ponte das Várzeas, não pode ser calculado através do programa Fatigue Damage Tool (FDT), utilizado nos modelos de Weibull e ISO, uma vez que este modelo não está definido no FDT. Apesar de ser possível calcular o dano manualmente já que temos a contagem de ciclos do tráfego padrão e normal do elemento 1170, a contagem de ciclos mostra-nos ciclos de tensões (tabela 20) muito inferiores à assíntota horizontal da curva (279.9 MPa), designada por “C”, o que resulta num dano a tender para 0 ($\rightarrow 0$).

4.3.4 MAD & AASHTO

O método acumulação de dano por fadiga (MAD) aplicado, utilizando a curva de fadiga de projeto da norma americana AASHTO (Categoria de Detalhe D, $A = 7.21 \times 10^{11} MPa^3$ e $m = 3$), foi realizado para os dois cenários de tráfego presentes. Através dos números de ciclos obtidos com base na equação 3.7, apresentada na Secção 3.3.5, é possível calcular manualmente o dano da ponte das Várzeas para cada um dos cenários de tráfego. Na tabela 29 está apresentado o dano ao fim de 100 anos no caso do cenário de tráfego padrão, e na tabela 30 no caso do cenário de tráfego pesado.

Tabela 29 - Dano obtido por MAD e curva de fadiga de projeto da norma AASHTO, num cenário de tráfego padrão (AASHTO, 2005)

Tráfego padrão						
Tipo de Comboio	N.º de Comboios por dia	N.º de Comboios por ano	A	m	Dano por ano	Dano ao fim de 100 anos
1	12	4380	7,21E+11	3	3,84E-04	3,84E-02
2	12	4380	7,21E+11	3	1,45E-04	1,45E-02
3	5	1825	7,21E+11	3	6,54E-05	6,54E-03
4	5	1825	7,21E+11	3	5,23E-05	5,23E-03
5	7	2555	7,21E+11	3	1,21E-03	1,21E-01
6	12	4380	7,21E+11	3	6,61E-04	6,61E-02
7	8	2920	7,21E+11	3	5,25E-04	5,25E-02
8	6	2190	7,21E+11	3	2,79E-04	2,79E-02
					Total	0,331863

Tabela 30 - Dano obtido por MAD e curva de fadiga de projeto da norma AASHTO, num cenário de tráfego pesado (AASHTO, 2005)

Tráfego pesado						
Tipo de Comboio	N.º de Comboios por dia	N.º de Comboios por ano	Categoria de detalhe	m	Dano por ano	Dano ao fim de 100 anos
5	6	2190	93,6208	3	1,03E-03	1,03E-01
6	13	4745	93,6208	3	7,40E-04	7,40E-02
11	16	5840	93,6208	3	1,30E-03	1,30E-01
12	16	5840	93,6208	3	8,73E-04	8,73E-02
					Total	0,394638

Comparando as Tabelas 29 e 30, verifica-se que o dano ao fim de 100 anos seria ligeiramente maior numa situação em que o cenário de tráfego fosse o pesado.

4.4 DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Analisando os resultados referentes ao dano acumulado das Secções 4.3.1, 4.3.2, 4.3.3 e 4.3.4 apresentados na Tabela 31 é possível concluir que o dano por fadiga calculado por MAD não é superior

a 1 ($D_{100} > 1$) em nenhum dos casos e que o dano obtido segundo a curva de projeto com base na norma AASHTO (2005) é a que se apresenta como a mais desfavorável. No caso da curva de projeto seguindo uma distribuição de Weibull o dano ao fim de 100 anos apresenta-se superior do que ao caso em que se utiliza uma curva de projeto com base na norma ISO12107 (2012). Em ambos os casos se consta que a utilização de uma regressão linear ortogonal é mais conservativa do que uma regressão linear clássica. Com isto, os resultados demonstram que a análise de regressão linear – CLR ou OLR – a ser utilizada poderá ser determinante na avaliação à fadiga de estruturas metálicas existentes. Com base nos resultados da Tabela 31, verifica-se também que o cenário de tráfego pesado é o mais desfavorável sempre que foram calculados valores de dano relevantes.

Tabela 31 - Discussão de Resultados do Dano ao fim de 100 anos

	ISO12107		Distribuição de Weibull		AASHTO
	Regressão Normal (CLR)	Regressão Ortogonal (OLR)	Regressão Normal (CLR)	Regressão Ortogonal (OLR)	
Tráfego Padrão	0,072929	→ 0	0,152005	0,031894	0,331863
Tráfego Pesado	0,06251	→ 0	0,180678	0,027338	0,394638

Cláudio Horas (2021) numa análise à fadiga ao mesmo elemento da Ponte das Várzeas, considerando diversa informação experimental sobre pontes metálicas antigas e uma curva S-N para ligações rebitadas obtida com base em tais dados (ver as respetivas características na Tabela 32), avaliou o dano ao fim de 100 anos em cenários de tráfego pesado e padrão (Tabela 33). Comparando os resultados apresentados na Tabela 31 e na Tabela 33, conclui-se que a curva S-N usada por Cláudio Horas (2021) é mais conservativa, conduzindo a valores de dano superiores à unidade ($D_{100} > 1$).

Tabela 32 - Parâmetros da curva S-N proposta para ligações rebitadas de pontes antigas (Horas, 2021)

Declive, m	5
$\Delta\sigma_c$ (MPa) (95% probabilidade de sobrevivência)	90

Tabela 33 - D_{100} do elemento 1770 segundo a análise (Horas, 2021)

D_{100} do elemento 1770	
Tráfego Padrão	1,389
Tráfego Pesado	1,478

5

CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

5.1 CONCLUSÃO

O trabalho desenvolvido no âmbito desta dissertação teve como principal objetivo, a avaliação de dano à fadiga baseada no método de acumulação de dano (Lei de Palmgren-Miner) e as curvas S-N de projeto obtidas com base em várias abordagens probabilísticas, para a ligação rebitada de corte duplo da Ponte das Várzeas utilizando também dados de fadiga de outras pontes Portuguesas (Fão, Várzeas e Viana) e de Taras & Greiner (Taras and Greiner, 2010,a). A fadiga nas estruturas metálicas é um assunto a ser destacado na análise de pontes ferroviárias, visto que é um dos fenómenos que leva a danos estruturais e eventualmente à rotura da estrutura.

Para realizar a avaliação da Ponte ferroviária das Várzeas foram analisados vários métodos probabilísticos de modo a obter e comparar várias curvas S-N de projeto. No caso dos modelos probabilísticos baseados na norma ISO12107 (ISO12107, 2012) e na distribuição de Weibull, foi também comparado a utilização de uma regressão linear normal (CLR) e de uma regressão linear ortogonal (OLR). Em ambos os modelos, a conclusão foi a mesma, o modelo que seguiu a regressão linear normal (CLR) apresenta-se como o mais conservativo, ou seja, apresenta um dano mais elevado. Comparando os modelos anteriores, percebe-se que curva S-N de projeto seguindo a norma de Weibull situa-se mais abaixo do que a curva seguindo a norma ISO12107, assumindo-se então como um modelo que conduz a uma curva mais conservativa. Além dos modelos anteriores, foram adicionados o modelo probabilístico Castillo & Fernández-Canteli (CFC) que se destaca por apresentar uma curva probabilística acima dos restantes modelos. A curva S-N de projeto, segundo a norma Americana AASHTO (AASHTO, 2005), destaca-se por apresentar uma curva mais conservativa entre outras obtidas pelas abordagens probabilísticas referidas.

Previamente à avaliação do dano por fadiga para as localizações críticas em consideração da Ponte das Várzeas, foram analisados o cenário de tráfego padrão e o cenário de tráfego pesado. Cada um com o seu conjunto de comboios, e respetivo número de repetições anual, e espectro de tensões.

Na avaliação do dano por fadiga de uma localização crítica da Ponte das Várzeas, para 100 anos, D_{100} , utilizando o método de acumulação de dano (MAD), seguindo a regra de Palmgren-Miner, conclui-se que as abordagens probabilísticas – ISO12107 (ISO12107, 2012) e Distribuição de Weibull – utilizando análise de regressão linear normal (CLR) aplicada aos dados de fadiga de ligações rebitadas de corte duplo de Pontes Portuguesas (Fão, Várzeas e Viana) e dados Taras & Greiner para obtenção de curvas S-N de projeto, apresentam danos mais elevados quando comparados com as mesmas abordagens utilizando a análise de regressão ortogonal (OLR) para estimar o declive da curva S-N de projeto. Quando a avaliação de dano por fadiga é efetuada usando a curva de fadiga de projeto obtida pela

aplicação do modelo CFC aos dados de fadiga de ligações rebitadas de corte duplo de Pontes Portuguesas (Fão, Várzeas e Viana) e dados Taras & Greiner, conclui-se que o dano tende para zero ($\rightarrow 0$). Quando a avaliação de dano por fadiga é efetuada usando a curva de fadiga de projeto da norma AASHTO, verifica-se que o dano para 100 anos, D_{100} , é o mais desfavorável. Quando a avaliação de dano por fadiga é efetuada usando as curvas de fadiga de projeto obtidas pela aplicação da distribuição de Weibull, baseada nas análises de regressão linear normal (CLR) e de regressão linear ortogonal (OLR) aos dados de fadiga de ligações rebitadas de corte duplo de Pontes Portuguesas (Fão, Várzeas e Viana) e dados Taras & Greiner, os resultados exibem danos para 100 anos mais elevados do que caso se tivesse utilizado uma curva de projeto com base na norma ISO12107.

Diante de toda a análise, conclui-se que para avaliar o dano de uma estrutura, a escolha do modelo probabilístico correto é imprescindível para obter resultados apropriados ao caso de estudo. No caso da Ponte das Várzeas e de pontes existentes, isto é, pontes em operação a necessitarem de manutenção e reparação, é relevante a ponderação da utilização de uma análise de regressão ortogonal (OLR) para tratar os dados de fadiga obtidos com base em elementos retirados da ponte, e desta forma obter a curva S-N de projeto mais indicada, em vez de uma análise de regressão normal (CLR), recomendada pelas normas.

5.2 TRABALHOS FUTUROS

Com base nos estudos realizados, apresentam-se sugestões a ter em consideração no desenvolvimento de trabalhos futuros:

- i) Utilização de outras abordagens probabilísticas ou técnicas avançadas, ex. Inferência Bayesiana, para obtenção de curvas S-N de projeto de ligações rebitadas de pontes metálicas existentes;
- ii) Utilização de outras abordagens para estimar o declive da curva S-N média, para além das análises de regressão linear normal (CLR) e de regressão linear ortogonal (OLR);
- iii) Realização de avaliações da vida à fadiga de detalhes e/ou ligações rebitadas utilizando outras leis de dano, para além da lei de Palmgren-Miner, tais como, lei sequencial, leis de dano não linear, ex. Lei de Huffman;
- iv) Desenvolvimento de submodelos locais à escala do grão para as localizações críticas, modelos sem e com fendas de fadiga, de modo a detalhar a resposta da estrutura e empregar comportamento à fadiga à escala considerada;
- v) Realização de ensaios de fadiga de materiais metálicos de pontes metálicas antigas e efetuar análises microestruturais (ex. análises metalográficas) desses mesmos materiais para obtenção do comportamento à fadiga à escala do grão, isto é, comportamento da resistência microestrutural à fadiga;
- vi) Realização de um estudo detalhado para obtenção de relações entre o comportamento monotónico e à fadiga (considerando vários regimes) dos materiais metálicos e currentes empregues em estruturas de engenharia civil.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AASHTO. (2005). AASHTO LRFD Bridge Design Specifications. American Association of state Highway and Transportation Officials.
- Al-Emrani, M., & Aygul, M. (2014). *Fatigue Design of Steel and Composite Bridges*. Göteborg, Sweden.
- AREMA. (2014). *AREMA Manual for Railway Engineering*. American Railway Engineering and Maintenance-of-Way Association.
- ASTM. (2015). ASTM E647 - 15e1. *Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth*. West Conshohocken, PA.
- Barroso, J. D. (2019). Dynamic Analysis and Fatigue Assessment of an Existing Railway Steel Bridge. *Dissertação de Mestrado*. FEUP.
- Castillo, E., & Fernández-Canteli, A. (2001). A general regression model for lifetime evaluation and prediction. *International Journal of Fracture*.
- Castillo, E., López-Aenlle, M., Ramos, A., Fernández-Canteli, A., Kieselbach, R., & Esslinger, V. (2005). Specimen length effect on parameter estimation in modelling fatigue strength by Weibull distribution. *International Journal of Fatigue*, 12.
- CEN. (2010c). Eurocode 3. *Design of steel structures. Part 1-9: Fatigue*. Lisboa: Instituto Português da Qualidade.
- CEN. (2017). Eurocode 1: Actions on structures. *Part 2: Traffic loads on bridges*. Lisboa, Instituto Português da Qualidade.
- Correia, J. (2014). An integral probabilistic approach for fatigue lifetime prediction of mechanical and structural components. Universidade do Porto (Portugal).
- Correia, J. A. F. O.; De Jesus, A. M. P.; Figueiredo, M. A. V. ., and Ribeiro, A. S.; Fernandes, A. A. (2008). Fatigue assessment of riveted railway bridge connections. Part I: Experimental investigations, in Steel bridges.
- Correia, J. A., & Veljkovic, M. (s.d.). CIE5126. *Probabilistic Fatigue Modeling*.
- Correia, J. A., Silva, L. S., Martins, J. P., & Laím, L. (s.d.). Design of Bridges, Theoretical Aspects. UC.
- Correia, J., & Veljković, M. (2022). CIE5126, Probabilistic Fatigue Modeling, L13.
- EN 1993-1-9. (2010). Em *Eurocódigo 3 – Projecto de Estruturas de Aço* (pp. Parte 1-9: Fadiga). Brussels: CEN.
- EN 1993-2. (2006). Eurocode 3: Design of Steel Structures. European committee for Standardization: Brussels.
- Fernandez-Canteli, A., Przybilla, C., Nogal, M., Aenlle, M. L., & Castillo, E. (2014). ProFatigue: A software program for probabilistic assessment of experimental fatigue data sets.
- Figueiredo, M.; Jesus, A.; Pereira, H.; Ribeiro, A.; Natal, R. ., and Moreira, P.; Castro, P. T.; Fernandes, A. A. (2004). Avaliação da integridade estrutural da Ponte do Pinhão. FEUP.
- Figueiredo, M.A.V., Jesus, A.M.P., Ribeiro, A.S., De Castro, P.M.S.T. and Fernandes, A.A. (2006). Fatigue behaviour of riveted steel lap joints. Em *Proceedings of the 3rd International*

Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management - Bridge Maintenance, Safety, Management, Life-Cycle Performance and Cost.

- Guida, M., & Penta, F. (2010). A Bayesian analysis of fatigue data. *Struct Safety*.
- Haghighi, A. W. (2020). *Probability, Statistics, and Stochastic Processes for Engineers and Scientists*.
- Horas, C. C. (2021). Integrated Methodology for Fatigue Life Prediction of Existing Metallic Railway Bridges. *Doutoramento*. FEUP.
- ISO12107. (2012). *Metallic Materials-Fatigue testing- Statistical planning and analysis of data*.
- Jesus, A.M.P.D., Silva, A.L.L.D., Figueiredo, M.V., Correia, J.A.F.O., Ribeiro, A.S. and Fernandes, A. A. (2011). Strain-life and crack propagation fatigue data from several Portuguese old metallic riveted bridges.
- KELES, T. (2018). Comparison of Classical Least Squares and Orthogonal Regression in. *International Online Journal of Educational Sciences*, 16.
- Kühn, B., Lukić, M., Nussbaumer, A., Günther, H.-P., Helmerich, R., Herion, S., . . . Bucak, Ö. (2008). Assessment of Existing Steel Structures: Recommendations for Estimation of Remaining Fatigue Life. Em *JRC Scientific and Technical Reports*.
- Liu, J., Correia, J. A., Xin, H., Gao, Q., Sun, Q., Bingzhen, . . . Berto, F. (2022). Stochastic analysis on fatigue life of butt-welded joints with uneven thickness considering mean stress effects. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 13.
- Liu, X.-W., Lu, D.-G., & Hoogenboom, P. C. (2017). Hierarchical Bayesian fatigue data analysis. *International Journal of Fatigue*, 11.
- Long, J., & Teetor, P. (2019). *R Cookbook, 2nd Edition*. O'Reilly'.
- Martins, P. M. (2020). Avaliação do Comportamento à Fadiga de uma Ponte Ferroviária Metálica. *Dissertação de Mestrado*. FEUP.
- Mendes, J. (2019). Comportamento à Fadiga de pontes Metálicas Ferroviárias Reforçadas com FRP's. *Dissertação de Mestrado*. FEUP.
- Mohabeddine, A., Correia, J., Montenegro, P. A., Jesus, A. d., Castro, J. M., & Berto, F. (2021). Probabilistic S-N curves for CFRP retrofitted steel details. *International Journal of Fatigue*, 13.
- NF EN 1090-2. (2018). Execution of steel structures and aluminium structures - Part 2: technical requirements for steel structures. Brussels, Belgium.
- NP EN 10002-1 . (2006). Materiais Metálicos. Ensaio de Tracção. Parte 1: Método de Ensaio à Temperatura Ambiente.
- Officials, A. A. (2005). *AASHTO LRFD Bridge Design Specifications*.
- Pedrosa, B., Correia, J. A., Rebelo, C. A., & Veljkovic, M. (2020). Reliability of Fatigue Strength Curves for Riveted Connections Using Normal and Weibull Distribution Function. *ASCE*, 8.
- Radaj, D. S. (2006). *Fatigue Assessment of Welded Joints by Local Approaches*. Woodhead publishing.
- Ron, E. C., Canteli, A. F., Collado, S. G., Aenlle, M. L., Macho, M. N., Pinto, H., . . . Garrido, A. R. (2014). *ProFatigue User Guide*.
- Schijve, J. (2003). Fatigue of structures and materials in the 20th century and the state of the art. Em F.-K. M. Materialov.

- Silva, A. L. (2015). Advanced Methodologies For The Fatigue . *Dissertação de Mestrado*. FEUP.
- Sousa, B. B. (2020). Probabilistic Fatigue Strength Modeling of Metallic Bridge Connections. *Dissertação de Mestrado* . FEUP.
- Souto, C. D., Correia, J. A., Jesus, A. M., & Calçada, R. A. (2019). Fatigue Damage Tool (FDT) - A tool for fatigue damage assessment according to design codes. FEUP.
- Souto, C. D., Correia, J. A., Jesus, A. M., & Calçada, R. A. (2020). Fatigue Damage Tool (FDT) - A tool for fatigue damage assessment according to design codes. *First International Symposium on Risk and Safety of Complex Structures and Components*, p. 10.
- Sundqvist. (21 de July de 2022). *Orthogonal Linear Regression*. Obtido de MATLAB Central File Exchange: <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/6716-orthogonal-linear-regression>
- Taras and Greiner. (2010,a). Development and Application of a Fatigue Class Catalogue for Riveted. *Structural Engineering International*.
- Taras, A. &. (2010b). Statistical Background to the Proposed Fatigue Class Catalogue for Riveted Components. Lausanne, Switzerland: ECCS TC6: Report: Contribution to WG6.1 – Assessment of Existing Steel Structures.
- Wang, S., Zhuang, W., Cao, J., & Lin, J. (2015). *Micro-mechanics Modeling for Micro-forming Processes*. Elsevier.
- Wicklin, R. (2015). Plot the conditional distribution of the response in a linear regression model. Em *Advanced Analytics*.
- Wikipédia. (2019). *Regressão linear*. Obtido de https://pt.wikipedia.org/wiki/Regress%C3%A3o_linear
- Xin, H., Correia, J. A., Veljkovic, M., Zhang, Y., Berto, F., & Jesus, A. M. (2021). Desempenho probabilístico de vida de fadiga por deformação com base na análise estocástica de aços inoxidáveis estruturais e WAAM. *Análise de falhas de engenharia*, 20.
- Xin, H., Correia, J., Veljkovic, M., Zhang, Y., Berto, F., & Jesus, A. (2021). Probabilistic strain-fatigue life performance based on stochastic . *Engineering Failure Analysis*, 20.