

Universidade de Passo Fundo
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e
Ambiental

Fábio Goedel

**MODELO HÍBRIDO PARA OBTENÇÃO DE CURVAS S-N
COM NÚMERO DE ENSAIOS REDUZIDOS**

Passo Fundo

2018

Fábio Goedel

**MODELO HÍBRIDO PARA OBTENÇÃO DE CURVAS $S-N$
COM NÚMERO DE ENSAIOS REDUZIDOS**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Faculdade de Engenharia e Arquitetura da Universidade de Passo Fundo, como requisito para a obtenção do título de Doutor em Engenharia, sob a orientação do Prof. Dr. Zacarias Martin Chamberlain Pravia

Passo Fundo
2018

Fábio Goedel

**MODELO HÍBRIDO PARA OBTENÇÃO DE CURVAS S-N
COM NÚMERO DE ENSAIOS REDUZIDOS**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Faculdade de Engenharia e Arquitetura da Universidade de Passo Fundo, como requisito para obtenção do grau de Doutor em Engenharia.

Data da defesa: 05/11/2018

Membros componentes da Banca examinadora:

Professor Doutor Zacarias Martin Chamberlain Pravia
Orientador

Professor Doutor Ignacio Iturrioz
Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Professor Doutor Inácio Benvegno Morsch
Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Professor Doutor Agenor Dias de Meira Junior
Universidade de Passo Fundo

Professor Doutor Moacir Kripka
Universidade de Passo Fundo

Professor Doutor Gustavo Prates Mezzomo
Universidade de Passo Fundo

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus.

Agradeço aos meus pais, Paulinho e Cereli, aos meus irmãos, Liziane, Geovana e Fabrício, que sempre acreditaram, incentivaram e me fizeram acreditar que seria possível. O apoio de vocês tem sido muito importante, tanto profissionalmente, como pessoalmente. Amo vocês e desejo que vocês sejam muito felizes e que tenhamos muita saúde para podermos aproveitar a vida juntos.

Agradeço minha esposa Daiane e ao meu filhão Davi, vocês são meu porto seguro. Obrigado por estarem sempre ao meu lado, pois sabem que isso é muito importante para mim. Quando terminei o mestrado, o meu filho e hoje meu melhor amigo, tinha 1 ano e 5 meses. Agora com 7 anos, tenho certeza que ele é a pessoa que melhor entende a minha felicidade por estar terminando mais essa etapa na minha vida, pois foi ele que me apoiou muito nesse último ano, me dando força, tendo paciência e incentivando, e principalmente, foi por ele que me dediquei com tanta garra para terminar o doutorado, pois é recíproca a vontade de estarmos juntos brincando e conversando, como sempre fizemos. Você é meu maior orgulho Davi e motivo de continuar sempre buscando ser uma pessoa melhor. Amo vocês, Daiane e Davi.

Agradeço ao meu orientador Prof. Zacarias Chamberlain, que além de orientador, se tornou um grande amigo. Agradeço profundamente por acreditar nas minhas ideias, a elas somar as suas “loucuras”, as quais, confesso tive grandes dificuldades de acompanhar inicialmente, mas foram essas “loucuras” e discussões que ocorriam sem local e sem hora marcada, que conduziram ao tema final e resultados da tese. Grato eternamente pela parceria, dedicação e disciplina cobrada.

Agradeço aos Professores Ignacio Iturrioz, Rogério Marczak, Agenor Dias de Meira Jr. e Gustavo Mezzomo, pois foram pessoas sensacionais que marcaram minha vida, contribuindo muito para meu crescimento técnico.

Um agradecimento especial aos amigos Kaue Riffel, Prof. Willian Haupt e Lucas Arend, pois o apoio de vocês foi muito importante para a fabricação dos corpos de prova usados nos ensaios de fadiga. Também agradeço a empresa Stara pela doação dos materiais usados na fabricação dos corpos de prova.

Agradeço a equipe da Resistenge Soluções em Engenharia, Cristiano Ferarez, Tairone Pedrotti e Renan Machado da Silva, pelo incentivo durante o doutorado, e por acreditar junto comigo, que sempre podemos fazer melhor. Grato pela parceria.

Agradeço a toda a equipe do Núcleo de Tecnologia Mecânica da Engenharia Mecânica da UPF, em especial aos senhores Eloi, Paulo e Derli, pelas contribuições na fabricação dos corpos de prova, dispositivos para ensaio e para a execução dos ensaios de fadiga.

Agradeço aos alunos que participam ou participaram do grupo de pesquisa “Fadiga em estruturas soldadas”. Foi muito gratificante trabalhar com todos vocês. Obrigado.

Este trabalho é dedicado aos meus pais, que me ensinaram o valor da honestidade, da perseverança e da fé. Também dedico a minha esposa Daiane e meu filho Davi, que convivem comigo diariamente, que me apoiaram nesses anos todos e me ensinaram a importância das palavras amor e companheirismo.

RESUMO

As juntas ou uniões soldadas têm grande importância na predição da vida útil de estruturas sujeitas à fadiga. Portanto, é do interesse dos engenheiros e das indústrias de um modo geral, que no projeto de tais estruturas, se utilizem metodologias confiáveis para obtenção dos parâmetros para a análise de fadiga, tanto quanto às propriedades dos materiais, bem como, os métodos para obtenção das tensões nas regiões soldadas, a fim de determinar a vida útil da estrutura ou componente mecânico com confiabilidade adequada. Este trabalho apresenta uma abordagem híbrida para obtenção de curvas $S-N$ com número reduzido de ensaios associados a dados estatisticamente simulados. Para validar a proposta, dois processos de validação foram desenvolvidos: um usando uma metodologia para gerar curvas $S-N$ com base em simulações de Monte Carlo e outra usando dados reais disponíveis na literatura, a qual permite comparar a abordagem híbrida com a curva experimental $S-N$ obtida com alta replicação. Em ambos os processos de validação, uma boa precisão foi verificada. Posteriormente, foi realizada a análise de fadiga de uma junta soldada em filete utilizando análise de elementos finitos para avaliar o dano cumulativo e a vida em fadiga, possibilitando a comparação entre o método proposto e a curva $S-N$ definida pela norma NBR 8800:2008. Os resultados obtidos com a metodologia proposta permitiram previsões mais precisas e menos conservadores do que as obtidas quando a norma NBR 8800 é usada para a mesma classe de detalhe de solda. As melhorias foram identificadas, tanto para a vida como para o dano por fadiga.

Palavras-chave: curva $S-N$, Método de Monte Carlo, ensaios de fadiga, junta soldada de filete, propriedades de fadiga

ABSTRACT

Welded joints have great importance in the fatigue analysis of structures subjected to cyclic loading, being that design engineers and industries have interest in reliable methods that can be used to obtain the parameters for the fatigue analysis, such as the materials properties and methods for obtaining the stresses in the welded regions, in order to determine the life cycle of the structure or mechanical component with adequate reliability. This work introduces a hybrid approach for obtaining $S-N$ curves with reduced number of tests associated to statistically simulated data. In order to validate the proposal, two validation process were developed. One using a methodology to generate $S-N$ curves based on Monte Carlo simulations and other using actual data available in the literature, allowing to compare the hybrid approach with the experimental curve $S-N$ obtained with high replication. In both validation process, a good accuracy was verified. Subsequently, the fatigue analysis of a fillet welded joint was carried out using finite element analysis to evaluate the cumulative damage and fatigue life, enabling comparison between the proposed method and standard NBR 8800:2008. The results obtained with the proposed methodology allowed more accuracy results and less conservative than standard for the same weld detail class, both for fatigue life and for cumulative fatigue damage evaluations.

Keywords: $S-N$ curve, Monte Carlo method, fatigue test, fillet welded joint, fatigue material properties

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - (a) Iniciação da trinca e fases I e II do crescimento de uma trinca de fadiga. (b) Representação esquemática de intrusões e extrusões.	26
Figura 2 – Estágios de formação de bandas de deslizamento (nucleação da trinca - Estágio I).	27
Figura 3 - Históricos de carregamentos típicos de uma aeronave em condições de serviço.	29
Figura 4 - Nomenclatura das componentes de tensões de um carregamento de amplitude constante.	30
Figura 5 - Telhado de uma pagoda.	32
Figura 6 - Analogia entre chuva caindo e o método Rainflow.	32
Figura 7 - Parâmetros básicos de carregamento por fadiga.	32
Figura 8 - Representação da relação tensão-deformação e método Rainflow.	33
Figura 9 - Exemplo de razão de ciclo para diferentes amplitudes de carga.	35
Figura 10 - Curva S–N baseada em dados experimentais.	38
Figura 11 - Máquina de teste de fadiga de flexão rotativa de R. R. Moore.	40
Figura 12 - Curva S–N de acordo com a norma JSME S 002.	41
Figura 13 - Método da escada para determinar o limite de resistência	42
Figura 14 - Relação entre resistência à fadiga sob flexão rotativa de corpos de prova sem entalhe e a resistência última a tração para aços.	45
Figura 15 - Efeito da tensão média na vida em fadiga.	46
Figura 16 - Comparação entre os critérios para correção da tensão média, sendo a) Soderberg, b) Goodman Modificado, c) Gerber e d) Morrow.	47
Figura 17 - Efeito da sobreposição da tensão cíclica com a tensão residual de tração com magnitude da ordem da tensão de escoamento do material.	48
Figura 18 - Resultados de testes que ilustram que a vida útil da fadiga de juntas soldadas contendo alta tensão residual de tração é independente da relação de tensão aplicada.	49
Figura 19 - Curva S–N teórica de (BASQUIN, 1910).	50
Figura 20 - Esquema de uma curva S–N para aços.	51
Figura 21 - Efeitos modificadores das curvas S–N para aços.	52
Figura 22 - Curva S–N estimada de acordo com as recomendações FITNET.	54
Figura 23 – Representação da curva S–N FITNET modificada.	56

Figura 24 – Esquema para obtenção da curva híbrida (analítica/experimental).....	59
Figura 25 – Distribuição Gama dos valores do coeficiente m , (a) para corpos de prova sem entalhes e (b) corpos de prova entalhados.	59
Figura 26 - Curva $S-N$ ajustada e dados experimentais.	63
Figura 27 - Curva $S-N$ ajustada com 2σ ou 3σ abaixo da curva média.	64
Figura 28 – Gráficos de distribuição normal. (a) Função densidade de probabilidade e (b) função de distribuição acumulada.	70
Figura 29 - Histograma da distribuição da vida em fadiga para 57 corpos de prova de liga de alumínio 7075-T6 testados para 207 MPa.	70
Figura 30- Distribuição de Weibull com dois parâmetros para diferentes coeficientes de forma b	71
Figura 31 – Intervalos de confiança para a média de uma população com distribuição normal.	73
Figura 32 - Fluxograma básico para análise de fadiga.	78
Figura 33 – Esquema dos diferentes tipos de abordagem para descrição da resistência à fadiga.	80
Figura 34 - Exemplos de efeitos macro geométricos.	82
Figura 35 – Tensão nominal em viga com reforço soldado.	82
Figura 36 - Tensão nominal extrapolada em uma junta soldada.	83
Figura 37 - Estrutura soldada real.....	85
Figura 38 - Modelagem da solda utilizando elementos Oblíquos em Casca.....	85
Figura 39 - Modelagem da solda utilizando uniões rígidas.....	86
Figura 40 - Modelagem da solda utilizando incremento da espessura.	86
Figura 41 – Representação da estrutura sólida e modelo de EF.	88
Figura 42 - Proposta I apresentada por (ECHER, 2015).	88
Figura 43 - Proposta II apresentada por (ECHER, 2015).	89
Figura 44 - Fluxograma para execução das simulações estatísticas.	91
Figura 45 - Nomenclatura dos parâmetros para definição de um ciclo de carga.....	92
Figura 46 – Esquema para cálculo do DRP	95
Figura 47 - Curvas $S-N$ estimadas com a) dois corpos de prova por nível em dois níveis de tensão, b) com dois corpos de prova por nível em três níveis de tensão e c) dois corpos de prova por nível em quatro níveis de tensão.	96

Figura 48 - Curva $S-N$ usada como referência para as simulações estatísticas.....	99
Figura 49 - Esquema dos principais parâmetros envolvidos na configuração de ensaios de fadiga.	100
Figura 50 - Fluxograma para avaliação de desempenho dos métodos propostos.....	102
Figura 51 - Fluxograma para geração de curvas $S-N$ híbridas.	104
Figura 52 – Representação esquemática para geração da curva $S-N$ híbrida.....	105
Figura 53 – Distribuição de probabilidade do expoente m para juntas soldadas de filete fabricadas em aço.	106
Figura 54 – Procedimento para validação da abordagem híbrida através de simulações de Monte Carlo.	108
Figura 55 – Classe de fadiga da junta soldada conforme (ABNT NBR 8800, 2008).	111
Figura 56 - Espectrômetro de emissão ótica modelo FOUNDRY – MASTER Xline da empresa Shimadzu.	113
Figura 57 – Robô de solda utilizado na fabricação dos corpos de prova.	114
Figura 58 – Fresadora e dispositivo de usinagem projetado para faceamento dos corpos de prova.	114
Figura 59 – (a) Máquina servo hidráulica para ensaios de fadiga e (b) detalhe do dispositivo de fixação dos corpos de prova.	116
Figura 60 - Projeto do dispositivo para fixação dos corpos de prova em duas posições diferentes.	116
Figura 61 - Fluxograma completo de projeto de uma junta soldada quanto à fadiga.....	118
Figura 62 - Detalhes de juntas soldadas de um componente agrícola.	119
Figura 63 - Geometria e dimensões da junta soldada do tipo T	120
Figura 64 – (a) Geometria, condições de contorno e (b) Malha de elementos finitos da junta soldada.	121
Figura 65 - Esquema geral de desenvolvimento dos estudos e análises.....	122
Figura 66 – Distribuição de <i>Weibull</i> com 3 parâmetros com percentis de 0.005 e 0.995.	124
Figura 67 - Exemplo de avaliação dos resultados (a) dentro dos limites do ensaio e (b) fora dos limites ensaiados (extrapolando).	125
Figura 68 – Influência do número de níveis de tensão na geração de curvas $S-N$ geradas com $RP=50\%$	126

Figura 69 – Influência da replicação na geração de curvas $S-N$ geradas com dois níveis de tensão.....	127
Figura 70 – Resultados para todas as simulações: (a) número total de corpos de prova versus envelope da DRP e (b) número de níveis de tensão versus envelope da DRP	130
Figura 71 – Curvas $S-N$ simuladas pelo método de Monte Carlo considerando a DRP dentro da faixa de tensões testadas.....	131
Figura 72 – Curvas $S-N$ simuladas pelo método de Monte Carlo considerando a DRP extrapolando a faixa de tensões testadas.....	132
Figura 73 – Curvas $S-N$ sobrepostas para 100 simulações para o (a) Caso 1 e (b) Caso 2....	134
Figura 74 – Densidade de probabilidade para o DRP para o dano estimado para o (a) Caso 1 e (b) Caso 2.....	136
Figura 75 – Densidade de probabilidade para a DRP para a vida em fadiga estimada para o (a) Caso 1 e (b) Caso 2.....	137
Figura 76 – Gráfico comparativo para verificação do método proposto usando dados de (ZHAO, GAO e SUN, 1998).....	139
Figura 77 – Gráfico comparativo para verificação do método proposto com dados do autor.....	141
Figura 78 - Corpos de prova finalizados.....	143
Figura 79 - Curva $S-N$ híbridas média e de projeto, com 50% e 95% de confiabilidade, respectivamente.....	143
Figura 80 – Corpos de prova fraturados no ensaio de fadiga e análise da superfície de falha.....	144
Figura 81 – Resultados da análise de elementos finitos para a tensão no pé da solda.....	145

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Alguns modelos propostos na literatura para curvas $S-N$.	38
Tabela 2 – Normas vigentes para ensaios de fadiga.	40
Tabela 3 - Valores recomendados para ensaio de fadiga.	43
Tabela 4 - Número de amostras necessárias para um dado nível de probabilidade de falha em vários níveis de confiança de acordo com a BS ISO 12107 (2015).	43
Tabela 5 – Estimativa da resistência à fadiga para 10^6 ciclos para outros tipos de materiais sob flexão rotativa.	53
Tabela 6 – Estimativa da resistência à fadiga para 1000 ciclos.	53
Tabela 7 – Valores do coeficiente fW, σ conforme o método FITNET.	55
Tabela 8 – Valores do coeficiente m para diversos materiais	56
Tabela 9 – Valores do coeficiente confiabilidade.	58
Tabela 10 – Parâmetros necessários para definir distribuições amostrais.	69
Tabela 11 – Intervalos de confiança para médias de distribuições de probabilidade.	73
Tabela 12 – Principais normas internacionais para avaliação de vida em fadiga em estruturas soldadas.	77
Tabela 13 – Principais configurações das simulações estatísticas – Parte 1.	97
Tabela 14 – Dados de fadiga de uma junta soldada fabricada em aço Q235 (ZHAO, GAO e SUN, 1998).	98
Tabela 15 – Diferentes configurações para ensaios de fadiga conforme E739.	100
Tabela 16 – Configurações para ensaios de fadiga conforme ISO 12107-2012 e JSME S 002-1994.	101
Tabela 17 – Valores dos parâmetros de entrada.	104
Tabela 18 – Espectro de tensão de acordo com a norma NBR 15018 levando em conta a curva de referência.	109
Tabela 19 - Dimensões em milímetros dos corpos de prova.	120
Tabela 20 - Resultados das simulações de 10000 curvas $S-N$ por estudo.	126
Tabela 21 – Diferentes configurações e resultados obtidos para testes de fadiga simulados de acordo com ASTM E 739.	129
Tabela 22 – Diferentes configurações e resultados obtidos para testes de fadiga simulados de acordo com BS ISO 12107 e JSME S 002.	132

Tabela 23 – Resultados obtidos para as 100 curvas simuladas.	135
Tabela 24 – Dados experimentais de fadiga iniciais selecionados randomicamente a partir da Tabela 14.	138
Tabela 25 – Dados experimentais de fadiga iniciais da junta soldada testada.	140
Tabela 26 – Valores dos parâmetros de entrada para a estimativa da curva $S-N$ híbrida.	140
Tabela 27 – Propriedades químicas do aço NBR 6656 LNE 38.	142
Tabela 28 - Propriedades químicas do material de adição ER70S6.	142
Tabela 29 - Propriedades mecânicas do material base.	142
Tabela 30 – Resultados para a junta testada.	145

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

FAC	Fadiga de alto ciclo
FBC	Fadiga de baixo ciclo
PSD	Power Spectral Density (Densidade Espectral de Potência)
LSE	Estimativa de mínimos quadrados (<i>Least Square Estimation</i>)
DOE	<i>Design of Experiment</i> (Experimento projetado)
FDP	Função densidade de probabilidade
MEF	Método dos Elementos Finitos

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	iv
RESUMO	vi
ABSTRACT	vii
LISTA DE FIGURAS	viii
LISTA DE TABELAS.....	xii
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	xiv
1 INTRODUÇÃO	18
1.1 Problema de pesquisa.....	20
1.2 Justificativa do trabalho	23
1.3 Objetivo geral.....	23
1.4 Objetivos específicos	23
2 FUNDAMENTOS BÁSICOS SOBRE FADIGA	25
2.1 Tipos de carregamentos de fadiga.....	28
2.2 Métodos para análise de carregamentos de amplitude variável.....	31
2.2.1 Contagem de ciclos – <i>Rainflow</i>	31
2.2.2 Determinação de dano acumulado – Regra de Miner.....	34
2.3 Métodos para obtenção de parâmetros de fadiga dos materiais	37
2.3.1 Métodos experimentais para obtenção de curvas $S-N$ conforme normas.....	39
2.3.2 Métodos simplificados para obtenção de curvas $S-N$ baseados na resistência estática dos materiais.....	44
2.3.3 Métodos para obtenção de curvas $S-N$ com número de corpos de prova reduzidos (métodos experimentais).....	59
2.3.4 Métodos de construção da curva de projeto.....	63
2.4 Fundamentação sobre estatística.....	64
2.4.1 Generalidades sobre dados de fadiga.....	64
2.4.2 Simulações estatísticas usando Método de Monte Carlo	66
2.4.3 Estimativa de parâmetros de uma população e distribuições de probabilidade.....	68
2.4.4 Intervalos de confiança	72
2.4.5 Estimativa de parâmetros de modelos.....	74
2.5 Abordagens para análise de fadiga em juntas soldadas conforme normas e recomendações	

2.5.1	Abordagem da Tensão Nominal	80
2.6	Modelamento em MEF de juntas soldadas para análise de tensões - Geometria	84
2.6.1	Modelagem da solda utilizando elementos oblíquos de casca.....	85
2.6.2	Modelagem da solda utilizando elementos rígidos	86
2.6.3	Modelagem da solda utilizando incremento da espessura	86
2.6.4	Modelagem da solda utilizando elementos sólidos.....	87
2.6.5	Modelagem da solda utilizando elementos oblíquos de casca utilizando parâmetros otimizados.....	87
3	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	90
3.1	Simulações estatísticas de curvas $S-N$	90
3.1.1	Algoritmo para simulação de curvas $S-N$ através de simulações de Monte Carlo.....	90
3.1.2	Simulações estatísticas (Aplicação 1) – Estudo paramétrico de ensaios de fadiga	95
3.1.3	Simulações estatísticas (Aplicação 2) – Configurações de ensaio conforme norma E739	99
3.2	Método proposto para obtenção de curvas $S-N$ híbridas e processo de validação	101
3.2.1	Algoritmo para obtenção de curvas $S-N$ – Abordagem híbrida proposta.....	103
3.2.2	Procedimento de validação com base em simulações de Monte Carlo – Parte 1	107
3.2.3	Procedimento de validação final com base em dados experimentais reduzidos (dados de ZHAO, GAO e SUN (1998)) associados a dados simulados – Parte 2.....	109
3.2.4	Procedimento de validação final com base em dados experimentais reduzidos (do autor) associados a dados simulados – Parte 3.....	110
3.3	Procedimentos Experimentais.....	111
3.3.1	Caracterização do material base (propriedades químicas e mecânicas estáticas).....	112
3.3.2	Preparação de corpos de prova para ensaios de fadiga	113
3.3.3	Ensaio de fadiga.....	115
3.4	Aplicação: Vida útil à fadiga de uma junta soldada de filete	117
4	APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	123
4.1	Simulações estatísticas de curvas $S-N$ usando Simulações de Monte Carlo	123
4.1.1	Simulações estatísticas de curvas $S-N$ – Análise paramétrica.....	123
4.1.2	Simulações estatísticas - Configurações de ensaios conforme normas	127
4.2	Avaliação e validação dos métodos propostos para geração de curvas $S-N$ híbridas .	133

4.2.1	Procedimento de validação com base somente em simulações de Monte Carlo – Parte 1	134
4.2.2	Procedimento de validação final com base em dados experimentais reduzidos (dados de ZHAO, GAO e SUN (1998)) associados a dados simulados – Parte 2.....	138
4.2.3	Procedimento de validação final com base em dados experimentais reduzidos (do autor) associados a dados simulados – Parte 3.....	139
4.3	Resultados dos procedimentos experimentais	141
4.3.1	Caracterização do material base e material de adição	141
4.3.2	Corpos de prova Fabricados.....	142
4.3.3	Resultados dos ensaios de fadiga (Curva $S-N$ de projeto).....	143
4.4	Aplicação da metodologia de projeto à fadiga de uma junta soldada.....	144
5	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS.....	147
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	150
	ANEXO 1 – Relatórios de ensaio visual de solda e por partículas magnéticas	156
	ANEXO 2 - Recomendações propostas e boas práticas no planejamento de testes de fadiga	161
	ANEXO 3 – Análise estatística do coeficiente de inclinação m	166
	ANEXO 4 – Produção científica relacionada com a tese.....	167
	ANEXO 5 – Algoritmo para simulação de curvas $S-N$ através de simulações de Monte Carlo e Geração de curvas $S-N$ híbridas	168

1 INTRODUÇÃO

O fenômeno da fratura por fadiga tornou-se proeminente na época da revolução industrial do século XIX, devido ao grande número de acidentes ocorridos nesse período em máquinas a vapor e locomotivas. Estimativas dessa época relatam cerca de duzentas mortes por ano na Inglaterra no período de 1860 a 1870 em acidentes ferroviários decorrentes de falhas por fadiga, o que é muito para uma época em que somente uma pequena parte da população tinha acesso a este tipo de transporte. No entanto, os acidentes mais citados foram os ocorridos com os navios Liberty, construídos nos Estados Unidos na década de 40 do século XX, época da segunda guerra mundial. Dos 2500 navios construídos, 1289 sofreram algum tipo de problema causado por fadiga desenvolvendo fraturas de considerável tamanho. Desses, 233 tiveram proporções catastróficas, comprometendo seu uso, sendo que ao menos 9 embarcações chegaram a romper-se em duas partes como resultado de fraturas frágeis. A iniciação dessas fraturas deu-se principalmente em regiões soldadas ou em locais de elevada concentração de tensões. O grande número de acidentes envolvendo fadiga durante a segunda guerra talvez foi o grande impulso para o estudo deste fenômeno (BARSOM e ROLFE, 1977; PRAVIA, 2003).

Falhas envolvendo fadiga também foram observadas em estruturas de infraestrutura, tais como pontes metálicas. Antes da Segunda Guerra Mundial, muitas pontes treliçadas do tipo Vierendeel usadas na Europa sofreram rupturas e colapsos pouco tempo depois de colocadas em serviço. Essas pontes eram pouco carregadas e as rupturas foram súbitas devido a fraturas frágeis. Resultados de estudos realizados nessas pontes indicaram que a maioria das falhas iniciaram nas juntas soldadas (BARSOM e ROLFE, 1977).

A falha por fadiga, conforme verificado nas falhas que ocorreram em pontes pouco carregadas citadas anteriormente, é um tipo de fratura que pode ocorrer em níveis de tensão significativamente inferiores aos valores de resistência ao escoamento dos materiais quando os elementos estruturais estão submetidos à ação de tensões repetidas, sendo que a falha não ocorre nos primeiros ciclos de carregamento, mas após um número suficiente de ciclos, sendo denominado de vida útil da estrutura ou do componente estrutural. Dessa forma, a utilização somente das teorias de falha estática, através das quais se verifica a possibilidade de ocorrência de falha por escoamento ou ruptura nas cargas de pico do carregamento, pode levar a projetos sem segurança quando as solicitações são cíclicas e repetidas. Conforme NORTON (2013), 80

a 90% das falhas observadas em componentes com solicitações cíclicas são falhas devido à fadiga.

Nota-se que em muitas falhas e acidentes observados ao longo de todos esses anos que o fenômeno da fadiga vem sendo exaustivamente estudado, e as regiões soldadas têm grande relação com a vida útil de uma estrutura soldada. Muitos resultados e conclusões de estudos de fraturas, sejam em pesquisas acadêmicas, testes em laboratório ou observações de problemas relacionados à fadiga na indústria e obras de infraestrutura, tal como pontes e aerogeradores, na maioria das vezes, as trincas têm início nas uniões soldadas. FISHER (1984) apud PRAVIA, (2003) relata vários casos de pontes que colapsaram por fratura frágil, tal como a ponte de Kings em Melbourne na Austrália, sendo que a ruptura da mesma foi atribuída a detalhes de projeto mal concebidos, que provocaram concentradores de tensão, e a defeitos de fabricação, principalmente nas soldas.

Atualmente, existe um grande número de métodos para a simulação e previsão de vida em fadiga em estruturas soldadas, tais como os métodos que levam em conta a tensão nominal, fator de intensidade de tensão, método da tensão estrutural (*hot spot*) e mecânica da fratura linear elástica/plástica. Cada um desses métodos tem vantagens e desvantagens, bem como suas limitações de aplicação. Ao longo das últimas décadas, é notória a tendência, tanto no âmbito industrial/tecnológico quanto acadêmico, de utilização de metodologias que levam em conta o cálculo de uma tensão estrutural através de elementos finitos ou experimentalmente. Esta tensão estrutural é obtida através de pontos de tensões que estão longe da região de tensões perturbada pela presença do entalhe gerado pelo cordão de solda, simplificando significativamente os métodos de análise e predição.

Segundo a literatura, uma das principais motivações dos diversos estudos que vêm sendo realizados em uniões soldadas é desenvolver metodologias de projeto para avaliação da vida útil de estruturas que sejam ao mesmo tempo de fácil utilização e que apresentem resultados confiáveis quanto à previsão de vida em fadiga. Busca-se através dessas pesquisas e estudos, garantir uma maior durabilidade das estruturas, para aumentar a competitividade das empresas e evitar acidentes que prejudiquem a segurança, o meio ambiente e a economia.

Sendo assim, a motivação desta pesquisa concentra-se no desenvolvimento de uma metodologia híbrida para obtenção de curvas $S-N$, que possibilitem a avaliação da vida útil de juntas T soldadas sujeitas à fadiga, as quais estão presentes no projeto de estruturas de equipamentos ou máquinas em geral, veículos terrestres (como automóveis e caminhões),

aviões, navios e de obras de arte especiais (como pontes, viadutos e passarelas) ou também de qualquer estrutura civil que possa utilizar a mesma metodologia de trabalho. A metodologia proposta é denominada híbrida, uma vez que para sua utilização, a mesma agrega juntamente, dados simulados estatisticamente e ensaios experimentais reduzidos.

Inicialmente foram delimitados o problema de pesquisa e suas justificativas, assim como os objetivos do trabalho. Posteriormente, foi feita a apresentação dos dados encontrados através de pesquisa bibliográfica, assim como a definição da metodologia de trabalho, o desenvolvimento da metodologia e as conclusões.

1.1 Problema de pesquisa

Conforme descrito na introdução deste trabalho, as juntas ou uniões soldadas têm grande importância na predição da vida útil de estruturas sujeitas à fadiga. Portanto, é do interesse dos engenheiros e das indústrias de máquinas e de obras de infraestrutura de um modo geral, que no projeto de tais estruturas, se utilizem metodologias confiáveis para obtenção dos parâmetros para a análise de fadiga, tanto quanto às propriedades dos materiais, bem como, os métodos para obtenção das tensões nas regiões soldadas, a fim de determinar a vida útil da estrutura ou componente mecânico com confiabilidade adequada. No entanto, como descrito por PRAVIA (2003), o tratamento do problema de fadiga, em geral, é bastante complexo, principalmente devido aos empirismos e pontos de vista contraditórios existentes sobre a aplicação prática dos procedimentos técnico-científicos disponíveis na literatura. Devido a esse aspecto, o campo de pesquisa em fadiga, o qual teve seus primeiros estudos realizados em 1829 por W. A. J. Albert, e posteriormente por August Wöhler em 1855, considerado o pai da teoria da fadiga de materiais metálicos, ainda hoje é objeto de estudo de muitos centros de pesquisas e grupos de pesquisadores, pois essa falta de consenso abre caminho para novos estudos de metodologias que aliem bons resultados em termos de confiabilidade dos resultados com custos menores para obtê-los.

A curva $S-N$ é a principal ferramenta para analisar e para prever vida útil de um material, componente ou estrutura, tendo grande influência na qualidade do resultado obtido, segundo FOUCHEREAU, CELEUX e PAMPHILE (2014). No entanto, a dificuldade para obtê-la faz com que os engenheiros utilizem regras simplificadas, que muitas vezes podem ser muito conservadoras, ou, em outros casos, devido às hipóteses utilizadas, pode-se obter previsões equivocadas, não garantindo que a peça não falhará em condições de trabalho. Sendo

assim, existe uma necessidade de metodologias que reduzam o tempo para a obtenção de curvas $S-N$ e também os custos envolvidos. Diversos autores têm pesquisado e publicado metodologias analíticas-experimentais para determinar as características de fadiga na região de vida finita. Metodologias analíticas podem ser baseadas em propriedades estáticas do material ou que envolvam estatística. Abaixo são apresentados resumidamente alguns trabalhos relevantes com relação ao tema citado.

STRZELECKI e SEMPRUCH (2012) apresentam o método de determinação da curva $S-N$ com base apenas nas propriedades estáticas do material. Para verificar o algoritmo de procedimento, foi realizado um experimento para obter as propriedades de fadiga do material C45 + C. O método analítico foi verificado por meio de cálculos estatísticos assumindo a hipótese nula da igualdade dos coeficientes de inclinação da linha estimada com o método analítico e a linha experimental. Os valores estatísticos calculados mostraram que não existem motivos para rejeitar a hipótese nula.

PAOLINO, CHIANDUSSI e ROSSETTO (2013) descrevem que modelos usuais de vida de fadiga, caracterizados por um único mecanismo de falha e pela presença do limite de fadiga, foram integrados por modelos que podem levar em conta a ocorrência de dois mecanismos de falha e não consideram a presença do limite de fadiga. O caso geral, no qual mais de dois mecanismos de falha coexistem com o limite de fadiga, ainda não foi proposto. O artigo apresenta um modelo estatístico unificado que pode levar em conta qualquer número de mecanismos de falha e a possível presença do limite de fadiga. Considera-se também o caso de curvas $S-N$ com diferentes distribuições de vida de fadiga coexistentes para toda a faixa de tensão coberta por testes de fadiga. A adaptabilidade do modelo estatístico às curvas $S-N$ propostas na literatura é demonstrada por exemplos numéricos.

Já FOUCHEREAU, CELEUX e PAMPHILE (2014) afirmam que modelos padrões baseados em teoria da mecânica da fratura ou modelos probabilísticos para analisar as curvas $S-N$ não puderam ajustar a curva $S-N$ em toda a faixa de ciclos sem informações de microestrutura. Essas informações são obtida através de investigação de fractografia dispendiosa raramente disponível na área industrial. Por outro lado, modelos estatísticos para a fadiga não necessitam de informações sobre a microestrutura, mas não podem ser utilizados para predições de vida, porque não têm interpretação do material. Além disso, os resultados dos testes de fadiga são largamente dispersos, principalmente para a região de alto ciclo. Esta é a motivação que levou os autores a propor um novo modelo probabilístico. Este

modelo é um modelo misto específico baseado em uma abordagem da mecânica da fratura, e não requer informações de microestrutura. Faz-se uso do fato de que a vida útil em fadiga pode ser considerada como a soma da vida para nucleação com a fase de propagação da trinca. Os parâmetros do modelo são estimados por um algoritmo de expectativa-maximização (EM), para o qual a etapa de maximização combina o método de Newton-Raphson de otimização e integrações de Monte Carlo. O modelo resultante fornece uma representação parcimoniosa das curvas $S-N$ com parâmetros facilmente interpretados por engenheiros. Este modelo foi aplicado em conjuntos de dados de ensaios de fadiga simulados e reais. Esses experimentos numéricos mostram a capacidade de produzir curvas $S-N$ com boa precisão em toda a faixa de ciclos.

STRZELECKI, SEMPRUCH e NOWICKI (2015) coletam diretrizes relativas à construção experimental das curvas $S-N$ de fadiga dentro da faixa de vida finita em fadiga. Uma tentativa é feita para comparar estas diretrizes, com base em dados experimentais registrados durante ensaios de flexão rotativa de um corpo de prova entalhado feito de 42CrMo4. As diferenças registadas nos valores de vida de fadiga entre as curvas construídas atingem o máximo de 12,2%. De acordo com as orientações acima, o número de ensaios varia de 6 a 28. Com base na análise realizada, concluiu-se que o aumento no número de testes leva ao aumento da precisão, mas por outro lado, aumenta consideravelmente o tempo do teste, e conseqüentemente seu custo.

Outra pesquisa que está relacionada com métodos acelerados para obtenção de curva $S-N$ é a de STRZELECKI e TOMASZEWSKI (2016b), na qual os autores apresentam uma abordagem padrão para determinação da curva $S-N$. O método proposto foi verificado baseado em resultados de testes para o aço S355J2+C, o qual foi realizado com máquina de flexão rotativa, baseado na curva resultante usando 9 amostras, a qual é menor que a normatizada que é de 14 amostras, de acordo com a norma (JSME S 002, 1994). Foram utilizadas diferentes bandas de dispersões dependendo do nível de tensão da amostra dentro dos limites de durabilidade. Isto pode ser obtido usando uma distribuição de *Weibull* de 3 parâmetros.

Dessa forma, nota-se uma grande tendência a realização de estudos que busquem otimizar os processos de obtenção de curvas $S-N$, buscando equilibrar precisão nos resultados e custos para obtenção dos parâmetros de fadiga.

O tema de fadiga é uma área bastante abrangente, sendo que a fim de manter a objetividade, algumas limitações são necessárias. No presente trabalho, alguns aspectos não foram levados em conta profundamente, sendo estes: fadiga multiaxial, fadiga no domínio da

frequência, abordagem pela mecânica da fratura linear elástica, vida baseada na deformação e regras de dano não linear.

1.2 Justificativa do trabalho

A motivação para o presente trabalho vem da sua grande aplicabilidade à indústria e projeto de obras de infraestrutura, tal como pontes, aerogeradores, uma vez que não existe um método definitivo e consensual para uso no projeto de uniões soldadas, e nesse contexto este trabalho pretende contribuir para o desenvolvimento de uma metodologia para obtenção de curvas $S-N$ com número de corpos de prova reduzidos, possibilitando melhor desempenho nas previsões de vida em fadiga e dano em projeto de juntas soldadas. É uma tendência a utilização de métodos acelerados para obter as propriedades do material quanto à fadiga pela redução do número de corpos de prova a serem ensaiados, associando-se dados simulados estatisticamente. No entanto, mais estudos numéricos (neste caso foram utilizadas simulações de Monte Carlo) e ensaios são necessários para verificar seu desempenho e limitações para a determinação da vida em fadiga.

O tema proposto tem grande relevância como pesquisa, pois mesmo após diversos estudos para obtenção de propriedades de fadiga de materiais terem sido desenvolvidos, não se chegou a um consenso com relação ao método mais adequado a ser utilizado em análises de fadiga de estruturas soldadas, principalmente devido ao número de tipos de uniões soldadas existentes. O presente trabalho contribuiu com o estudo de mais um tipo de união soldada aos já existentes na literatura, melhorando o equilíbrio entre precisão dos resultados e custos para obtenção dos parâmetros do material necessários para a realização de uma análise de fadiga.

1.3 Objetivo geral

O objetivo principal deste trabalho é desenvolver uma metodologia híbrida para obtenção de curvas $S-N$ com número de corpos de prova reduzidos, associados a dados simulados estatisticamente, a fim de assegurar um desempenho adequado de vida útil de estruturas de aço e componentes mecânicos soldados.

1.4 Objetivos específicos

Para que o objetivo principal seja atingido, apresentam-se os seguintes objetivos específicos:

- a) Avaliar de forma exploratória o estado da arte de métodos de obtenção de curvas $S-N$;
- b) Desenvolver um algoritmo para simular curvas $S-N$ baseadas nas propriedades de fadiga do material e distribuições de probabilidades conhecidas previamente, utilizando simulações de Monte Carlo;
- c) Realizar um estudo paramétrico das principais variáveis envolvidas em ensaios de fadiga utilizando a metodologia proposta para simular curvas $S-N$ e dados de materiais disponíveis na literatura;
- d) Propor uma metodologia para gerar curvas $S-N$ com número de ensaios reduzidos, associados a dados simulados estatisticamente;
- e) Realizar ensaios de fadiga em uma junta de filete soldada tipo T, aplicando a metodologia proposta para obter a curva $S-N$.
- f) Validar a metodologia proposta;
- g) Avaliar a vida útil da junta soldada objeto de estudo, considerando carregamentos com amplitude variável, comparando o dano obtido utilizando a curva $S-N$ da norma ABNT NBR 8800 (2008) com a curva híbrida proposta;
- h) Apresentar uma análise crítica sobre os diversos aspectos a serem levados em conta na previsão de vida útil de estruturas soldadas, buscando o equilíbrio nos dados de entrada (geometria, material e carregamento) em uma análise de fadiga.

2 FUNDAMENTOS BÁSICOS SOBRE FADIGA

Historicamente o fenômeno da fadiga tem se demonstrado muito presente na causa de falhas estruturais, tendo maior evidência a partir da Segunda Guerra Mundial (BARSOM e ROLFE, 1977). Devido a sua complexidade por ser um tema interdisciplinar, que envolve diversas áreas, tais como projeto, materiais, fabricação e utilização do produto, o estudo da fadiga ainda apresenta uma série de lacunas teóricas e práticas a serem preenchidas e, conseqüentemente, possibilidades de pesquisa e questões a serem respondidas.

Segundo BRANCO, FERNANDES e CASTRO (1999), define-se como fadiga o fenômeno de ruptura progressiva de materiais sujeitos a ciclos repetidos de tensão ou deformação, sendo de grande importância o estudo do fenômeno na concepção de máquinas e estruturas, visto que a grande maioria das falhas observadas em serviço envolvem fadiga.

Falhas envolvendo fadiga fazem com que empresas e órgãos públicos das mais diversas áreas industriais e civis, sejam elas da indústria agrícola, ferroviária, automotiva ou infraestrutura, tenham custos elevados com reparos e garantias, gerando custos elevados de pós-venda. No Brasil, há empresas ainda não adotaram nenhum tipo metodologia de desenvolvimento de produtos que levem em conta o aumento da confiabilidade e redução de falhas devido aos esforços repetidos (falha por fadiga).

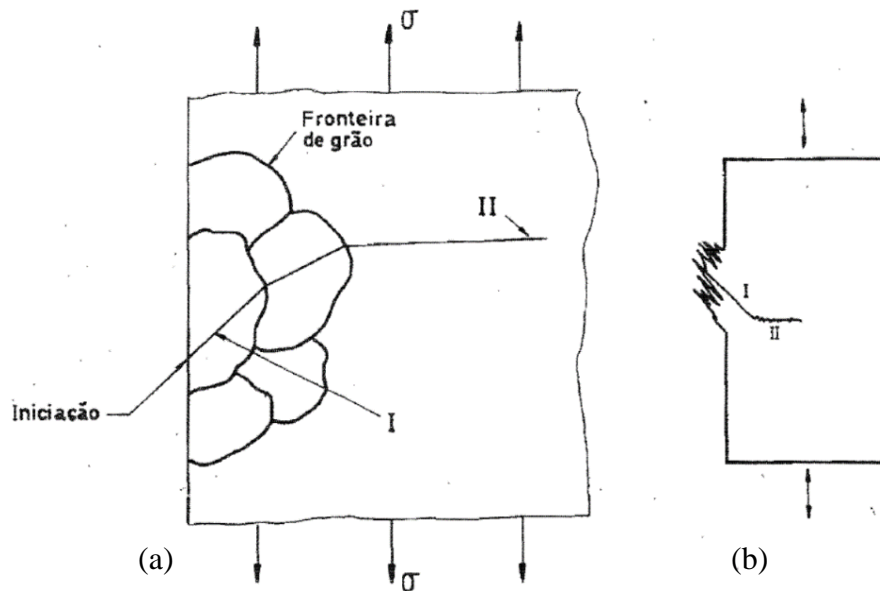
Segundo DOWLING (2012), falhas por fadiga continuam sendo a maior preocupação em projeto de engenharia, sendo que os custos relacionados com fraturas e prevenção das mesmas são muito grandes, sendo que se estima que aproximadamente 80% dos custos envolvidos em situações de falha onde se tem cargas cíclicas são relacionados com fadiga. Como resultado disso, o custo anual da fadiga de materiais para a economia dos EUA em 1982 foi por volta de US\$100 bilhões, correspondendo a aproximadamente 3% do produto interno bruto (PIB). Esses custos são o resultado da ocorrência ou da prevenção da falha por fadiga em veículos terrestres, veículos ferroviários, aviões de todos os tipos, pontes, guindastes, equipamentos industriais, estruturas marítimas de poços de petróleo e uma ampla variedade de mecanismos e equipamentos incluindo itens de uso doméstico, brinquedos e equipamentos esportivos.

Não existe hoje no Brasil um estudo de domínio público quantificando os custos relacionados a falhas e manutenção de equipamentos e estruturas. No entanto, a realidade mostra que muito dinheiro é gasto para reparos e troca de estruturas que falham quando submetidas as suas condições de trabalho. Neste contexto, é necessário que ocorra uma

mudança cultural para que as metodologias de projeto disponíveis sejam utilizadas, objetivando um aumento na confiabilidade e que ocorra uma redução de custos com pós-venda, e que os recursos naturais sejam utilizados de maneira mais consciente e responsável.

BRANCO, FERNANDES e CASTRO (1999) descrevem que o mecanismo de falha por fadiga compreende as seguintes fases sucessivas: nucleação da trinca de fadiga, propagação da trinca e ruptura final. A iniciação da trinca é verificada normalmente na superfície externa dos componentes de estruturas, uma vez que é na superfície que se apresentam os maiores níveis de tensões e concentradores de tensões. A fase de propagação da trinca, também chamada de propagação estável, desenvolve-se em três fases (ver Figura 1). A fase I consiste no crescimento a 45° em relação a direção de aplicação da carga, que corresponde a propagação do defeito inicial em planos sujeitos a valores elevados de tensões cisalhantes. Na fase II a trinca tende a propagar perpendicularmente ao eixo de aplicação da carga, comportamento governado principalmente pela tensão normal. A velocidade de propagação da trinca na fase II é função da amplitude do fator de intensidade de tensões. Finalmente atingido um valor crítico no tamanho da trinca, tem-se a fase III, comumente chamada de propagação instável da trinca, na qual ocorre a ruptura final da peça com a aplicação de um único ciclo de carga.

Figura 1 - (a) Iniciação da trinca e fases I e II do crescimento de uma trinca de fadiga. (b) Representação esquemática de intrusões e extrusões.

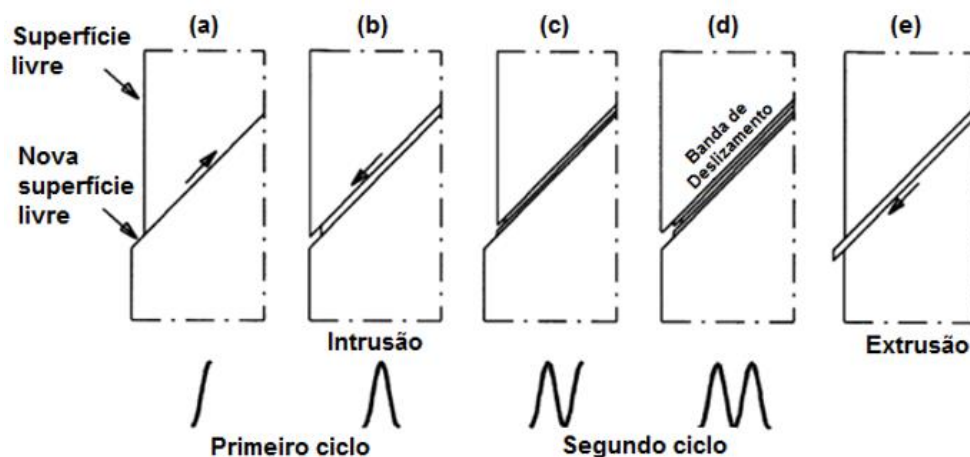


Fonte: (BRANCO, FERNANDES e CASTRO, 1999)

Segundo SCHIJVE (2001), investigações microscópicas iniciadas no século XX têm mostrado que as trincas de fadiga iniciam a nucleação em micro trincas em bandas de deslizamento com tamanho microscópico. A nucleação e propagação de uma trinca são uma

consequência do deslizamento cíclico, pois isto gera deformação plástica cíclica localizada, limitada a um número pequeno de grãos do material, uma vez que normalmente a fadiga ocorre com amplitude de tensão nominal inferiores a resistência ao escoamento do material. Esta plastificação localizada preferencialmente irá ocorrer em grãos nas superfícies livres do material, porque nessas regiões existe uma menor restrição ao deslizamento, uma vez que para formação das bandas de deslizamento, é necessária a presença de tensões cisalhantes cíclicas. A Figura 2 apresenta os estágios de formação de bandas de deslizamento devido a tensões cíclicas, criando condições para nucleação de uma trinca.

Figura 2 – Estágios de formação de bandas de deslizamento (nucleação da trinca - Estágio I).



Fonte: Adaptado de (SCHIJVE, 2001)

SHIGLEY e MISCHKE (2005) apresentam três abordagens distintas para o estudo do fenômeno da fadiga: Abordagem com base na tensão ($S-N$), Abordagem com base na deformação ($\epsilon-N$) e Abordagem da Mecânica da Fratura.

De acordo com NORTON (2013), a escolha de qual abordagem adotar, depende, dentre outros critérios, da classificação do fenômeno estudado quanto ao número de ciclos que pode ser: fadiga de alto ciclo (FAC) e fadiga de baixo ciclo (FBC).

Fadiga de alto ciclo ocorre para componentes mecânicos que deverão apresentar uma vida superior a aproximadamente 10^3 ciclos. Segundo SCHIJVE (2001), para a fadiga de alto ciclo, tem-se o estágio da nucleação de trinca correspondendo a maior parcela da vida em fadiga. A fadiga de baixo ciclo ocorre para componentes mecânicos que deverão operar em número de ciclos inferior à aproximadamente 10^3 ciclos ou em que as tensões apresentem um

valor suficiente para causar o escoamento do material. Nesses casos, o estágio de crescimento de trinca pode assumir uma parcela considerável da vida em fadiga (SCHIJVE, 2001).

Conforme DIETER (1981), para fadiga de alto ciclo, têm-se tensões plásticas altamente localizadas, enquanto que para fadiga de baixo ciclo a deformação plástica é generalizada, tornando difícil sua interpretação em termos de tensão. Esse é um tipo de problema comum em projetos de vasos de pressão e turbinas a vapor. Nesses casos a abordagem mais adequada é pela deformação (curvas ϵ -N). Para peças que possuem trincas pré-existentes é indicada a abordagem pela mecânica da fratura (MFLE).

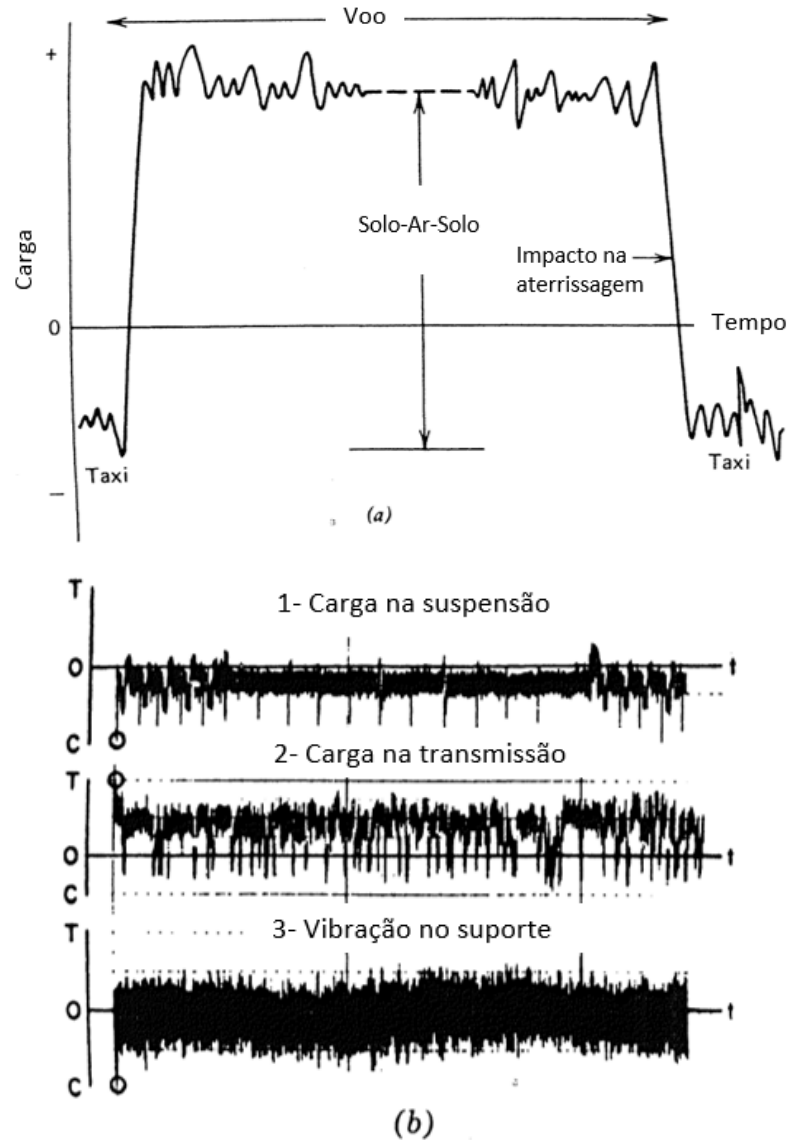
2.1 Tipos de carregamentos de fadiga

Componentes mecânicos, estruturas e veículos estão sujeitos a diversos tipos de históricos de carregamento. Em alguns casos, estes históricos de carregamentos podem ser simples e repetitivos, denominados carregamentos determinísticos, e em outros casos, podem ser completamente randômicos e complexos, sendo considerados estocásticos. Essa aleatoriedade, no entanto, pode conter partes substanciais de cargas determinísticas (STEPHENS, 2000).

As cargas determinísticas são cargas previsíveis, ou seja, sabe-se quando e em qual intervalo de tempo irão ocorrer (MILELLA, 2013). Este modelo pode ser utilizado em cálculos com objetivo de prever as solicitações que o componente sofrerá e assim projetá-lo de forma a suportar estas cargas. Já para cargas estocásticas, não se sabe quando e nem com qual magnitude a solicitação ocorrerá ao longo do histórico, como o exemplo da Figura 3. Para este tipo de carregamento, uma análise estatística é realizada após se analisar o fenômeno por algum tempo, envolvendo análise de dados e desvios padrões, o que é mais adequado com um histórico aleatório (MILELLA, 2013).

Na Figura 3a é apresentado um histórico de carregamento esquemático de um voo, no qual pode-se verificar carregamentos devido a decolagem, turbulências durante o voo, aterrissagem e de deslocamento do avião em solo (taxi). Na Figura 3b são apresentados, três históricos de carregamentos típicos de componentes de um veículo terrestre em condições reais de trabalho. Estes históricos de carregamento tem comportamento aleatório, caracterizando exemplos de carregamentos típicos que são encontrados na vida real em situações de engenharia (STEPHENS, 2000).

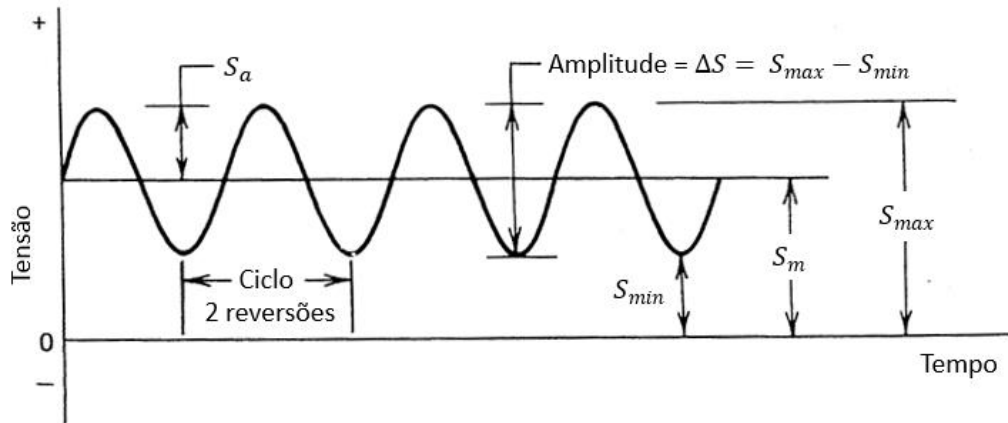
Figura 3 - Históricos de carregamentos típicos de uma aeronave em condições de serviço.



Fonte: Adaptado de (STEPHENS, 2000)

Por outro lado, a nomenclatura utilizada em projeto de fadiga tem sido baseada em um histórico de tensão de amplitude constante, tal como apresentado na Figura 4. Esse tipo de carregamento é bastante comum em componentes de máquinas rotativas, sendo que através do mesmo é possível definir as componentes de tensão alternada (S_a), da tensão média (S_m), da tensão máxima (S_{max}) e da mínima (S_{min}), bem como da amplitude de tensões (ΔS), conforme indicado na Figura 4.

Figura 4 - Nomenclatura das componentes de tensões de um carregamento de amplitude constante.



Fonte: Adaptado de (STEPHENS, 2000)

As Equações 1 a 5 são referente aos termos apresentados na Figura 4.

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

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

$$S_m = \frac{S_{max} + S_{min}}{2} \quad (3)$$

$$S_{max} = S_m + S_a \quad (4)$$

$$S_{min} = S_m - S_a \quad (5)$$

Outros dois parâmetros importantes no estudo de carregamentos de fadiga são a relação de tensão (R) e a relação da tensão alternante (A), conforme Equação 6.

$$R = \frac{S_{min}}{S_{max}} \quad e \quad A = \frac{S_a}{S_m} \quad (6)$$

As relações de tensões $R = -1$ e $R = 0$ são duas condições de testes comuns usadas para obter propriedades de fadiga de materiais. $R = -1$ é chamada de carregamento completamente alternado, uma vez que S_{min} é igual a $-S_{max}$. $R = 0$ é chamada de carregamento pulsante. Um ciclo é o menor segmento da tensão versus tempo que é repetido periodicamente, conforme mostrado na Figura 4. Em históricos de carregamento de amplitude variável, a definição de um ciclo não é tão simples, sendo considerados frequentemente reversões de tensão, sendo utilizados métodos específicos para contagem de ciclos, tal como *Rainflow* conforme apresentado na Seção 2.2.1.

2.2 Métodos para análise de carregamentos de amplitude variável

O dano causado em um componente devido ao histórico de cargas aplicadas depende do número de ciclos do histórico de carregamento, logo a contagem desse número de ciclos de carga é um requisito fundamental. No entanto, conforme mencionado anteriormente, o componente estrutural pode estar submetido a cargas estocásticas, e de amplitude variável, o que torna a contagem de ciclos uma tarefa consideravelmente mais difícil do que para as cargas cíclicas flutuantes com amplitude constante. Desta forma, métodos de contagem de ciclos são utilizados para discretizar os ciclos existentes no histórico de carregamento do componente.

2.2.1 Contagem de ciclos – *Rainflow*

Segundo JOHANNESSON e SPECKERT (2014), o método de contagem de ciclos mais empregado na prática associado a variações de tensões, é denominado *Rainflow*, proposto originalmente por Matsuishi & Endo em 1968 e apresentado na forma lógica para aplicações em fadiga devido a históricos de carregamentos com amplitude variável por Wirshing & Shehata (1977). Segundo LEITÃO (2009), várias normas internacionais referem-se ao uso desse método de contagem de ciclos, tal como a norma Britânica de Pontes BS 5400 (1980), EN 1993-1-9 (2005), BS 7608 (1993) e AASHTO (1990).

O método de *Rainflow* foi nomeado baseado em uma analogia que pode ser feita com o fluxo de água da chuva fluindo através do telhado de uma pagoda, nome dado a um tipo de templo japonês, conforme mostrado nas figura 5 e figura 6.

A norma ASTM E 1049 (2005) apresenta uma série de procedimentos aceitos para a contagem de ciclos, e também define a nomenclatura dos parâmetros relacionados a este tipo de carregamento em fadiga, conforme pode ser visualizado na Figura 7.

Esses parâmetros utilizados pelos diferentes métodos de contagem de ciclos são apresentados pela norma ASTM E 1049 (2005), onde o conceito de ciclo varia, particularmente, de acordo com o método de contagem de ciclos utilizado. Em outras palavras, em alguns casos o carregamento observado pode ser considerado meio ciclo, como também pode ser considerado como resíduo apenas. A norma ASTM E 1049 (2005) cita os seguintes métodos para contagem de ciclos: Contagem de Cruzamentos de Nível, Contagem de Picos, Contagem de Intervalo Simples e Contagem de Faixa Emparelhada. Segundo LEE (2005), esses métodos, denominados de parâmetro único para contagem de ciclos, não são adequados para análise de dano acumulado por fadiga, pois não representam fisicamente os ciclos sofridos pelo material.

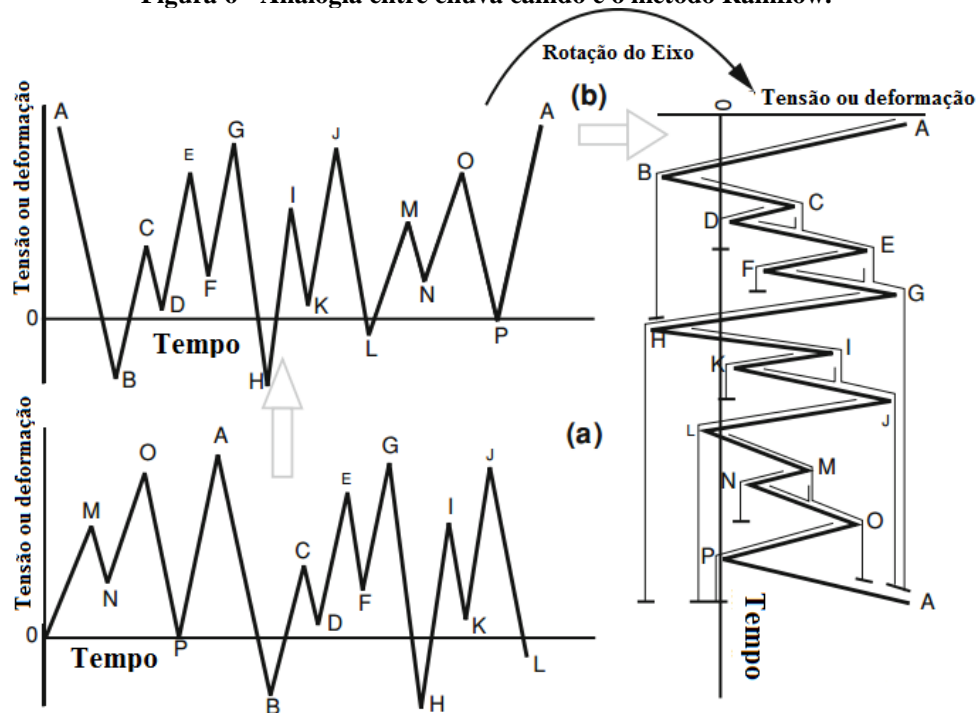
Em contrapartida, o Método *Rainflow* é amplamente utilizado para análise de dano acumulado, e apresenta aceitável aproximação com o fenômeno físico.

Figura 5 - Telhado de uma pagoda.



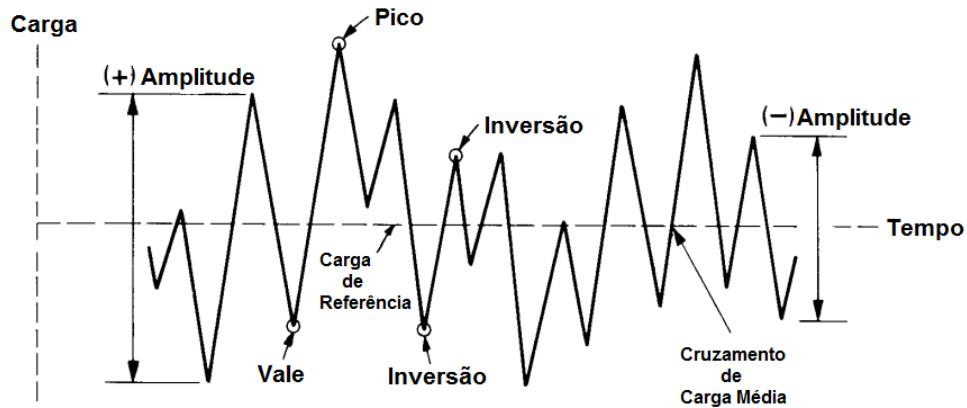
Fonte: (WIKIPEDIA, 2016)

Figura 6 - Analogia entre chuva caindo e o método Rainflow.



Fonte: Adaptado de (MILELLA, 2013)

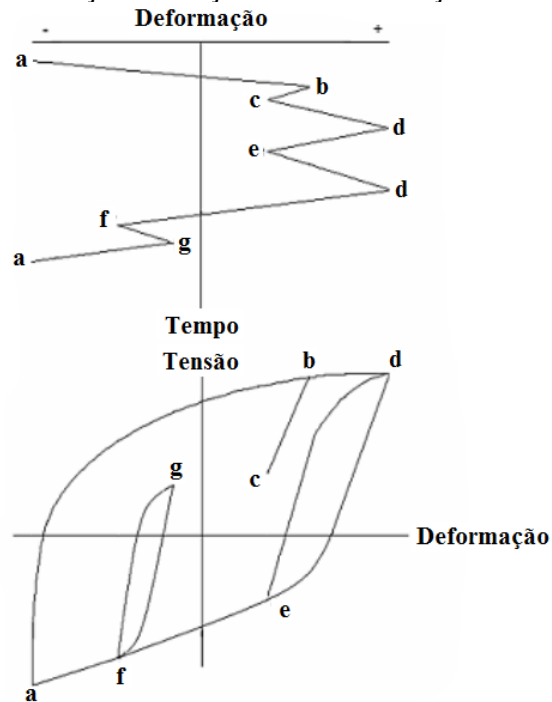
Figura 7 - Parâmetros básicos de carregamento por fadiga.



Fonte: Adaptado de (ASTME 1049, 2005)

ARIDURU (2004) comenta que este método é conduzido baseado no comportamento de tensão-deformação do material, conforme a Figura 8, reduzindo o histórico de tensões em uma série de picos e vales. A Figura 8 demonstra que o material se deforma do ponto “a” para “b” observando a curva tensão-deformação descrito no plano cartesiano abaixo dela. Já no ponto “b”, a carga é revertida e o material retorna elasticamente para o ponto “c”. Quando outra carga é aplicada novamente, o ponto “c” percorre o caminho até “d”, e quando a carga é retirada o material retorna ao ponto “e”. Isso ocorre sucessivamente, baseado no histórico de cargas aplicadas no material, e inevitavelmente, causando danos ao material que o levarão a falhar por fadiga.

Figura 8 - Representação da relação tensão-deformação e método *Rainflow*.



Fonte: Adaptado de (ARIDURU, 2004)

Um tratamento matemático completo, com a possibilidade de processar sinais de tensões aleatórios é apresentado por JOHANNESSON e SPECKERT (2014). O algoritmo apresentado por BANNANTINE, COMER e HANDROCK (1990) é mais semelhante ao original e é denominado como o algoritmo de três pontos. O algoritmo alternativo de quatro pontos foi popularizado por AMZALLAG (1994).

Outra forma de analisar carregamentos de natureza randômica são as tecnologias para análise de fadiga espectral, mais conhecida como fadiga no domínio da frequência. Esta é uma abordagem para estimar a vida em fadiga quando os carregamentos de entrada, ou o histórico de tensões obtido na estrutura ou componente, são de natureza randômica e assim sendo melhor especificado usando informações estatísticas sobre o processo, sendo geralmente tratado na forma de uma função de densidade espectral de potência (*Power Spectral Density* - PSD) BISHOP e SHERRATT (2000). No entanto, como neste trabalho o foco principal dos estudos e análises realizadas será no domínio do tempo, não serão apresentados em detalhes os conceitos de análises de fadiga espectral, sendo que BISHOP e SHERRATT (2000) e LEE (2005) apresentam de forma bastante detalhada essa metodologia.

Nesta seção é apresentado o procedimento para obtenção da estimativa da vida em fadiga de componentes submetidos a carregamentos cíclicos de amplitude variável, sendo que para isso, serão apresentados métodos para quantificar o dano acumulado devido ao carregamento aplicado.

2.2.2 Determinação de dano acumulado – Regra de Miner

O mecanismo de falha por fadiga é independente do tipo de histórico de carregamento, seja o carregamento de amplitude constante ou variável, no entanto, os resultados de vida sob fadiga dos componentes dependem do tipo de carregamento. As teorias de dano acumulado surgiram da necessidade de se estudar a vida sob fadiga de componentes submetidos a um espectro variável de cargas (POOK, 2007). Neste campo, o diagrama $S-N$ não representa fielmente o número de ciclos que levará o material a falhar sob fadiga, uma vez que este diagrama considera as cargas como sendo de amplitude constante. Desta forma, procura-se mensurar o dano causado por cada ciclo em função de sua intensidade, e a falha é entendida como um processo alimentado por cada ciclo em cada nível de tensão individualmente.

A Regra de Miner é amplamente utilizada e aceita em projetos tolerantes ao dano, sendo que este modelo foi originalmente desenvolvido por Palmgren em 1924 e mais tarde aprimorado por MINER (1945), e por isso, é referida como Regra de Palmgren-Miner (ARIDURU, 2004).

Esta regra é aplicada juntamente com a contagem de ciclos Rainflow, e inicialmente o conceito de razão de ciclo deve ser entendido.

A razão de ciclo ou fração de dano, refere-se à razão entre o número de ciclos aplicados na estrutura (n_i) e o número de ciclos permitidos (N_i) para aquela amplitude de tensão observado na curva $S-N$ do material. A razão de ciclo é descrita por MILELLA (2013) através da Equação 7:

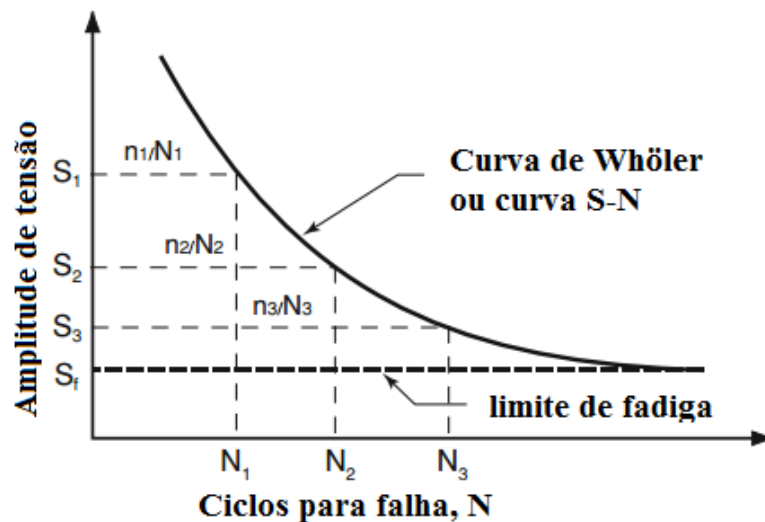
$$D_i = \left(\frac{n_i}{N_i}\right)^{m_i} \quad (7)$$

onde m pode assumir qualquer valor dependendo da amplitude das cargas, porém, quando igual a 1, o dano progressivo é dito linear MILELLA (2013). Neste sentido, a Regra de Miner considera o fator m como sendo 1. Portanto, o dano total sofrido por um componente sob o histórico de cargas de amplitude variável é calculado linearmente através da Equação 8

$$D_{Total} = \sum D_i = \sum D_{CR} \frac{n_i}{N_i} \quad (8)$$

onde D_{cr} refere-se à fração de dano crítico, a qual ocorre a falha por fadiga, variando de material para material, e está diretamente relacionada a resistência à fadiga (S) do material representado pela curva de Whöler, conforme exemplificado na Figura 9.

Figura 9 - Exemplo de razão de ciclo para diferentes amplitudes de carga.



Fonte: Adaptado de (MILELLA, 2013)

Logo,

$$D_{CR} = D_{CR} \left(\frac{n_1}{N_1}\right) + D_{CR} \left(\frac{n_2}{N_2}\right) + D_{CR} \left(\frac{n_3}{N_3}\right) \quad (9)$$

Que resulta, em termos gerais, em:

$$1 = \frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} + \frac{n_3}{N_3} = \sum \frac{n_i}{N_i} \quad (10)$$

Finalmente o evento de falha pode ser descrito como:

$$D = \sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_i} \geq 1 \quad (11)$$

Através da Equação 11 é possível concluir que a falha ocorrerá toda vez que o somatório da razão de ciclo for maior ou igual a 1, sendo que BANNANTINE, COMER e HANDROCK (1990) sugerem valores menores que 1, a fim de garantir um maior conservadorismo na previsão da durabilidade da estrutura.

ARIDURU (2004) cita algumas suposições intrínsecas à Regra de Palmgren-Miner que levam ao critério de falha descrito pela Equação 11. As quais são:

- A regra assume que o processo de carregamento de tensão que ocorre no componente pode ser descrito na forma de ciclos de tensão, de forma que o espectro de amplitude dos ciclos de tensão é possível de se definir;
- O método assume que a curva $S-N$ para o material está disponível e é compatível com a definição de tensão utilizada, caso contrário não é possível utilizá-lo.

Naturalmente, estas suposições remetem a algumas limitações, também enumeradas por ARIDURU (2004), as quais seguem:

1. O método é representado por um sistema linear, uma vez que a Regra de Miner assume que a magnitude de dano é a mesma independente do dano ter ocorrido no início ou mais tarde na vida do componente;
2. É um método não iterativo, ou seja, a regra assume que os danos causados a diferentes níveis de tensão de fadiga não interagem entre si, ou seja, o dano causado por S_2 é contabilizado de forma que não leva em consideração o dano já causado por S_1 (Figura 9);
3. Este método admite que as regras que governam o dano causado por um nível de tensão são as mesmas para diferentes níveis de tensão.

Em resumo a Regra de Palmgren-Miner assume que o processo de falha progride e se acumula de forma linear. Segundo ARIDURU (2004), estas suposições são falhas na prática,

mas mesmo assim, esta regra continua sendo amplamente utilizada apresentando satisfatória aproximação dos resultados para cálculo de estimativa de vida em fadiga. Outros métodos de acúmulo de dano não linear estão disponíveis, conforme apresentado por BANNANTINE, COMER e HANDROCK (1990), entre outras bibliografias.

2.3 Métodos para obtenção de parâmetros de fadiga dos materiais

Nos cálculos de projeto à fadiga, é necessário conhecer as propriedades de fadiga dos materiais utilizados, sendo que a curva $S-N$ (método da vida sob tensão) na região de fadiga de alto ciclo é comumente utilizada, tendo grande aceitação no projeto de componentes ou estruturas que estão expostas a cargas cíclicas. No entanto, diversos modelos matemáticos foram propostos ao longo do anos para descrever a relação entre tensão cíclica e número de ciclos até a falha (curva $S-N$ ou curva de Wöhler), sendo os principais apresentados na Tabela 1. Cada modelo apresenta parâmetros do material dimensionais e adimensionais, os quais devem ser estimados com análise estatística, tal como mínimos quadrados.

A curva $S-N$ é dividida geralmente em duas regiões, uma região de vida infinita e outra de vida finita em fadiga. Na região de vida finita, a curva $S-N$ é descrita através de equações que relacionam o número de ciclos até a falha para uma dada tensão alternada S_a e as propriedades do material, sendo que a tensão aplicada pode também ser expressa em termos da amplitude de tensão ΔS . Em coordenadas log-log, conforme apresentado na Figura 10, a curva $S-N$ representa uma linha reta, conforme modelos de Basquin (1910), o qual foi apresentado na Tabela 1. A forma apresentada na Equação 12 é semelhante ao modelo de Wöhler e define a relação entre tensão alternada e número de ciclos para a região de vida finita, onde m é a inclinação da reta em log-log e pode ser relacionado com o parâmetro b de Wöhler pela equação $m = -1/b$. Ainda na Figura 10 se apresenta simbolicamente o escopo para plotagem de dados experimentais de fadiga, através dos quais é possível obter o coeficiente angular da reta m , o qual é obtido pela Equação 13. Valores de m obtidos experimentalmente apresentam boa precisão, infelizmente, devido ao número de corpos de prova necessários, o tempo consumido e o custo para o ensaio, muitas vezes inviabiliza tais ensaios na fase de projeto de estruturas (STRZELECKI e SEMPRUCH, 2011b).

$$\Delta\sigma^m N = C \quad (12)$$

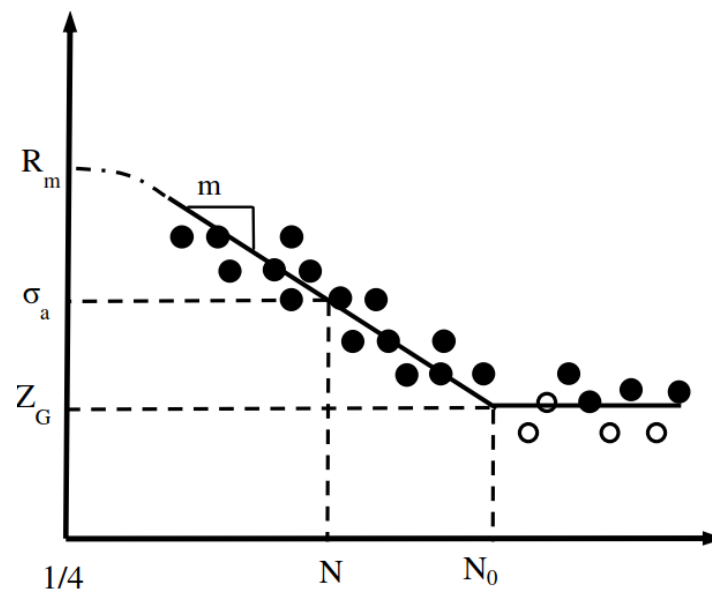
$$m = \frac{\log\left(\frac{N_0}{N}\right)}{\log\left(\frac{\sigma_a}{Z_G}\right)} \quad (13)$$

Tabela 1 – Alguns modelos propostos na literatura para curvas S–N.

	Referência	Forma analítica	Parâmetros	
			Dimensionais	Adimensional
1	Wöhler (1870)	$\log N = a - bS$	b	a
2	Basquin (1910)	$\log N = a - b \log S$	b	a
3	Strohmeyer (1914)	$\log N = a - b \log(S - Z_G)$	b, Z_G	a
4	Palmgren (1924)	$\log(N + d) = a - b \log(S - Z_G)$	b, Z_G	a, d
6	Weibull (1949)	$\log(N + d) = a - b \log(S - Z_G) / (S_{st} - Z_G)$	S_{st}, Z_G	a, b, d
7	Stüssi (1955)	$\log N = a - b \log(S - Z_G) / (S_{st} - Z_G)$	S_{st}, Z_G	a, b
8	Bastenaire (1972)	$(\log(N - b))(S - Z_G) = a \exp(-c(S - Z_G))$	a, c	b

Fonte: Adaptado de (CASTILLO e FERNANDEZ-CANTELI, 2009)

Figura 10 - Curva S–N baseada em dados experimentais.



Fonte: Adaptado de (STRZELECKI e SEMPRUCH, 2011b)

Segundo LEE (2005), outra forma muito comum de apresentar a curva S–N é dada pela Equação 14, sendo que os coeficientes a e b são propriedades do material, sendo que $b = -1/m$, buscando verificar a relação entre as Equações 13 e 14.

$$S_a = a(N)^b \quad (14)$$

Conforme apresentados na Tabela 1, ainda existem outros modelos para representar a curva $S-N$, sendo as Equações 12 e 14 as mais conhecidas no âmbito de aplicações de projeto.

Diversos métodos para obtenção de curvas $S-N$ para análise de fadiga estão disponíveis na literatura. Determinar as propriedades de fadiga para componentes ou materiais de acordo com recomendações de normas, tal como, ASTM E 739 (2015) conduz a resultados mais precisos (sendo essa, uma das vantagens da abordagem experimental), mas infelizmente, devido ao tempo necessário para os ensaios, esta abordagem gera custos significativos (sendo essa uma desvantagem de métodos puramente experimentais) (SEMPRUCH e STRZELECKI, 2011). As recomendações da norma ASTM E 739 (2015) quanto ao mínimo número de corpos de prova requeridos em ensaios para obter a curva $S-N$, depende do tipo de teste conduzido. Por exemplo, para dados a serem utilizados em projetos, deve-se ensaiar no mínimo 12 corpos de prova e levando em conta um percentual de replicação de no mínimo 50%, o que muitas vezes é considerado adequado para muitas pesquisas e desenvolvimento de componentes (ASTM E 739, 2015). Deve ser levado em conta que os ensaios em laboratório devem ser conduzidos com extremo cuidado, tentando representar de maneira mais real possível a aplicação do material ou junta soldada na condição de utilização no projeto do componente estrutural, uma vez que as condições de teste muitas vezes são diferentes das condições reais, necessitando-se de fatores de correção da resistência à fadiga, o que pode gerar erros nas estimativas de vida em fadiga, caso não sejam considerados.

2.3.1 Métodos experimentais para obtenção de curvas $S-N$ conforme normas

Nesta seção efetuou-se uma pesquisa na literatura existente, com objetivo de identificar métodos experimentais e planejamento experimental para ensaios de fadiga para obtenção de curvas $S-N$ de materiais com (detalhes soldados) e sem solda (material base). Existem algumas normas que estão vigentes, tal como, ASTM E 466 (2015), JSME S 002 (1994), ASTM E 739 (2015) e ISO 12107 (2012). No entanto, nenhuma é voltada especificamente para ensaios de fadiga em uniões soldadas. LASSEN e RECHO (2006) apresentam informações importantes quanto à métodos experimentais e análise de dados para ensaios de fadiga de uniões soldadas. A Tabela 2 apresenta as normas vigentes, bem como uma descrição sucinta do escopo de cada norma.

Os primeiros ensaios de fadiga foram realizados com máquina de teste de flexão rotativa, sendo o esquema da máquina de teste de R. R. Moore apresentado na Figura 11. O ensaio de fadiga consiste em submeter um corpo de provas a um carregamento, geralmente

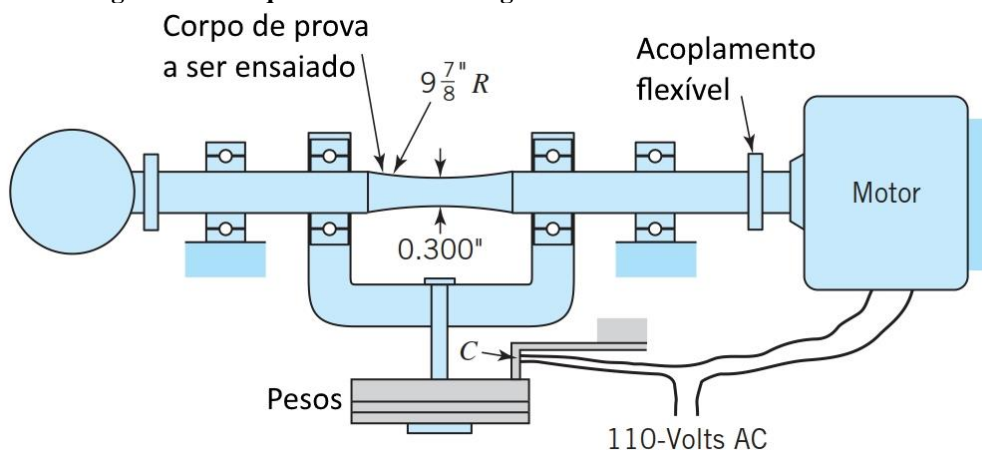
senoidal com amplitude constante, até que ocorra a fratura do mesmo ou até atingir o número máximo de ciclos estipulado. Os ensaios de fadiga mais empregados são: axial, flexão, flexão rotativa e torção cíclica, sendo os três primeiros os mais comuns (COSTA, 2010).

Tabela 2 – Normas vigentes para ensaios de fadiga.

Norma	Descrição	Ano
ASTM E 466	Prática padrão para realização de ensaios de fadiga axial controlada de amplitude constante de materiais metálicos	2015
ASTM E 739	Prática padrão para análise estatística de dados de fadiga de Tensão-Vida ($S-N$) e Deformação-Vida ($\epsilon-N$)	2015
ISO 12107	Materiais metálicos – Testes de fadiga – Planejamento estatístico e análise de dados	2012
JSME S 002	Método padrão de testes de fadiga estatísticos	1994

Tendo necessidade de avaliar uma curva $S-N$, há diversos estudos estatísticos para prever a vida à fadiga em diferentes condições, como por exemplo, métodos apresentados pela JSME S 002 (1994), Nakazawa Kodama (1987), ASTM E 739 (2015), Shen (1994), Wirshing (1983) e Kececioglu (2003), os quais são amplamente utilizados para obtenção experimental de curvas $S-N$. Este trabalho vai apresentar uma sucinta definição da norma ASTM E 739 (2015) e JSME S 002 (1994), que sugerem um procedimento para tratamento estatístico de dados na geração das curvas de fadiga.

Figura 11 - Máquina de teste de fadiga de flexão rotativa de R. R. Moore.



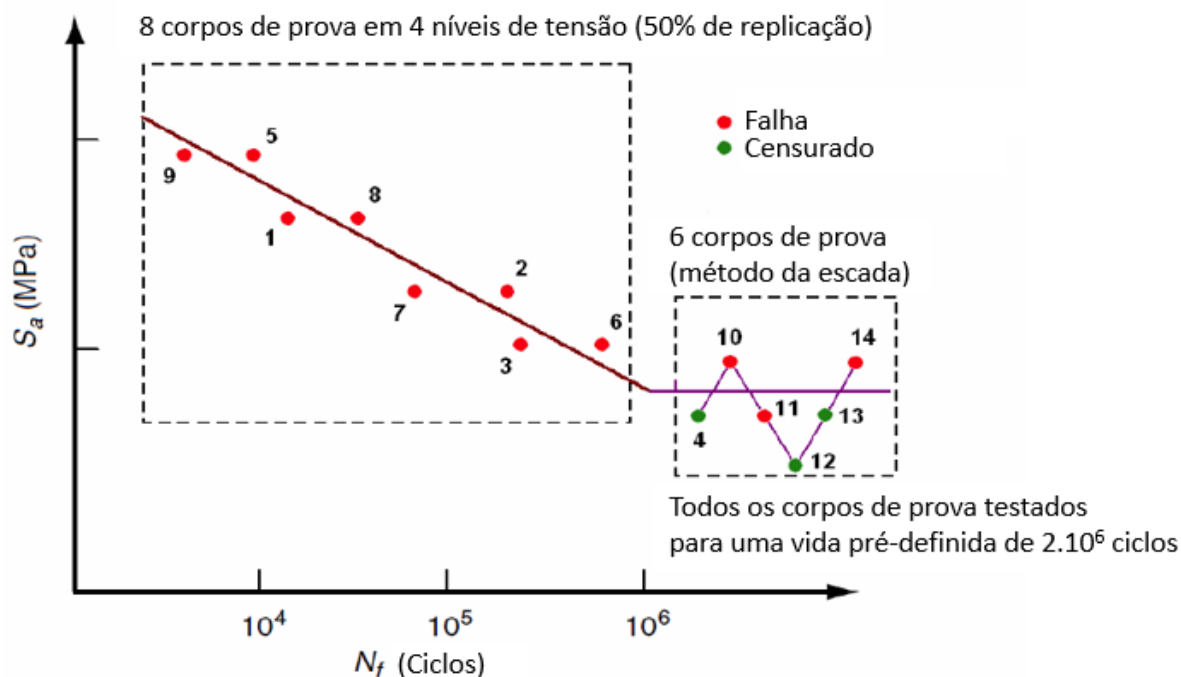
Fonte: (JUVINALL e MARSHEK, 2016)

2.3.1.1 Norma JSME S 002:1994

A norma JSME S 002 (1994) estabelece para obtenção da curva $S-N$, que devem ser usados oito corpos de prova em quatro níveis de tensões diferentes na região de vida finita, e

seis corpos de prova para determinar o limite de fadiga através do método de escada. O limite de fadiga é determinado tomando a média dos níveis de tensão utilizados durante o método da escada. A sequência dos ensaios é numerada na Figura 12.

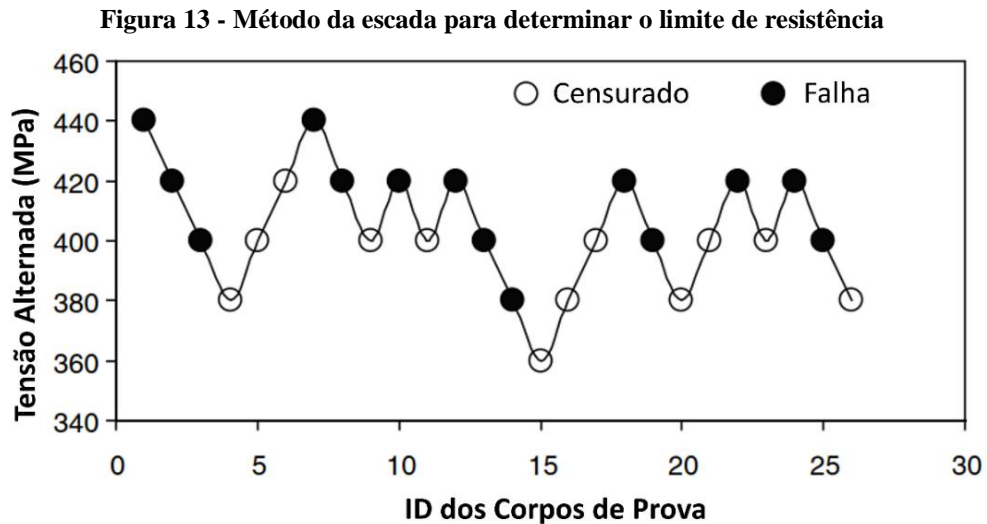
Figura 12 - Curva S-N de acordo com a norma JSME S 002.



Fonte: Adaptado de (JSME S 002, 1994)

No método de escada, primeiramente o limite de resistência à fadiga deve ser estimado, e posteriormente um corpo de prova é ensaiado com uma carga em torno de 5% maior que máxima estimada. Se a amostra ensaiada falhar antes de completar o número de ciclos estipulado para vida infinita em fadiga (*runout*, normalmente em torno de 10^6 para os aços), o ensaio seguinte é realizado com uma tensão em torno de 5% menor que a anterior. Caso não falhe, após a amostra ultrapassar o número de ciclos estipulado para vida infinita em fadiga, o ensaio é interrompido e o próximo corpo de prova é submetido a uma tensão superior às anteriores. Portanto, cada teste depende dos resultados do teste anterior, sendo que o teste continua com um acréscimo ou diminuição do nível de tensão. A Figura 13 ilustra o gráfico do método de escada. Lee (2005) apud Collins (1993) recomendam que o teste seja rodado com ao menos 15 corpos de prova. De acordo com LEE (2005), o método de Dixon-Mood (1948) pode ser utilizado para tratar os dados ensaiados, sendo que este método fornece equações para calcular a média μ_5 e o desvio padrão σ_5 do limite de fadiga S_e . O método assume que o limite de fadiga segue uma distribuição normal, o qual requer que duas propriedades estatísticas sejam

determinadas pelo uso dos dados do evento menos frequente, isto é, apenas os corpos de prova que falharam ou somente os que não falharam são usados. Com a média e o desvio padrão obtidos pelo método de Dixon-Mood (maiores detalhes em LEE (2005)), levando em conta uma distribuição normal, o valor do limite inferior associado com a confiabilidade e nível de confiança desejada, pode ser determinada.



Fonte: Adaptado de (LEE, 2005)

2.3.1.2 Norma ASTM E 739:2015

A norma ASTM E 739 (2015) recomenda que não seja testado apenas um corpo de provas por nível de tensão, pois isso não permite a avaliação da variabilidade e estatística da distribuição dos dados levantados. A replicação do ensaio (PR) depende do número total de corpos de prova ensaiados (n_s) e do número dos níveis de tensões (L) usados durante os testes de fadiga, e pode ser determinada Equação 15:

$$PR (\%) = 100 \left(1 - \frac{L}{n_s} \right) \quad (15)$$

Por definição, as medições replicadas ou replicação (observações) são medições independentes (observações) feitas em unidades experimentais nominalmente idênticas sob condições nominalmente idênticas (Little, 2002).

A norma define uma porcentagem mínima de replicações dependendo da finalidade do ensaio realizado.

Tabela 3 - Valores recomendados para ensaio de fadiga.

Tipo de ensaio	Número mínimo de corpos de prova	Percentual de replicação (%)
Preliminar	6 a 12	17 a 33 min
Pesquisa e desenvolvimento de componentes e corpos de prova	6 a 12	33 a 50 min
Dados utilizáveis em projeto	12 a 24	50 a 75 min
Dados com confiabilidade estatística	12 a 24	75 a 88 min

Fonte: (ASTM, E. 739, 2015)

A norma ASTM E 739 (2015) também apresenta os procedimentos para a obtenção dos parâmetros do material com base nos dados de fadiga ensaiados, sendo que estes procedimentos são apresentados na Seção 2.4.5, por se tratarem de conceitos fundamentais de estatística.

2.3.1.2 Norma BS ISO 12107:2015

De acordo com a norma BS ISO 12107 (2015), o número total de amostras requeridas pode ser determinado usando os valores típicos dados na Tabela 4, considerando a finalidade do teste e a disponibilidade do material de teste. Esta norma indica que no mínimo oito amostras devem ser usadas para testes exploratórios com dois corpos de prova a serem testados em cada um dos quatro níveis de tensão igualmente espaçados, o que também é indicado pela norma JSME S 002 (1994). No entanto, pelo menos 30 corpos de prova são necessários para dados com confiabilidade estatística, de acordo com a BS ISO 12107 (2015). Neste caso, seis amostras devem ser testadas em cada um dos cinco níveis de tensão igualmente espaçados.

Tabela 4 - Número de amostras necessárias para um dado nível de probabilidade de falha em vários níveis de confiança de acordo com a BS ISO 12107 (2015).

Probabilidade de falha P (%)	Nível de confiança, $1 - \alpha$ (%)		
	50	90	95
Número de corpos de prova, n_s^a			
50	1	3	4
10	7	22	28
5	13	45	58
1	69	229	298

^aOs valores de n_s são arredondados para o número inteiro mais próximo.

Fonte: (BS ISO 12107, 2015)

Devido aos métodos puramente experimentais utilizados para obter curvas $S-N$ que foram descritos nessa seção serem bastante morosos e de alto custo, diversas propostas de

métodos mais práticos estão disponíveis na literatura para obtenção de curvas $S-N$. Estes métodos são desenvolvidos principalmente para engenheiros de aplicação, a fim de possibilitar a utilização de metodologias para avaliação da vida útil em fadiga na etapa de projeto de estruturas. Os métodos até o momento desenvolvidos têm como alicerce as seguintes premissas:

- Métodos simplificados baseados nas propriedades mecânicas estáticas dos materiais, as quais podem ser obtidas através de um simples ensaio de tração;
- Métodos puramente probabilísticos;
- Métodos probabilísticos assistidos por ensaios com número de corpos de prova reduzidos para aumentar a confiabilidade dos resultados.

Cada um desses métodos para obtenção de curvas $S-N$ tem suas vantagens e desvantagens. É de extrema importância que os engenheiros de aplicação tenham noção quando fazem a escolha de uma dessas metodologias para utilização em projetos, das limitações quanto à precisão de cada método, bem como da limitação quanto a faixa de aplicação dos mesmos.

As curvas $S-N$ são aplicadas, na prática, na região de vida finita e vida “infinita”, nas quais normalmente as tensões aplicadas são inferiores ao limite de resistência ao escoamento do material, não havendo plastificação do material. A região de vida finita para a qual as curvas $S-N$ são utilizadas é denominada de região de fadiga de alto ciclo, que de acordo com diversas bibliografias é considerada a partir de 10^3 ciclos. Tradicionalmente, os engenheiros têm realizado previsões de falha por fadiga em projetos há muitos anos se baseando preferencialmente na região de vida “infinita”, principalmente por questões de conservadorismo, uma vez que a utilização de metodologias simplificadas para obtenção da curva $S-N$, podem levar a previsões com pouca precisão na região de vida finita, uma vez que a obtenção dos parâmetros do material que definem a curva $S-N$, são de difícil obtenção.

Nas seções subsequentes são apresentadas as metodologias simplificadas para obtenção de curvas de fadiga de maneira mais ágil, a fim de utilizar na fase inicial de projeto de componentes e estruturas.

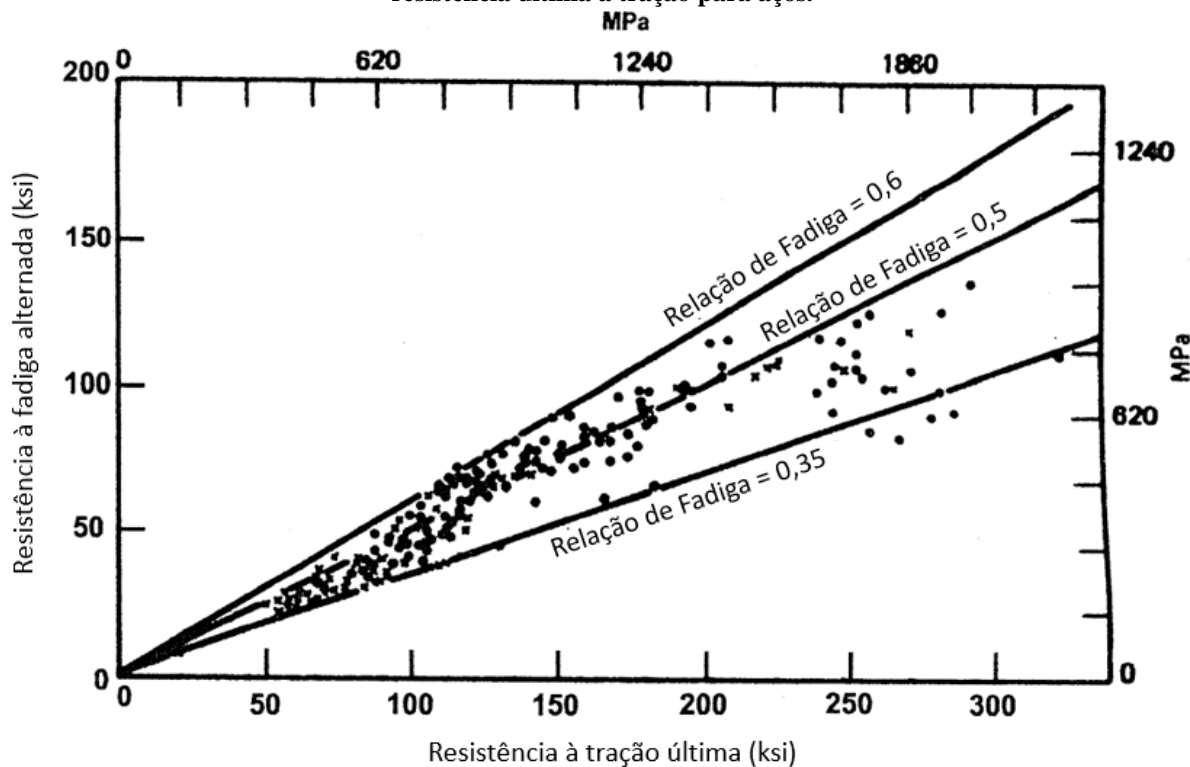
2.3.2 Métodos simplificados para obtenção de curvas $S-N$ baseados na resistência estática dos materiais

Nesta seção serão apresentados os principais métodos simplificados para obtenção de curvas $S-N$, os quais estão fundamentados principalmente na resistência estática dos materiais obtida através de um ensaio de tração simples. As propriedades mecânicas utilizadas são a

resistência ao escoamento do material (S_y) e a resistência última à tração (S_{ut}), dependendo do método utilizado, ou ambas.

Diversos autores BANNANTINE, COMER e HANDROCK (1990), STEPHENS (2000), JUVINALL e MARSHEK (2016), NORTON (2013) e SHIGLEY e MISCHKE (2005) descrevem os princípios básicos para obtenção da resistência à fadiga de materiais sob carregamentos completamente alternados baseado nas propriedades estáticas do material, obtidas de um ensaio simples de tração. Através de ensaios em fadiga de flexão rotativa de diversos tipos de materiais com diferentes valores de resistência, verificou-se que existia uma relação entre a resistência à fadiga (S_e) e o limite de resistência última do material (S_{ut}), conforme apresentado na Figura 14.

Figura 14 - Relação entre resistência à fadiga sob flexão rotativa de corpos de prova sem entalhe e a resistência última a tração para aços.



Fonte: Adaptado de (STEPHENS, 2000)

Através da Figura 14 observa-se, que boa parte dos corpos de prova ensaiados estão concentrados próximo da relação de fadiga $S_e/S_{ut} = 0.5$ para aços de baixo e médio carbono. Os dados, na realidade, variam entre 0.35 e 0.6 para $S_{ut} < 1400 \text{ MPa}$. Para $S_{ut} > 1400 \text{ MPa}$, S_e não aumenta significativamente. Portanto, é muito comum utilizar as Equações 16 e 17 (STEPHENS, 2000).

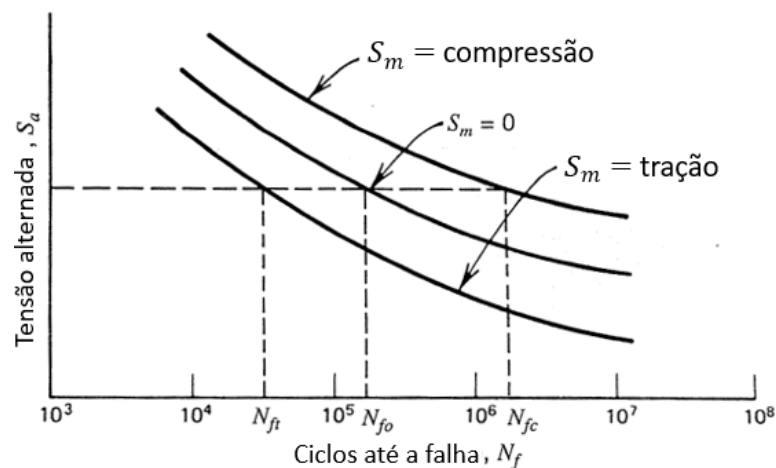
$$S_e \approx 0.5S_{ut} \quad \text{para} \quad S_{ut} \leq 1400 \text{ MPa (200 KPsi)} \quad (16)$$

$$S_e \approx 700 \text{ MPa (100 KPsi)} \quad \text{para} \quad S_{ut} > 1400 \text{ MPa (200 KPsi)} \quad (17)$$

2.3.2.1 Efeito da tensão média no comportamento das curvas S-N

A tensão alternada (S_a) e a tensão média S_m já foram definidas na Figura 4 e Equações 2 e 3, sendo que a tensão média (S_m) pode ter uma influência substancial no comportamento à fadiga. Isto pode ser visto na Figura 15, na qual é traçada a tensão alternada (S_a) versus o número de ciclos até a falha (N), para diferentes tensões médias. Nota-se que tensões médias de tração são prejudiciais e tensões médias de compressão são benéficas, pois para uma dada tensão alternada (S_a) (linha reta horizontal), tem-se N_{ft} , N_{f0} e N_{fc} , representando vida em fadiga para tensões médias de tração, zero e de compressão, respectivamente.

Figura 15 - Efeito da tensão média na vida em fadiga.



Fonte: Adaptado de (STEPHENS, 2000)

Diversos estudos da influência das tensões médias foram desenvolvidos, sendo que nesta seção são apresentados alguns dos critérios mais conhecidos para corrigir o efeito das tensões médias. De acordo com STEPHENS (2000), as Equações 18 a 21 representam os critérios de Soderberg, Goodman Modificado, Gerber e Morrow, respectivamente, possibilitando a correção do efeito da tensão média para um estado uniaxial de tensões, sendo necessário isolar a resistência à fadiga corrigida (S_e), usando $S_a = \sigma_a$ e $S_m = \sigma_m$, como entrada (ver Figura 16).

$$\frac{S_a}{S_e} + \frac{S_m}{S_y} = 1 \quad (18)$$

$$\frac{S_a}{S_e} + \frac{S_m}{S_{ut}} = 1 \quad (19)$$

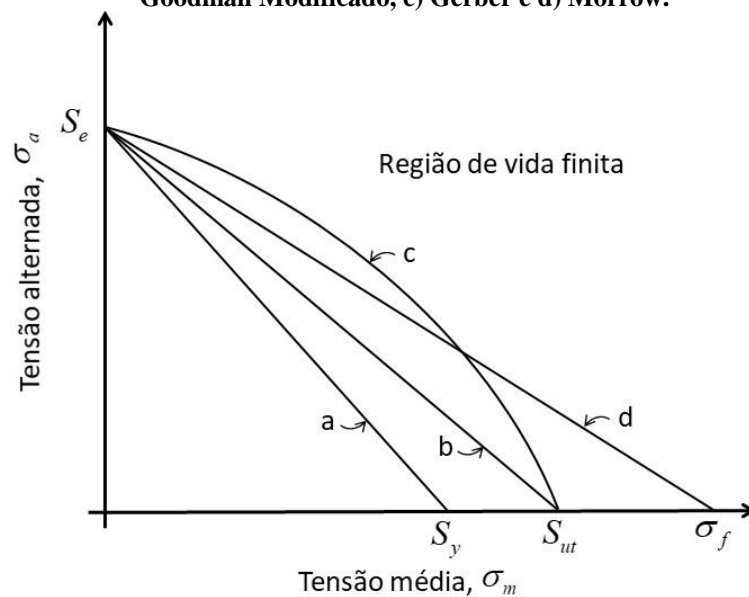
$$\frac{S_a}{S_e} + \left(\frac{S_m}{S_{ut}}\right)^2 = 1 \quad (20)$$

$$\frac{S_a}{S_e} + \frac{S_m}{\sigma_f} = 1 \quad (21)$$

Segundo DOWLING (2004), o critério de Goodman que emprega o limite último à tração do material (S_{ut}) é excessivamente conservador para tensões médias de tração. Quanto ao critério de Morrow, que usa tensão de fratura verdadeira (σ_f), segundo o autor, tem bom comportamento para vários metais, mas tem a desvantagem de que valores de σ_f não estão sempre disponíveis, funcionando bem para aços, mas é altamente impreciso e não conservador para algumas ligas de alumínio, para as quais não deve ser usado.

O critério de Goodman tem grande aceitação em aplicações de projeto de engenharia por sua facilidade de utilização, fácil obtenção das propriedades mecânicas do material e também por ser um critério mais conservador, tal como afirma DOWLING (2004), o que para projetos que envolvem fadiga muitas vezes é desejável, devido à grande dispersão nos dados e os diversos fatores que influenciam na resistência à fadiga.

Figura 16 - Comparação entre os critérios para correção da tensão média, sendo a) Soderberg, b) Goodman Modificado, c) Gerber e d) Morrow.

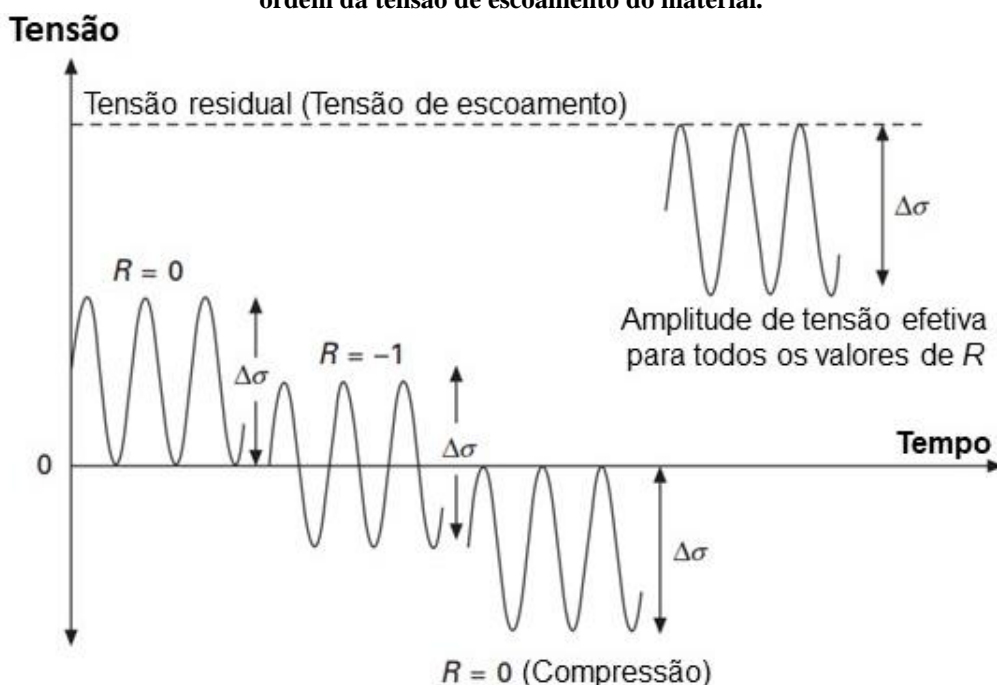


Fonte: Adaptado de (BANNANTINE, COMER e HANDROCK, 1990)

O efeito da tensão média em juntas e estruturas soldadas, geralmente é desconsiderado, conforme referências normativas de projeto de juntas soldadas. O motivo para isso, segundo MADDOX (2011), é que as tensões residuais de tração exercem um efeito muito significativo sobre a fadiga. Quaisquer tensões flutuantes aplicadas, são sobrepostas à tensão residual,

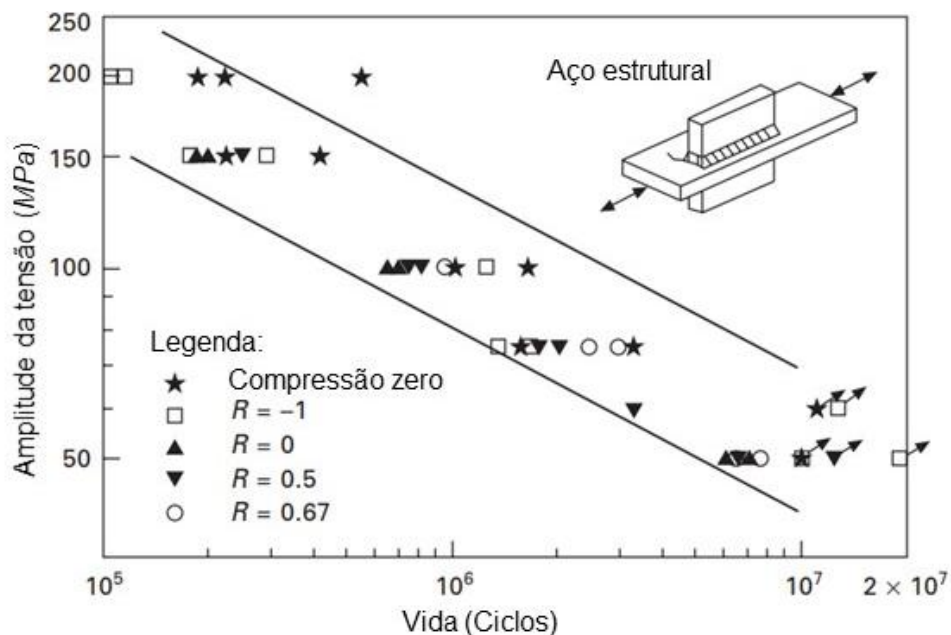
conforme ilustrado na Figura 17 . Se as tensões residuais, forem tão altas quanto a tensão de escoamento, os ciclos de tensão caem abaixo do escoamento, sendo a amplitude do ciclo inalterada. Assim, a junta soldada está submetida ao efeito mais severo da tensão média de tração, mesmo quando tensões de compressão são aplicadas. Com base nessas conclusões, a vida útil em fadiga de juntas soldadas contendo tensões residuais de tração elevadas, deve ser independente da tensão média aplicada para tensões aplicadas de tração ou compressão, sendo que isso foi de fato, confirmado experimentalmente muitas vezes. No exemplo mostrado na Figura 18, os resultados foram obtidos de amostras de chapa de aço com enrijecedor longitudinal soldados em filete. Tensões residuais de tração muito elevadas atuando ao longo da solda, que é a direção do carregamento de fadiga, são produzidas em tais corpos de prova. Resultados semelhantes para outros detalhes de solda foram obtidos de vigas soldadas em escala real, sendo que os resultados mais impressionantes são aqueles obtidos sob tensões puramente compressivas, pois não se espera que tal carregamento provoque qualquer trinca por fadiga em um componente. Como resultado da influência das tensões residuais de tração, as vidas de fadiga das juntas soldadas estão relacionadas à amplitude de tensão total na curva $S-N$, independentemente de ser de tração ou de compressão.

Figura 17 - Efeito da sobreposição da tensão cíclica com a tensão residual de tração com magnitude da ordem da tensão de escoamento do material.



Fonte: Adaptado de (MADDOX, 2011)

Figura 18 - Resultados de testes que ilustram que a vida útil da fadiga de juntas soldadas contendo alta tensão residual de tração é independente da relação de tensão aplicada.



Fonte: Adaptado de (MADDOX, 2011)

2.3.2.2 Fatores modificadores da resistência à fadiga

BANNANTINE, COMER e HANDROCK (1990), STEPHENS (2000), JUVINALL e MARSHEK (2016), NORTON (2013) e SHIGLEY e MISCHKE (2005) descrevem diversos efeitos que influenciam na resistência à fadiga dos materiais. Alguns efeitos apresentados são:

- Microestrutura;
- Efeito de tamanho;
- Efeito de superfície (Acabamento);
- Frequência;
- Carregamento;
- Confiabilidade;
- Tensões residuais;
- Temperatura.

Neste trabalho estes efeitos não serão descritos em detalhes, pois normalmente, a maioria deles se aplicam a materiais sem solda, sendo que o foco principal deste trabalho é em juntas soldadas. Alguns destes efeitos que influenciam na resistência à fadiga de juntas soldadas serão descritos na Seção 2.7, sendo que outros fatores citados acima, são descritos com mais detalhes pelos autores citados no início desta seção.

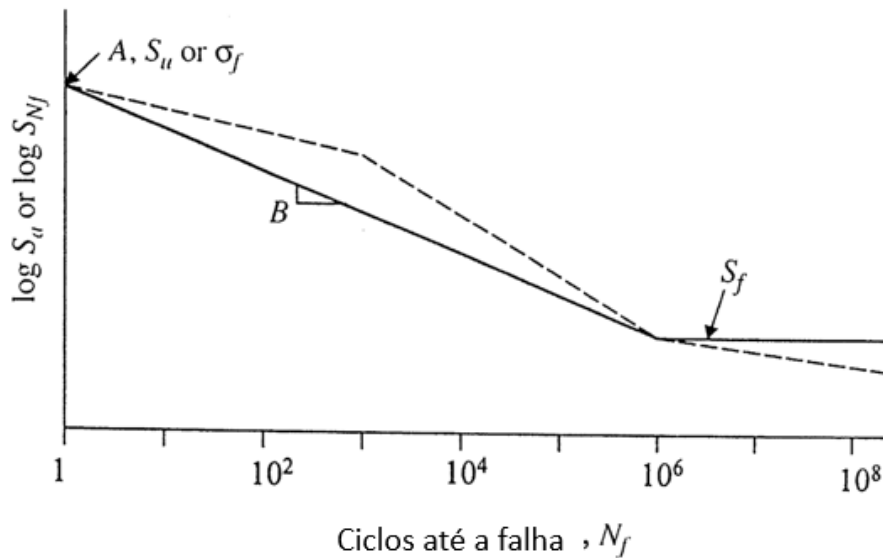
2.3.2.3 Representação da curva $S-N$ teórica – Método (BASQUIN, 1910 apud STEPHENS, 2000)

Dados reais de fadiga obtidos através de corpos de prova ou peças, devem ser usados sempre que possível. Essas informações podem estar disponíveis através de *handbooks*, códigos de projeto, normas da indústria, arquivos de dados da empresa e testes anteriores. Muitas vezes esta informação não está disponível, devendo ser gerada ou muitas vezes é necessário utilizar aproximações do comportamento das curvas $S-N$. Existem muitos modelos que descrevem curvas $S-N$, e estes geralmente implicam uma vida média de fadiga, ou seja, curva $S-N$ média (STEPHENS, 2000).

A Figura 19 mostra uma curva $S-N$ média. BASQUIN (1910) apud STEPHENS (2000) sugeriu a Equação 22, a qual representa um gráfico log-log uma linha reta, onde S_a é a tensão alternada aplicada, S_{N_f} é a tensão completamente reversa para $R=-1$, resistência à fadiga para ciclos (N_f), A e B são propriedades dos material, e representam o valor de S_a ou S_{N_f} para um ciclo e o coeficiente angular da reta log-log, respectivamente.

$$S_a \text{ ou } S_{N_f} = A(N_f)^B \quad (22)$$

Figura 19 - Curva $S-N$ teórica de (BASQUIN, 1910).



Fonte: Adaptado de (STEPHENS, 2000)

Uma representação aproximada da curva $S-N$ é um modelo tri-linear com três regiões distintas conforme pode ser visto na Figura 19, representado pela linha tracejada, na qual tem-se uma inclinação para a região entre 1 e 10^3 ciclos, uma inclinação para a região entre 10^3 e 10^6 ciclos e outro após 10^6 ciclos (esse valor pode mudar dependendo do método utilizado).

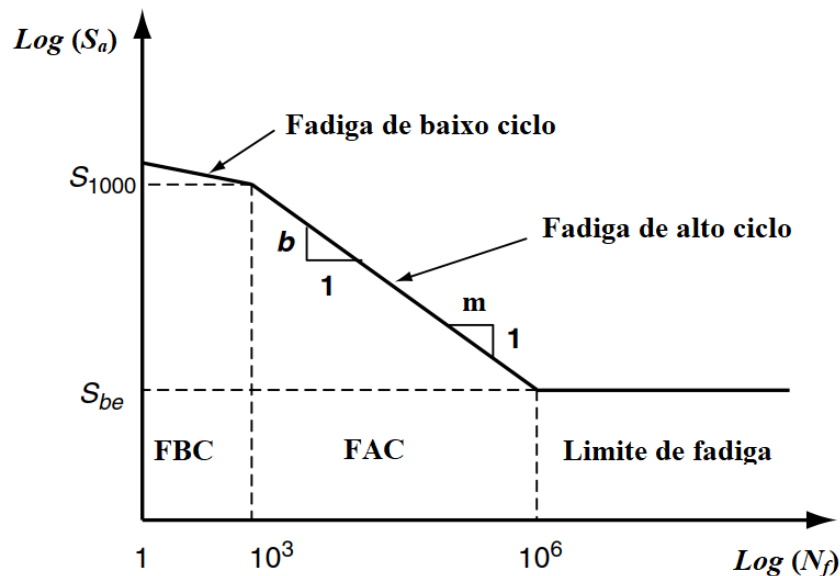
Este modelo tri-linear indica que não existe um limite de resistência à fadiga, sendo que este modelo está presente em algumas normas de projeto, tal como para engrenagens e soldas. Em alguns casos, esse modelo pode utilizar a terceira linha como horizontal para longas vidas a partir de 10^6 . Outros modelos aproximados assumem uma linha reta inclinada de 1 ciclo até 10^6 , seguidos por uma linha horizontal ou outra linha inclinada. O coeficiente A para $N_f = 1$, pode ser escolhido como a resistência última a tração (S_{ut}), a tensão de fratura verdadeira (σ_f) ou através de regressão de dados de fadiga e S_f , o qual corresponde o limite de resistência à fadiga do material é obtido conforme as Equações 16 ou 17.

2.3.2.4 Representação da curva $S-N$ teórica – Método apresentado por (LEE, 2005)

O método apresentado por LEE (2005) foi elaborado com base em trabalhos de diversos autores, tal como, JUVINALL e MARSHEK (2016), BANNANTINE, COMER e HANDROCK (1990), DOWLING (2012) e STEPHENS (2000).

Este método apresenta uma curva $S-N$ derivada dos corpos de prova padrão sob cargas de flexão totalmente reversas, a qual apresenta três regiões lineares distintas, quando considerado coordenadas log-log, conforme apresentado na Figura 20.

Figura 20 - Esquema de uma curva $S-N$ para aços.



Fonte: Adaptado de (LEE, 2005)

Para corpos de prova feitos de aços, os valores de resistência à fadiga em 1, 10^3 , 10^6 ciclos definem uma curva $S-N$. Estes valores de resistência à fadiga serão referidos como S'_f , S_{1000} e S_{be} , respectivamente. A inclinação da curva $S-N$ na região de fadiga de alto ciclo é denotada como b e expressa pela Equação 23.

$$b = -\frac{1}{3} \log \left(\frac{S_{1000}}{S_{be}} \right) \quad (23)$$

O coeficiente angular inverso da curva é definido por $m = -1/b$.

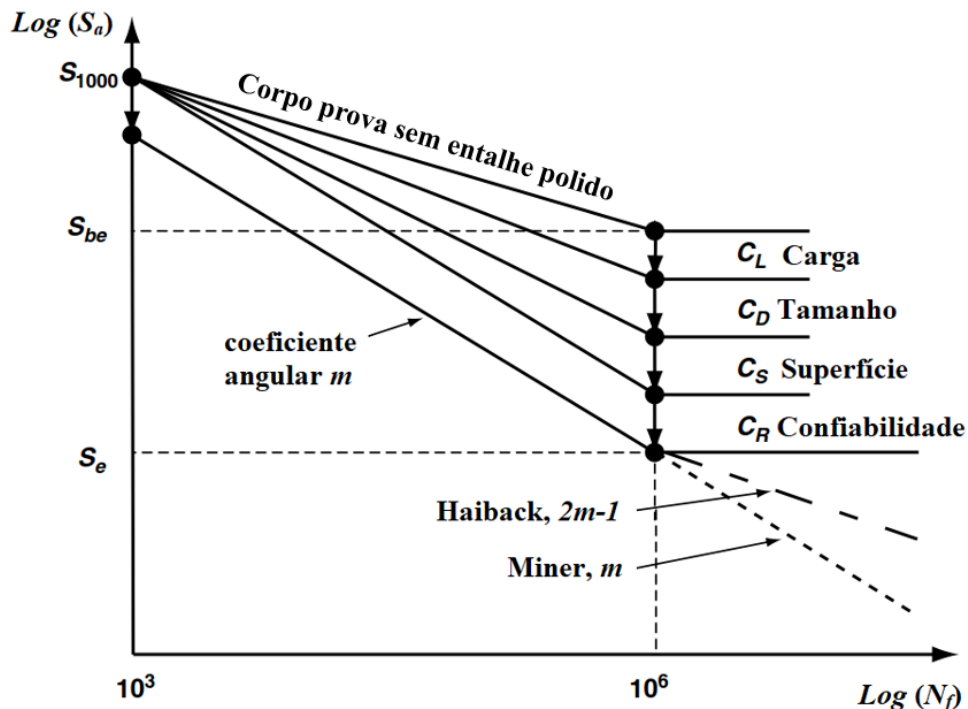
Para um dado ponto da curva (S_1, N_1) , o coeficiente angular b ou o coeficiente angular inverso m podem ser usados para determinar o número de ciclos equivalentes (N_2) para uma amplitude de tensão (S_2) pela Equação 24.

$$N_2 = N_1 \left(\frac{S_1}{S_2} \right)^{-1/b} \text{ ou } N_2 = N_1 \left(\frac{S_1}{S_2} \right)^m \quad (24)$$

Em geral, se o comportamento em fadiga é dominado pela etapa de propagação da trinca, tal como em juntas soldadas ou componentes com entalhes muito agudos, a curva $S-N$ frequentemente tem um coeficiente angular da ordem de $b \approx -0.333$ e $m \approx 3$. Se o comportamento é governado pela etapa de nucleação, tal como em corpos de prova sem concentradores de tensão ou componentes entalhados suaves, a curva $S-N$ frequentemente tem um coeficiente angular da ordem de $b \approx -0.15$ e $m \approx 7$ (LEE, 2005).

A Figura 21 apresenta a influência dos efeitos modificadores das curvas $S-N$. No entanto, conforme descrito na Seção 2.3.2.2, os mesmos não serão discutidos neste trabalho, sendo que LEE (2005) apresenta os fatores com detalhes.

Figura 21 - Efeitos modificadores das curvas $S-N$ para aços.



Fonte: Adaptado de (LEE, 2005)

A metodologia para gerar a curva $S-N$ teórica para o componente necessita então do conhecimento do limite último de tração do material (S_{ut}), através do qual são estimados os valores das resistências a fadiga para 10^3 e 10^6 ciclos. Para estimar o valor da resistência à fadiga de aços para 10^6 ciclos são usadas as Equações 16 ou 17, corrigindo-se pelos fatores modificadores, principalmente pelo efeito do carregamento. Para outros materiais os valores de S_{be} são apresentados na Tabela 5.

Já para se obter a resistência para 10^3 ciclos, LEE (2005) sugere os valores presentes na Tabela 6, de acordo com tipo de material e tipo de carregamento.

Tabela 5 – Estimativa da resistência à fadiga para 10^6 ciclos para outros tipos de materiais sob flexão rotativa.

Tipo de material	Número de Ciclos para Vida Infinita	S_{be}
Aços forjados com $S_{ut} < 1400 \text{ MPa}$	10^6	$0.5S_{ut}$
Aços forjados com $S_{ut} \geq 1400 \text{ MPa}$	10^6	700 MPa
Ferro Fundido	$5 \cdot 10^7$	$0.4S_{ut}$
Ligas de Alumínio com $S_{ut} < 336 \text{ MPa}$	$5 \cdot 10^8$	$0.4S_{ut}$
Ligas de Alumínio com $S_{ut} \geq 336 \text{ MPa}$	$5 \cdot 10^8$	130 MPa

Fonte: Adaptado de (LEE, 2005)

Tabela 6 – Estimativa da resistência à fadiga para 1000 ciclos.

Tipo de material	Tipo de carregamento	S_{1000}
Todos	Flexão	$0.9S_{ut}$
Todos	Axial	$0.75S_{ut}$
Aços	Torção	$0.72S_{ut}$
Não ferrosos	Torção	$0.63S_{ut}$
Ferro Fundido	Torção	$1.17S_{ut}$

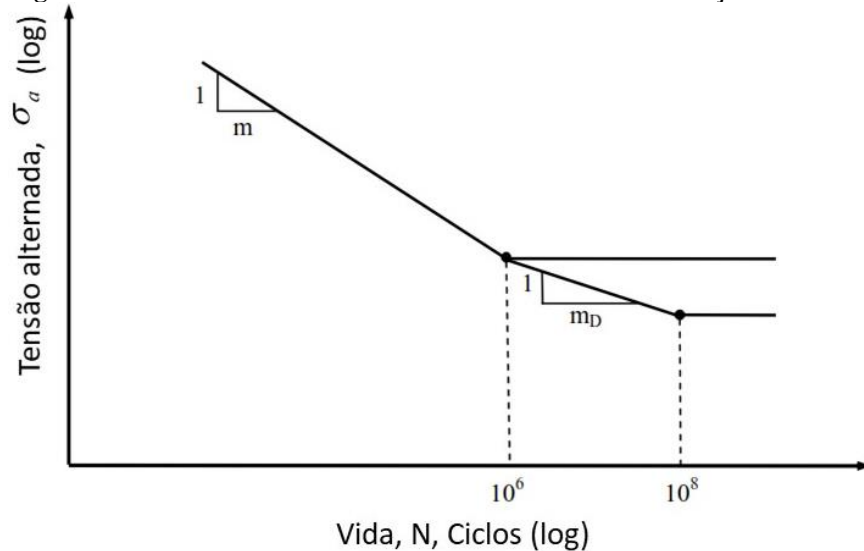
Fonte: Adaptado de (LEE, 2005)

2.3.2.5 Representação da curva $S-N$ teórica – Método FITNET

O método FITNET para representação da curva $S-N$ na região de alto ciclo é apresentado por NEIMITZ (2008) apud SEMPRUCH e STRZELECKI (2010). A abordagem descrita nos procedimentos da FITNET pressupõe o uso de conhecimentos gerais sobre o comportamento de fadiga de alguns grupos de materiais em condições de cargas especificadas, sendo que utiliza valores de inclinação pré-definidos. Os valores da Figura 22 dependem do tipo de tensão que domina durante o processo de falha por fadiga, sendo usado $m = 5$ para

tensões normais e $m = 8$ para o tensões cisalhantes. O valor do limite de fadiga σ_w é determinado para o ponto de 10^6 ciclos. Essas questões detalhadas acima, referem-se ao aço (excluindo o aço austenítico) e ao aço fundido. Para outros materiais de construção e aço austenítico já mencionado, para a faixa de ciclos de 10^6 a 10^8 ciclos, estima-se o uso de m_D , respectivamente 15 e 25 (SEMPRUCH e STRZELECKI, 2010). Uma desvantagem desse método, é que a precisão desse tipo de abordagem não foi largamente estudada, tal como outros métodos que foram apresentados anteriormente, sendo que SEMPRUCH e STRZELECKI (2011) avaliaram os erros envolvidos nas previsões de fadiga conforme o método FITNET, verificando erros para as condições estudadas na faixa de 14% a 573%. Os mesmos autores propuseram um novo método com base no método FITNET, o qual será apresentado na Seção 2.3.2.6.

Figura 22 - Curva S-N estimada de acordo com as recomendações FITNET.



Fonte: Adaptado de (SEMPRUCH e STRZELECKI, 2010)

O método para determinar o limite de fadiga σ_w (10^6 ciclos) para o material de acordo com o método FITNET, tal como os métodos vistos anteriormente, depende da resistência última do material (S_{ut}) e de um coeficiente dependente do material $f_{w,\sigma}$ e $f_{w,\tau}$, para tensões normais e cisalhantes, respectivamente. Na Tabela 7 são apresentados os valores do coeficiente $f_{w,\sigma}$ para diversos materiais. A resistência à fadiga para tensões normais e tensões cisalhantes são apresentadas nas Equações 25 e 26, respectivamente.

$$\sigma_w = f_{w,\sigma} S_{ut} \quad (25)$$

$$\sigma_\tau = f_{w,\tau} \sigma_w \quad (26)$$

Tabela 7 – Valores do coeficiente $f_{w,\sigma}$ conforme o método FITNET.

Tipo de material	$f_{w,\sigma}$
Aço cementado	0.40
Aço inoxidável	0.40
Aço forjado	0.40
Aço fundido	0.34
Outros aços além dos acima	0.45
Ferro fundido esferoidal	0.34
Ferro fundido maleável	0.30
Ferro fundido cinza	0.30
Liga de alumínio fundida	0.30

Fonte: Adaptado de (STRZELECKI e SEMPRUCH, 2012)

2.3.2.6 Representação da curva $S-N$ teórica/experimental – Método proposto por STRZELECKI e SEMPRUCH (2011b)

O método proposto por STRZELECKI e SEMPRUCH (2011b) foi baseado no método FITNET e consiste em determinar o coeficiente angular m , o qual depende do tipo de material e do tipo de carregamento, pois os autores verificaram que o método FITNET apresentava erros bastante grandes em determinadas partes da curva $S-N$, principalmente porque o método FITNET mantém o coeficiente m inalterado, independente do material, conforme apresentado na Seção 2.3.2.5. Os autores buscaram verificar e avaliar diversos tipos de materiais, com intuito de validar o método proposto. O método FITNET, se mostrou como uma metodologia com precisão insuficiente para prever a vida em fadiga na região de vida finita, por isso os autores propuseram uma modificação que envolve a variação do coeficiente m em uma faixa mais ampla que a metodologia original, baseando-se em dados analítico e experimentais, os quais podem ser obtidos por ensaios simples de fadiga ou por dados experimentais presentes na literatura.

Com objetivo de mostrar que os valores do coeficiente m tem uma grande faixa de variação, os autores apresentaram um resumo dos valores de m para diversos materiais, os quais estão apresentados na Tabela 8.

Os autores propuseram uma equação geral que descreve a dependência da inclinação m em relação ao valor da razão do limite de escoamento (S_y) e da resistência última à tração (S_{ut}). Nas Equações 27 e 28, assumiu-se que o limite para vida finita de fadiga é dado pelo valor de

$0.9S_y$, correspondente ao número de ciclos N_{Sy} , sendo que para diferenciar dos valores da Tabela 8, o símbolo m_e foi introduzido, conforme apresentado na Figura 23.

Tabela 8 – Valores do coeficiente m para diversos materiais

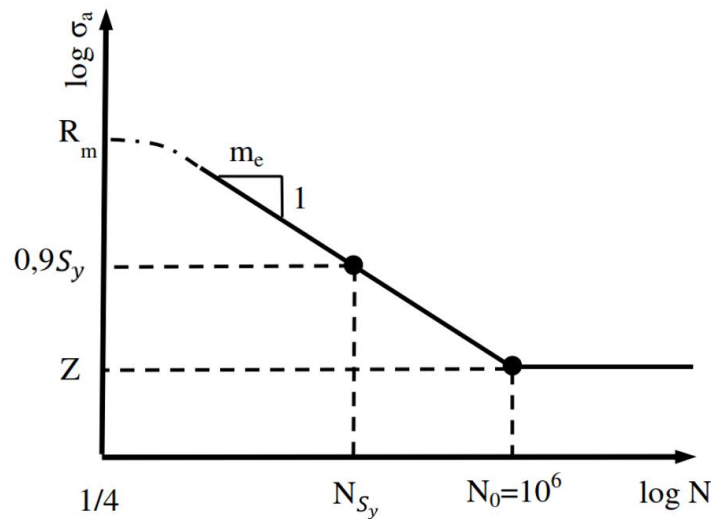
Tipo de material	Estado	Valores de m	
		Tensões normais	Tensões cisalhantes
Aço	Sem entalhe	12	12
Aço	Com entalhe	7	7
Aço	Tratamento térmico	18	18
Ferro fundido	Sem entalhe	11	-
Ligas de alumínio	Sem entalhe	8	8

Fonte: Adaptado de (STRZELECKI e SEMPRUCH, 2011b)

$$N_{Sy} = 400 \left(\frac{S_y}{S_{ut}} \right)^{-10} \quad (27)$$

$$m_e = \frac{\log \left(\frac{10^6}{N_{Sy}} \right)}{\log \left(\frac{0.9S_y}{Z} \right)} \quad (28)$$

Figura 23 – Representação da curva S-N FITNET modificada.



Fonte: Adaptado de (STRZELECKI e SEMPRUCH, 2011b)

Segundo STRZELECKI e SEMPRUCH (2011b), a aplicação da metodologia híbrida proposta, conduziu a redução dos erros de previsão da vida em fadiga de 573% para 286% para a região de análise na curva S-N.

STRZELECKI e SEMPRUCH (2013) utilizam uma abordagem probabilística, assumindo que a distribuição de fadiga é similar a uma distribuição normal, tal como descrito por LEE (2005). A partir dessa suposição, é possível definir a probabilidade do valor de resistência para vida infinita usando a equação da distribuição normal padrão, conforme a Equação 29. A abordagem apresentada nesta seção é baseada no método proposto por STRZELECKI e SEMPRUCH (2011b), no qual os autores propuseram uma modificação do Método FITNET conforme apresentado na Seção 2.3.2.6, sendo que apenas introduziram-se os conceitos de probabilidade para levar em conta a confiabilidade nas previsões de vida em fadiga.

$$Z = \frac{Z_{GR} - \mu}{s} \quad (29)$$

onde Z é o valor da variável randômica a partir da distribuição normal, Z_{GR} é a variável randômica do limite de fadiga, μ é o valor da média do limite de fadiga (pode ser assumido como indicado pelo Método FITNET na Equação 25) e s é o desvio padrão.

Assume-se que a probabilidade de falha da amostra carregada pela amplitude de tensão definida é dada pela Equações 30 e 31.

$$P(Z < \mu) = \Phi(Z) = 1 - R \quad (30)$$

$$Z = \Phi^{-1}(1 - R) \quad (31)$$

onde $\Phi(Z)$ é função de densidade normal padrão e R é o nível de confiabilidade.

O coeficiente de variação é definido pela Equação 32.

$$V = \frac{s}{\mu} \quad (32)$$

Substituindo a Equação 29 na Equação 31, bem como pela substituição do desvio padrão s a partir da Equação 32, obtém-se a Equação 33.

$$Z_{GR} = \mu + \Phi^{-1}(1 - R)\mu V \quad (33)$$

Introduzindo o coeficiente de confiabilidade, o qual reduz o limite de fadiga para o valor adequado assumindo a probabilidade de falha, obtém-se a Equação 34.

$$Z_{GR} = C_R \mu \quad (34)$$

Sendo C_R , o fator de confiabilidade, definido conforme a Equação 35.

$$C_R = 1 + \Phi^{-1}(1 - R)V \quad (35)$$

Assumindo que coeficiente de variação do limite de fadiga é da ordem de 0.08 (de acordo com LEE (2005)), é possível determinar o coeficiente de confiabilidade, sendo que os valores calculados são apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 – Valores do coeficiente confiabilidade.

R (Confiabilidade)	C_R
0.9	0.897
0.95	0.868
0.98	0.836
0.99	0.814
0.999	0.753
0.9999	0.702

Fonte: Adaptado de (LEE, 2005)

Finalmente para calcular o limite de fadiga para um dado nível de confiabilidade, a Equação 36 deve ser utilizada, onde σ_w é obtido pela Equação 25.

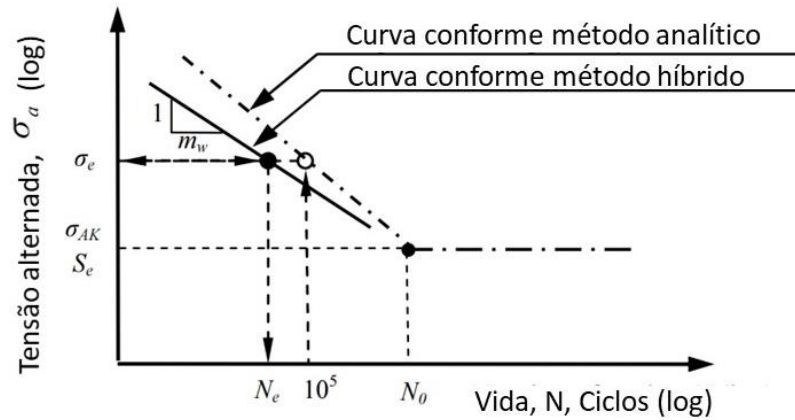
$$Z_{GR} = C_R \sigma_w \quad (36)$$

2.3.2.7 Representação da curva $S-N$ teórica/experimental – Método híbrido proposto por (STRZELECKI e SEMPRUCH, 2014)

Neste trabalho de STRZELECKI e SEMPRUCH (2014), os autores apresentam um método para obtenção da curva $S-N$ de materiais na região de alto ciclo, denominado método híbrido. Tal denominação, foi motivada devido ao método ser baseado nas propriedades de fadiga que são obtidas por método analítico (método FITNET), e dados experimentais de fadiga, no qual devem ser ensaiados 3 corpos de provas.

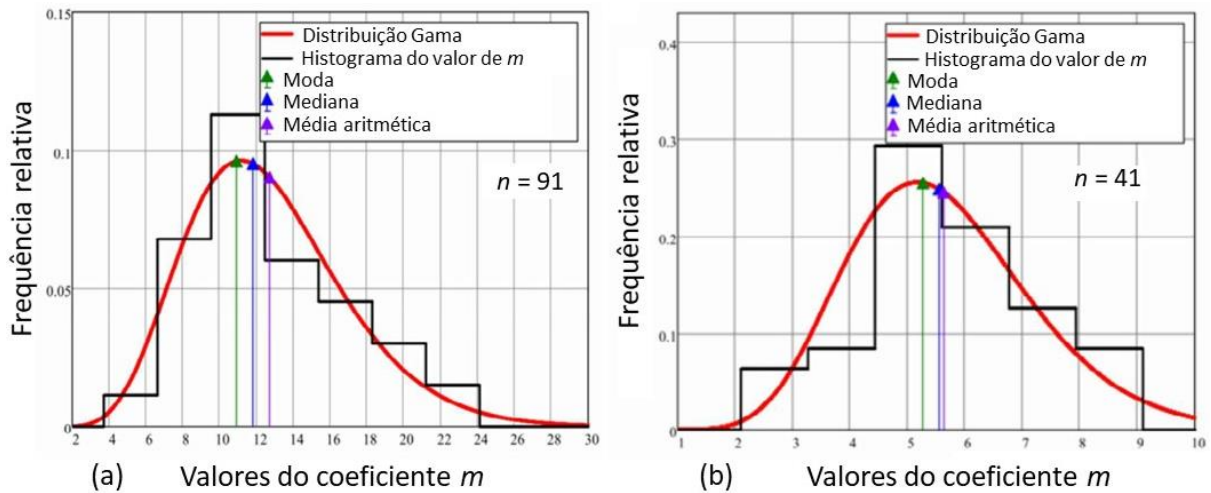
O método híbrido consiste em inicialmente determinar a curva $S-N$ de acordo com a metodologia analítica FITNET, sendo determinado o nível de tensão a ser ensaiado σ_e , com base nas propriedades analíticas para 10^5 ciclos (ver Figura 24). Posteriormente, realizam-se os testes de fadiga de 3 corpos de prova para a tensão σ_e , determinando-se a partir dos resultados dos ensaios, a vida média N_e com base nos resultados de vida experimental obtidos. Com o ponto (N_e, σ_e) e o coeficiente angular m_w , pode-se traçar a curva $S-N$ híbrida, conforme pode ser visto esquematicamente na Figura 24. O coeficiente m_w é igual a 10.9 para corpos de prova sem entalhe e 5.3 para corpos de prova entalhados. Os valores de m_w foram obtidos através de análise estatística das propriedades de fadiga de 91 tipos de materiais (corpos de prova sem entalhes) e 41 tipos de materiais (corpos de prova entalhados), ambos sob tensões normais, conforme pode ser visto na Figura 25.

Figura 24 – Esquema para obtenção da curva híbrida (analítica/experimental).



Fonte: Adaptado de (STRZELECKI e SEMPRUCH, 2014)

Figura 25 – Distribuição Gama dos valores do coeficiente m , (a) para corpos de prova sem entalhes e (b) corpos de prova entalhados.



Fonte: Adaptado de (STRZELECKI e SEMPRUCH, 2014)

2.3.3 Métodos para obtenção de curvas $S-N$ com número de corpos de prova reduzidos (métodos experimentais)

Há uma tendência nas pesquisas de métodos para obtenção de parâmetros de fadiga de materiais, através da utilização de métodos que possibilitem ensaiar um número reduzido de corpos de prova para obter a curva $S-N$. Nesta seção busca-se apresentar o estado da arte dos métodos mais relevantes presentes na literatura.

A norma ASTM E 739 (2015) estabelece as diretrizes básicas para planejamento de ensaios de fadiga e a análise estatística comumente utilizada para obter as propriedades dos materiais, sendo que conforme descrito na Seção 2.3.1.2, esta norma define uma porcentagem mínima de replicações dependendo da finalidade do ensaio realizado, não sendo recomendada a utilização de apenas um corpo de prova por nível, pois isso não permite a avaliação da

variabilidade e estatística da distribuição dos dados levantados. Na ASTM E 739 (2015) o número de corpos de prova mínimo para dados a serem utilizados em projetos varia de 12 a 24, dependendo da replicação. Uma configuração de ensaio bastante comum é a utilização de 12 corpos de prova, com 4 corpos de prova por nível com 3 níveis de tensão, o que representa 75% de replicação para a região de vida finita em fadiga. Para a determinação do limite de resistência à fadiga para vida infinita (no caso de aços, por exemplo), devem ser utilizados mais corpos de prova, sendo normalmente utilizado o método da escada, conforme apresentado na Seção 2.3.1.1 (Figura 13).

A norma japonesa JSME S 002 (1994) estabelece um ensaio com replicação de 50%, sugerindo a utilização de um planejamento do ensaio de fadiga com número de corpos de prova reduzidos, na qual são usados oito corpos de prova em quatro níveis de tensões diferentes na região de vida finita e são utilizados seis corpos de prova para determinar o limite de fadiga através do método de escada. O limite de fadiga é determinado tomando a média dos níveis de tensão utilizados durante o método da escada (Figura 12).

Comparando as duas normas descritas acima, nota-se que para a região de vida finita a norma JSME S 002 (1994) sugere a utilização de 8 corpos de prova com uma replicação de 50%, ou seja, com dois corpos de prova por nível, enquanto que a norma ASTM E 739 (2015) sugere o mínimo de 12 corpos de prova.

Muitos métodos e abordagens são encontradas na literatura sobre obtenção de parâmetros da curva $S-N$ com um número limitado de corpos de prova, sendo que podem ser citados como os principais em ordem cronológica os seguintes: DIXON e MOOD (1948), COLEMAN (1963), ZHANG e KECECIOGLU (1998), GOPE (1999), LIN, LEE e LU (2001), GOPE (2002), STRZELECKI e TOMASZEWSKI (2016b), STRZELECKI e SEMPRUCH (2016a) e STRZELECKI, SEMPRUCH e TOMASZEWSKI (2016c). Abaixo serão apresentados em detalhes os métodos que mais se relacionam com o tema do presente trabalho.

Segundo LIN, LEE e LU (2001), existem muitas técnicas para redução do número de corpos de prova para obtenção de propriedades estatísticas de resistência à fadiga, mas poucas foram suficientemente validadas por ensaios e simulação. A validação por simulação é preferível, porque os testes de fadiga de alto ciclo geralmente são muito subjetivos, não repetíveis e demorados. LIN, LEE e LU (2001) comparam qualitativamente duas abordagens diferentes para a avaliação das distribuições do limite de fadiga. A análise baseia-se em simulações computacionais. A primeira abordagem contém dois métodos de redução de dados

por DIXON e MOOD (1948), bem como por ZHANG e KECECIOGLU (1998) baseado no método da escada simulado. A outra abordagem inclui dois métodos de extrapolação da vida em fadiga na região de vida finita (o método do raio-projetado e o método paralela-projetado). Vários algoritmos baseados em simulação para a geração de dados de limite de fadiga (como limite de fadiga, pode entender como a resistência à fadiga para vida infinita) e dados de fadiga para vida finita foram desenvolvidos com base em um dada distribuição estatística do limite de fadiga. Os resultados dos testes simulados foram avaliados de forma estatística em relação às distribuições dadas, com uma média alvo e dois coeficientes diferentes de variação dos limites de fadiga ($COV(S_{FL})$). Os autores concluíram que para um $COV(S_{FL})$ regular (no caso, 3.3%), o método paralela-projetado é o melhor, seguido da abordagem Dixon e Mood (1948). Em um $COV(S_{FL})$ extremamente grande (no caso 30%), o método de DIXON e MOOD (1948) é recomendado. Cabe salientar, que os estudos de LIN, LEE e LU (2001) são focados na obtenção do limite de resistência à fadiga para 10^7 ciclos, ou seja, no limite de resistência para vida infinita.

COLEMAN (1963) descreve dois métodos diferentes para estimar os parâmetros da curva de fadiga com um número limitado de corpos de prova. No primeiro método, o procedimento de carga progressivamente crescente para testes de fadiga, originalmente desenvolvido por PROT (1945), é analisado. Por análise matemática, é possível obter uma equação que explica a equação empírica proposta por PROT (1945), e pode ser usada para generalizar métodos de carga cíclica que aumentam linearmente. Como consequência deste estudo, um procedimento de curta duração é apresentado, possibilitando estimar o limite de resistência e outros parâmetros da curva de fadiga, bem como para fornecer a curva $S-N$ com corpos de prova reduzidos. No segundo método, a precisão da estimativa da curva de fadiga média vs tamanho da amostra, também é investigada para determinar a natureza dessa variação, de modo que possa haver uma base quantitativa para tomar uma decisão sobre o tamanho da amostra ideal, sendo que através da análise dos resultados obtidos, o autor sugere que um mínimo de 6 a 7 corpos de prova devem ser ensaiados. O método de incremento de carga de Prot é proposto com base na regra de dano cumulativo de Miner e na expressão de *Weibull* para a curva $S-N$.

GOPE (1999) apresenta um método simples para determinação do tamanho da amostra requerido para estimar a vida em fadiga para uma probabilidade de sobrevivência e nível de confiança desejada. O método é usado para casos em que os dados seguem distribuições log

normal ou *Weibull*. A grande vantagem dos dados apresentados por GOPE (1999), é que o mesmo apresentou tabelas de fatores de erro, os quais podem ser diretamente usadas para determinar o tamanho da amostra para as probabilidades de 50, 90 e 95% e níveis de confiança de 90, 95, 97,5, 99 e 99,5%. O tamanho da amostra presentes nas tabelas vai de 3 a 25, tanto para a distribuição de *Weibull* como para a distribuição log normal. A aplicação prática dos fatores de erro é ilustrada com exemplos. A precisão do método é estudada comparando-os com alguns métodos padrão existentes disponíveis na literatura.

GOPE (2002) também apresenta um método para a determinação do tamanho mínimo de amostras necessários para estimar a vida de fadiga, o qual baseia-se na análise da variância do erro que surge devido à natureza dispersa dos dados de vida em fadiga. Um exemplo de aplicação do método apresentado também é realizado, sendo que esse método pode ser utilizado para dados que seguem distribuição de *Weibull* e log normal.

STRZELECKI e TOMASZEWSKI (2016b) apresentam uma abordagem alternativa para obtenção da curva $S-N$, a qual requer poucos corpos de prova. Baseado nos resultados obtidos para a curva, os autores obtiveram precisão suficiente para 9 corpos de prova ensaiados, sendo um tamanho de amostra menor que os sugeridos pela ASTM E 739 (2015). Os autores aplicaram a distribuição de *Weibull* com 2 e 3 parâmetros para descrever as curvas $S-N$, sendo que os parâmetros do modelo, foram obtidos usando o método da máxima verossimilhança (*Maximum Likelihood Method*). Também são apresentadas comparações entre os métodos descritos, sendo que os autores concluíram que utilizando a distribuição de *Weibull* com 3 parâmetros, obtém-se uma curva mais precisa do que usando uma distribuição normal, sendo que utilizando *Weibull* com 3 parâmetros é possível variar a banda de dispersão de acordo com o nível de tensão (dados de fadiga heteroscedásticos), o que é mais próximo dos resultados experimentais.

STRZELECKI e SEMPRUCH (2016a) apresentam duas abordagens para traçar uma curva $S-N$ com base nos resultados experimentais. A primeira abordagem é comumente utilizada pelos pesquisadores e apresentada em detalhes em muitos estudos, a qual usa uma regressão linear cujos parâmetros são estimados usando o método de mínimos quadrados. O método de escada é usado para um critério de fadiga para vida infinita. O segundo modelo combina a curva $S-N$ definida como uma linha reta e o registro da ocorrência aleatória do limite de fadiga, sendo que se utiliza o método de máxima verossimilhança para estimar os parâmetros da curva $S-N$. Os dados de fadiga para o aço C45 + C obtidos no ensaio de flexão torcional

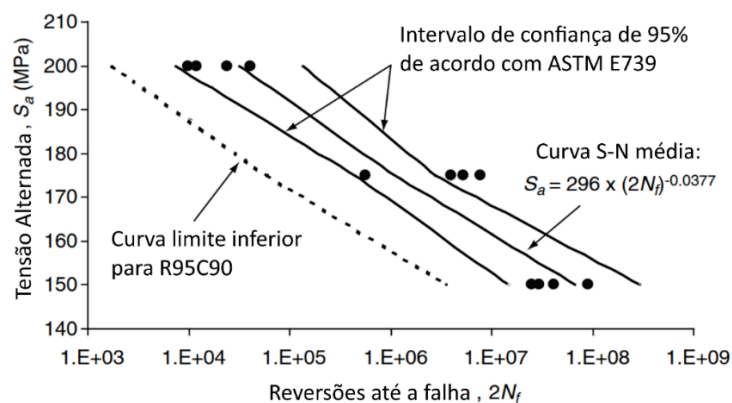
foram utilizados para comparar com as curvas $S-N$ estimadas. Para os números pseudo-aleatórios gerados usando o algoritmo Mersenne-Twister, a curva $S-N$ estimada com 10 resultados experimentais, conseguiu-se estimar a vida em fadiga na banda de dispersão de fator 3. Os resultados foram considerados satisfatórios, dando uma boa aproximação, especialmente levando em conta o tempo necessário para obter a curva $S-N$.

PASCUAL e MEEKER (1997) e posteriormente STRZELECKI, SEMPRUCH e TOMASZEWSKI (2016c) apresentam dois métodos para estimar a curva de fadiga $S-N$. O primeiro é o método de regressão linear tradicional e método de escada. O outro método alternativo é baseado na vida em fadiga aleatória, limite de fadiga e probabilidade. Os dois métodos fornecem resultados semelhantes, mas o último requer menos corpos de provas ensaiados.

2.3.4 Métodos de construção da curva de projeto

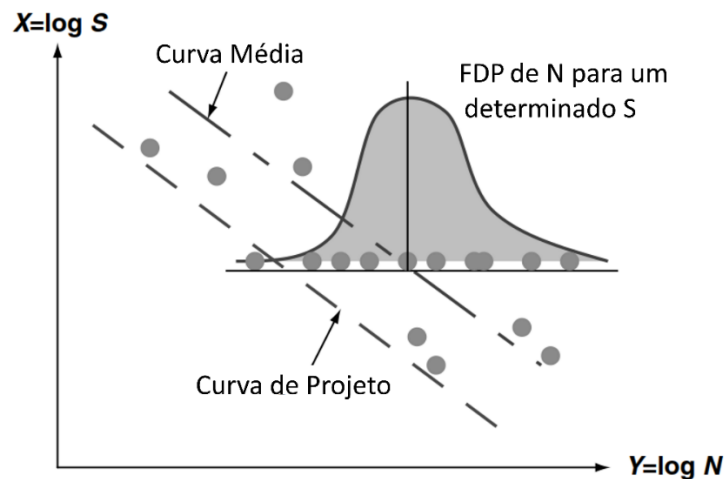
Essa seção apresenta um método prático para construção da curva $S-N$ de projeto que caracteriza a vida de fadiga mínima para um determinado nível de resistência à fadiga, de modo que a maioria dos dados de fadiga estejam acima do valor mínimo, também conhecido como limite inferior. A escolha da curva $S-N$ (limite inferior) (a chamada curva $S-N$ de projeto) é bastante arbitrária e depende do custo dos materiais, da política de segurança e dos padrões do setor. Por exemplo, se um valor de R95C90 é usado para projetos de componentes, esse valor particular garante que existe uma possibilidade de sobrevivência de 95% (confiabilidade) com um nível de confiança de 90% para uma vida de fadiga em um nível de tensão específico. Como o tamanho da amostra é geralmente limitado, o nível de confiança de 90% é introduzido para garantir que exista uma probabilidade de 90% que o valor real da confiabilidade de 95% possa ficar acima desse limite inferior, conforme pode ser visto na Figura 26.

Figura 26 - Curva $S-N$ ajustada e dados experimentais.



Tradicionalmente, prefere-se usar a curva de projeto com 2σ ou 3σ abaixo da curva média, sendo que a curva de projeto pode ser obtida deslocando a curva $S-N$ média em coordenadas logarítmicas para a esquerda por duas ou três vezes o desvio padrão da amostra. Segundo Lee (2005), esses métodos não levam em consideração a distribuição estatística da vida de fadiga devido ao tamanho da amostra e ao nível de confiabilidade de interesse. Este método é apresentado na Figura 27.

Figura 27 - Curva $S-N$ ajustada com 2σ ou 3σ abaixo da curva média.



Fonte: Adaptado de (LEE, 2005)

2.4 Fundamentação sobre estatística

Nesta seção são apresentados conceitos de estatística relevantes para o entendimento da metodologia e desenvolvimento do presente trabalho.

2.4.1 Generalidades sobre dados de fadiga

A curva $S-N$ para aços carbono e aços de baixa liga, em um gráfico logarítmico, freqüentemente caracterizada por uma relação linear e um limite de resistência à fadiga na faixa de ciclo alto, aproximadamente 10^6 ciclos conforme SHIGLEY e MISCHKE (2005), sendo que este valor pode variar, dependendo da abordagem utilizada e do material.

A curva $S-N$ de juntas soldadas tendem a uma linha reta no espaço de log-log em uma ampla faixa de tensões. Para baixos níveis de tensão, muitas vezes, um modelo bi ou tri-linear é usado como uma curva de projeto para descrever os limites de resistência.

Os dados de fadiga são geralmente heteroscedásticos, isto é, o desvio padrão do logaritmo da vida em fadiga, não é constante em todo o intervalo de teste. O desvio padrão do logaritmo da vida em fadiga, tende a aumentar em níveis de tensão mais baixos.

Na prática, os corpos de prova são freqüentemente testados em diferentes níveis de tensão com poucas repetições em cada nível de tensão. Nos ensaios de fadiga, dados censurados (ou seja, *runouts*) são bastante comuns. Os corpos de prova censurados são aqueles que não falharam no momento em que o ensaio foi encerrado. Na região de vida de alto ciclo, um ensaio pode ser encerrado em uma vida pré definida, simplesmente por causa de restrições práticas de tempo e custo (SHEN, 1994).

Um ensaio de fadiga também pode ser categorizado como um ensaio preliminar ou de melhoria do projeto. Testes preliminares são caracterizados por pequenos tamanhos de amostra e geralmente não possuem replicações, com pouca ou nenhuma análise estatística aplicada. Esses dados são usados para análises de falha ou para identificação de efeitos grosseiros. Segundo SHEN (1994) os ensaios de fadiga podem ser descritos conforme abaixo:

1- **Ensaio sem repetições.** Uma única amostra de teste é selecionada em cada nível de tensão, feito normalmente quando apenas um pequeno tamanho de amostra está disponível. São recomendados quatro a seis corpos de prova se a forma da curva $S-N$ for conhecida. Se a forma for desconhecida, sugere-se 6 a 12 níveis de tensão (LITTLE, 1975).

2- **Testes com dados replicados.** Mais de um corpo de prova é testado em cada nível de tensão. Requisitos de replicação são necessários para estimar a variabilidade ou a distribuição da vida em fadiga. Um tamanho de amostra de pelo menos quatro em cada nível de tensão é sugerido para estimar a variabilidade dos dados (ASTM E-9, 1963). Um tamanho de amostra de 10 ou mais em cada nível de tensão é desejado para obter alguma indicação quanto à forma da distribuição de vida. Pelo menos quatro ou cinco diferentes níveis de tensão são necessários para determinar as curvas $P-S-N$ (Curvas $S-N$ com probabilidades). Para obter um grau de precisão igual no intervalo da curva $S-N$, são necessários mais corpos de prova no intervalo de alto ciclo devido a maior variabilidade na vida.

As características dos dados típicos de fadiga, combinado com os objetivos da análise de dados de fadiga conforme descrito acima, apresentam as seguintes dificuldades na análise estatística dos dados (SHEN, 1994):

1. A variância relativamente grande na vida em fadiga para um dado nível de tensão leva a grandes incertezas nas estimativas dos parâmetros do modelo. São necessários tamanhos de

amostra relativamente grandes, para reduzir a incerteza nas estimativas dos parâmetros, o que na maiorias das vezes é inviável;

2. Os tamanhos das amostras são geralmente pequenos por questão de custo e tempo, pois os ensaios de fadiga são bastante morosos;

3. Para garantir alta confiabilidade, são necessárias curvas de projeto visando percentis baixos para a vida de fadiga (curva limite inferior conforme Figura 26 e Figura 27). O problema com a estimativa de curva com baixa probabilidade de falha, é que a imprecisão nas estimativas aumenta à medida que o nível de probabilidade de falha α diminui;

4. Dados censurados (*Runouts*) podem existir em alguns casos, pois alguns corpos de prova, particularmente na faixa de alto ciclo, podem não falhar dentro de um período de tempo razoável;

5. A existência de um limite de resistência apresenta dificuldades matemáticas. A vida no limite de resistência à fadiga para vida “infinita” provavelmente será muito longa. Muitas vezes, as falhas não ocorrem dentro de um período de tempo prático. Assim, muitos corpos de prova podem ser censurados, sendo que dados censurados fornecem pouca informação para a análise estatística. Em última análise, a modelagem matemática no limite de fadiga pode ser principalmente um julgamento de engenharia sem muitas evidências físicas sólidas;

6. Os dados podem ser heteroscedásticos;

7. Geralmente, a distribuição dos dados de vida em fadiga N para uma dada tensão aplicada S é desconhecida.

Em resumo, as dificuldades na análise de dados de fadiga são decorrentes dos custos envolvidos nos ensaios e da vida longa em fadiga requerida para os componentes, gastando muito tempo para obter dados de fadiga pelos critérios normatizados, tal como (ASTM E-9, 1963). Se os ensaios de fadiga fossem baratos, um grande número de corpos de prova poderiam produzir estimativas precisas da: (a) distribuição da vida para dado nível de tensão, e com isso, (b) a obtenção da curva de projeto na região de baixa probabilidade de falha (curva limite inferior, tal como apresentado na Figura 27).

2.4.2 Simulações estatísticas usando Método de Monte Carlo

O método de Monte Carlo é um tipo especial de simulação utilizada em modelos envolvendo eventos probabilísticos, sendo um método numérico para solução de um dado modelo matemático pela simulação de variáveis randômicas, possibilitando avaliar o resultado (SOBOL, 1994).

O marco geralmente aceito do método de Monte Carlo é 1949, quando um artigo intitulado "O método de Monte Carlo" de METROPOLIS e ULAM (1949) foi publicado. Os matemáticos americanos John von Neumann e Stanislav Ulam são considerados seus principais criadores. Na União Soviética, os primeiros trabalhos sobre o método de Monte Carlo foram publicados em 1955 e 1956 por V. V. Chavchanidze, Yu. A. Shreider e V.S. Vladimirov (SOBOL, 1994).

Os dados simulados são usados rotineiramente em situações onde os recursos são limitados ou onde obter dados reais é muito caro ou impraticável. O método de Monte Carlo tem uma longa história desde que revolucionou a pesquisa nuclear nos anos 1940. Hoje, o uso de dados simulados para desenvolver um panorama paramétrico confiável dos resultados de um processo é vital em diversos setores, podendo serem citados como exemplo, a área de finanças, fabricação, extração de gás e óleo, farmácia, e muito mais. Segundo SHEEHY e MARTZ (2017), é possível usar a simulação de Monte Carlo para:

- Simular a gama de resultados possíveis para ajudar a tomar uma decisão;
- Prever resultados financeiros ou estimar cronogramas de projetos;
- Compreender a variabilidade em um processo ou sistema;
- Encontrar problemas em um processo ou sistema;
- Gerenciar riscos através da compreensão das relações de custo/benefício.

As principais etapas na simulação de Monte Carlo são apresentadas a seguir, sendo que dependendo do número de fatores envolvidos, as simulações podem ser muito complexas. Mas em um nível básico, as simulações Monte Carlo têm quatro etapas simples:

1. Identificar a equação de transferência: Para fazer uma simulação de Monte Carlo, é necessário um modelo quantitativo da atividade, plano ou processo que se quer explorar. A expressão matemática desse processo é chamada de "equação de transferência". Ela pode ser uma equação de engenharia ou de negócios bem conhecida, ou pode ser baseada em um modelo criado a partir de um experimento projetado (DOE) ou análise de regressão;

2. Definir os parâmetros de entrada: Para cada fator em sua equação de transferência, deve-se conhecer a distribuição dos dados de fadiga. Algumas entradas podem seguir uma distribuição normal, enquanto outras seguem uma distribuição triangular ou uniforme. Depois, é necessário determinar parâmetros de distribuição para cada entrada, por exemplo, pode ser necessário especificar a média e desvio padrão de entradas que seguem uma distribuição normal;

3. Criar dados aleatórios: Para fazer uma simulação válida, é necessário criar um conjunto de dados aleatórios muito grande para cada entrada (algo na ordem de 100.000 instâncias) baseados na distribuição escolhida. Esses pontos de dados aleatórios simulam os valores que seriam vistos ao longo de um grande período, para cada entrada. Diversos softwares, como por exemplo Minitab, Matlab, R Statistical, Excel, podem criar facilmente dados aleatórios que seguem a distribuição de probabilidade que se deseja utilizar, tal como distribuição normal, *Weibull*, uniforme, entre outras;

4. Simular e analisar os resultados do processo: Com os dados simulados prontos, é possível usar a equação de transferência para calcular resultados simulados. Executar uma grande quantidade de dados de entrada simulados, através do modelo, fornecerá uma indicação confiável dos resultados do processo ao longo do tempo, dada a variação antecipada nas entradas.

2.4.3 Estimativa de parâmetros de uma população e distribuições de probabilidade

Os parâmetros são medidas descritivas de toda uma população, contudo, seus valores são normalmente desconhecidos, porque é inviável medir uma população inteira. Por causa disso, é possível extrair uma amostra aleatória da população para obter estimativas de parâmetros. Um dos objetivos das análises estatísticas é a obtenção das estimativas dos parâmetros da população, juntamente com a quantidade de erro associada a essas estimativas. Essas estimativas também são conhecidas como estatísticas de amostra (Minitab, 2017).

Existem diversos tipos de estimativas de parâmetros:

- As estimativas pontuais são o valor único e mais provável de um parâmetro. Por exemplo, a estimativa pontual da média da população (o parâmetro) é a média da amostra (a estimativa do parâmetro);
- Intervalos de confiança são uma faixa de valores que provavelmente contêm o parâmetro da população, com um nível de confiança desejado.

Como a estatística é um resumo das informações sobre um parâmetro obtido a partir da amostra, o valor de uma estatística depende da amostra particular que foi extraída da população. Os seus valores mudam aleatoriamente a partir de uma amostra aleatória para a seguinte, por conseguinte, uma estatística é uma quantidade aleatória (variável). A distribuição de probabilidade desta variável aleatória é chamada distribuição amostral. A distribuição amostral de uma amostra estatística, é importante porque nos permite tirar conclusões sobre o parâmetro da população correspondente, com base em uma amostra aleatória (Minitab, 2017).

Por exemplo, quando se extrai uma amostra aleatória de uma população distribuída normalmente, a média da amostra é uma estatística. O valor da média da amostra com base na amostra em questão, é uma estimativa da média da população. Este valor estimado irá mudar aleatoriamente se uma amostra diferente for extraída da mesma população normal. A distribuição de probabilidade que descreve essas mudanças é a distribuição amostral da média da amostra. A distribuição amostral de uma estatística, especifica todos os possíveis valores de uma estatística e a frequência com que algum intervalo de valores da estatística ocorre. No caso em que a população de origem for normal, a distribuição de amostragem da média da amostra também é normal (Minitab, 2017).

Cada distribuição é inteiramente definida por diversos parâmetros específicos, normalmente entre um e três. A Tabela 10 fornece exemplos dos parâmetros necessários para três distribuições. Os valores dos parâmetros determinam o local e a forma da curva da distribuição, e cada combinação exclusiva de valores de parâmetros determinam uma curva de distribuição exclusiva. Uma distribuição de amostragem é a distribuição de probabilidade de uma determinada estatística, como a média.

Tabela 10 – Parâmetros necessários para definir distribuições amostrais.

Distribuição	Parâmetro 1	Parâmetro 2	Parâmetro 3
Normal	Média	Desvio padrão	-
<i>Weibull</i> 2 parâmetros	Forma	Escala	-
<i>Weibull</i> 3 parâmetros	Forma	Escala	Localização

Fonte: Adaptado de (Minitab, 2017)

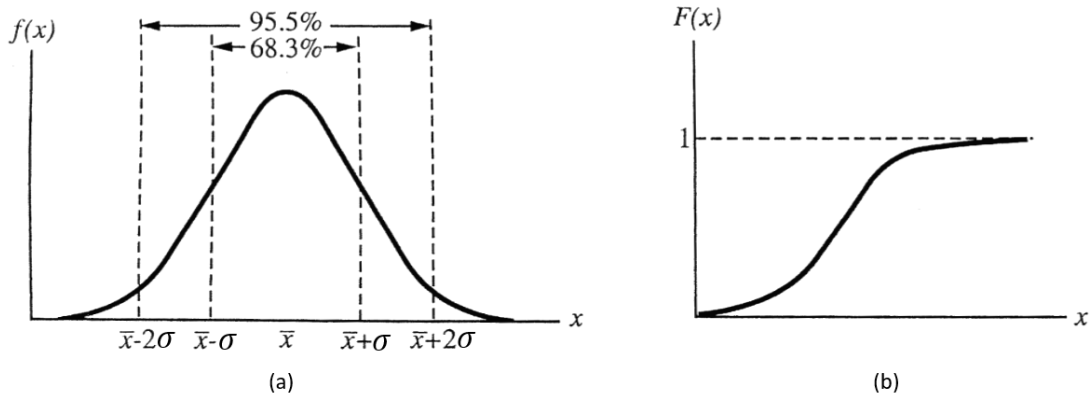
Se as variações de uma variável x são simétricas com relação a média, a função densidade de probabilidade (FDP), $f(x)$, é representada pela distribuição normal ou de Gauss dada pela Equação 37.

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\bar{x}}{\sigma}\right)^2} \quad (37)$$

A distribuição normal é descrita em termos da média \bar{x} e do desvio padrão σ , tendo uma curva em forma de sino, conforme pode ser visto na Figura 28. Conforme pode ser visto na Figura 28, existem faixas de probabilidade padronizadas, as quais são medidas em números de

desvios padrões, sendo normalmente utilizado 1σ , 2σ , 3σ e 4σ , os quais representam 68.26%, 95.44%, 99.73% e 99.994%, respectivamente.

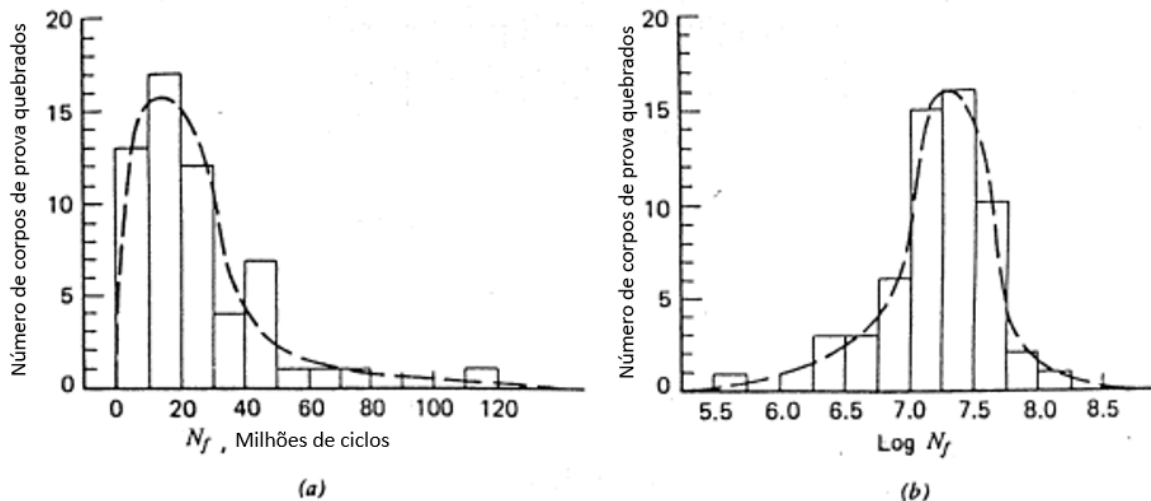
Figura 28 – Gráficos de distribuição normal. (a) Função densidade de probabilidade e (b) função de distribuição acumulada.



Fonte: (STEPHENS, 2000)

A Equação 37 pode ser expressa na forma logarítmica usando $x = \log(N)$, sendo que esta distribuição é chamada distribuição log-normal. Na Figura 29, é apresentado um exemplo para este tipo de distribuição, apresentando um histograma da distribuição da vida em fadiga para 57 corpos de prova de liga de alumínio 7075-T6 testados para 207 MPa.

Figura 29 - Histograma da distribuição da vida em fadiga para 57 corpos de prova de liga de alumínio 7075-T6 testados para 207 MPa.



Fonte: (STEPHENS, 2000)

Na Figura 29(a), a qual é baseada em ciclos até a falha, nota-se que a distribuição normal ou Gaussiana não representa adequadamente os dados. No entanto, como pode ser visto na Figura 29(b), a qual é baseada no logaritmo da vida até a falha, a mesma aproxima

razoavelmente a distribuição normal, mas conforme dito anteriormente, esta distribuição é chamada de log-normal.

Outra distribuição de probabilidades importante para estudos de fadiga, é a distribuição de *Weibull*, a qual é frequentemente usada quando a distribuição normal não é válida. Tanto a distribuição de *Weibull* de dois parâmetros ou de três parâmetros podem ser usadas em projeto de fadiga e testes, mas a função de dois parâmetros é mais frequentemente usada segundo (STEPHENS, 2000). Ela assume que a vida mínima N_{f0} da população é zero, enquanto que a função de três parâmetros define a vida finita mínima diferente de zero.

O modelo de *Weibull* de três parâmetros é definido pela Equação 38.

$$F(N) = 1 - e^{-\left(\frac{N - N_{f0}}{\theta - N_{f0}}\right)^b} \quad (38)$$

onde:

$F(N)$ = fração de fraturas em ciclos;

N_{f0} = ciclos mínimos até a falha;

θ = vida característica (ciclos quando 63.2% falharam);

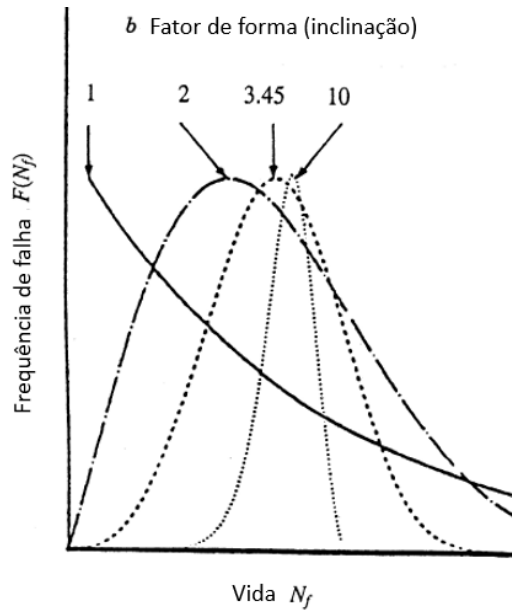
b = parâmetro de forma ou inclinação de *Weibull*.

Os termos N_{f0} , θ e b são os três parâmetros de *Weibull*. Para o modelo de *Weibull* com dois parâmetros $N_{f0} = 0$, logo a Equação 38 é reduzida à Equação 39.

$$F(N_f) = 1 - e^{-\left(\frac{N_f}{\theta}\right)^b} \quad (39)$$

Na Figura 30 são apresentadas distribuições de *Weibull* com dois parâmetros para diferentes valores do coeficiente de forma b .

Figura 30- Distribuição de *Weibull* com dois parâmetros para diferentes coeficientes de forma b .



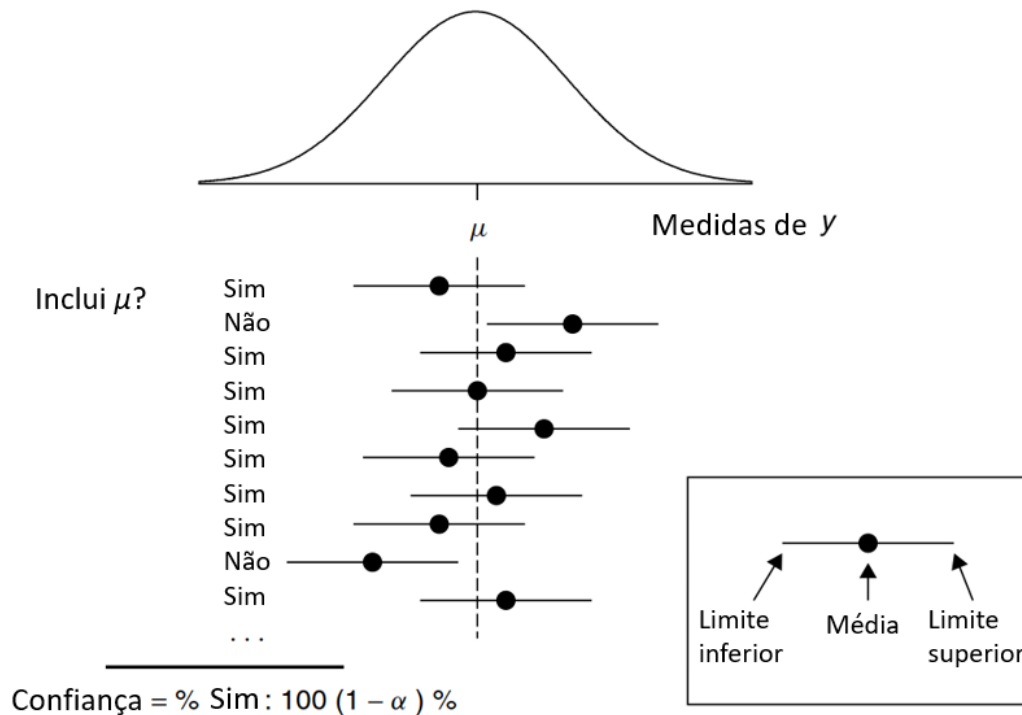
Fonte: Adaptado de (STEPHENS, 2000)

2.4.4 Intervalos de confiança

Um intervalo de confiança é uma amplitude de valores, derivados de estatísticas de amostras, que têm a probabilidade de conter o valor de um parâmetro populacional desconhecido. Devido à sua natureza aleatória, é improvável que duas amostras de uma determinada população irão fornecer intervalos de confiança idênticos. No entanto, repetindo-se a amostra várias vezes, uma determinada porcentagem dos intervalos de confiança resultantes conterá o parâmetro populacional desconhecido, no caso a média populacional μ , conforme Figura 31 (Minitab, 2017).

Na Figura 31, a linha vertical tracejada representa o valor fixo da média desconhecida da população, μ . Nota-se que alguns intervalos de confiança contêm o valor da média da população e outros não contêm esse valor. Por exemplo, um intervalo de confiança de 95% indica que 19 em 20 amostras (95%, $1 - \alpha$, denominado de nível de confiança, onde α é a margem de erro) da mesma população produzem intervalos de confiança contendo o parâmetro da população desconhecido. Dessa forma o intervalo de confiança é usado para avaliar a estimativa do parâmetro populacional. Por exemplo, um fabricante quer saber se o comprimento médio dos lápis que eles produzem é diferente do comprimento objetivo. O fabricante usa uma amostra aleatória de lápis e determina que o comprimento médio da amostra é 52 milímetros e o intervalo de confiança de 95% é (50, 54). Portanto, pode-se ter 95% de confiança de que o comprimento médio de todos os lápis está entre 50 e 54 milímetros.

Figura 31 – Intervalos de confiança para a média de uma população com distribuição normal.



Fonte: Adaptado de (MASON, GUNST e HESS, 2003)

O intervalo de confiança é determinado calculando-se uma estimativa de ponto e, depois, determinando sua margem de erro. Na Tabela 11 são apresentados os intervalos de confiança para médias de uma distribuição de probabilidade normal quando o desvio padrão σ é conhecido e quando não é conhecido, ambas para os casos de intervalos de dois lados, um lado superior e um lado inferior.

Tabela 11 – Intervalos de confiança para médias de distribuições de probabilidade.

σ conhecido	σ desconhecido
Dois lados: $\bar{y} - z_{\alpha/2}\sigma_{\bar{y}} < \mu < \bar{y} + z_{\alpha/2}\sigma_{\bar{y}}$	$\bar{y} - t_{\alpha/2}s_{\bar{y}} < \mu < \bar{y} + t_{\alpha/2}s_{\bar{y}}$
Um lado superior: $\mu < \bar{y} + z_{\alpha}\sigma_{\bar{y}}$	$\mu < \bar{y} + t_{\alpha}s_{\bar{y}}$
Um lado inferior: $\bar{y} - z_{\alpha}\sigma_{\bar{y}} < \mu$	$\bar{y} - t_{\alpha}s_{\bar{y}} < \mu$

Fonte: Adaptado de (MASON, GUNST e HESS, 2003)

Na Tabela 11, $\sigma_{\bar{y}} = \sigma/n^{1/2}$, $s_{\bar{y}} = s/n^{1/2}$, os quais representam o erro padrão da média \bar{y} , z é o valor crítico da distribuição normal, t é o valor crítico da distribuição t , μ é a média da população, a qual não se conhece e \bar{y} é a média da amostra, usada como estimativa da média populacional desconhecida. Nas equações do erro padrão, n é número de amostras, σ é o desvio padrão da população e s é o desvio padrão da amostra. Conforme pode ser visto na Tabela 11, quando o desvio padrão populacional σ não é conhecido, utiliza-se o desvio padrão da amostra

s, bem como ao invés de usar a distribuição normal (valor crítico de Z), utiliza-se a distribuição t (valor crítico de t).

Quando se utiliza estatística para estimar um valor, é importante lembrar-se que não importa quão bem seu estudo foi projetado, sua estimativa está sujeita a erros de amostragem aleatórios. A margem de erro quantifica esse erro e indica a precisão da sua estimativa.

O modo mais fácil de compreender a margem de erro, é entender como a margem de erro está relacionada aos resultados de uma pesquisa, como por exemplo, uma pesquisa política. Neste exemplo, uma pesquisa pode relatar que o índice de aprovação de um candidato é 55% com uma margem de erro de 5%. Isso significa que o real índice de aprovação é de +/- 5%, e está em algum ponto entre 50% e 60%.

Para um intervalo de confiança de dois lados, a margem de erro é a distância da estatística estimada para cada valor de intervalo de confiança. Quando um intervalo de confiança é simétrico, a margem de erro é metade da largura do intervalo de confiança. Quanto maior a margem de erro, maior é o intervalo, e menos certeza tem-se sobre o valor da estimativa do ponto.

O conceito de intervalo de confiança é importante para o presente trabalho, pois na estimativa de parâmetros, o mesmo tem grande importância, sendo que para dados de fadiga, a norma ASTM E 739 (2015) apresenta o procedimento para obtenção dos intervalos de confiança para os dados obtidos.

2.4.5 Estimativa de parâmetros de modelos

O método dos mínimos quadrados é um dos procedimentos de análise mais utilizado para estimar parâmetros das curvas de fadiga de materiais. A análise de mínimos quadrados requer que algumas premissas sejam atendidas, conforme apresentado abaixo:

1. O ensaio deve ser randomizado;
2. Os dados ou os dados transformados devem ser homoscedásticos, que no caso de dados de fadiga, implica que a variância da vida em fadiga é assumida como constante para toda a faixa de tensão;
3. A distribuição da vida em fadiga para um dado nível de tensão segue uma distribuição normal. Esta premissa é necessária somente quando for necessária a avaliação do intervalo de confiança das estimativas. No entanto, o método *bootstrap* pode ser usado para avaliar o intervalo de confiança sem a premissa da normalidade (EFRON e TIBSHIRANI, 1986).

Com os dados ensaiados, a norma ASTM E 739 (2015) assume que a curva $S-N$ tem uma distribuição normal e que a variância da vida (logarítmica) seja constante em toda a faixa de teste (dados homoscedásticos). Empregando regressão linear e o método dos mínimos quadrados, estima-se os parâmetros da curva $S-N$, podendo-se verificar a qualidade de ajuste do modelo obtido pelo coeficiente de correlação. Em um gráfico logarítmico, com a amplitude de tensão versus o número de ciclos até a falha, a curva $S-N$ é representada como uma reta, sendo a Equação 40 a equação dos mínimos quadrados (LEE, 2005).

$$\bar{Y} = \hat{A} + \hat{B}\bar{X} \quad (40)$$

onde, X é a tensão logarítmica ($\log S$), Y é o número de ciclos logarítmico ($\log N$), sendo que o símbolo $\hat{}$ representa estimativa (estimador) e o símbolo $\bar{}$ representa média.

A estimativa dos valores de \hat{A} e \hat{B} é obtida pela minimização da soma dos quadrados dos desvios dos valores observados em Y , a partir dos valores previstos. As equações para estimativa dos valores de \hat{A} e \hat{B} são apresentadas nas Equações 41 e 42, onde \bar{X} e \bar{Y} são as médias dos valores de X e Y ($\bar{X} = \sum X_i/n_s$ e $\bar{Y} = \sum Y_i/n_s$).

$$\hat{B} = \frac{\sum_{i=1}^{n_s} (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sum_{i=1}^{n_s} (X_i - \bar{X})^2} \quad (41)$$

$$\hat{A} = \bar{Y} - \hat{B}\bar{X} \quad (42)$$

A medida do desvio sobre Y_i em X_i , isto é, o resíduo médio quadrado, é assumido como sendo constante dentro da faixa de X_i de interesse e é descrita pela Equação 43, onde s é o erro padrão da amostra de Y_i estimada em X_i .

$$s^2 = \frac{1}{n_s - 2} \sum_{i=1}^{n_s} [Y_i - (\hat{A} + \hat{B}X_i)]^2 \quad (43)$$

Rearranjando a Equação 22, e fazendo o logaritmo em ambos os lados, obtém-se a Equação 44.

$$\log(2N_f) = -\frac{1}{b}\log(S'_f) + \frac{1}{b}\log(S_a) \quad (44)$$

Na Equação 44, o \log_{10} é usado, sendo que por comparação com a Equação 42 dos mínimos quadrados, é possível determinar que $X = \log(S_a)$, sendo a variável independente e $Y = \log(2N_f)$, que é a variável dependente.

Similarmente, os coeficiente da equação de mínimos quadrados tomam a forma de $\hat{A} = (-1/b) \log(S'_f)$ e $\hat{B} = 1/b$. Em resumo, o expoente b pode ser relacionado com a constante de regressão linear \hat{B} pela Equação 45.

$$b = \frac{1}{\hat{B}} \quad (45)$$

O coeficiente constante de resistência à fadiga pode ser calculado pela Equação 46, pois nesse caso, o \log_{10} é usado.

$$S'_f = 10^{(-\hat{A} b)} \quad (46)$$

2.5 Abordagens para análise de fadiga em juntas soldadas conforme normas e recomendações

Nos últimos anos muitas pesquisas têm sido desenvolvidas, sendo que diversas abordagens para a análise de estruturas soldadas foram propostas. Cada abordagem apresenta suas vantagens e desvantagens, sendo que ainda não há um consenso quanto ao melhor método, pois é um tema bastante complexo e que possui vários fatores que influenciam, dificultando o estabelecimento de uma metodologia padrão para qualquer tipo de junta soldada e de carregamento, entre outros fatores que influenciam nesse tipo de análise. SILVEIRA, MEZZOMO e GOEDEL (2017) apresentam estudos relacionados com abordagens que levam em conta a tensão estrutural, metodologias de modelagem de cordões de solda, apresentando estudos comparativos entre diversas metodologias, as quais serão apresentadas com maiores detalhes nas seções subsequentes.

Até o momento, o foco principal esteve nos conceitos fundamentais de fadiga e de estatística, sendo que a partir deste ponto, o foco principal será voltado para conceitos, metodologias e abordagens utilizadas no projeto de estruturas soldadas. O projeto de uma junta soldada quanto à fadiga é bastante complexo, sendo que a análise da vida em fadiga de uma junta soldada pode-se tornar ainda mais complexa quando se insere a mesma no contexto da estrutura como um todo. ATZORI, LAZZARIN *et al.* (2009) citam as principais razões:

- Dificuldade na escolha adequada de um histórico representativo das tensões;
- Grande quantidade de cordões de solda na estrutura e a dificuldade em determinar qual deve ser ponto de atenção;

- Além da presença de tensões residuais locais devido à solda, existem tensões residuais globais resultantes do próprio processo de montagem que dificultam os cálculos para obtenção da tensão total na região de interesse;
- Dificuldade em controlar a geometria do cordão de solda (tamanho, forma e raio de concordância) mesmo em processos muito bem controlados;
- Efeitos secundários devido a imperfeições de fabricação dos componentes;
- Dificuldade em definir um modelo idealizado da geometria da solda de maneira que seja suficientemente precisa para as propostas de análise, mas suficientemente simples para uso industrial.

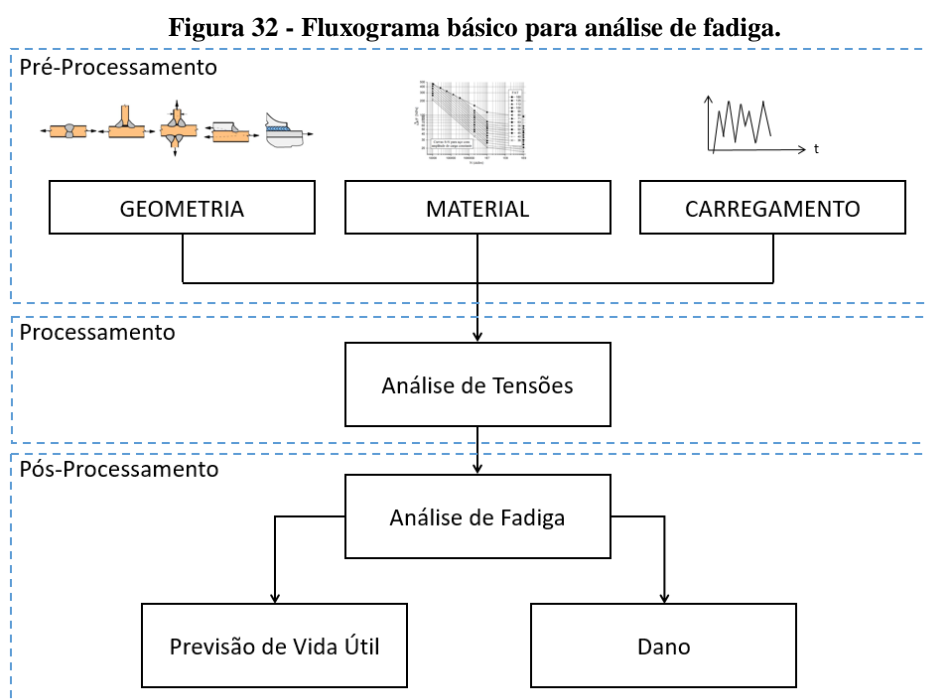
Dada a complexidade envolvida na análise de vida em fadiga de estruturas soldadas, esse assunto vem sendo abordado por diversos autores como HOBACHER (2009), NIEMI (1995), NIEMI, FRICKE e MADDOX (2006), DONG (2001), POUTIAINEN e MARQUIS (2006), RADAJ, SONSINO e FRICKE (2006) e DOWLING (2012). Diversas normas listadas na Tabela 12 são desenvolvidas e constantemente atualizadas com o propósito de contrabalançar a minimização de riscos no projeto de um elemento estrutural soldado com a minimização de custos exigida pelo ambiente industrial altamente competitivo (CASAVOLA e PAPPALETTERE, 2009).

Tabela 12 – Principais normas internacionais para avaliação de vida em fadiga em estruturas soldadas.

Origem / Abrangência	Norma /Entidade	Aplicação
Internacional	International Institute for Welding – IIW	Geral
Europa	Eurocode 3 (Estruturas em aço)	
	European Convention for Constructional Steelwork - ECCS	
	Bureau Veritas – Regras e regulamentos para construção e classificação de plataformas offshore	Estruturas Offshore
Alemanha	Germanischer Lloyd – Regras de construção e inspeção de instalações offshore	
Itália	Italian Naval Registry – RINA	
Inglaterra	British Standards Institute – BS 6235:1982	
América	American Welding Society – AWS D1.5-2010	
Inglaterra	British Standards Institute – BS 5400:1980	Pontes de aço
	British Standards Institute – BS 5500:1982	
Alemanha	AD Merkblatt – S1 Manufatura e testes em vasos de pressão	Vasos de Pressão
América	ASME VIII Div 2 - Vasos de pressão. Regras alternativas	
	American Institute of Steel Construction - AISC	Edifícios
Alemanha	Deutsches Institut für Normung - DIN 15018	Aparelhos de Elevação e Movimentação
América	American Welding Society – AWS D14.1-2005	

Fonte: Adaptador de (CASAVOLA e PAPPALETTERE, 2009) e (BRANCO, FERNANDES e CASTRO, 1999).

Uma característica comum a todas as metodologias já desenvolvidas é a estrutura dos dados de entrada necessários na etapa de pré-processamento, sendo eles: condições geométricas, tipo de carregamento e propriedade do material (ALVES FILHO, 2013). Qualquer uma das abordagens para análise de fadiga que serão apresentadas com maiores detalhes a seguir necessitam desses dados de entrada para se determinar a vida em fadiga de um componente ou estrutura, sendo que as três áreas são fontes de incertezas na análise. Um esquema referente as etapas a serem executadas em análise de fadiga é apresentado na Figura 32.



Fonte: do autor

O projeto contra fadiga em estruturas soldadas é dividido em duas abordagens diferentes para predição de vida em fadiga. De um lado, têm-se as abordagens de projeto baseadas em tensão nominal e tensão estrutural com uma série de curvas $S-N$, classificadas pelo tipo de junta e o tipo de carregamento, os quais têm melhor aceitação pela maioria das indústrias e recomendada por várias normas nacionais e internacionais. De outro lado, tem-se a abordagem de tensão local.

Na abordagem de tensões nominais com determinada geometria ou fator de concentração de tensão, é necessário se determinar uma curva $S-N$ para calcular o dano de fadiga para cada geometria de junta soldada a ser estudada. Segundo DONG (2001), dois assuntos críticos permanecem sem solução nesta abordagem. Primeiramente, tem-se que a

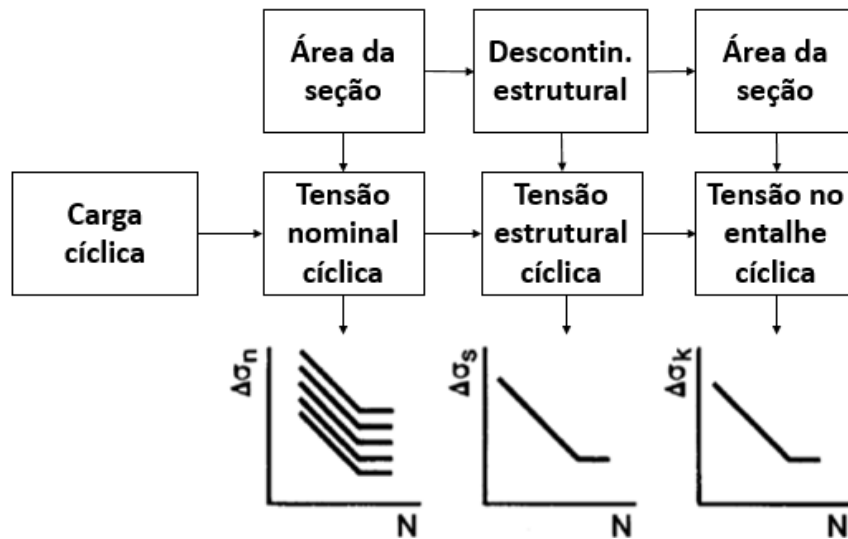
tensão nominal e fatores de concentração de tensão geométricos não podem ser prontamente calculados através do método dos elementos finitos devido à extrema dependência do tamanho do elemento nas descontinuidades da solda e não se conhece bem a geometria real do cordão de solda. Em segundo lugar, a seleção apropriada da curva $S-N$ para cálculo do dano pode ser muito subjetiva, uma vez que as classificações de soldas são baseadas não somente na geometria da junta, mas também no modo de carregamento dominante.

Muitos esforços estão concentrados em mapear esses dois assuntos, porém a maioria está baseada em desenvolver procedimentos para extrapolar as tensões atuantes no pé da solda, determinando uma tensão efetiva estrutural e correlacioná-la com as curvas $S-N$ disponíveis. No entanto, os procedimentos de extrapolação disponíveis até o momento ainda não têm consistência para aplicações gerais (NIEMI, 1995).

Segundo FRICKE (2003), existem diferentes abordagens para análise de fadiga em estruturas soldadas, as quais podem ser distinguidas por parâmetros usados para descrição do número de ciclos N e a resistência à fadiga. A Figura 33 mostra os diferentes parâmetros em conjunto com os diagramas característicos. Em geral, as abordagens podem ser subdivididas nas seguintes categorias:

- **Abordagem da tensão nominal**, usando a amplitude da tensão nominal $\Delta\sigma_n$ determinada pela carga interna ou externa e pela propriedade da seção transversal adequada.
- **Abordagem da tensão estrutural (*hot spot stress*)**, usando a amplitude da tensão estrutural $\Delta\sigma_s$ para a solda para considerar adicionalmente o efeito da descontinuidade estrutural, porém eliminando os efeitos não lineares da tensão no pé da solda.
- **Abordagem da tensão de entalhe e intensidade de entalhe**, usando a amplitude da tensão elástica no entalhe $\Delta\sigma_k$ ou um parâmetro equivalente tal como a intensidade de tensão para levar em conta o efeito do entalhe do pé ou da raiz da solda.
- **Abordagem da deformação no entalhe**, usando a amplitude da deformação elasto-plástica e/ou outros parâmetros para descrever o processo de dano no material.
- **Abordagem da propagação da trinca**, usando parâmetros especiais tal como integral J ou amplitude da intensidade de tensões ΔK para descrever o aumento do tamanho da trinca por ciclo, isto é, a taxa de crescimento da trinca da/dN .

Figura 33 – Esquema dos diferentes tipos de abordagem para descrição da resistência à fadiga.



Fonte: Adaptado de (FRICKE, 2003).

Com o intuito de manter a objetividade, não são discutidas com detalhes todas as abordagens. A intenção, nesse momento, é uma breve contextualização da abordagem pela tensão, tendo em vista sua popularização e levando em conta sua ligação com o tema do presente trabalho.

Na Seção 2.5.1 apenas a abordagem da tensão nominal será apresentada com maiores detalhes, devido a sua importância para a metodologia e desenvolvimento dos estudos da junta soldada do presente trabalho.

2.5.1 Abordagem da Tensão Nominal

Segundo RADAJ, SONSINO e FRICKE (2006), a abordagem da tensão nominal para avaliar a resistência à fadiga e a vida útil das juntas soldadas (geralmente até a fratura final), é realizada da mesma forma que a abordagem para membros não soldados, sendo que apenas alguns parâmetros de entrada na análise têm influência diferente, sendo que o principal é a curva $S-N$, a qual para tensão nominal é definida de acordo com a classe de material, entalhe ou classe de detalhe e qualidade de soldagem.

Este é o método mais “clássico” é largamente utilizado para avaliar juntas soldadas submetidas à fadiga. As classes de fadiga são dadas em diferentes normas e a tensão nominal pode ser calculada utilizando os conceitos de resistência dos materiais, se a geometria é simples, mas caso a geometria ou carregamento forem complexos, uma alternativa é a utilização do método dos elementos finitos (ERIKSSON, LIGNELL, *et al.*, 2003).

Para que o método da tensão nominal forneça resultados satisfatórios, é requerido que as seguintes premissas sejam atendidas:

- A tensão nominal deve ser bem definida e não pode ser complicada por muitos fatores macro geométricos, tal como a interseção de chapas ou reforços de chapa;
- Deve existir uma classe de fadiga (curva) que foi desenvolvida para tensão nominal para o tipo de junta e carregamento a ser avaliado;
- A estrutura não deve ter defeitos ou desalinhamentos que estão fora dos limites que foram considerados na classe de fadiga.

A tensão nominal (σ_{nom}) é definida como a tensão global na seção transversal da placa base, com uma exceção: as soldas de penetração parcial podem ser avaliadas com base nas tensões nominais (componentes normais e de cisalhamento) na seção da garganta da solda (denominada "tensão nominal de solda") (RADAJ, SONSINO e FRICKE, 2006). Segundo ERIKSSON, LIGNELL et al. (2003), os livros de análise de estruturas geralmente usam as tensões nominais, sendo que os concentradores de tensão causados pela solda ou reforços soldados não são incluídos. No entanto, incrementos de tensão devido à mudança macro geométrica e cargas aplicadas pontuais ou forças de reação devem ser consideradas, conforme pode ser visto na Figura 34, sendo que efeitos macro geométricos podem, por exemplo, consistir em um grande furo, uma mudança na seção transversal ou uma curva em uma viga, em outras palavras, características geométricas que muitas vezes têm um efeito considerável sobre a distribuição de tensão em toda a seção transversal.

Em casos simples, a tensão nominal pode ser calculada usando a teoria de viga linear elástica, de acordo com a Equação 47.

$$\sigma_{nom} = \frac{F}{A} + \frac{M}{I}z \quad (47)$$

onde:

F = esforço normal;

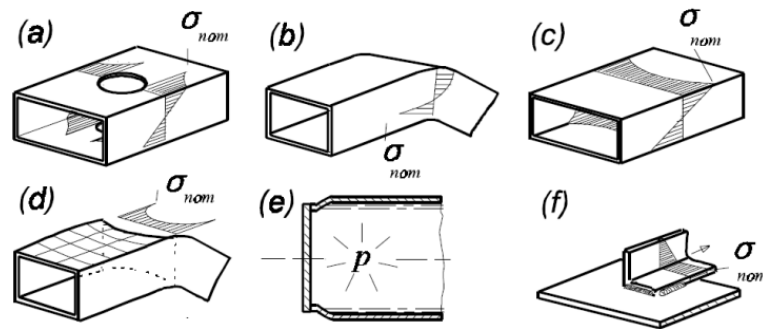
A = área da seção transversal;

M = momento fletor;

I = momento de inércia da seção transversal;

z = distância da linha neutra até a posição que se quer calcular a tensão.

Figura 34 - Exemplos de efeitos macro geométricos.

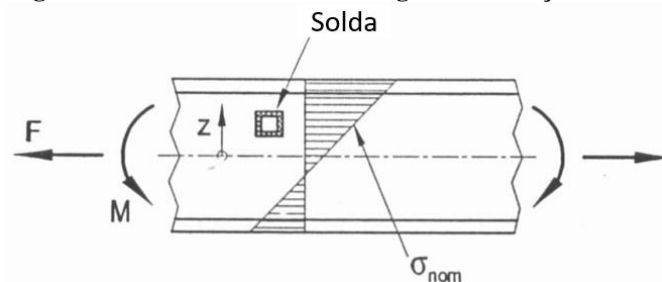


Fonte: (HOBACHER, 2009)

ERIKSSON, LIGNELL et al. (2003) apresentam um exemplo tal como mostrado na Figura 35, na qual apresenta-se a tensão nominal em uma viga com uma chapa soldada. A seção da viga está sujeita a um esforço axial e um momento fletor, sendo que de acordo com a Equação 47, nenhum efeito do concentrador de tensões devido ao reforço soldado foi incluído na tensão nominal. Para o caso simples apresentado, a tensão nominal foi determinada usando a teoria de vigas linear elástica, sendo que para casos mais complexos ou geometrias estaticamente indeterminadas, pode ser necessário a realização de uma análise de elementos finitos da estrutura objeto de estudo, com objetivo de determinar a magnitude da tensão nominal.

Quando análises de elementos finitos são utilizadas para avaliar a tensão nominal em juntas soldadas, alguns cuidados são necessários, pois, em modelos numéricos baseados no método de elementos finitos, as tensões são calculadas levando conta descontinuidades e concentradores de tensão, ou seja, levam em conta efeitos geométricos no cálculo das tensões, ou, em outras palavras, não há tensões nominais em elementos finitos. ERIKSSON, LIGNELL et al. (2003) apresentam técnicas de pós processamento que têm sido desenvolvidas para obter a tensão nominal através de elementos finitos usando extrapolação das tensões suficientemente longe das descontinuidades, a fim de eliminar as tensões não lineares próximas das descontinuidades, no caso, a solda. Na Figura 36 é apresentado um exemplo de tensão nominal extrapolada em uma junta soldada.

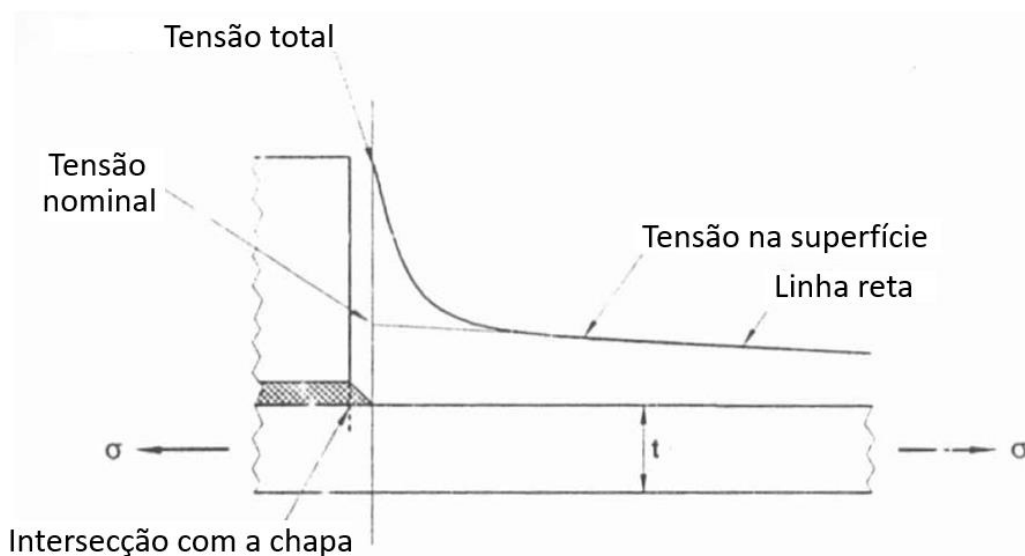
Figura 35 – Tensão nominal em viga com reforço soldado.



Fonte: Adaptado de (ERIKSSON, LIGNELL, et al., 2003)

No método da tensão nominal, conforme citando anteriormente, uma classe de fadiga deve ser selecionada cuidadosamente. A classe de fadiga é obtida através de tabelas de juntas soldadas, nas quais cada junta pode ser associada com um tipo de entalhe. Os efeitos dos concentradores de tensão que estão incluídos na classe do entalhe não devem ser considerados na tensão calculada. Se a junta a ser avaliada têm efeitos de concentrador de tensões que não estão presentes na classe escolhida, estes efeitos devem ser incluídos na tensão “nominal” calculada. O resultado é um tipo de “tensão nominal modificada” que é somente válido para a classe de fadiga escolhida e para a junta a ser avaliada.

Figura 36 - Tensão nominal extrapolada em uma junta soldada.



Fonte: Adaptado de (ERIKSSON, LIGNELL, *et al.*, 2003)

Segundo ERIKSSON, LIGNELL et al. (2003), nem sempre é óbvia a identificação de quais efeitos de concentração de tensões foram considerados em alguns casos de entalhes nas diferentes normas, especialmente sobre o grau de flexão localizada na junta. Infelizmente, há poucas informações sobre isso, o que significa que geralmente é necessário fazer uma avaliação individual. Geralmente, pode-se dizer que, em caso de dúvida, é melhor incluir os efeitos de concentradores de tensão na tensão nominal, já que os resultados serão a favor da segurança. Neste caso é bastante difícil obter a tensão nominal, e será mais apropriado mudar para abordagens de tensão estrutural (*hot spot*) para a avaliação da junta.

Curvas *S-N* para avaliações com o método da tensão nominal podem ser encontradas nas seguintes normas e recomendações de projeto:

- IIW (International Institute of Welding) – Fatigue design of welded joints and components (HOBACHER, 2009);

- Swedish Regulations for Steel Structures (BSK 99, 2003);
- Fatigue Design of Offshore Steel Structures (DNV-RP-C203, 2011);
- StBK-N2 (1981), a qual refere-se ao código construção e projeto de soldas Sueco, a qual foi substituída pela BSK 99 (2003);
- Fatigue of steel structures (BS 7608, 1993);
- Eurocode 3: Design for steel structures – Part 1-9: Fatigue (EN 1993-1-9, 2005).

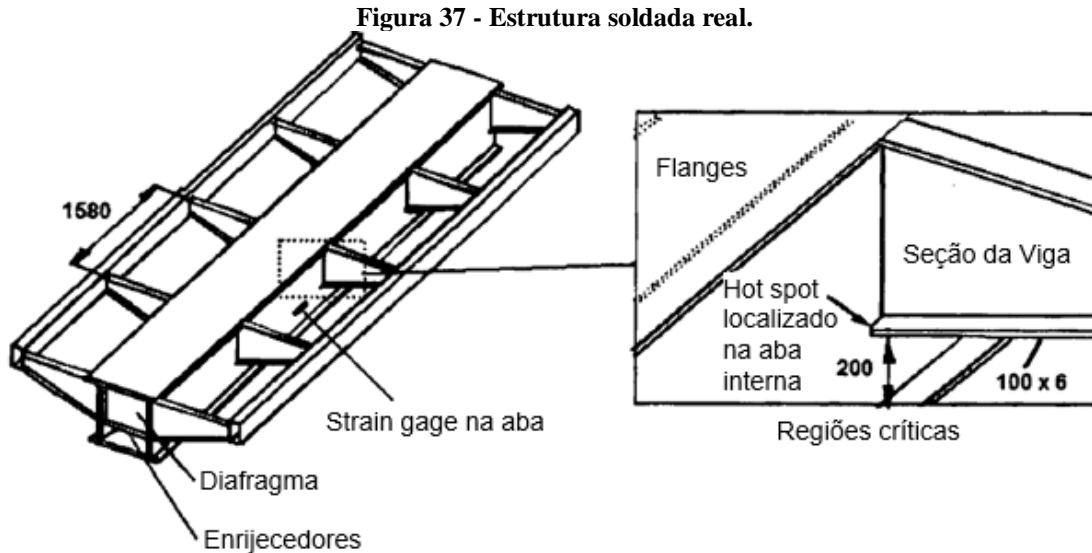
2.6 Modelamento em MEF de juntas soldadas para análise de tensões - Geometria

Segundo ROSA (2002), a análise de tensão em juntas soldadas pode ser realizada através de três métodos principais, sendo eles: métodos analíticos, experimentais e numéricos. Os métodos analíticos têm grande limitação quanto à geometria, carregamentos e restrições, sendo que estão disponíveis apenas para casos simples, motivo pelo qual são pouco utilizados, pois as estruturas soldadas reais, normalmente, são bastante complexas tal como pode ser visto na Figura 37. Nestes casos, a análise de tensões é muitas vezes impossível de se obter analiticamente. Os métodos experimentais são outra possibilidade para determinar as tensões, nos quais a análise é efetuada diretamente sobre o produto, onde normalmente o interesse é sobre os deslocamentos da estrutura, quando carregada, ou então sobre as tensões e deformações nos pontos críticos, sendo também muito utilizados para validar os resultados obtidos através de métodos analíticos e numéricos. Métodos numéricos desenvolveram-se, principalmente, devido a limitações dos métodos analíticos, e permitem a análise de qualquer geometria, sem limitações quanto aos carregamentos e restrições, sendo que os principais métodos numéricos utilizados são o de diferenças finitas, método dos elementos finitos (MEF) e elementos de contorno.

A tensão atuante no cordão de solda é uma das variáveis mais importantes para a análise de vida à fadiga. Para a maior parte dos casos, essa informação pode ser bastante complexa de se obter, sendo que sem o auxílio do MEF, esta seria uma tarefa extremamente árdua, demorada e suscetível a erros. AYGÜL (2012) comenta que o principal propósito de se utilizar o método de elementos finitos é de se obter de forma mais precisa os efeitos de um carregamento sobre determinada junta.

Segundo AYGÜL (2012), a necessidade de se modelar o cordão de solda está restrita aos casos em que a rigidez da seção soldada precisa ser levada em consideração, ou seja, quando a tensão total sofre influência significativa pelo seu componente de flexão ou quando se torna

difícil distinguir a não linearidade da tensão originada por uma descontinuidade do cordão de solda junto ao seu pé ou de concentrações de tensões derivadas de descontinuidades geométricas. Para esses casos, quando se torna necessária a modelagem do cordão de solda, diferentes técnicas são utilizadas. As principais técnicas são apresentadas nas seções subsequentes.

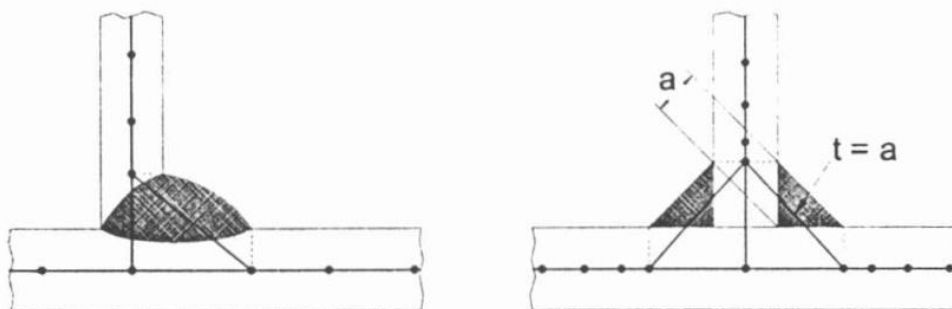


Fonte: Adaptado de (ESDEP, 2017)

2.6.1 Modelagem da solda utilizando elementos oblíquos de casca

A modelagem da solda utilizando elementos oblíquos em casca é recomendada por NIEMI (1995), sendo que essa técnica permite uma representação correta tanto da geometria como da rigidez, mas não deve ser utilizada na previsão de falhas nucleadas a partir da raiz da solda. A chapa secundária deve ser unida à principal através da interseção entre elas, e o tamanho do elemento inclinado de casca é definido conforme está na Figura 38, sendo que a espessura pode ser definida com o mesmo valor da profundidade de garganta “ a ” (AYGÜL, 2012).

Figura 38 - Modelagem da solda utilizando elementos Oblíquos em Casca

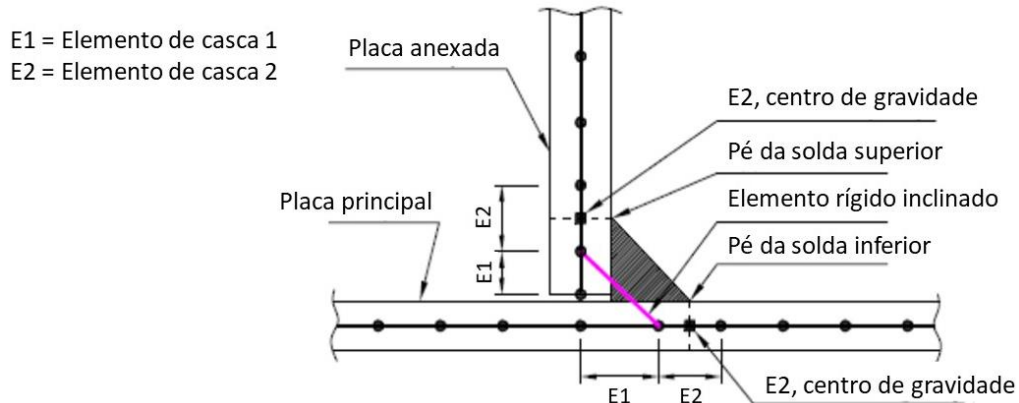


Fonte: (NIEMI, 1995) adaptador por (ERIKSSON, LIGNELL, *et al.*, 2003)

2.6.2 Modelagem da solda utilizando elementos rígidos

A modelagem da solda utilizando elementos rígidos foi sugerida por FAYARD et al. (1996). A proposta do desenvolvimento dessa técnica é a obtenção do valor da tensão hot spot no pé da solda através da leitura direta da tensão no centro de um elemento “E2” do modelo. Este método permite a representação da rigidez local da junta provocada pelo cordão através da modelagem de elementos rígidos de ligação entre as duas chapas, definidos por pares de nós distribuídos ao longo de todo o comprimento do cordão, conforme ilustrado na Figura 39. A dimensão dos elementos E1 e E2 deve ser cuidadosamente escolhida de forma a representar corretamente a rigidez local da junta e fornecer valores confiáveis de tensão (AYGÜL, 2012).

Figura 39 - Modelagem da solda utilizando uniões rígidas

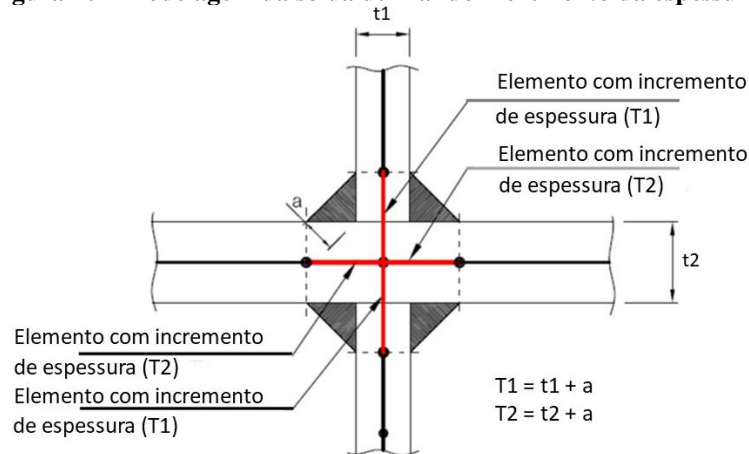


Fonte: Adaptado de (AYGÜL, 2012)

2.6.3 Modelagem da solda utilizando incremento da espessura

A modelagem da solda utilizando incremento da espessura sugerida por (NIEMI, 1995) consiste na utilização de um incremento de espessura do elemento em casca na região de intersecção da junta soldada. ERIKSSON, LIGNELL et al. (2003) sugere o esquema ilustrado na Figura 40.

Figura 40 - Modelagem da solda utilizando incremento da espessura.



Fonte: Adaptado de (ERIKSSON, LIGNELL, *et al.*, 2003)

2.6.4 Modelagem da solda utilizando elementos sólidos

A modelagem da solda utilizando elementos sólidos é comumente utilizada devido a simplicidade do trabalho de modelagem e acuracidade nos resultados, pois o cordão de solda pode ter sua rigidez corretamente representada a partir de modelos sólidos. No entanto, alguns procedimentos devem ser realizados, caso o cordão de solda for modelado como elemento sólido sobre uma chapa modelada em elementos de casca, pois há diferença no número de graus de liberdade dos nós (AYGÜL, 2012).

Quando a abordagem da tensão no entalhe efetivo é utilizada, modelos com elementos sólidos altamente refinados são utilizados, sendo que esta técnica de modelagem é muitas vezes proibitiva, devido ao custo computacional, pois os modelos de elementos finitos ficam muito grandes usando elementos sólidos. Muitas vezes, para contornar esse problema, técnicas de submodelagem são utilizadas, a fim de reduzir o tempo de processamento (AYGÜL, 2012).

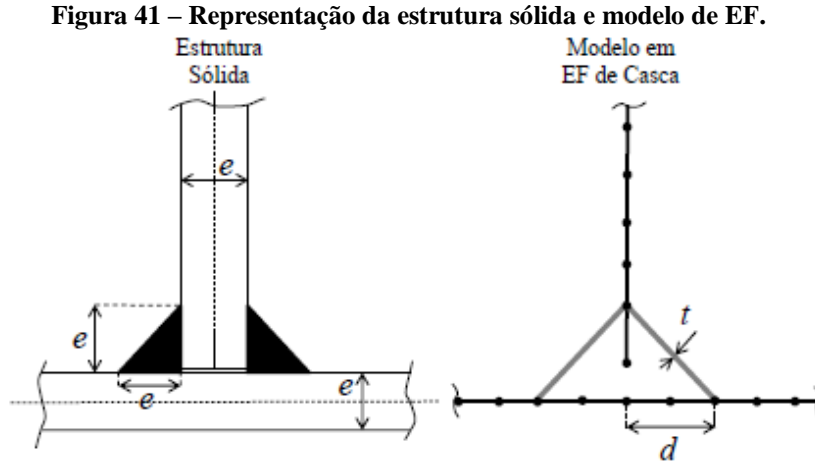
2.6.5 Modelagem da solda utilizando elementos oblíquos de casca utilizando parâmetros otimizados

Esta técnica consiste na utilização de parâmetros ótimos representativos do filete de solda, ao contrário do que é recomendado por NIEMI (1995) e ERIKSSON, LIGNELL et al. (2003), sendo os autores orientam o emprego dos parâmetros com base na seção transversal do filete ou então no tamanho da garganta da solda.

ECHER (2015) apresenta uma nova proposta para obtenção de parâmetros para modelagem numérica do filete de solda, usando um algoritmo de otimização para obter valores de t e d , conforme apresentados na Figura 41.

Para ECHER (2015), um dos principais problemas para modelamento de estruturas soldadas através de elementos de casca é a correta representação da rigidez da estrutura. Considerando esse problema, (ECHER, 2015) procurou obter os parâmetros ótimos para o modelo de casca, com objetivo de minimizar os erros na representação da rigidez e massa, sempre comparando com um modelo sólido que é a representação numérica mais próxima do detalhe estrutural real. Para avaliação da rigidez e da massa, ECHER (2015) comparou as duas primeiras frequências naturais do modelo sólido (referência) com os modelos de casca, uma vez que as frequências naturais dependem desses dois parâmetros do modelo.

Como principal resultado de seu trabalho, ECHER (2015) apresenta duas propostas de parâmetros otimizados para modelagem de juntas de filete, tal como apresentado na Figura 42 e Figura 43.



Fonte: (ECHER, 2015)

As Equações 49 e 51 correspondem aos valores dos parâmetros para modelagem conforme a Proposta I:

$$d = 0.78e + 6.86 \quad (48)$$

$$t = 0.07e^2 + 0.25e + 0.55 \quad (49)$$

A Equação 62 corresponde aos valores dos parâmetros para modelagem conforme a Proposta II, sendo que nessa proposta, os valores de d e t são iguais.

$$t = d = 1.34e \quad (50)$$

onde e é a espessura da chapa.

Figura 42 - Proposta I apresentada por (ECHER, 2015).

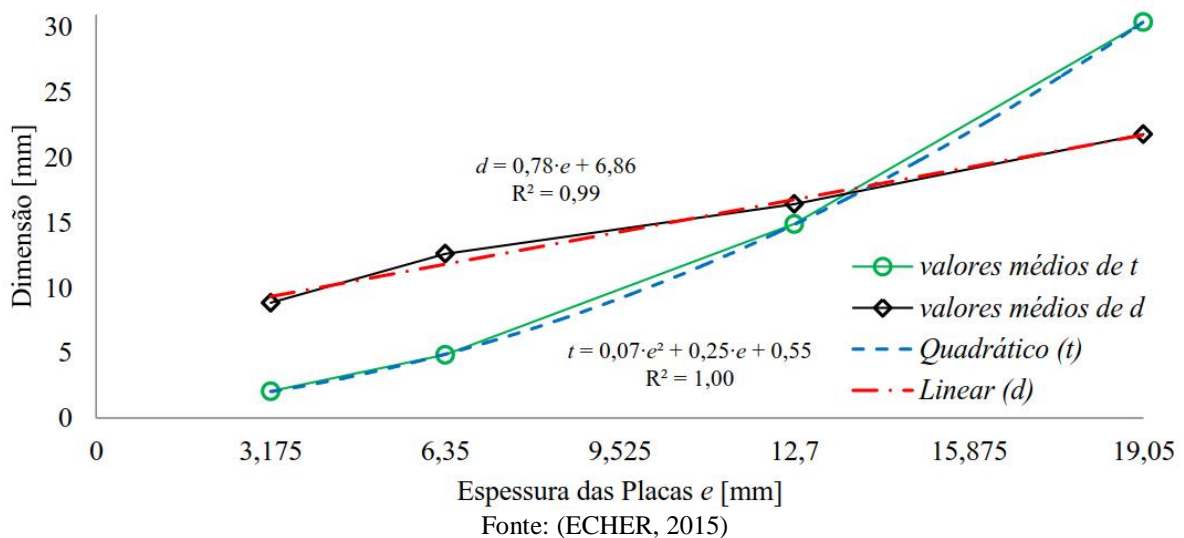
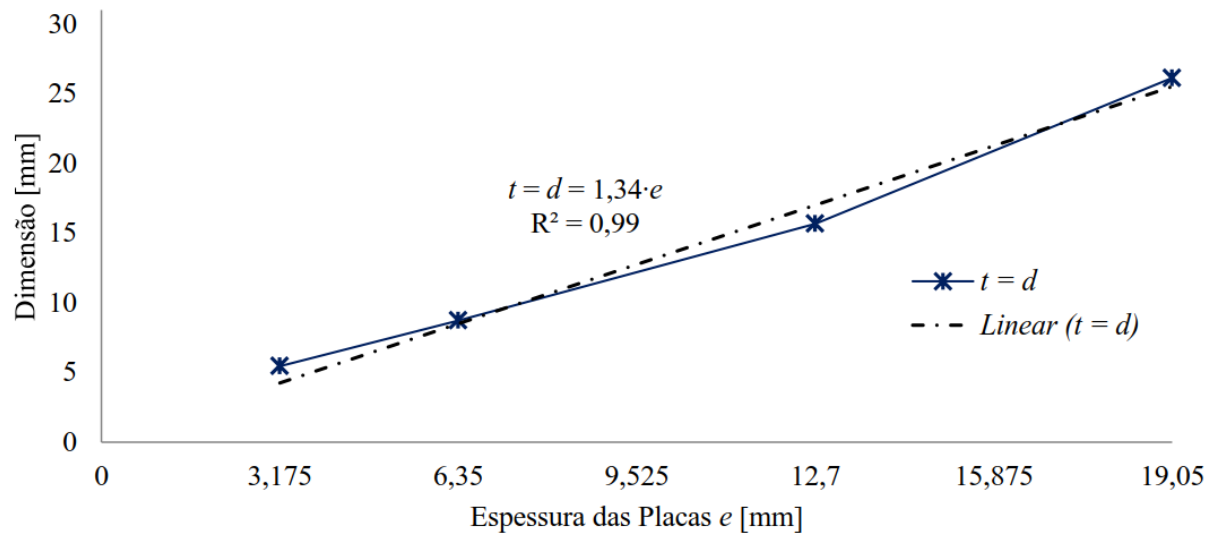


Figura 43 - Proposta II apresentada por (ECHER, 2015).



Fonte: (ECHER, 2015)

3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Nesse capítulo são apresentados os procedimentos metodológicos utilizados para o desenvolvimento do presente trabalho. Inicialmente, apresenta-se detalhadamente o algoritmo desenvolvido em MatLab (2018) para geração de curvas $S-N$, o qual foi utilizado para a realização dos estudos paramétricos dos principais parâmetros envolvidos em ensaios de fadiga, com base em dados de materiais disponíveis na literatura. Posteriormente, apresenta-se a metodologia proposta para geração de curvas $S-N$ com número de ensaios reduzidos associados a dados simulados estatisticamente, bem como o processo de validação do método proposto, que envolve a realização de ensaios de fadiga da junta de filete soldada tipo T e avaliação da vida útil da mesma quando submetida a carregamentos de amplitude variável, comparando o método proposto com a norma ABNT NBR 8800 (2008). Finalmente, são apresentados os procedimentos experimentais, descrevendo-se os materiais e métodos utilizados na caracterização dos materiais e nos ensaios de fadiga.

3.1 Simulações estatísticas de curvas $S-N$

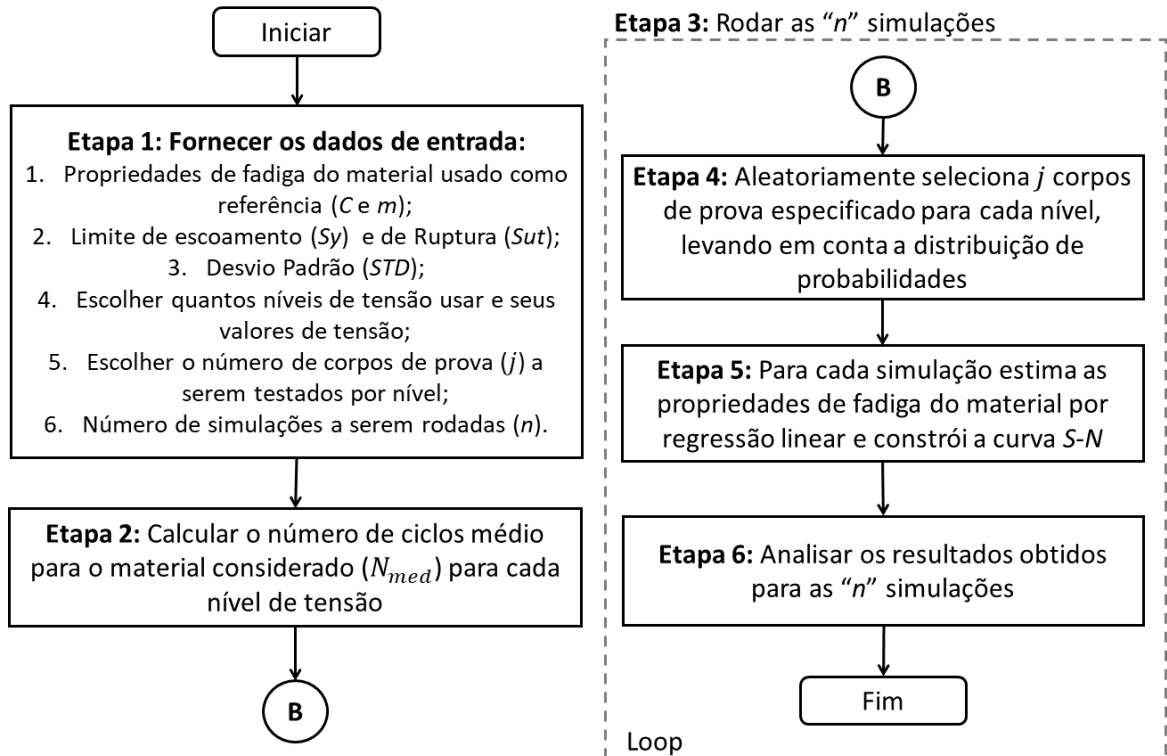
O principal objetivo deste trabalho é o desenvolvimento de um método para obtenção de curvas $S-N$ com número de corpos de prova reduzidos, bem como apresentar uma análise crítica sobre os diversos aspectos a serem levados em conta na previsão de vida útil de estruturas soldadas, buscando o equilíbrio nos dados de entrada (geometria, material e carregamento) em uma análise de fadiga, tal como apresentado na Figura 32. A geometria (método de modelagem do cordão de solda) e o método de obtenção da tensão no pé da solda, têm grande influência na previsão da vida útil, pois pequenas variações na amplitude da tensão geram grandes variações na vida estimada. Por esse motivo, muitas pesquisas têm sido realizadas com intuito de obter métodos mais precisos para calcular o “nível de tensão correto”, uma vez que a incerteza na vida pode ser muito alta. No entanto, a quantidade de esforço que é colocada no cálculo do “nível de tensão correto” deve ser mantida em proporção com as incertezas que existem no restante dos dados, tal como nas propriedades dos materiais e no carregamento (ERIKSSON, LIGNELL, *et al.*, 2003).

3.1.1 Algoritmo para simulação de curvas $S-N$ através de simulações de Monte Carlo

Um procedimento foi desenvolvido para simular curvas $S-N$ usando dados experimentais disponíveis através do método de Monte Carlo, sendo implementado em uma rotina usando o software MATLAB (2018) (ver Anexo 5). A simulação de Monte Carlo requer

que uma função de transferência, os parâmetros de entrada e o método de geração de números aleatórios sejam definidos, a simulação seja executada e os resultados devem ser interpretados. A Figura 44 ilustra um fluxograma para a execução das simulações de Monte Carlo, proposto neste trabalho.

Figura 44 - Fluxograma para execução das simulações estatísticas.



Fonte: do autor

Abaixo são apresentadas de forma detalhada cada etapa do fluxograma para execução das simulações estatísticas de curvas $S-N$.

Etapa 1: Fornecer os dados de entrada necessários de acordo com a Figura 44. O modelo matemático (função de transferência) usado para descrever a relação entre amplitude de tensão aplicada e vida até a falha, foi o modelo clássico de acordo com MADDOX (2014) conforme Equação 12, sendo C e m , as propriedades de fadiga do material.

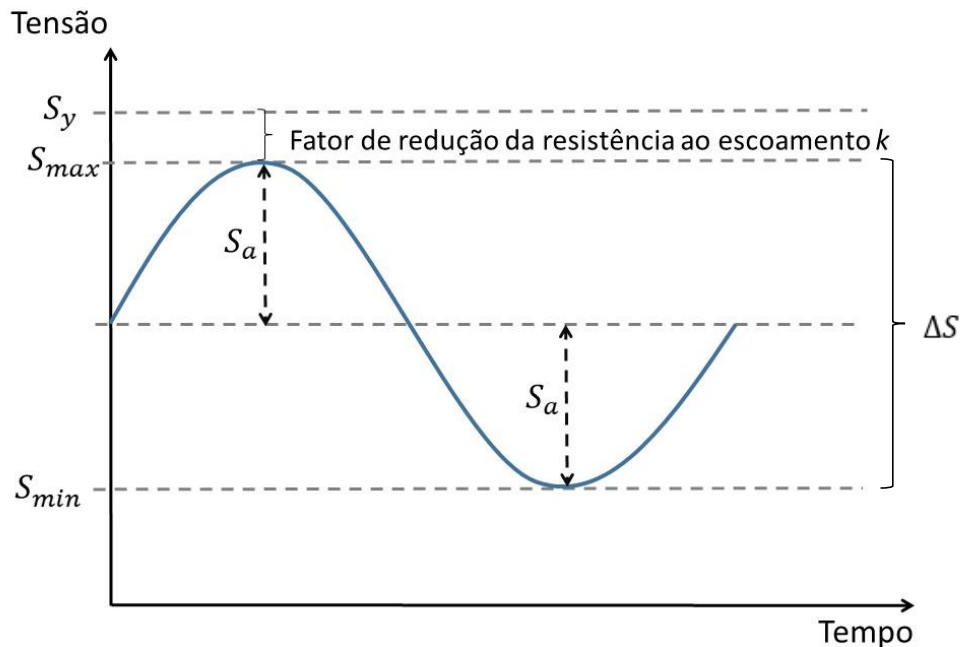
Também são necessários como dados de entrada, as propriedades mecânicas estáticas S_y e S_{ut} e a escolha da distribuição de probabilidade (neste caso, foi utilizada uma distribuição normal com média igual ao valor de vida obtido na Etapa 2 e um desvio padrão fixo igual a 0.17). Segundo ERIKSSON, LIGNELL et al. (2003) um desvio padrão para o log N para as amostras soldadas está compreendido entre 0.16 a 0.18 e segundo LOTSBERG (2016) é de aproximadamente 0.20. No presente trabalho assumiu-se que a variância da vida útil dentro do

intervalo testado é constante (dados homocedásticos). Outras distribuições de probabilidade podem ser usadas, bem como dados heteroscedásticos. Para considerar o desvio padrão heteroscedásticos, ou seja, não constante, é necessário apenas substituir a constante STD pelo modelo proposto por NELSON (1984), que fornece um desvio padrão diferente para cada nível de tensão.

O número de níveis de tensão, o número de amostras em cada nível e o número de simulações estatísticas a serem executadas, também devem ser fornecidos, os quais foram definidos conforme Tabela 13 e Tabela 15, para os estudos preliminares (Seção 3.1.2) e configurações de ensaio conforme normas (Seção 3.1.3), respectivamente. Para a definição do valor da tensão alternada no nível superior, foi utilizada a Equação 51, sendo a tensão mínima no mesmo nível, foi determinada usando a Equação 52. Para a definição do valor de tensões nas simulações no nível mais baixo de tensão, foi calculada uma tensão alternada para $N=2 \times 10^6$ ciclos usando a Equação 12.

As Equações 51 a 54 são semelhantes às equações disponíveis na literatura, sendo que nesse trabalho foram considerados a razão de tensão R e um fator de redução da tensão de escoamento k para definir os valores de tensão para cada nível. A Figura 45 exibe um ciclo de carga e a nomenclatura dos principais parâmetros utilizados nas equações.

Figura 45 - Nomenclatura dos parâmetros para definição de um ciclo de carga.



Fonte: do autor

De acordo com a Figura 45, o fator de redução da resistência ao escoamento do material k é utilizado para definir a tensão máxima do ciclo de carga S_{max} no nível superior, como visto na Equação 51. O valor do fator k é definido principalmente para garantir tensões elásticas no ensaio, assumindo valor igual ou menor que 1.

$$S_{max} = kS_y \quad (51)$$

A tensão mínima do ciclo de carregamento S_{min} no nível de tensão superior, considera a relação de tensão do ensaio R , como pode ser obtida pela Equação 52.

$$S_{min} = RS_{max} \quad (52)$$

Portanto, usando a Equação 53 que define a tensão alternada do ciclo de carga, e substituindo as Equações 51 e 52 na Equação 53, pode-se obter a tensão alternada admissível para o nível de tensão superior S_a^U (Figura 46) através da Equação 54 considerando S_y , R e k (neste caso, k foi considerado igual a 1.0).

$$S_a = \left| \frac{S_{max} - S_{min}}{2} \right| \quad (53)$$

$$S_a^U = \left| \frac{kS_y - kS_yR}{2} \right| = \left| \frac{kS_y(1 - R)}{2} \right| \quad (54)$$

A amplitude da tensão no nível inferior deve ser definida levando em conta, se as amostras são soldadas ou não. (LEE, 2005), bem como outras literaturas, apresentam métodos simplificados para obter o limite de fadiga para 10^6 ciclos para materiais sem solda, sendo que estes métodos podem servir como base inicial para decidir os valores a serem usados nos níveis de tensão inferiores. A definição do valor de tensão no nível inferior em corpos soldados torna-se mais complicada, podendo ser usado como um ponto de partida, as normas de projeto, tal como a ABNT NBR 8800, Eurocode 3, BS-5400, BS-7608 e IIW, entre outras.

Etapa 2: Isolando N na Equação 12, a vida média N_{med} para cada nível de tensão pode ser determinada de acordo com a Equação 55, sendo que neste caso foi utilizada a componente de tensão alternante do ciclo de fadiga ao invés da amplitude de tensão, bem como as propriedades de fadiga fornecidas na Etapa 1, detalhada anteriormente.

$$N = N_{med}(i) = \frac{C}{(S_a^i)^m} \quad (55)$$

onde i é o número do nível de tensão considerado.

Etapa 3: Com as Etapas 1 e 2 finalizadas, inicia-se o loop das “ n ” simulações, conforme definido na Etapa 1, sendo que neste trabalho foram realizadas 10000 simulações.

Etapa 4: Selecionar aleatoriamente os corpos de prova conforme a configuração definida anteriormente, ou seja, de acordo com o número de níveis de tensão e o número de amostras por nível, definidos como dados de entrada. Diversas configurações foram rodadas como mostrado nas Tabela 13 (Seção 3.1.2) e Tabela 15 (Seção 3.1.33). A Equação 56 foi usada para obter as amostras aleatórias em cada nível de tensão.

$$RN(j, 1) = STD \times randn(j, 1) + \log N_{med}(i) \quad (56)$$

onde j é o número de corpos de prova por nível, STD é o desvio padrão, $RN(i)$ é uma matriz que define as amostras aleatórias selecionadas para cada nível de tensão i contendo j corpos de prova por nível e $randn(j, 1)$ é a função do Matlab que gera j escalares aleatórios extraídos de uma distribuição normal padrão com média igual a zero e desvio padrão igual a 1 (um).

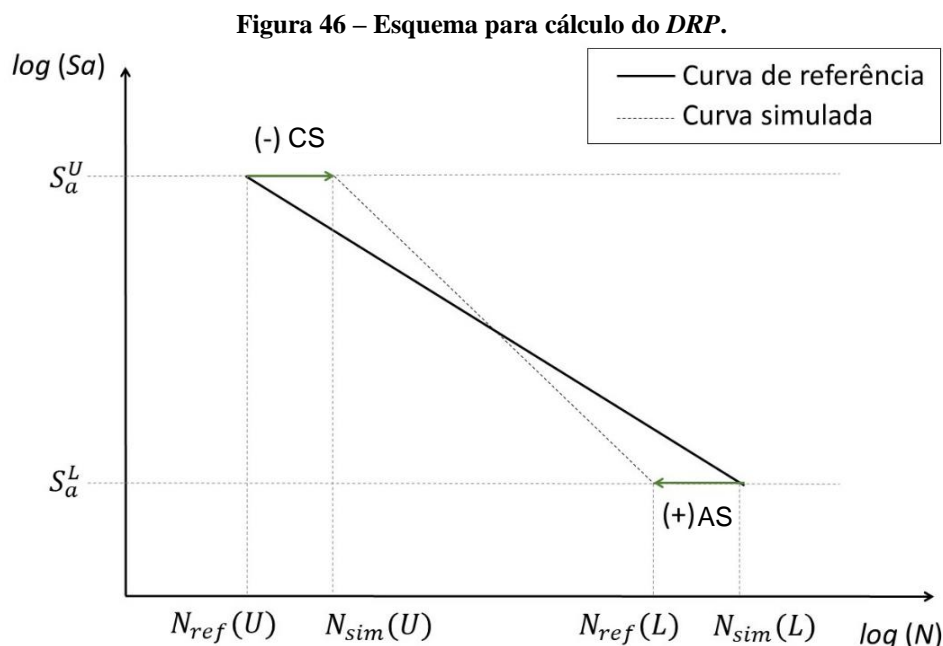
Etapa 5: A partir dos resultados em cada simulação, estimar as propriedades de fadiga do material usando todos os corpos de prova em todos os níveis de tensão, o que permite construir a curva $S-N$ para cada simulação. O método dos mínimos quadrados e a regressão linear foram utilizados para obter os parâmetros de fadiga do material em cada simulação.

Etapa 6: Realizar a análise dos resultados ao final de cada simulação, sendo os principais dados de saída em cada uma das simulações, o máximo (+) e mínimo (-) DRP (Diferença Relativa Percentual) para os níveis de tensão superior e inferior, bem como o envelope do DRP (definido como a máxima diferença relativa percentual, obtida para todas as curvas $S-N$ simuladas) para cada configuração de teste. Na Equação 57 é apresentado como o DRP foi avaliado para cada simulação em cada nível de tensão i .

$$DRP(i) (\%) = 100 \left(\frac{N_{ref}(i) - N_{sim}(i)}{N_{ref}(i)} \right) \quad (57)$$

onde, $N_{ref}(i)$ é obtido com a Equação 55 usando as propriedades do material de referência (Etapa 1) e o valor de tensão do nível i , e $N_{sim}(i)$ é a vida obtida com as propriedades do material C e m estimado por regressão linear de cada uma das n simulações realizadas na Etapa 5. A Figura 46 mostra um esquema para melhor entendimento dos cálculos da DRP nos níveis de tensão superior e inferior, nos quais se pode ver que o DRP positivo (+) corresponde ao lado

a favor da segurança (*AS*) e o *DRP* negativo (-) corresponde ao resultado contra a segurança (*CS*).



Dois estudos foram realizados com objetivos distintos utilizando o algoritmo proposto nesta seção, sendo que maiores detalhes são apresentados nas Seções 3.1.2 e 3.1.3.

3.1.2 Simulações estatísticas (Aplicação 1) – Estudo paramétrico de ensaios de fadiga

As simulações descritas nessa seção têm como objetivo avaliar a influência da variabilidade dos dados na estimativa das propriedades de fadiga do material, quantificando-se principalmente a diferença relativa percentual (*DRP*) da curva simulada em relação a curva de referência, quando diferentes configurações de testes e um número reduzido de amostras é considerado.

Os principais objetivos relacionados com os estudos dessa seção são:

- Verificar a influência do número de níveis de tensão utilizados nos ensaios, na estimativa das propriedades de fadiga do material, e consequentemente na previsão da vida útil e no cálculo do dano acumulado;
- Verificar se os erros nas previsões de fadiga são maiores, quando são ensaiados mais níveis de tensão com poucos corpos de prova (menor replicação de dados), ou se poucos níveis de tensão com mais corpos de prova por nível (maior replicação de dados).

Na Figura 47 são apresentados de forma esquemática algumas das configurações de testes a serem estudadas. Na Tabela 13 é apresentado um resumo das configurações de cada teste realizado, nos quais serão simuladas 10000 curvas *S-N* em cada configuração, através das

quais, será possível definir com base nos resultados obtidos, a configuração da metodologia que será proposta no presente trabalho, ou seja, pretende-se através desses estudos definir o número de corpos de prova a serem ensaiados e o número de níveis de tensão.

Figura 47 - Curvas $S-N$ estimadas com a) dois corpos de prova por nível em dois níveis de tensão, b) com dois corpos de prova por nível em três níveis de tensão e c) dois corpos de prova por nível em quatro níveis de tensão.

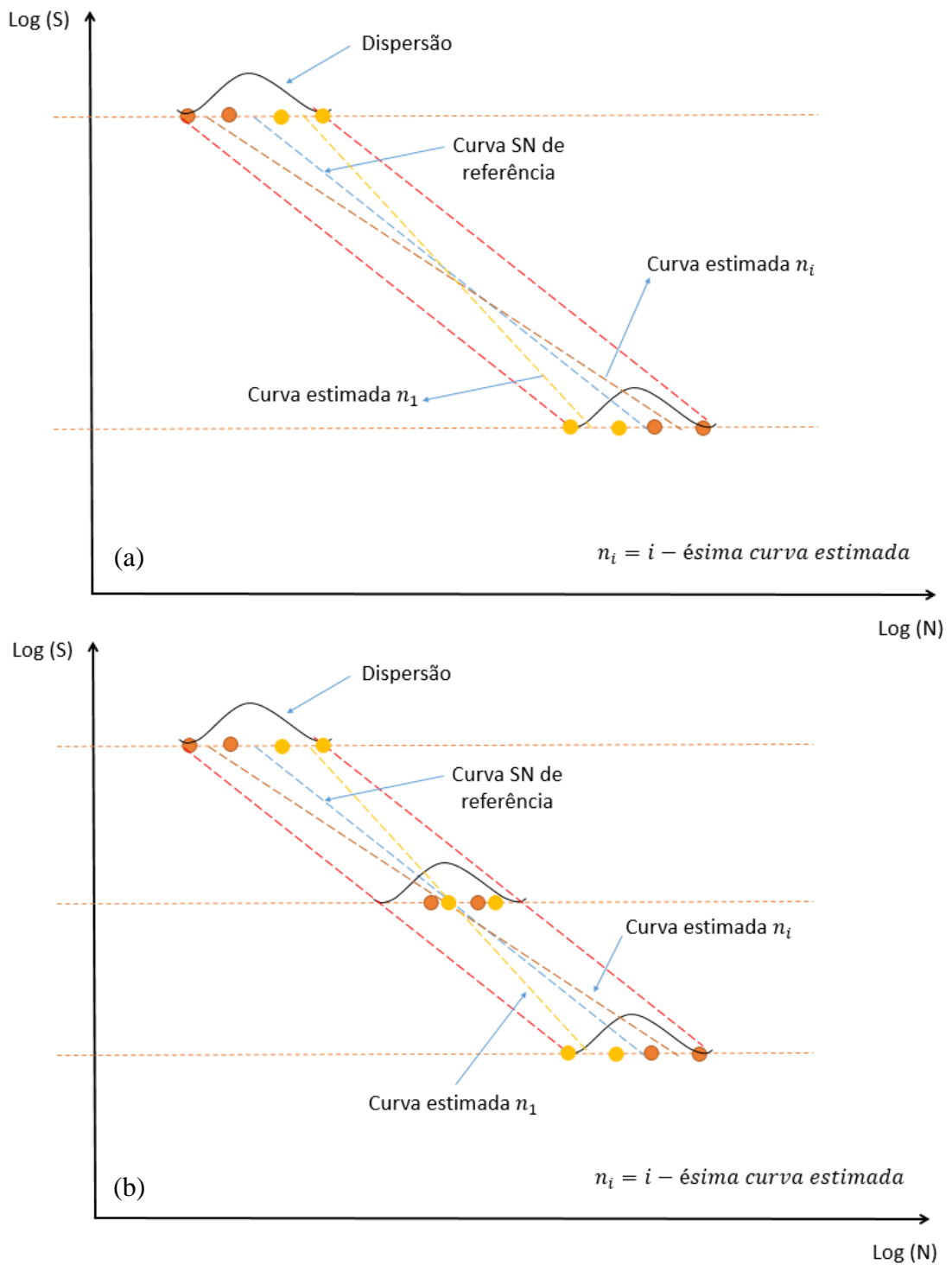
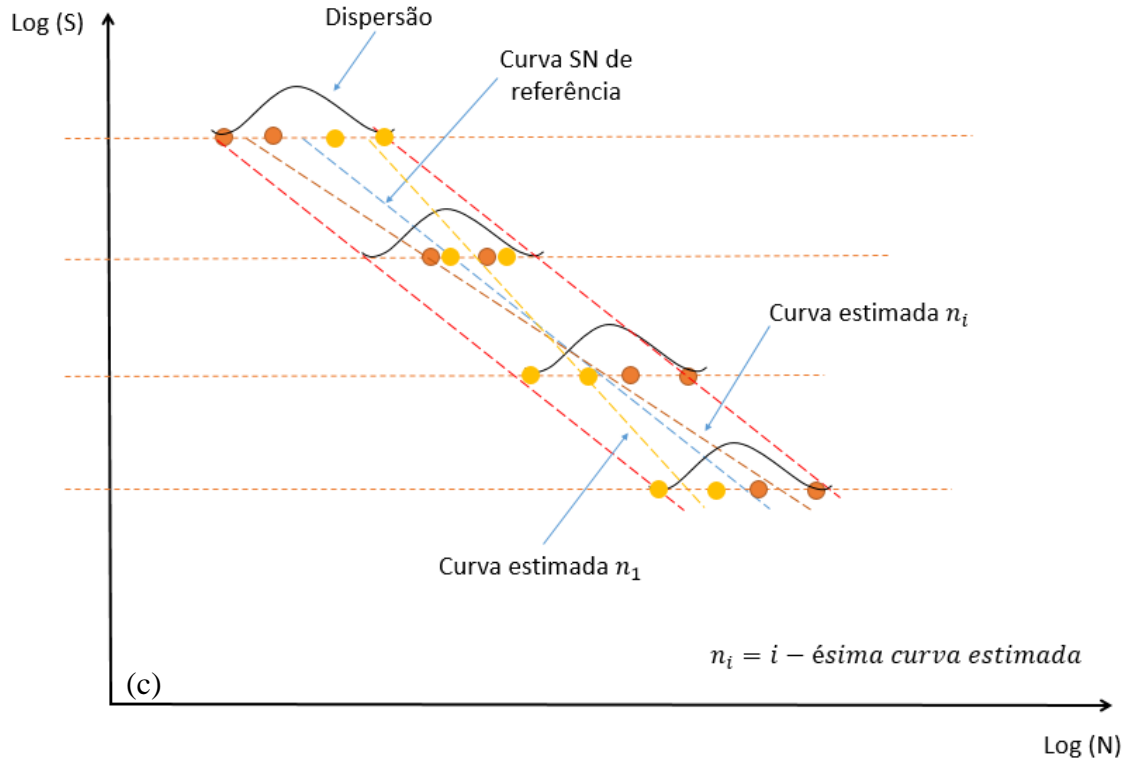


Figura 47 (continuação) - Curvas $S-N$ estimadas com a) dois corpos de prova por nível em dois níveis de tensão, b) com dois corpos de prova por nível em três níveis de tensão e c) dois corpos de prova por nível em quatro níveis de tensão.



Fonte: do autor

Tabela 13 – Principais configurações das simulações estatísticas – Parte 1.

Estudo	Nº de CP's	Nº de Níveis	Nº de CP's por nível	Replicação (%)
1	4	2	2 - 2	50%
2	6	3	2 - 2 - 2	
3	8	4	2 - 2 - 2 - 2	
4	12	6	2 - 2 - 2 - 2 - 2 - 2	
5	5	2	2 - 3	60%
6	6		2 - 4	67%
7	6		3 - 3	67%
8	8		4 - 4	75%
9	10		5 - 5	80%
10	12		6 - 6	83%

Fonte: do autor

Para realização das simulações estatísticas foram usados dados reais de fadiga de uma junta soldada feita de aço Q235 ($S_y = 270$ MPa and $S_{ut} = 500$ MPa), um dos materiais estruturais mais utilizados na China, que foi ensaiada por ZHAO, GAO e SUN (1998). A Figura 48 apresenta a curva $S-N$ e as dimensões dos corpos de prova testados, sendo que os resultados

dos níveis de tensão ensaiados e a vida experimental obtida são apresentados na Tabela 14. O procedimento de soldagem foi arco elétrico manual com um arame de solda com diâmetro de 4 ou 5mm. A composição química do metal de adição é 0.14 C, 0.25 Mn, 0.03 Si, 0.018 P e 0.03 S. Os ensaios de fadiga foram conduzidos em temperatura ambiente com flexão de quatro pontos, carregamento senoidal e uma relação de tensão de $R=0.1$. A frequência da carga foi de aproximadamente 80-120 Hz. O percentual de replicação do ensaio foi $PR=90\%$, sendo considerado pela norma ASTM E 739 (2015) um teste com dados com confiabilidade, sendo este o principal motivo para sua escolha como referência nos estudos do presente trabalho.

As propriedades de fadiga do material foram obtidas através de uma análise estatística dos dados experimentais (Tabela 14), usando regressão linear e método dos mínimos quadrados, baseado na metodologia apresentada por LEE (2005). Os valores das propriedades dos materiais obtidos são $C = 5.9152e+12$ (curva média com 50% de probabilidade de falha) e $m = 3.05$. Após avaliar o desvio padrão em cada nível de tensão dos dados da Tabela 14, verificou-se que o desvio padrão máximo foi de 0.17, o que corrobora com a escolha feita nos estudos, conforme mencionado anteriormente.

Tabela 14 – Dados de fadiga de uma junta soldada fabricada em aço Q235 (ZHAO, GAO e SUN, 1998).

Faixa de Tensão (MPa)	$N \times 10^5$										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
254.8	3.99	5.69	3.07	4.5	3.06	1.68	4.67	1.91	2.86	2.93	2.19
215.6	9.03	3.92	3.23	3.85	3.4	2.36	5.2	4.43	4.02	2.72	
176.4	16.14	5.45	11.4	7.3	1.039	9.26	9.92	7.77	10.74	7.6	
137.2	21.93	22.88	15.30	31.26	27.30	27.50	19.57	10.73	15.27	18.09	

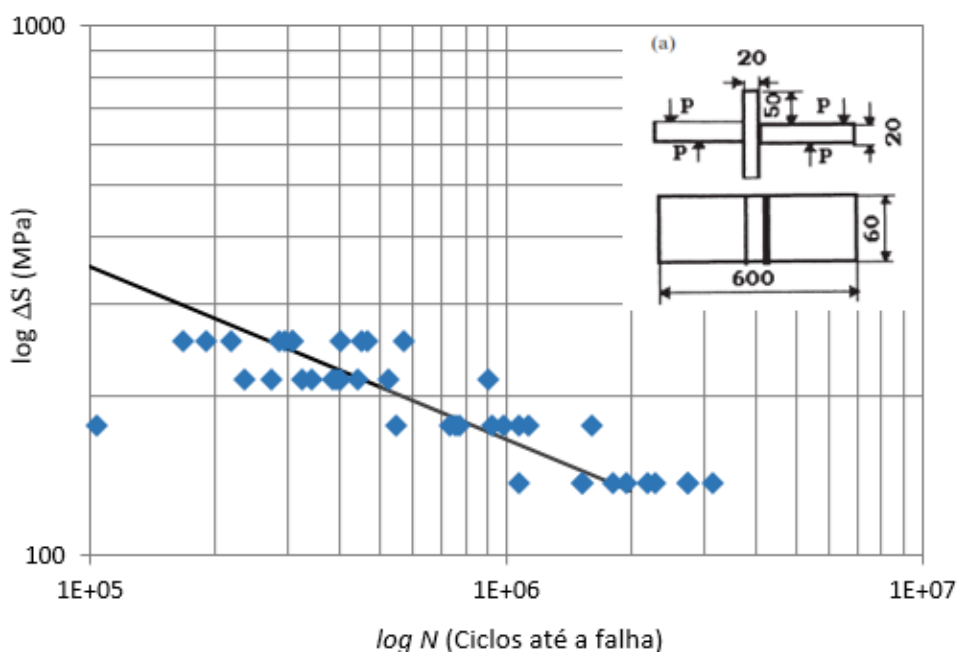
Os principais aspectos a serem definidos no início do planejamento de um teste de fadiga são:

- o tipo de teste (Tabela 3 de acordo com a ASTM E 739 (2015));
- quantos níveis de tensão utilizar;
- o valor das tensões em cada nível;
- quantas amostras devem ser testadas;
- a razão de tensão R a ser utilizada na carga.

Os itens (b), (c) e (d) são mais importantes para avaliar a DRP e a variabilidade dos testes, mas a razão de tensão do item (e) tem influência na faixa de vida de fadiga, principalmente no nível de tensão superior, pois a tensão máxima do ciclo de carga não deve ser maior que a resistência ao escoamento do material para garantir a validade do método da

curva $S-N$ (método da vida sob tensão). Por exemplo, como pode ser visto na Figura 48, a configuração do teste de fadiga realizado por ZHAO, GAO e SUN (1998), levou em conta uma razão de tensão de $R=0.1$, conduzindo a um número de ciclos até a falha da ordem de 3×10^5 ciclos com uma tensão máxima do ciclo de fadiga da ordem do limite de escoamento, impossibilitando assim o aumento da tensão máxima para obter vidas menores, limitando o uso do modelo para essa faixa de vida de fadiga.

Figura 48 - Curva $S-N$ usada como referência para as simulações estatísticas.



Fonte: (ZHAO, GAO e SUN, 1998)

3.1.3 Simulações estatísticas (Aplicação 2) – Configurações de ensaio conforme norma E739

O algoritmo desenvolvido e apresentado na Seção 3.1.1, possibilita que vários estudos sejam conduzidos para melhor compreender os parâmetros envolvidos na configuração de ensaios de fadiga. O objetivo desses estudos foi desenvolver boas práticas no planejamento experimental e avaliar quantitativamente os efeitos de diferentes configurações de ensaios de fadiga conforme normas, na qualidade das curvas $S-N$ para a região de vida finita, mais especificamente 10^3 a 2×10^6 ciclos. Foram consideradas as referências normativas ASTM E 739 (2015), BS ISO 12107 (2015) e JSME S 002 (1994).

ASTM E 739 (2015) classifica os testes de acordo com o uso dos dados (Tabela 3). Assim, todos os estudos mostrados na Tabela 15 foram conduzidos considerando dados aceitáveis em projeto e dados com confiabilidade, excluindo configurações com um percentual de replicação igual a 50% ou menos, pois a replicação muito baixa não permite avaliar a

variabilidade dos dados adequadamente. A Figura 49 mostra os principais parâmetros envolvidos na configuração dos experimentos de fadiga para um melhor entendimento do estudo paramétrico executado neste trabalho.

Figura 49 - Esquema dos principais parâmetros envolvidos na configuração de ensaios de fadiga.

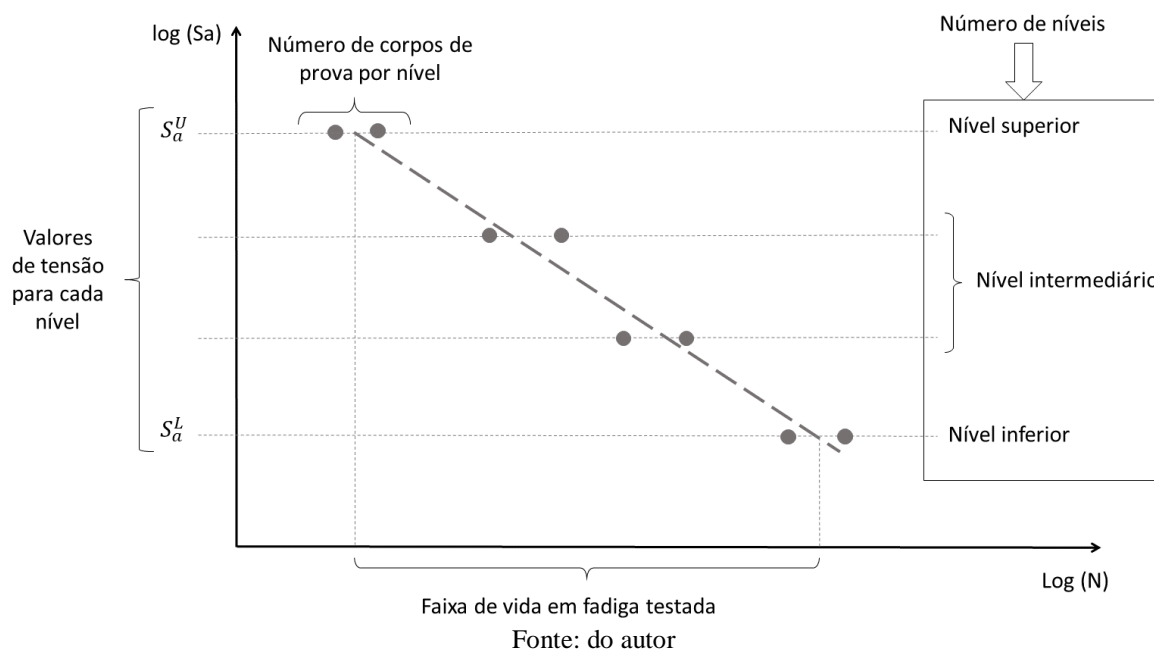


Tabela 15 – Diferentes configurações para ensaios de fadiga conforme E739.

	Configuração	Número de corpos de prova	PR (%)	Número de níveis de tensão	Número de corpos de prova por nível	
Dados com confiabilidade estatística	1	16	88	2	8	
	2	24		3		
	3	14	86	2	7	
	4	21		3		
	5	12	83	2	6	
	6	18		3		
	7	24		4		
	Dados aplicáveis em projeto	8	15	80	3	5
		9	20		4	
10		12	75	3	4	
11		16		4		
12		20		5		
13		24		6		
Dados aplicáveis em projeto		14	12	67	4	3
		15	15		5	
		16	18		6	
	17	21	7			
	18	24	8			

Na Tabela 16 são mostradas duas configurações de ensaios de fadiga conforme as normas BS ISO 12107 (2015) e JSME S 002 (1994).

Tabela 16 – Configurações para ensaios de fadiga conforme ISO 12107-2012 e JSME S 002-1994.

Configuração	Número de corpos de prova	PR (%)	Número de níveis de tensão	Número de corpos de prova por nível
ISO	30	80	6	5
JSME	8	50	4	2

Segundo LITTLE (1975), um dos principais pontos no planejamento de qualquer teste de fadiga, e especialmente aqueles envolvendo tamanho de amostras pequenos, é definir claramente o objetivo do teste. Se os dados do teste forem considerados preliminares ou exploratórios, como é comum na geração de dados de pesquisa, então o planejamento do teste é nitidamente diferente do que se espera para testes que gerem dados confiabilidade. Também é imprescindível que cada ensaio seja conduzido em uma ordem aleatória, cuidando para que nem todas as replicações em um nível de tensão sejam executadas sequencialmente (Little, 1975).

Para obter uma curva $S-N$ em laboratório, é necessário planejar o experimento e considerar as seguintes questões:

- a) Qual é o tipo de teste (ASTM E739), ou quais são as aplicações dos dados gerados?
- b) Quantos níveis de tensão serão testados?
- c) Quais são os valores das tensões em cada nível?
- d) Quantos corpos de prova devem ser testados?

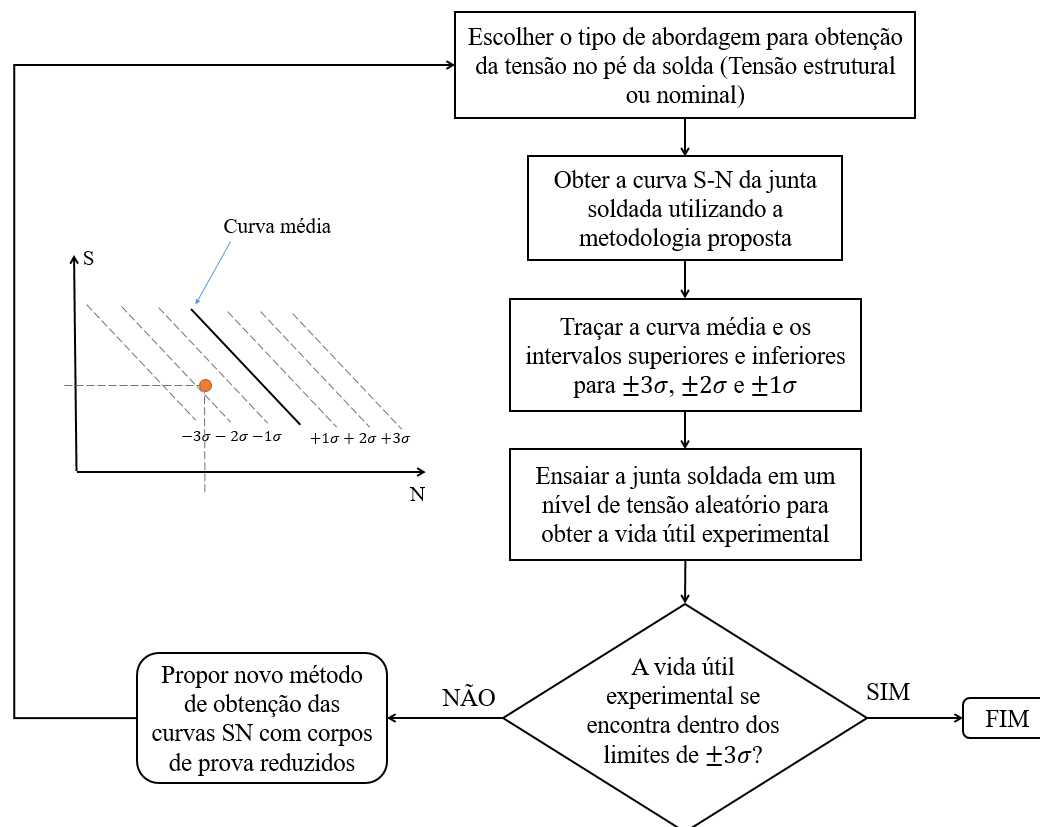
3.2 Método proposto para obtenção de curvas $S-N$ híbridas e processo de validação

Esta seção apresenta uma nova abordagem híbrida para obtenção de curvas $S-N$, denominada híbrida, pois consiste em definir uma curva $S-N$ com número de ensaios reduzidos associados a dados simulados com base em distribuições estatísticas do m (inclinação da curva $S-N$ em escala log-log) disponíveis na literatura. O objetivo da metodologia proposta é melhorar as estimativas da vida à fadiga com custos menores e tempo reduzido, no entanto, garantindo melhores resultados em comparação com às normas de projeto, que às vezes são muito conservadoras.

Na Figura 50 é apresentado o fluxograma do procedimento de validação da metodologia proposta, o qual pode ser dividido em duas etapas principais, sendo uma numérica e outra experimental. A metodologia para obtenção da curva $S-N$ com corpos de prova reduzidos se baseia em dados experimentais reduzidos e simulações estatísticas para ajustar a curva $S-N$, a

fim de melhorar a confiabilidade das previsões de vida útil e dano de fadiga, os quais são os parâmetros de controle nesse estudo.

Figura 50 - Fluxograma para avaliação de desempenho dos métodos propostos.



Fonte: do autor

Um das tarefas mais difíceis no projeto de juntas soldadas submetidas a carregamentos de fadiga é a definição da curva $S-N$ a ser utilizada na análise, a qual depende do tipo de detalhe da solda (solda de topo, solda de filete, etc.), direção do carregamento e do processo de solda (penetração total ou parcial). Conforme descrito na Seção 2.3, existem diversos métodos para a obtenção de curvas $S-N$, cada um com vantagens e desvantagens. Durante a fase de desenvolvimento de um projeto, raramente o engenheiro tem disponível recursos financeiros ou tempo suficiente para recorrer a métodos puramente experimentais para a obtenção das propriedades de fadiga de juntas soldadas, o que leva na maioria das vezes a utilização de metodologias baseadas nas propriedades estáticas dos materiais, e principalmente a utilização de curvas $S-N$ de juntas soldadas presentes em normas de dimensionamento de estruturas, tal como AASHTO (1990), BS 7608 (1993), HOBACHER (2009), BSK 99 (2003), entre outras normas disponíveis.

Existe uma grande dificuldade na escolha da curva $S-N$ correta a ser utilizada dentre tantas curvas disponíveis e dados necessários para escolhê-la. Ainda deve-se levar em conta

que as normas de projeto e a realidade não são a mesma coisa, uma vez que as normas são geralmente bastante gerais, possibilitando muitas vezes previsões bastante conservadoras, ou seja, a favor da segurança ERIKSSON, LIGNELL et al. (2003). Existe a possibilidade de as normas não abrangerem algum detalhe estrutural soldado mais complexo ou específico, sendo necessário que a curva $S-N$ do detalhe seja obtida por métodos aproximados, muitas vezes difíceis de aplicar e não precisos. Em casos mais críticos, nos quais a exigência de segurança é elevada, a junta deverá ser ensaiada para estimativa mais precisa das propriedades de fadiga. Neste contexto será proposta uma metodologia para obter as propriedades de fadiga de materiais com solda através de métodos híbridos, para reduzir o tempo de obtenção, e consequentemente os custos.

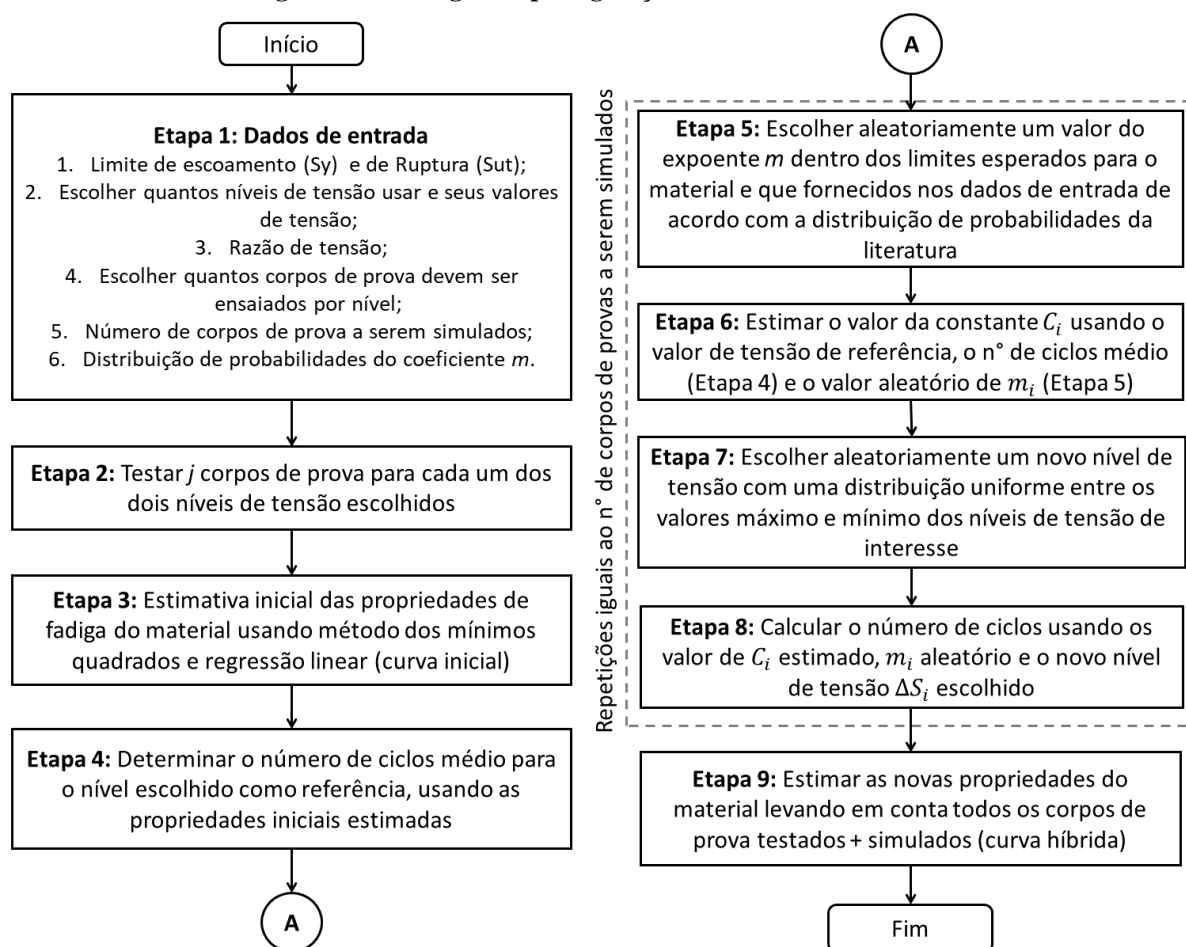
3.2.1 Algoritmo para obtenção de curvas $S-N$ – Abordagem híbrida proposta

A metodologia proposta é apresentada no fluxograma da Figura 51 e explicada passo a passo abaixo, sendo a rotina implementada em MATLAB (2018) (ver Anexo 5).

Etapa 1: Fornecer os parâmetros de entrada necessários, sendo que os parâmetros utilizados no presente trabalho são apresentados na Tabela 17. Dois casos de estudo foram desenvolvidos de acordo com a Tabela 17, um para uma razão de tensão $R = 0,1$ e outro com $R = -1$. O objetivo principal dessas duas configurações, foi avaliar a influência da faixa de vida de fadiga dos corpos de prova testados, considerando que a abordagem baseada na tensão (curvas $S-N$) é válida somente para tensões elásticas. Para o Caso 1 ($R = 0,1$), a faixa de vida de fadiga testada é limitada na faixa de 3×10^5 a 8×10^5 ciclos, já que tensões mais altas resultariam em uma tensão máxima do ciclo acima do limite de escoamento do material. Por outro lado, para o Caso 2 ($R = -1$), valores mais altos de tensão são possíveis, e a faixa de vida de fadiga das amostras testadas é de 3×10^4 a 5×10^4 ciclos, ou seja, um intervalo totalmente diferente do Caso 1. Na Tabela 17, foi indicado que serão ensaiados 6 corpos de prova, sendo 4 utilizados para construir a curva $S-N$ híbrida e 2 serão usados para o processo de validação da metodologia, conforme apresentado na Figura 50.

Etapa 2: Realizar os testes experimentais de fadiga com número de amostras reduzidas nos dois níveis de tensão escolhidos, com o número de testes escolhidos na Etapa 1. j representa o número de amostras a serem testadas em cada nível de tensão. Um esquema é mostrado na Figura 52. Essa configuração de teste com 2 níveis de tensão, foi adotada com base nos resultados obtidos através das simulações estatísticas da Seção 3.1.

Figura 51 - Fluxograma para geração de curvas $S-N$ híbridas.



Fonte: do autor

Tabela 17 – Valores dos parâmetros de entrada.

Item	Parâmetro de Entrada	Caso 1	Caso 2
1	Número total de corpos de prova a serem testados experimentalmente	6	6
2	Tensão máxima do ciclo de carregamento para os níveis de tensão superior e inferior, respectivamente (kS_y)	$1.0S_y$ e $0.8S_y$	$0.9S_y$ e $0.7S_y$
3	Razão de tensão (R)	0.1	-1
4	Propriedades estáticas do material S_y e S_{ut} (obtidas em ensaios de tração simples). Neste caso foram usados os valores médios das propriedades.	Ver Tabela 29	Ver Tabela 29
5	Número de corpos de prova a serem simulados (i)	25	25
6	Distribuição de probabilidade do expoente m	Ver Figura 53	Ver Figura 53

Fonte: do autor

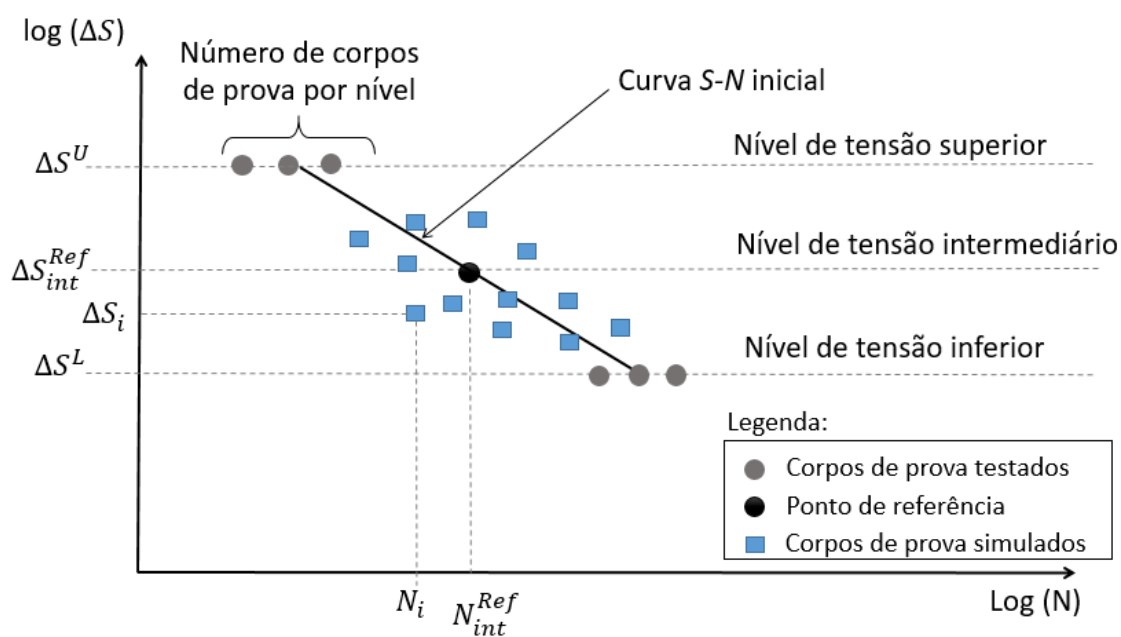
Etapa 3: Após os testes, as propriedades iniciais de fadiga do material são estimadas através da utilização de mínimos quadrados e regressão linear, obtendo-se as propriedades de fadiga, denominadas $C_{inicial}$ e $m_{inicial}$, com as quais pode-se construir a curva $S-N$ inicial.

Etapa 4: Usando as propriedades de fadiga iniciais estimadas na Etapa 3, determinar o número médio de ciclos para o nível intermediário de tensão N_{int}^{Ref} (ver Figura 52), que servirá como referência inicial para as simulações que iniciam na Etapa 5. Um nível de tensão intermediário foi escolhido, pois a *DRP* nos níveis intermediários é menor do que nos níveis superior e inferior.

Etapa 5: Selecionar aleatoriamente um valor do expoente m dentro dos limites desejados de acordo com a experiência ou conforme disponível na literatura, o que foi chamado de m_i , onde i representa o número de amostras a serem simuladas.

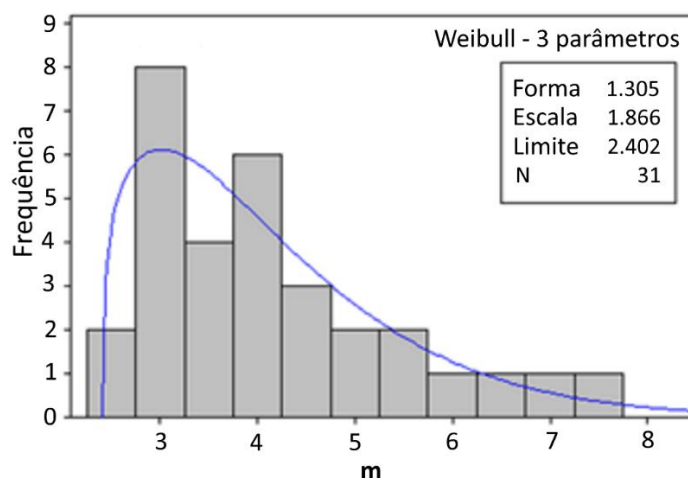
Para juntas soldadas de filete, tal como a estudada no presente trabalho, não foram encontradas distribuições de probabilidade da frequência do expoente m . Sendo assim, foi realizada uma pesquisa na literatura, buscando dados de ensaios fadiga de juntas com tipo de detalhe da solda e carregamento, semelhantes aos estudados no presente trabalho. Foram encontrados 31 trabalhos, que possibilitaram uma análise estatística do expoente m , sendo que uma distribuição de probabilidade de *Weibull* de 3 parâmetros foi utilizada para descrever a frequência relativa de ocorrência do expoente m para 31 juntas soldadas em filetes de aços, conforme a Figura 53, pois a distribuição de *Weibull* de 3 parâmetros, possibilitou uma melhor adequação da distribuição de ocorrência dos dados. Os dados usados nas análises estatísticas para o coeficiente m são apresentados no Anexo 3.

Figura 52 – Representação esquemática para geração da curva S-N híbrida.



Fonte: do autor

Figura 53 – Distribuição de probabilidade do expoente m para juntas soldadas de filete fabricadas em aço.



Fonte: do autor

Etapa 6: Usando o intervalo de tensão no nível intermediário ΔS_{int}^{Ref} como referência, o número de ciclos obtidos na Etapa 4, o valor de m_i escolhido aleatoriamente na Etapa 5, um novo valor é estimado para o coeficiente de fadiga, denotado por C_i , usando a Equação 58.

$$C_i = (\Delta S_{int}^{Ref})^{m_i} N_{int}^{Ref} \quad (58)$$

Etapa 7: Usando uma distribuição de probabilidade uniforme, deve-se escolher aleatoriamente um novo valor de tensão que estará dentro dos limites de tensão dos níveis superior e inferior escolhidos na Etapa 1, que é chamado ΔS_i , o qual será usado como referência para gerar a primeira amostra simulada na Etapa 8.

Etapa 8: Nesta etapa, a primeira amostra virtual é gerada, determinando-se o número de ciclos N_i usando a Equação 59, com os valores de C_i (Etapa 6), m_i (Etapa 5) e ΔS_i (Etapa 7). Como pode ser visto na Figura 52, uma amostra simulada é gerada com a tensão ΔS_i e o número de ciclos N_i . As Etapas 5 a 8 são repetidas i vezes, gerando amostras simuladas puramente estatísticas para níveis aleatórios de tensão através de simulações estatísticas.

$$N_i = \frac{C_i}{(\Delta S_i)^{m_i}} \quad (59)$$

Etapa 9: Após a geração de todas as amostras simuladas de acordo com os dados de entrada, todos os corpos de prova reais e virtuais são agrupados, possibilitando a aplicação do método de mínimos quadrados e regressão linear para obter as propriedades do material, permitindo construir a curva $S-N$ híbrida com confiabilidade de 50%. Para obtenção da curva $S-N$ híbrida para outros valores de confiabilidade é apresentado no Anexo 2 na Figura A.2 um

procedimento muito utilizado, sendo que uma maneira simples de corrigir o efeito de confiabilidade também é apresentada por SHIGLEY e MISCHKE (2005), os quais aplicaram um fator de correção para a confiabilidade desejada.

Com o objetivo de validar a metodologia proposta foram realizados três tipos de avaliações de desempenho conforme apresentado nas Seções 3.2.2, 3.2.3 e 3.2.4. As seções 3.2.2 e 3.2.3 foram desenvolvidas com dados disponíveis na literatura, sendo utilizados dados de ensaios realizados por ZHAO, GAO e SUN (1998), conforme já foram apresentados na Seção 3.1.2, na Figura 48 e na Tabela 14. A Seção 3.2.4 foi desenvolvida com dados de fadiga ensaiados pelo próprio autor.

3.2.2 Procedimento de validação com base em simulações de Monte Carlo – Parte 1

O procedimento de simulação estatística de curvas $S-N$ baseado no método de Monte Carlo, já utilizado no presente trabalho e apresentado na Seção 3.1.1, foi muito útil para verificar o desempenho do método proposto na Seção 3.2.1. A Figura 54 apresenta um esquema básico usado para geração de dados, que substitui os dados reais na Etapa 2 da Figura 51 (Seção 3.2.1) por dados simulados, os quais são baseados em uma distribuição normal com média e desvio padrão usando dados reais de ZHAO, GAO e SUN (1998), possibilitando obter a curva inicial com tamanho de amostra reduzido. Esse procedimento foi utilizado para permitir a avaliação estatística do método proposto, pois com o procedimento adotado, é possível gerar várias curvas de fadiga, as quais experimentalmente seriam impraticáveis devido ao tempo e custos envolvidos. Nos estudos descritos nesta seção, foram simuladas 100 curvas de fadiga utilizando o procedimento para geração de curvas $S-N$ da Figura 54 (para ambos os casos da Tabela 17, Seção 3.2.1), permitindo uma avaliação mais consistente do desempenho do método proposto. As simulações de Monte Carlo utilizadas nesta seção foram realizadas conforme algoritmo já apresentado na Seção 3.1.1.

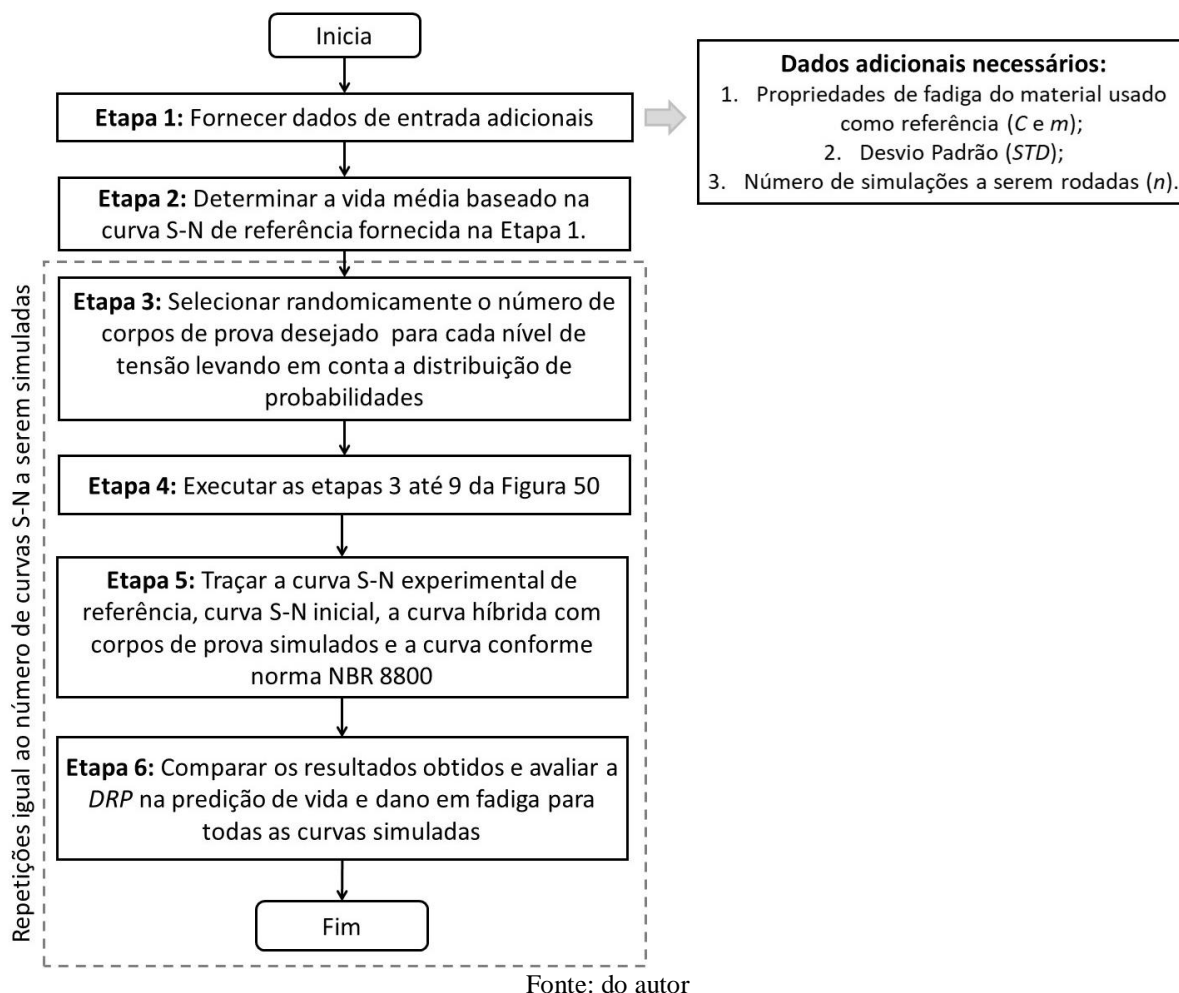
O fluxograma da Figura 54 é apresentado de forma detalhada abaixo:

Etapa 1: Fornecer os parâmetros de entrada adicionais necessários para a simulação de dados de fadiga, assumindo uma distribuição normal. Estes parâmetros já foram descritos na Seção 3.1.1, na qual o algoritmo para simulação de curvas $S-N$ baseado no método de Monte Carlo foi apresentado de forma detalhada.

Etapa 2: Idem a Etapa 2 da Seção 3.1.1.

Etapa 3: Iniciar o processo de simulação de dados de fadiga (100 curvas iniciais foram simuladas) selecionando aleatoriamente amostras, com base em uma distribuição normal, conforme procedimento já apresentado na Seção 3.1.1, Etapa 3.

Figura 54 – Procedimento para validação da abordagem híbrida através de simulações de Monte Carlo.



Etapa 4: Para cada curva simulada, aplicar as Etapas 3 a 9 do fluxograma definido na Figura 51.

Etapa 5: Para cada simulação, correspondente as Etapas 3 até 6 na Figura 54, com objetivo de verificar qualitativamente as diferenças entre as curvas estudadas, traçar juntamente com os dados de teste simulados, a curva de referência, a curva inicial, a curva híbrida e a curva conforme a norma ABNT NBR 8800 (2008).

Etapa 6: Conforme já detalhado na Etapa 6 da Seção 3.1.1, ao final de cada *loop* de simulação, a *DRP* na predição de vida e dano de fadiga são calculados em relação à curva de referência, permitindo uma comparação quantitativa dos resultados. Como nesta seção, além da

DRP nas previsões de vida, também foi avaliada a *DRP* no dano, foram utilizados espectros de carregamento e a regra de Miner, conforme detalhado abaixo.

A regra de dano de Miner é definida pela Equação 11. O número de ciclos n_i foi definido com base no espectro da DIN 15018 (1984), como também usado por PRAVIA (2003).

A Tabela 18 apresenta o dano (D) para a curva de referência, usando o espectro de acordo com a (DIN 15018, 1984). O número de ciclos foi definido para obter D igual a 1 para a curva de referência. Os valores da faixa de tensão e número de ciclos usados para calcular o dano, são apresentados na Tabela 18. O dano obtido usando as curvas híbridas simuladas é apresentado na Seção 4.2.1, após a geração das curvas de acordo com as metodologias descritas nas Figura 51 e Figura 54.

Tabela 18 – Espectro de tensão de acordo com a norma NBR 15018 levando em conta a curva de referência.

$\Delta\sigma^i / \sigma^{max}$	n_i (ciclos)	$\Delta\sigma^i$ (MPa)	$N_i = C / \Delta\sigma^{i^m}$	n_i / N_i
1.000	1	540.00	27414	0.00004
0.952	8	514.08	31851	0.00025
0.890	74	480.60	39113	0.00189
0.814	672	439.56	51352	0.01309
0.716	6123	386.64	75942	0.08063
0.579	56057	312.66	145143	0.38622
0.323	517930	166.05	1000000	0.51793
	$\sum n_i = 580865$			$D = 1.00$

Fonte: do autor

Este primeiro procedimento de validação foi muito importante para a definição da estrutura e configuração do procedimento para obtenção de curvas $S-N$ com número de corpos de prova reduzidos, sendo que diversos tipos de configuração foram testados até encontrar a metodologia proposta.

3.2.3 Procedimento de validação final com base em dados experimentais reduzidos (dados de ZHAO, GAO e SUN (1998)) associados a dados simulados – Parte 2

Nesta seção serão realizados estudos com base nos dados de fadiga de ZHAO, GAO e SUN (1998), os quais já foram apresentados na Seção 3.1.2, na Tabela 14 e Figura 48. O principal objetivo dos estudos apresentados nessa seção, é comparar a curva $S-N$ híbrida com a curva $S-N$ com alta replicação obtida através dos dados de fadiga de ZHAO, GAO e SUN (1998).

Os estudos serão realizados através do algoritmo apresentado na Seção 3.2.1, modificando-se apenas a Etapa 2, na qual originalmente deve-se ensaiar corpos de prova em

ensaios reais, nesta seção estes corpos de prova serão escolhidos de forma aleatória em dois níveis de tensão já ensaiados por ZHAO, GAO e SUN (1998). Os níveis de faixa de tensão ensaiados foram 254.8 MPa (11 corpos de prova), 215.6 MPa (10 corpos de prova), 176.4 MPa (10 corpos de prova) e 137.2 MPa (10 corpos de prova), sendo que os valores de tensão representam a faixa de tensão ΔS .

Os níveis escolhidos para os estudos foram 254.8 MPa e 176.4 MPa, sendo que aleatoriamente foram escolhidos dois corpos de prova por nível para rodar a Etapa 2 da metodologia proposta. Além dos quatro corpos de prova escolhidos para obtenção da curva inicial, mais dois corpos de prova foram escolhidos aleatoriamente no nível de tensão de 137.2 MPa para uso no processo de validação, ou seja, esse nível de tensão será utilizado para verificação do método proposto.

3.2.4 Procedimento de validação final com base em dados experimentais reduzidos (do autor) associados a dados simulados – Parte 3

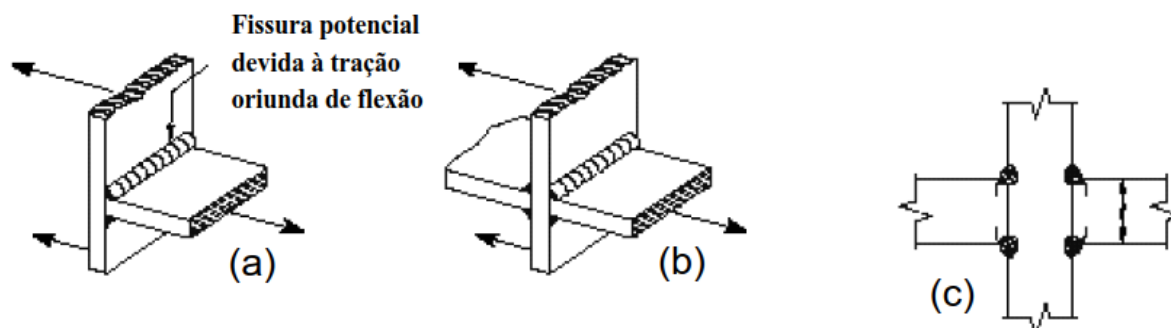
O principal objetivo dessa seção é a validação final da metodologia proposta anteriormente, buscando avaliar seu desempenho utilizando para a parte experimental (Etapa 2 da Figura 51), dados de ensaios realizados pelo autor, sendo que no presente trabalho foram realizados ensaios de fadiga em uma junta soldada utilizando 3 níveis de tensão com 2 corpos de prova por nível de tensão. Dois corpos de prova foram testados em dois níveis de tensão (4 corpos de prova) para gerar a curva $S-N$ inicial. Os valores da faixa de tensão nos níveis usados para gerar os dados iniciais foram 700 e 450 MPa. Outros dois corpos de prova foram testados com 380 MPa para uso no processo de validação.

Os ensaios de fadiga que serão necessários para a obtenção da curva $S-N$ híbrida são discutidos na Seção 3.3.3.

Objetivando verificar o desempenho da metodologia proposta, efetuou-se uma comparação da mesma com a curva $S-N$ da norma brasileira ABNT NBR 8800 (2008) para o mesmo detalhe de solda, que é semelhante a AISC (2016), sendo que ambas as normas definem as propriedades para detalhes estruturais soldados de acordo com uma categoria de fadiga para tensão nominal. Para a junta soldada de filete estudada neste trabalho, a categoria fadiga é apresentada na Figura 55, que corresponde à categoria de tensão C, com constante $C_f = 44 \times 10^8$ e $\sigma_{TH}=69$ MPa para 95% de confiabilidade (consulte o Apêndice K na ABNT NBR 8800 (2008) para todas as categorias de fadiga). Para outros valores da confiabilidade, a constante C_f deve ser ajustada. Para fins de comparação com outros resultados obtidos por abordagem

experimental e híbrida na Seção 3, a constante ajustada C_f é 67.3×10^{10} para 50% de confiabilidade.

Figura 55 – Classe de fadiga da junta soldada conforme (ABNT NBR 8800, 2008).



Fonte: Adaptado de (ABNT NBR 8800, 2008)

A ABNT NBR 8800 (2008) deve ser aplicada a elementos estruturais e ligações metálicas sujeitas a ações com grande número de ciclos, com variação de tensões no regime elástico, cuja frequência e magnitude são suficientes para iniciar fissuras e colapso progressivo por fadiga, que define o estado limite de fadiga e aplicam-se a tensões no metal-base, sendo que o valor não deve ultrapassar $0.66S_y$ ou $0.40S_y$, para tensões normais ou de cisalhamento, respectivamente.

Nenhuma verificação de resistência à fadiga σ_{SR} é necessária se o número de ciclos de aplicação das ações variáveis for menor que 20 000 ciclos.

Para juntas soldadas, a faixa de variação de tensões não deve exceder a faixa de tensão admissível (σ_{TH}) calculada para as categorias de tensão A, B, B', C, D, E e E', deve ser determinada pela Equação 60:

$$\sigma_{SR} = \left(\frac{327C_f}{N} \right)^{0.333} \geq \sigma_{TH} \quad (60)$$

onde a categoria de tensão é definida pelo tipo de detalhe conforme as Tabelas K.1 e K.2 da ABNT NBR 8800 (2008). A constante C_f e σ_{TH} é encontrada na Tabela K.1.

3.3 Procedimentos Experimentais

Os procedimentos experimentais podem ser divididos em três etapas, sendo a primeira voltada para a caracterização das propriedades químicas e propriedades de resistência estática do material, a segunda é a preparação de corpos de prova e uma terceira etapa voltada aos ensaios de fadiga.

Os ensaios com as juntas soldadas serão realizados avaliando-se a vida sob tensão. Os testes de fadiga incluem todas as fases, tais como planejamento do teste, a preparação das amostras e as análises estatísticas dos resultados. É muito importante manter o controle dos principais parâmetros que têm influência sobre os resultados do teste, sendo necessário para isso, definir uma população de amostras homogêneas. Se uma população envolve corpos de prova com grandes diferenças, os resultados dos testes realizados apresentarão grande dispersão, podendo ser difícil explicar e interpretar esses resultados. Os resultados práticos serão que as juntas de alta qualidade serão penalizadas porque foram misturadas com juntas de qualidade inferior.

As tensões residuais nas juntas soldadas não foram avaliadas neste trabalho. A justificativa para isso, está ligada a grande complexidade e dificuldade de avaliar as tensões residuais nos corpos de prova, e incorporar seus efeitos nas metodologias de projeto à fadiga, sendo que isso fica ainda mais complexo, quando se insere o detalhe soldado em uma estrutura. Segundo MADDOX (2000), a soldagem introduz tensões residuais, que modificam a tensão média aplicada em uma junta soldada sob carga de fadiga. Tensões residuais também são introduzidas, quando os subconjuntos forem conectados uns aos outros, devido a um encaixe imperfeito entre os mesmos. Normalmente deve-se assumir que as tensões residuais de tração estarão presentes em uma estrutura soldada, e que possuem magnitude da ordem de grandeza da resistência ao escoamento do material. Como resultado disso, a vida em fadiga será independente da tensão média e dependerá apenas da amplitude de tensão aplicada ΔS , mesmo que seja compressiva. Conseqüentemente, todos os códigos de projeto de fadiga de estruturas soldadas aceitam este princípio, e o projeto é baseado na amplitude de tensão aplicada ΔS . Muitos estudos abordaram o benefício do alívio das tensões residuais, com vistas a modificar a abordagem de projeto à fadiga. No entanto, o alívio completo das tensões raramente pode ser alcançado, principalmente se tratando de uma estrutura. Esses fatores persuadiram a maioria dos escritores de normas a ignorar o benefício potencial do alívio de tensões, segundo MADDOX (2000).

3.3.1 Caracterização do material base (propriedades químicas e mecânicas estáticas)

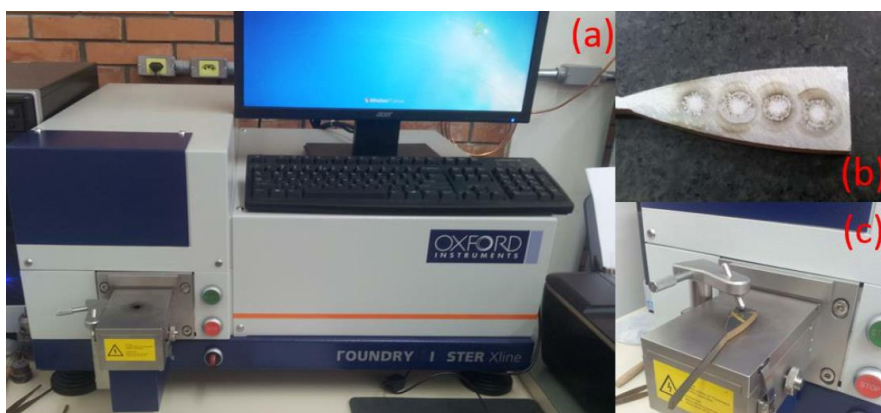
O material escolhido foi um aço estrutural NBR 6656 LNE 38 muito utilizado em longarinas, travessas, chassis, guindastes, componentes automotivos e agrícolas. Devido ao baixo teor de carbono, apresenta excelente conformabilidade, soldabilidade e bom desempenho quanto à fadiga. Este material pertence ao grupo dos aços ARBL (Alta Resistência e Baixa

Liga), pois são elaborados usando técnicas de laminação para transformação termomecânica, permitindo a obtenção de altos valores de resistência mecânica com relativamente baixo carbono equivalente.

Para a análise da composição química do material base, a qual é importante para a definição do tipo de arame de solda e do gás a serem utilizados no processo de soldagem, foi utilizado um espectrômetro de emissão ótica modelo FOUNDRY – MASTER Xline, da empresa Shimadzu, apresentado na Figura 56 (a). Os resultados foram baseados em uma média de três análises como mostra a Figura 56 (b).

Os ensaios de tração foram realizados no aço NBR 6656 LNE-380 sem solda, em temperatura ambiente, com formato e dimensões do corpo de prova segundo a norma ASTM E-8M. A máquina universal de ensaios utilizada é da marca SCHENCK e com capacidade de 100 KN. Foram ensaiados cinco corpos de prova. O objetivo destes ensaios é obter as propriedades mecânicas do material, principalmente a resistência máxima à tração utilizada muitas vezes para definição da curva $S-N$ teórica, e também, obter o limite de escoamento do aço.

Figura 56 - Espectrômetro de emissão ótica modelo FOUNDRY – MASTER Xline da empresa Shimadzu.



Fonte: do autor

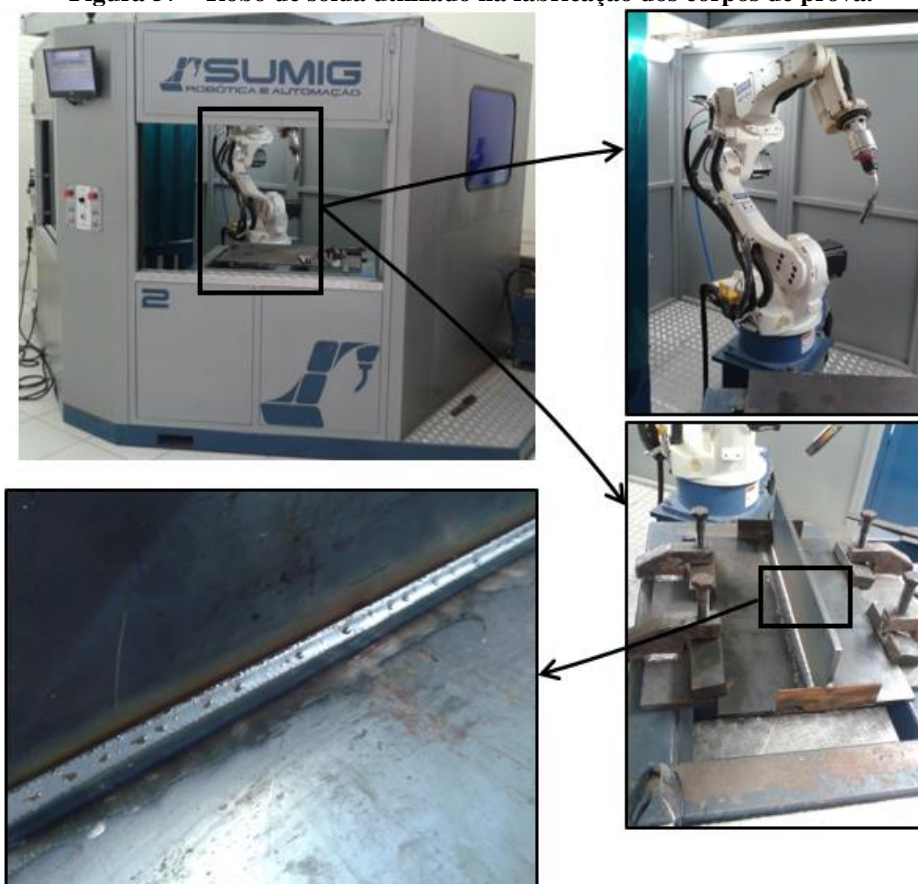
3.3.2 Preparação de corpos de prova para ensaios de fadiga

Os corpos de prova foram soldados usando um procedimento robótico de soldagem, usando um modelo de célula robótica OTC 400, do fabricante SUMIG. O material de adição no processo de soldagem foi o arame ER70S6, com gás de proteção APAL (82% Argônio+18% CO₂). Como parâmetros de soldagem foi utilizada uma corrente pulsada de 300A, uma voltagem de 29V, uma velocidade de 40 cm/min e uma vazão de gás de 15 l/min.

O processo de fabricação dos corpos de prova soldados para os ensaios de fadiga pode ser resumido nas seguintes etapas:

- 1) Soldagem das chapas em forma de T em processo robotizado conforme Figura 57;

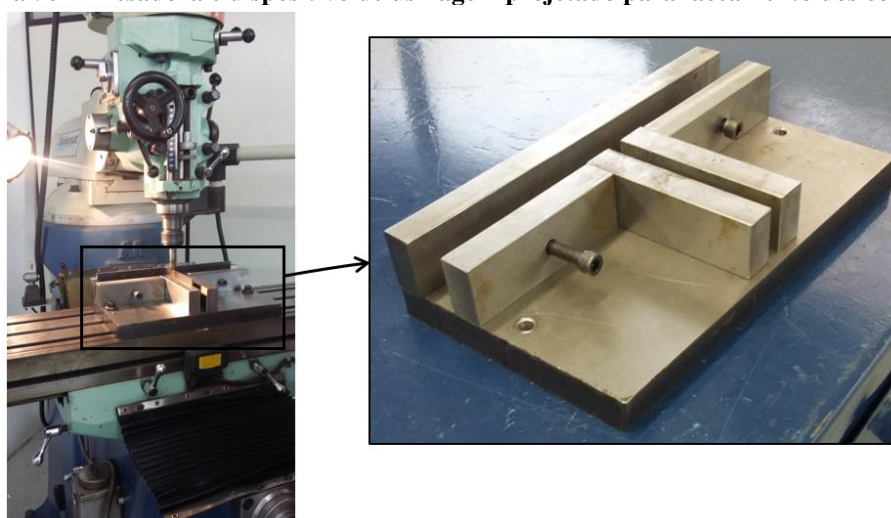
Figura 57 – Robô de solda utilizado na fabricação dos corpos de prova.



Fonte: do autor

- 2) Cortar os corpos de prova com a largura de 55mm, sendo 5mm de sobre material para posterior processo de usinagem;
- 3) Faceamento dos corpos de prova por usinagem, conforme Figura 58;

Figura 58 – Fresadora e dispositivo de usinagem projetado para faceamento dos corpos de prova.



Fonte: do autor

- 4) Acabamento final com lixa para melhorar o acabamento final dos corpos de prova;
- 5) Inspeção visual e ensaio por partículas magnéticas para verificação de qualidade dos corpos de prova. Os ensaios foram realizados pela empresa Metasa – Indústria de Estruturas Metálicas conforme norma AWS D.1.1, sendo que os relatórios dos ensaios estão apresentados no Anexo 1.

3.3.3 Ensaio de fadiga

Os ensaios de fadiga foram realizados em uma máquina servo hidráulica da fabricante Shimadzu com capacidade de carga de 100 kN, conforme Figura 59(a). Esta máquina é uma máquina que aplica carregamentos cíclicos axiais em sua configuração de fábrica, sendo que para possibilitar os ensaios de flexão nos corpos de prova deste trabalho, fez-se necessário a realização do projeto e fabricação de um dispositivo conforme apresentado na Figura 60. O projeto foi realizado possibilitando a montagem dos corpos de prova em duas posições diferentes, com objetivo de tornar o dispositivo mais versátil e para possibilitar a realização de ensaios em condições de carregamento diferentes. Para o presente trabalho, a posição representada pela Figura 60 (a) e Figura 59(b) será a condição de ensaio dos corpos de prova.

Durante os testes, as seguintes informações devem ser medidas e registradas:

- O modo de carga será flexão, variação de carga (senoidal);
- A razão de tensões aplicada;
- Frequência de carga;
- Número de ciclos até a falha final.

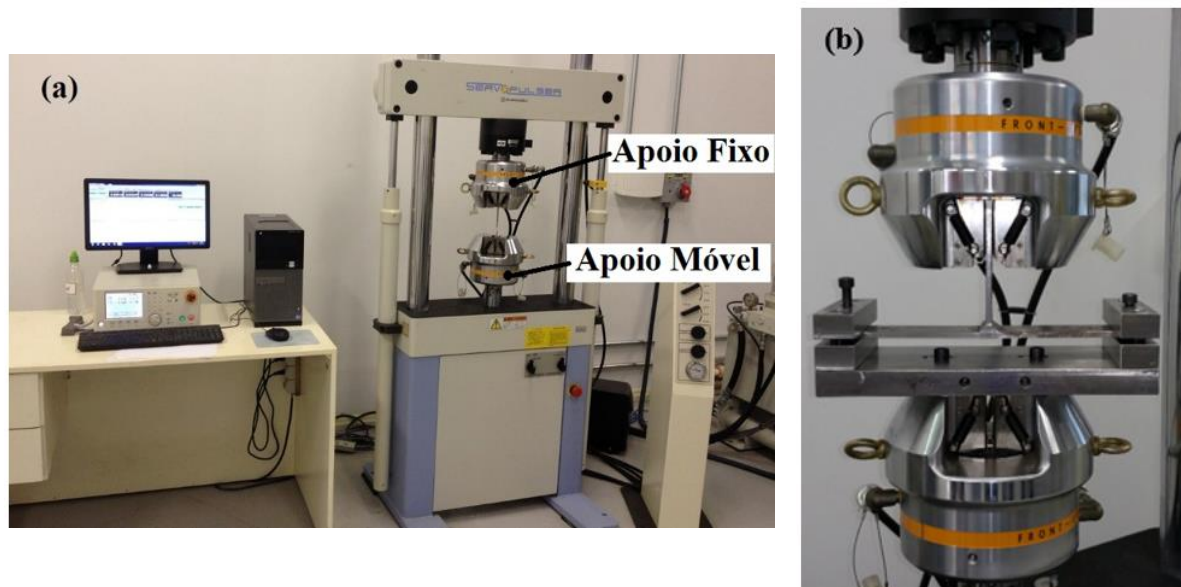
O modo de carregamento que será utilizado no ensaio é flexão de 3 pontos (Figura 60 (a)), sendo que os corpos de prova estarão sujeitos a uma razão de carga de $R=-1$ (completamente alternada), com cargas senoidais e em temperatura ambiente.

A frequência típica de aplicação da carga em juntas soldadas segundo LASSEN e RECHO (2006) é de 6 a 10 Hz, sendo que neste trabalho devido a limitações da máquina quanto à frequência máxima que pode ser utilizada de acordo com o deslocamento do cabeçote no ensaio, as frequências variaram na faixa de 1-4 Hz, dependendo do carregamento aplicado.

Ferramentas estatísticas, tal como a regressão linear, serão utilizadas para a análise de dados, uma vez que há uma grande dispersão nos resultados de um ensaio de fadiga, possibilitando a obtenção dos parâmetros do modelo estatístico de fadiga.

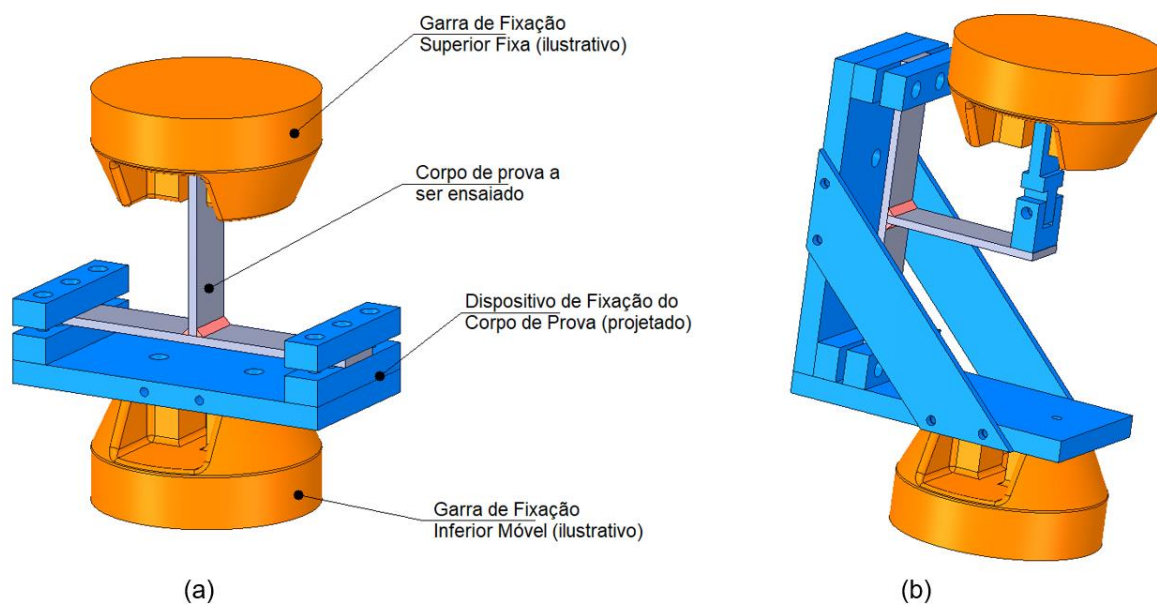
As tensões máximas a que os corpos de prova serão submetidos nos ensaios de fadiga serão 90% da tensão de escoamento do material, evitando assim que ocorra plastificação, a fim de garantir a validade das curvas $S-N$. Os níveis de tensões, e conseqüentemente, as cargas a serem aplicadas na máquina de fadiga, serão apresentados no Capítulo 4, uma vez que os mesmos dependem dos resultados obtidos nos estudos iniciais, conforme descrito na Seção 3.1 e 3.2.

Figura 59 – (a) Máquina servo hidráulica para ensaios de fadiga e (b) detalhe do dispositivo de fixação dos corpos de prova.



Fonte: do autor

Figura 60 - Projeto do dispositivo para fixação dos corpos de prova em duas posições diferentes.



Fonte: do autor

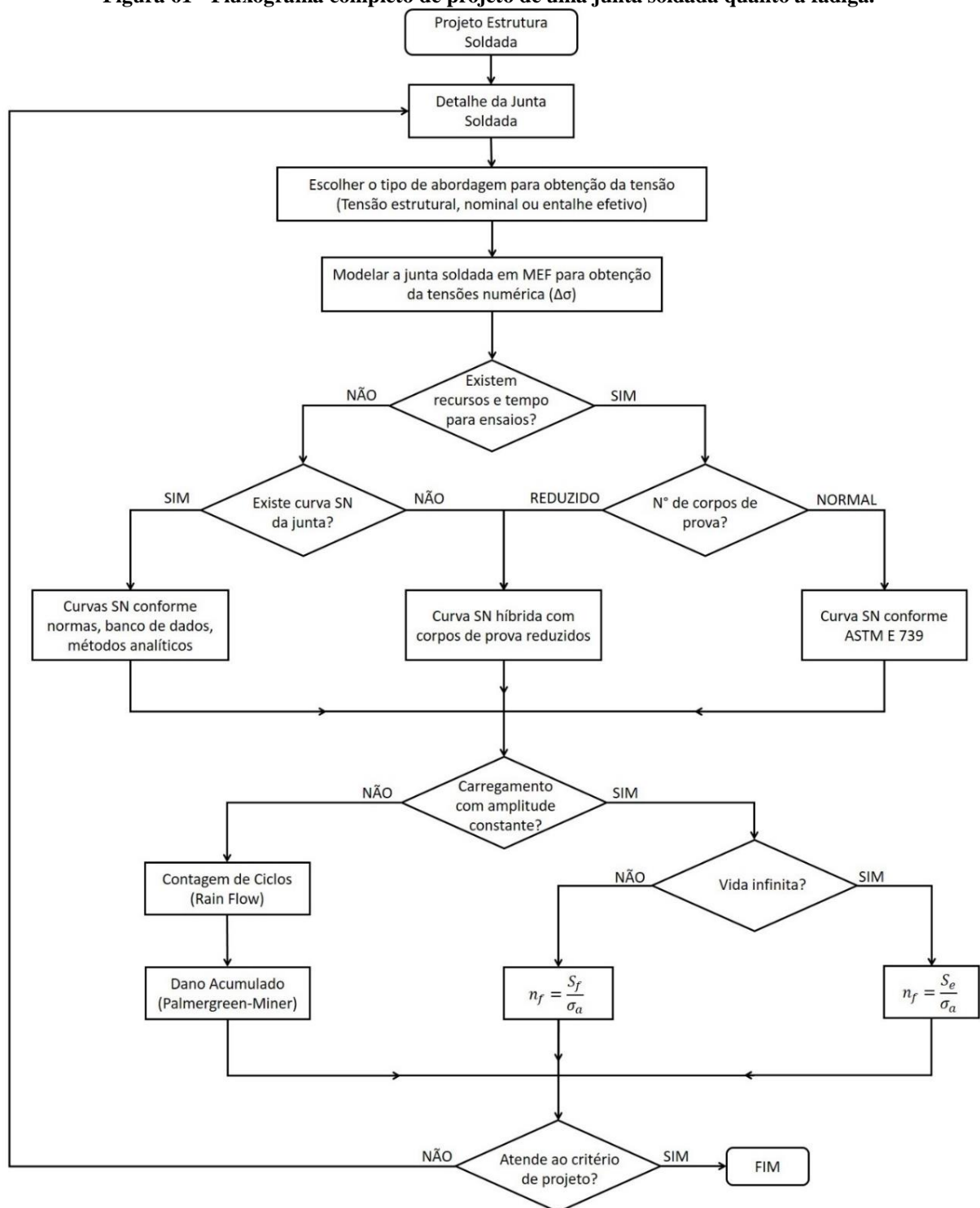
3.4 Aplicação: Vida útil à fadiga de uma junta soldada de filete

Nesta seção é utilizada uma metodologia que leva em conta os diversos aspectos que devem ser considerados em uma análise de fadiga de uma estrutura soldada. Como já mencionado nos capítulos anteriores, existem diversas abordagens que podem ser utilizadas para a obtenção da tensão na junta soldada, para escolha da curva $S-N$ de projeto e quanto aos carregamentos atuantes. As definições sobre a escolha de qual abordagem utilizar, foram apresentados com maiores detalhes na revisão bibliográfica.

Dois aspectos importantes que devem ser levados em conta, e que definem qual caminho será seguido para obtenção dos dados necessários para a análise de fadiga, é a verificação dos recursos e tempo disponível para a execução do projeto da junta, conforme apresentado na Figura 61. Para garantir uma confiabilidade aceitável na durabilidade estrutural e segurança das estruturas soldadas, além do carregamento de serviço, devem ser levados em consideração parâmetros decisivos, tais como geometria e método de modelagem de detalhes, estado de tensão (uniaxial, multiaxial proporcional ou não proporcional) e regras de dano cumulativo. O fator de segurança a ser utilizado, depende não só da gravidade da falha, mas também da confiabilidade dos métodos de projetos utilizados MACDONALD e SONSINO (2011). Neste contexto, fica evidente que quanto mais confiabilidade se pretende obter na resposta da análise de fadiga, mais tempo e recursos devem ser disponibilizados para obter parâmetros de propriedades de materiais, execução de modelos de cálculo das tensões mais refinado, obtenção das cargas reais atuantes na estrutura.

O esquema desenvolvido e apresentado na Figura 61 tem como objetivo apresentar de uma forma completa e compacta as principais decisões que o engenheiro deve tomar com base nos recursos e tempo disponível, para que a análise de durabilidade seja executada dentro de parâmetros aceitáveis e controlados de confiabilidade e segurança. Cabe salientar que é necessário buscar um equilíbrio no esforço e aplicação de recursos para obter os diversos parâmetros necessários para a análise de fadiga. Por exemplo, a realização de diversos ensaios em detalhes de juntas soldadas, a fim de obter a curva $S-N$, seriam morosos e de elevado custo, mas não contribuiriam significativamente para o aumento da confiabilidade, caso não sejam aplicados esforços e recursos suficientes para garantir a qualidade das juntas soldadas na manufatura das peças, obtenção de carregamentos e modelos de cálculo mais refinados.

Figura 61 - Fluxograma completo de projeto de uma junta soldada quanto à fadiga.



Fonte: do autor

Conforme o fluxograma para projeto de juntas soldadas apresentado na Figura 61, quando uma estrutura soldada deve ser verificada quanto ao critério de falha por fadiga, diversos tipos de detalhes de juntas soldadas podem estar presentes em uma mesma estrutura. A primeira e uma das tarefas mais difíceis, é identificar dentre todos os tipos de detalhes

estruturais de juntas presente nas normas ou recomendações, qual representa a geometria, carregamento aplicado (estado de tensões no pé e na raiz da solda), processo de solda (penetração total) e se a junta soldada tem transferência de carga. Normalmente, as estruturas soldadas, sejam elas estruturas metálicas, obras de arte (por exemplo pontes), implementos agrícolas ou rodoviários, automóveis, aviões ou navios, apresentam grande complexidade nas juntas soldadas. Na Figura 37 apresentada na Seção 2.6, bem como no exemplo de uniões soldadas de um componente de um pulverizador automotriz agrícola, conforme apresentado na Figura 62, as uniões soldadas apresentam alta complexidade, tanto geométrica como do estado de tensão atuante nas proximidades da solda, o que dificulta bastante a escolha de uma curva $S-N$ adequada para cada região.

Figura 62 - Detalhes de juntas soldadas de um componente agrícola.



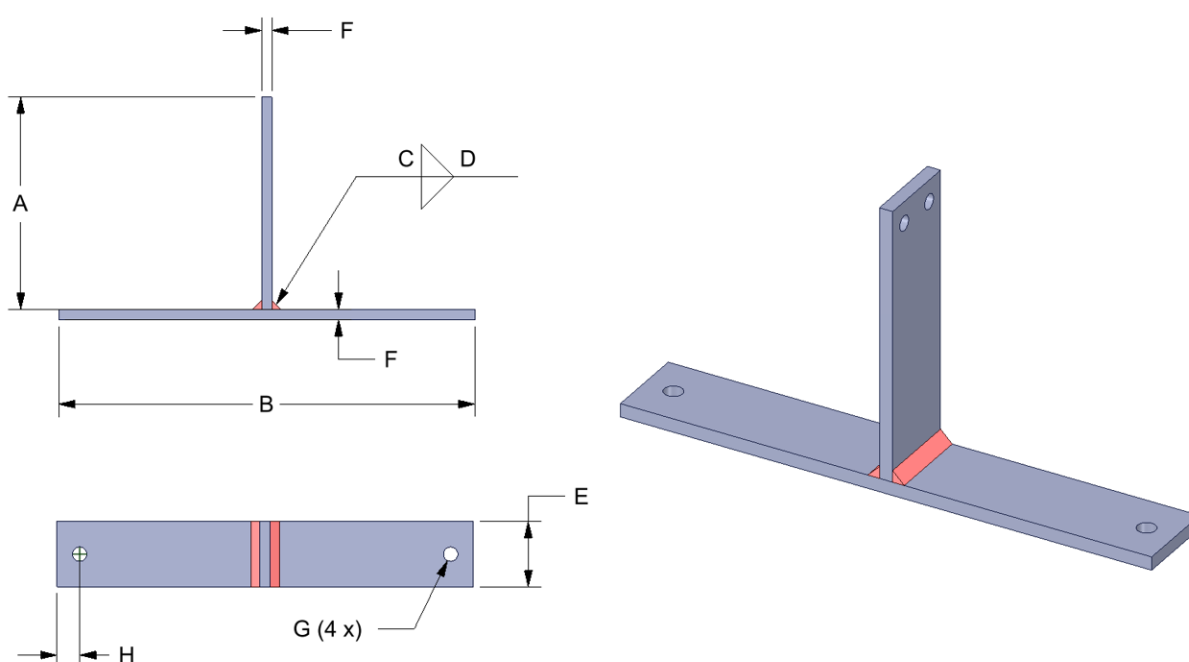
Fonte: Fornecido e autorizado pela Stara Indústria de Implementos Agrícolas.

Como pode ser verificado no esquema de projeto da Figura 61, a utilização de curvas $S-N$ híbridas torna-se uma prática intermediária, reduzindo consideravelmente o tempo e custo para obter as propriedades de fadiga da junta, agregando maior confiabilidade, pois utiliza dados de ensaios com número de corpos de prova reduzidos, associados a dados simulados. As normas muitas vezes são muito gerais, o que leva a previsões com grandes erros, muitas vezes a favor da segurança. Já os métodos puramente experimentais garantem maior confiabilidade,

mas muitas vezes são proibitivos, pois na etapa de projeto não se tem tempo e nem recursos para realizá-los. Neste contexto, nas seções subsequentes, é apresentada a metodologia que será utilizada neste trabalho para a realização das análises de fadiga de uma junta soldada do tipo *T* com penetração parcial e com transferência de carga.

A geometria da junta de filete soldada em *T* estudada, é apresentada na Figura 63, sendo que as dimensões dos corpos de prova estão apresentadas na Tabela 19.

Figura 63 - Geometria e dimensões da junta soldada do tipo *T*.



Fonte: do autor

Tabela 19 - Dimensões em milímetros dos corpos de prova.

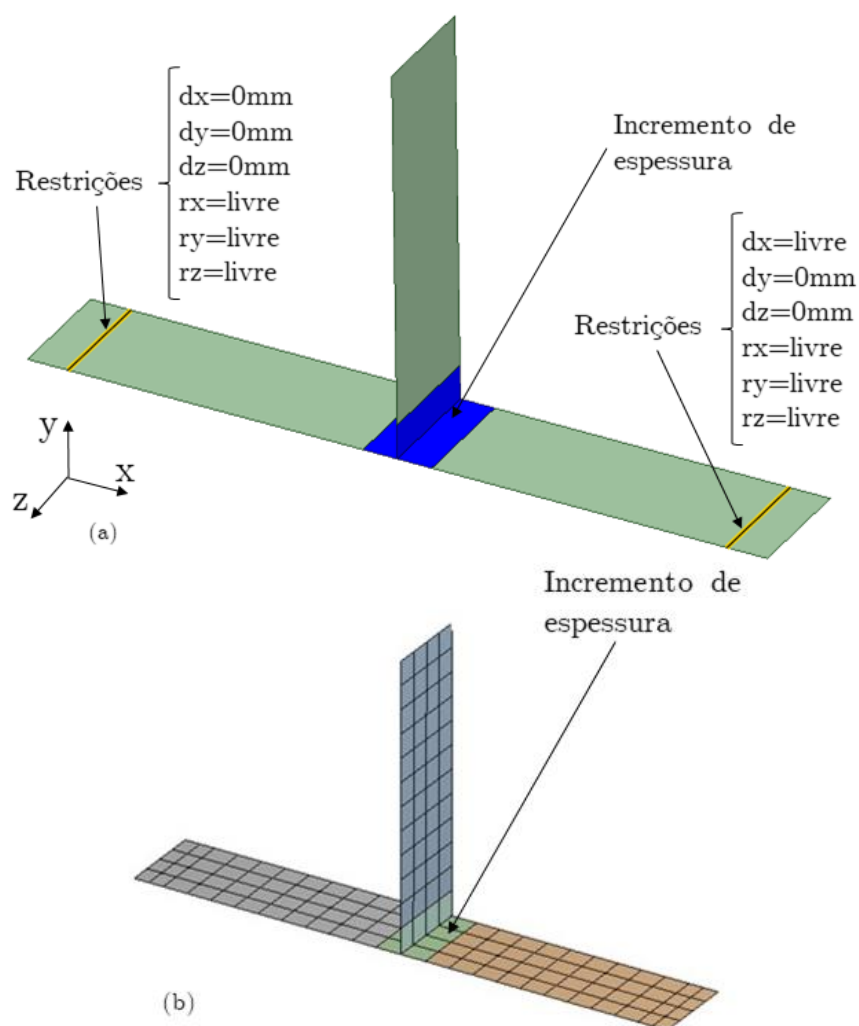
F (espessura)	A (altura)	B (comprimento)	C	D	E (largura)	G	H
12.7	163	320	8,5	50	50	11	17.5

Fonte: do autor

Outra decisão importante, que deve ser definida no início do projeto, é a escolha da abordagem para obtenção da tensão na região da junta soldada para posterior cálculo da vida em fadiga. Conforme descrito na Seção 2.5, as abordagens mais utilizadas são: tensão nominal, tensão estrutural e entalhe efetivo. No presente trabalho a abordagem de tensão nominal foi escolhida devido a geometria e carregamento que atuam no detalhe soldado, e também porque como comentando anteriormente, será utilizada a norma ABNT NBR 8800 (2008), a qual usa o método da tensão nominal.

O modelo de cálculo para obtenção das tensões na junta soldada será executado através do método de elementos finitos utilizando as técnicas de modelagem da solda com incremento de espessura, conforme descrito na Seção 2.6.3. O enfoque principal dos estudos são para modelos de elementos finitos de casca, sendo rodada uma análise estática linear. A geometria modelada usando a técnica de incremento de espessura é exibida na Figura 64 (a) e a malha de elementos finitos mapeada empregada para a junta soldada testada é mostrada na Figura 64 (b). A malha foi construída usando elementos de casca de 8 nós com tamanho máximo de elemento de 12.5 mm. A escolha dos elementos de casca de 8 nós foi feita porque, de acordo com NIEMI (1995), em geral os elementos de casca produzem excelentes resultados para este tipo de junta soldada. O tamanho dos elementos foi definido por motivos de convergência. A distância entre suportes é de 285 mm. As condições de contorno também são representadas na Figura 64 (a), onde d significa translação e r representa rotação.

Figura 64 – (a) Geometria, condições de contorno e (b) Malha de elementos finitos da junta soldada.



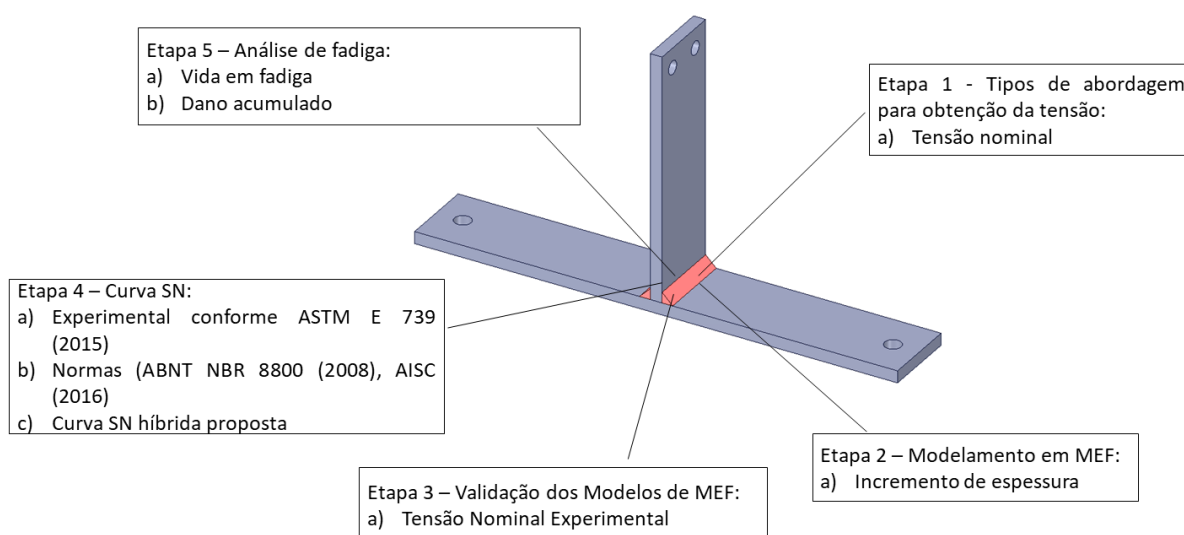
Fonte: do autor

Na análise de fadiga, as propriedades de fadiga do material foram usadas conforme a referência normativa ABNT NBR 8800 (2008) e conforme a metodologia híbrida proposta, possibilitando a comparação dos resultados de vida e dano de fadiga.

Quanto ao tipo de carregamento, o foco principal está em carregamentos com amplitude variável, objetivando verificar qual a influência da utilização de curvas $S-N$ híbridas no cálculo do dano acumulado. Os carregamentos utilizados nesta aplicação são os mesmos usados na Etapa 6, da Seção 3.2.2.

Na Figura 65 apresenta-se um resumo geral dos estudos, métodos e considerações a serem levadas em conta no desenvolvimento deste trabalho.

Figura 65 - Esquema geral de desenvolvimento dos estudos e análises.



Fonte: do autor

4 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados dos estudos, análises, simulações e ensaios mecânicos descritos na metodologia, sendo apresentada uma discussão dos resultados obtidos ao final de cada estudo. Os resultados foram apresentados na mesma sequência descrita na metodologia, a fim de facilitar o entendimento e organização do trabalho.

4.1 Simulações estatísticas de curvas $S-N$ usando Simulações de Monte Carlo

Os estudos apresentados nas Seções 3.1.2 e 3.1.3 são impossíveis de serem realizados apenas através de procedimentos experimentais, pois os testes de fadiga são demorados e caros. Neste contexto, simulações estatísticas foram usadas para avaliar vários aspectos de ensaios de fadiga, buscando principalmente entender melhor os parâmetros envolvidos em ensaios de fadiga, informações relevantes para a definição da metodologia proposta. Através dos estudos paramétricos, também foi possível desenvolver boas práticas que irão possibilitar que engenheiros de testes tenham informações relevantes para auxiliar na decisão da melhor configuração do teste que atenda a necessidade de utilização dos dados. As normas muitas vezes apresentam informações não tão claras e não apresentam exemplos de aplicação, sendo que através do método de simulação estatística proposto no presente trabalho, foi possível fazer aplicação de diferentes configurações de experimento e principalmente, avaliar quantitativamente os parâmetros envolvidos e sua influência, o que somente através de métodos puramente experimentais seria inviável, devido à quantidade de estudos que foram realizados.

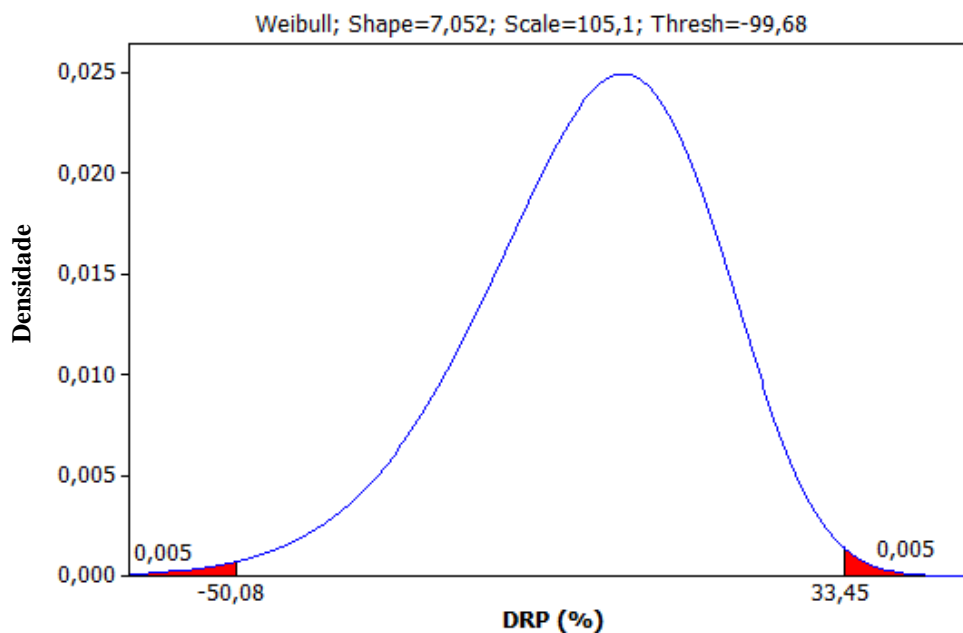
4.1.1 Simulações estatísticas de curvas $S-N$ – Análise paramétrica

Nesta seção objetiva-se através de diversos estudos levando em conta a dispersão dos dados de fadiga, verificar a diferença relativa percentual (DRP) de curvas simuladas em relação a curva de referência, quando se utilizam número de corpos de prova reduzidos, sendo esta a principal hipótese do presente trabalho. Com base nos Estudos 1 a 10 desta seção, busca-se responder a seguinte pergunta: É mais eficiente realizar ensaios de fadiga com maior replicação, ou seja, com menos níveis de tensão e mais corpos de prova por nível, ou menor replicação com mais níveis de tensão e menos corpos de prova por nível?

Na Tabela 20 são apresentados os resultados quantitativos referentes as simulações realizadas, levando em conta os dados do ensaio de fadiga apresentados na Figura 47 e Tabela 13. O principal resultado de saída das simulações foi a DRP , mais especificamente o envelope da DRP , o qual representa a máxima DRP calculada nos níveis de tensão alto e baixo para uma

probabilidade de ocorrência de 99% utilizando uma distribuição de *Weibull* de 3 parâmetros. Para melhor entendimento do envelope da *DRP*, a Figura 66 apresenta a distribuição de *Weibull*, juntamente com os percentis de 0.005 e 0.995. No caso apresentado na Figura 66, o envelope da *DRP* é o valor de 50,08%, pois é a maior *DRP*.

Figura 66 – Distribuição de *Weibull* com 3 parâmetros com percentis de 0.005 e 0.995.

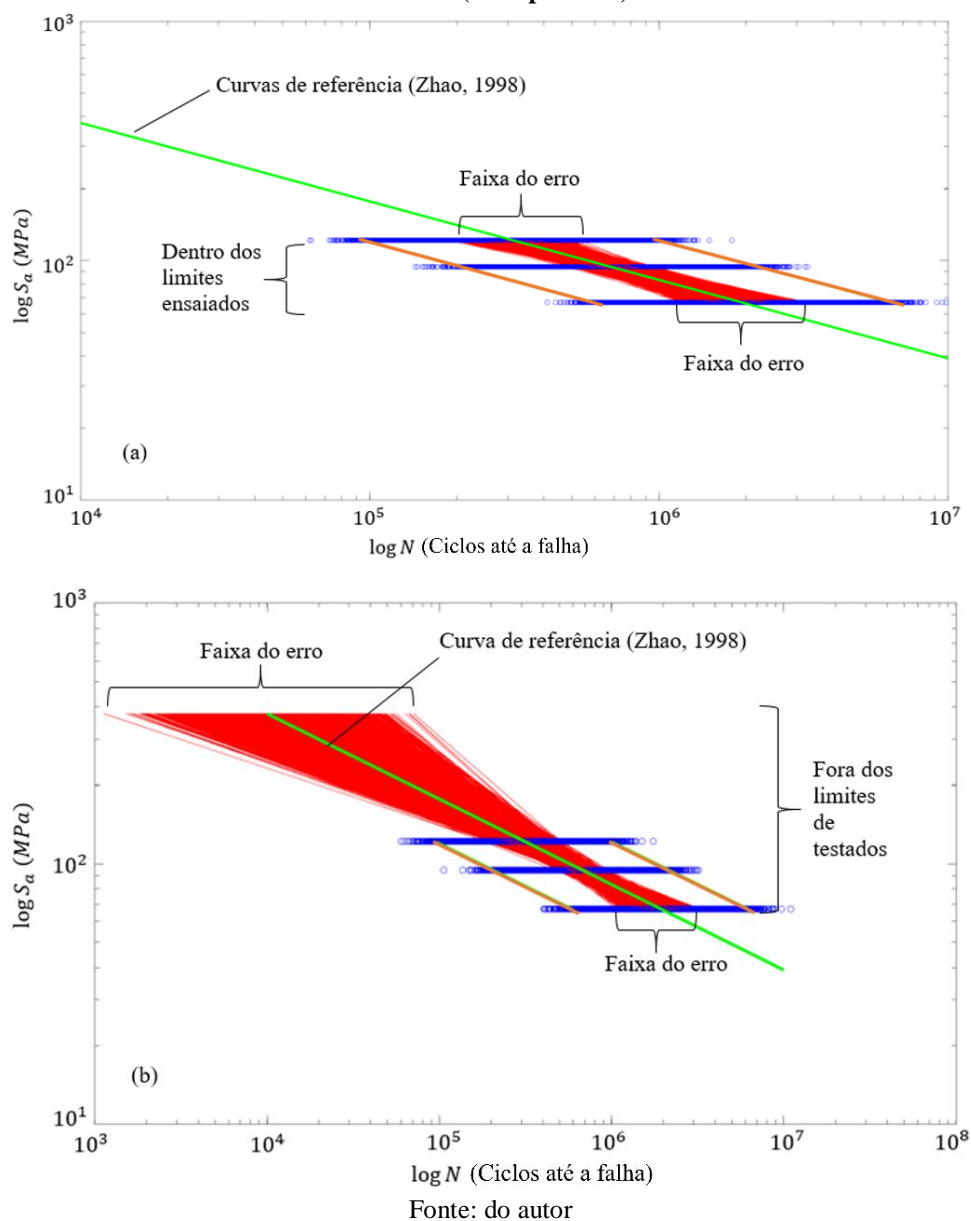


Fonte: do autor

Em alguns dos estudos que serão apresentados abaixo, dois tipos de avaliações da *DRP* foram realizados, um calculando o envelope da *DRP* dentro da faixa de tensões ensaiada, conforme pode ser visto na Figura 67 (a), ou seja, sem extrapolar os limites do ensaio, e outra avaliação extrapolando a utilização do modelo de fadiga para fora dos limites ensaiados, de acordo com a Figura 67 (b), sendo a faixa de vida avaliada neste caso de 10^4 e 2×10^6 ciclos. Extrapolar os limites do modelo é uma prática não indicada na estatística e que pode gerar grandes erros nas previsões de vida em fadiga, conforme resultados que serão apresentados neste capítulo. As linhas laranjas nas Figuras Figura 67 (a) e (b), representam o limite superior e inferior considerando a faixa de 3σ , ou seja, três desvios padrões acima e abaixo da curva média de referência, representada pela linha verde.

Os Estudos 1 a 4 foram realizados com objetivo de verificar a influência do número de níveis de tensão, mantendo-se 2 corpos de prova por nível (replicação de 50% em todos os estudos). O estudo 1 e os estudos 5 a 10 foram conduzidos com intuito de avaliar qual a influência do aumento da replicação, quando são utilizados 2 níveis de tensão, sendo a replicação de cada estudo foi de 50%, 60%, 67%, 75%, 80% e 83%, respectivamente.

Figura 67 - Exemplo de avaliação dos resultados (a) dentro dos limites do ensaio e (b) fora dos limites ensaiados (extrapolando).



Os resultados para os Estudos 1 a 4, realizados utilizando diferentes quantidades de níveis de tensão, podem ser verificados na Tabela 20 e na Figura 68, os quais indicam que com o aumento do número de níveis, sendo que ocorre conseqüentemente, o aumento do número de corpos de prova total utilizados no ensaio, mas se mantém constante a replicação por nível de tensão, a *DRP* tende a diminuir consideravelmente quando foram utilizados 6 níveis de tensão (12 corpos de prova no total), verificando-se uma redução da *DRP* da ordem de 35% sem extrapolar e 22% extrapolando os limites do ensaio. Para os Estudos 1, 2 e 3, verifica-se que houve menor influência do número de níveis, apresentando uma redução na *DRP* muito menor,

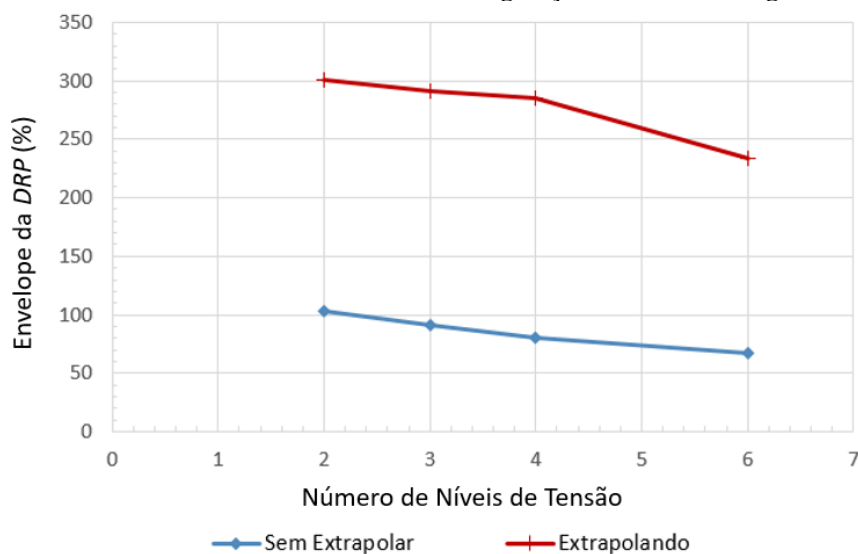
da ordem de 22% sem extrapolação e de 5% com extrapolação, comparando-se os Estudos 1 e 3.

Tabela 20 - Resultados das simulações de 10000 curvas S-N por estudo.

Configurações do Estudos					Resultados dos Estudos – 99% de ocorrência (<i>Weibull</i> - 3 parâmetros)	
Estudo	Nº de CP's	Nº de Níveis	Nº de CP's por nível	Replicação (%)	Envelope <i>DRP</i> (%) – Sem extrapolar	Envelope <i>DRP</i> (%) – Extrapolando
1	4	2	2 - 2	50%	103	301
2	6	3	2 - 2 - 2		92	291
3	8	4	2 - 2 - 2 - 2		80	285
4	12	6	2-2-2-2-2-2		67	234
5	5	2	2 - 3	60%	93	279
6	6		2 - 4	67%	89	268
7	6		3 - 3	67%	77	233
8	8		4 - 4	75%	65	200
9	10		5 - 5	80%	56	179
10	12		6 - 6	83%	50	164

Fonte: do autor

Figura 68 – Influência do número de níveis de tensão na geração de curvas S-N geradas com $RP=50\%$.

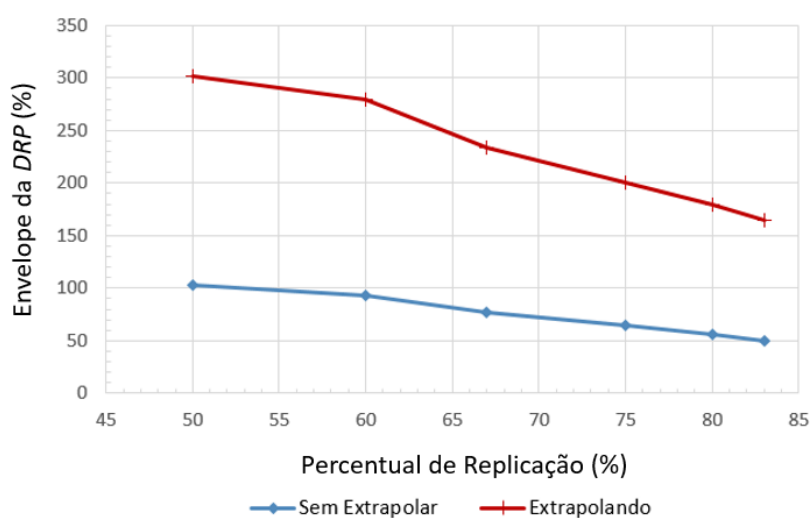


Fonte: do autor

Através do Estudo 1 e dos Estudos 5 a 10, notou-se que quando o número de níveis é mantido fixo (2 níveis de tensão) e varia-se a replicação percentual (de 50% a 83%), as *DRP* tende a diminuir significativamente, verificando-se uma redução da *DRP* da ordem de 51.5% sem extrapolar e 45% extrapolando os limites do ensaio, sendo assim, aumento de replicação é mais efetivo. Na Figura 69 pode ser verificado claramente o que foi concluído nesse parágrafo, pois com o aumento da replicação, a redução da *DRP* é da ordem da metade, tanto com ou sem extrapolação.

Comparando-se os Estudos 4 e 10, os quais possuem número de corpos de prova totais iguais, sendo 12 corpos de prova para ambos os casos, nota-se que foi mais vantajoso a utilização de menos níveis de tensão com maior replicação de dados, corroborando com a conclusão anterior. Isso também foi verificado, quando se compararam os resultados da *DRP* para os Estudos 2 e 7, e também para os Estudos 3 e 8, mostrando que é melhor em ensaios de fadiga, escolher maior replicação e menos níveis de tensão, pois maior replicação permite obter uma melhor avaliação da variabilidade dos dados em cada nível, ou seja, permite uma análise estatística mais detalhada.

Figura 69 – Influência da replicação na geração de curvas *S-N* geradas com dois níveis de tensão.



Fonte: do autor

Através dos resultados apresentados nas Figura 68 e Figura 69, pode-se verificar que o aumento da replicação sempre é uma boa escolha em ensaios de fadiga. Já o aumento de níveis de tensão somente apresentou grande influência para o Estudo 4. Segundo LITTLE (1975), um número maior de níveis é necessário quando não se conhece muito bem a forma da curva de fadiga, o que em muitos casos, tal como no presente estudo, já é bem conhecida da literatura disponível.

4.1.2 Simulações estatísticas - Configurações de ensaios conforme normas

Os estudos apresentados nesta seção, os quais foram conduzidos conforme indicações normativas serão extremamente importantes, pois servirão de norteador quanto à faixa da *DRP* que estão presentes nos ensaios comumente realizados, podendo fornecer dados valiosos para a validação das metodologias propostas no presente trabalho, bem como fornecer subsídios para possibilitar que as conclusões apresentadas na Seção 4.1 sejam mais assertivas e fortes. O foco

dos estudos será para dados utilizáveis em projeto e dados confiáveis estatisticamente, conforme classificação da norma ASTM E 739 (2015) e BS ISO 12107 (2015). A norma JSME S 002 (1994), a qual prevê um número de amostras menor, também é objeto de estudo e comparação.

Para todas as configurações dos testes de fadiga simulados apresentados na Tabela 21, as diretrizes da ASTM E 739 (2015) foram consideradas. Os principais resultados da avaliação foram as *DRP* em cada nível de tensão, mais especificamente, o envelope da *DRP*. O envelope representa o *DRP* máximo, considerando o valor absoluto obtido para toda a faixa de vida de teste em cada configuração.

Avaliando os resultados da Tabela 21, verifica-se claramente que as análises e simulações acima mencionadas, indicaram que os valores das estimativas das propriedades de fadiga eram fortemente dependentes das escolhas dos parâmetros de configuração nos experimentos de fadiga. Algumas recomendações e boas práticas no planejamento de teste de fadiga são propostas com base nos resultados obtidos na análise paramétrica, com a intenção de contribuir para o estado da arte em experimentos de fadiga e fornecer ao engenheiro de teste uma melhor escolha de parâmetros experimentais, como replicação, número de níveis de tensão e razão de tensão, entre outros. O desafio em experimentos de fadiga para determinação de propriedades de materiais, é principalmente saber como gerenciar fatores que são frequentemente conflitantes, do ponto de vista de equilíbrio entre confiabilidade e viabilidade técnica, esta última muito ligada aos custos e o tempo prolongado para obter esses dados. Vários estudos buscaram um equilíbrio entre custos e confiabilidade, que é um dos objetivos do presente trabalho.

O efeito do número total de corpos de prova e do número de níveis de tensão, associados ao percentual de replicação, podem ser verificados nas Figura 70 (a) e 70 (b), respectivamente. Estes gráficos permitem uma melhor avaliação da relação entre os três principais parâmetros envolvidos na Equação 15 da norma ASTM E 739 (2015), sendo eles o percentual de replicação *PR*, o número total de amostras n_s e o número de níveis de tensão *L*. Conforme pode ser visto na Figura 70 (a), em um mesmo gráfico pode-se avaliar a influência do n_s e *PR*, sendo que na Figura 70 (b), pode ser verificada a influência *L* e *PR* na *DRP*. Nas duas figuras, o percentual de replicação é representado pelas séries de dados, conforme pode ser visto na legenda das figuras.

Tabela 21 – Diferentes configurações e resultados obtidos para testes de fadiga simulados de acordo com ASTM E 739.

Configurações de teste					Resultados				
Configuração	Número de corpos de prova	PR (%)	Número de níveis de tensão	Número de corpos de prova por nível	DRP (%) Nível de tensão superior		DRP (%) Nível de tensão inferior		Envelope da DRP (%)
					Max	Min	Max	Min	Max
1	16	88	2	8	36	-63	32	-66	66
2	24		3		41	-57	43	-57	57
3	14	86	2	7	44	-74	45	-84	84
4	21		3		37	-65	43	-70	70
5	12	83	2	6	50	-84	45	-80	84
6	18		3		41	-71	40	-70	71
7	24		4		37	-67	40	-63	67
8	15	80	3	5	46	-77	47	-93	93
9	20		4		41	-68	44	-72	72
10	12	75	3	4	100	-52	107	-51	107
11	16		4		95	-44	92	48	95
12	20		5		73	-40	85	-44	85
13	24		6		59	-40	69	-41	69
14	12	67	4	3	96	-50	133	-53	133
15	15		5		44	-83	49	-116	116
16	18		6		78	-42	95	-47	95
17	21		7		78	-40	91	-48	91
18	24		8		61	-49	83	-47	83

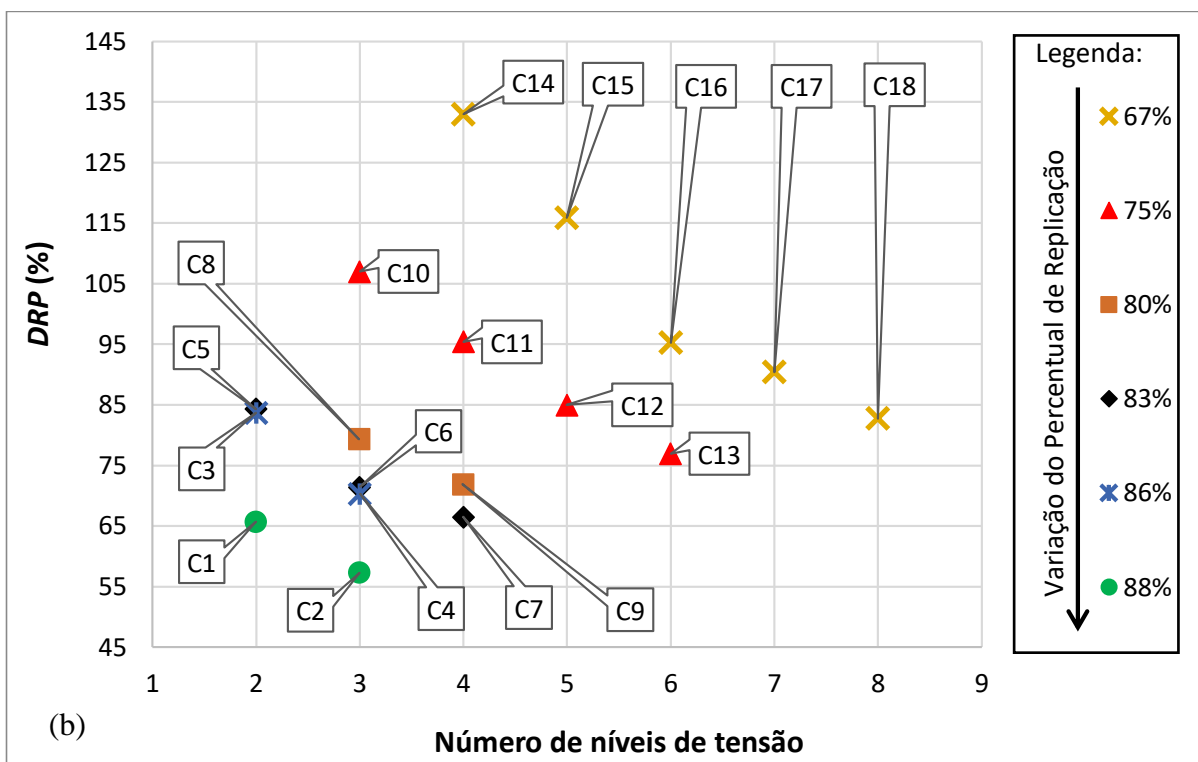
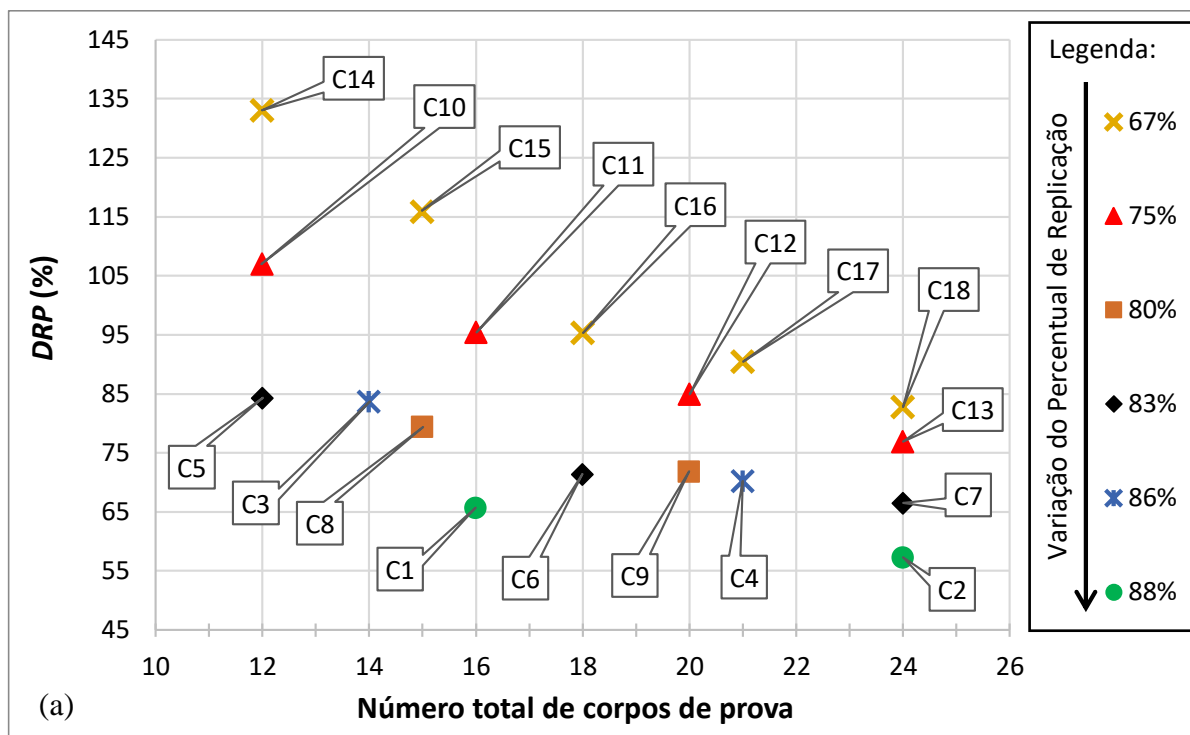
Fonte: do autor

Com base nos resultados da Tabela 21 e resumidos graficamente na Figura 70 (a), aumentar o número de corpos de provas tendeu a reduzir a *DRP*, mas não em todos os casos. Como pode ser visto na Figura 70 (a), a porcentagem de replicação teve grande influência, conforme já verificado na Seção 4.1.1. Comparando, a Configuração 5 (12 amostras e 83% de replicação) com a Configuração 18 (24 amostras e 67% de replicação), o número de amostras dobrou, no entanto, a *DRP* dos resultados ficou na faixa de 84% em ambos os casos. Com base nisso, é possível escolher uma melhor configuração do teste de fadiga, buscando um melhor equilíbrio entre confiabilidade e custos, usando os resultados obtidos por simulações, conforme mostrado na Tabela 21.

Na Figura 70 (b), verificou-se que o aumento do número de níveis de tensão associados à replicação constante reduz a *DRP*, uma vez que o aumento do número total de corpos de prova testados (n_s) melhora a estimativa dos parâmetros de curva. No entanto, as configurações que melhor apresentam um equilíbrio entre confiabilidade e tempos/custo, são as configurações que

apresentam menos número de níveis de tensão e com maior replicação, tal como as configurações 3, 5 e 8, por exemplo.

Figura 70 – Resultados para todas as simulações: (a) número total de corpos de prova versus envelope da *DRP* e (b) número de níveis de tensão versus envelope da *DRP*.

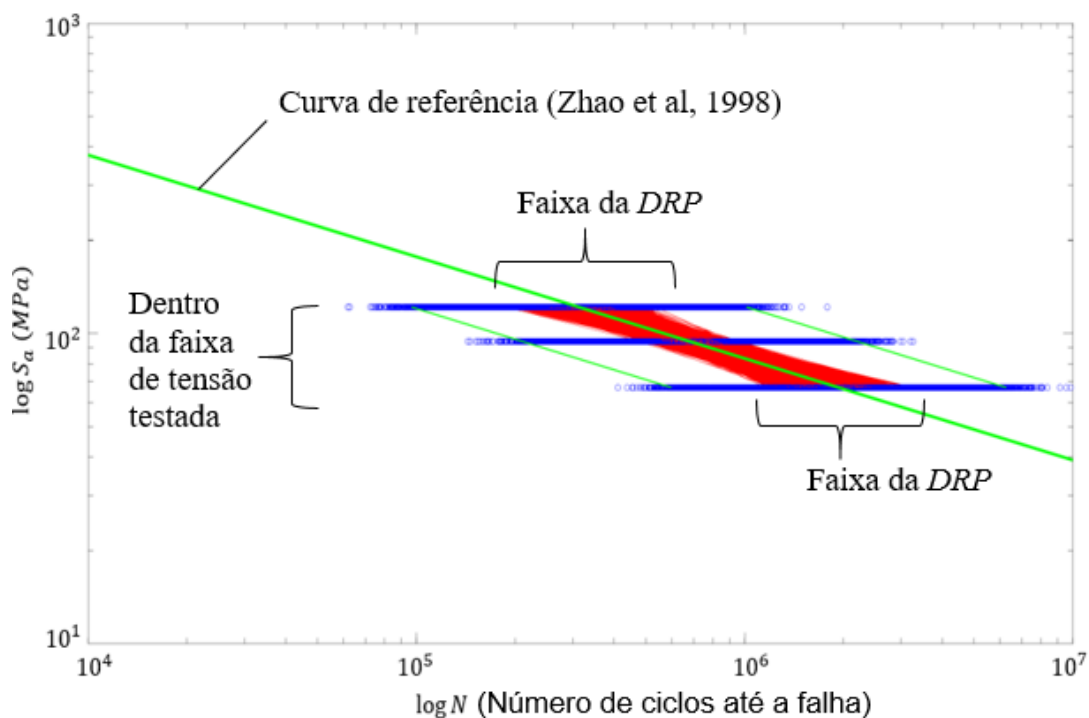


Fonte: do autor

A Tabela 21 apresenta os resultados da máxima e mínima *DRP* nos níveis de tensão superior e inferior. A máxima até a mínima *DRP* é definida como o intervalo da *DRP* em cada nível. Quando o intervalo da *DRP* é avaliado sem extrapolação dos limites testados, os maiores *DRP* são obtidos nestes níveis extremos. Quando são usadas extrapolações de modelos de fadiga fora da faixa de vida testada, a *DRP* aumenta significativamente, conforme mostrado na Figura 71.

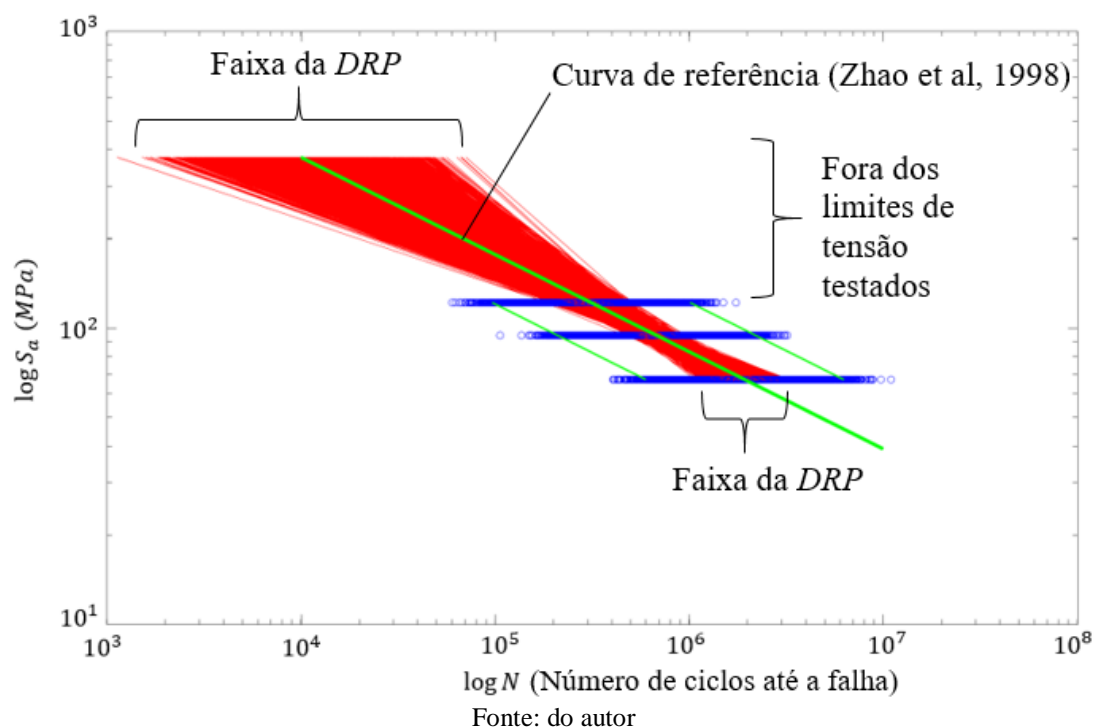
As Figuras 71 e 72 ilustram os resultados para duas situações: uma considerando apenas o uso do modelo de fadiga dentro da faixa de vida testada, e a outra considerando a extrapolação fora dos limites testados (não recomendado na estatística). A última prática não é apropriada. Em ambas as figuras, a linha verde é uma curva de referência de acordo ZHAO, GAO e SUN (1998). Os pontos azuis são corpos de prova simulados e as linhas vermelhas sobrepostas dentro do limite de tensão testado, são as curvas *S-N* para cada uma das *n* simulações. Quando o engenheiro de teste usa o modelo fora dos limites dos níveis experimentados, a *DRP* é da ordem de 607% (nível superior) neste caso e, portanto, não é recomendado o uso do modelo obtido fora dos limites de tensão e vida testados.

Figura 71 – Curvas *S-N* simuladas pelo método de Monte Carlo considerando a *DRP* dentro da faixa de tensões testadas.



Fonte: do autor

Figura 72 – Curvas $S-N$ simuladas pelo método de Monte Carlo considerando a DRP extrapolando a faixa de tensões testadas.



A Tabela 22 mostra duas configurações de teste, uma de acordo com as normas BS ISO 12107 (2015) e outra de acordo com a JSME S 002 (1994), que foram simulados para quantificar o intervalo do DRP , tornando possível comparar as diferentes configurações testadas. Os resultados da BS ISO 12107 (2015) foram próximos aos da ASTM E 739 (2015) quando 24 amostras foram usadas com 88% de replicação (Configuração 2, Tabela 21). Os resultados obtidos usando o JSME S 002 (1994) foram piores do que aqueles para todas as configurações avaliadas na Tabela 21, evidenciando que baixas replicações não são recomendadas quando o tipo de teste de fadiga é para fins de projeto ou confiáveis.

Tabela 22 – Diferentes configurações e resultados obtidos para testes de fadiga simulados de acordo com BS ISO 12107 e JSME S 002.

Configurações de teste					Resultados				
Configuração	Número de corpos de prova	RP (%)	Número de níveis de tensão	Número de corpos de prova por nível	DRP (%) Nível de tensão superior		DRP (%) Nível de tensão inferior		Envelope da DRP (%)
					Max	Min	Max	Min	
ISO	30	80	6	5	57	-37	58	-38	58
JSME	8	50	4	2	168	-57	134	-57	168

Fonte: do autor

Com os resultados dos estudos apresentados nessa seção, foi possível apresentar algumas boas práticas no planejamento de um teste de fadiga quando são utilizadas referências normativas. Como estes resultados não são o foco principal do presente trabalho, as boas práticas e recomendações propostas para planejamento de testes de fadiga foram apresentadas no Anexo 2.

Como fechamento das simulações estatísticas baseadas em simulações de Monte Carlo, com os resultados apresentados nas Seções 4.1.1 e 4.1.2, foi possível definir a configuração de testes com número de corpos de prova reduzidos, com dois níveis de tensão, para o desenvolvimento e aplicação da metodologia híbrida para geração de curvas $S-N$. Quanto ao número de corpos de prova utilizados, iniciou-se com uma replicação de 50%, ou seja, a configuração testada ficou com dois níveis de tensão e com dois corpos de prova por nível, totalizando 4 corpos de prova no total, sendo um número de amostra consideravelmente reduzido, quando comparado com as referências normativas estudadas na presente seção. Pode-se concluir nesta etapa do presente trabalho, que caso seja necessário aumentar o número de amostras para melhorar as previsões obtidas pela metodologia híbrida, estas amostras serão ensaiadas nos dois níveis de tensão já escolhidos, possibilitando o aumento da replicação de dados, pois foi comprovado que maior replicação apresenta melhores resultados, ao invés de aumentar o número de níveis de tensão.

4.2 Avaliação e validação dos métodos propostos para geração de curvas $S-N$ híbridas

Esta seção tem como objetivo apresentar os resultados obtidos utilizando a metodologia híbrida proposta na Seção 3.2, a qual possibilita a geração de curvas $S-N$ com número de corpos de prova reduzidos. Conforme mencionado na Seção 3.2, inicialmente foram realizados estudos com dados de fadiga já existentes (conforme procedimento metodológico apresentado nas Seções 3.2.2 e 3.2.3), sendo que o próximo passo será a realização de novos estudos para validação da metodologia proposta conforme esquema já apresentado na Figura 50, utilizando dados de ensaios em corpos de prova de uma junta soldada do tipo T (conforme apresentado na Seção 3.2.4). Os resultados referentes aos três procedimentos de validação são apresentados nas Seções 4.2.1, 4.2.2 e 4.2.3, seguindo a ordem apresentada na metodologia, a fim de facilitar o entendimento e organização dos resultados.

4.2.1 Procedimento de validação com base somente em simulações de Monte Carlo – Parte 1

Essa primeira parte do procedimento de validação teve como principal objetivo a verificação e validação da configuração de teste adotada nas seções anteriores com base em simulações de Monte Carlo, para posteriormente realizar o procedimento de validação com ensaios reais, somente da melhor configuração obtida, reduzindo o tempo para validação e os custos envolvidos. A configuração inicial usada nesta seção possui dois níveis de tensão, com dois corpos de prova por nível, ou seja, totalizando 4 corpos de prova no total.

Usando simulações de Monte Carlo, 100 curvas foram geradas para a avaliação do método proposto, conforme descrito na Seção 3.2 para a junta soldada estudada. A Figura 73 mostra a curva de referência experimental, obtida com dados reais de acordo com ZHAO, GAO e SUN (1998) e a curva $S-N$ definida de acordo com a NBR 8800 sobreposta às 100 curvas $S-N$ simuladas iniciais e híbridas para os Casos 1 e 2 da Tabela 17 (Seção 3.2.2), permitindo uma avaliação qualitativa dos resultados.

Figura 73 – Curvas $S-N$ sobrepostas para 100 simulações para o (a) Caso 1 e (b) Caso 2.

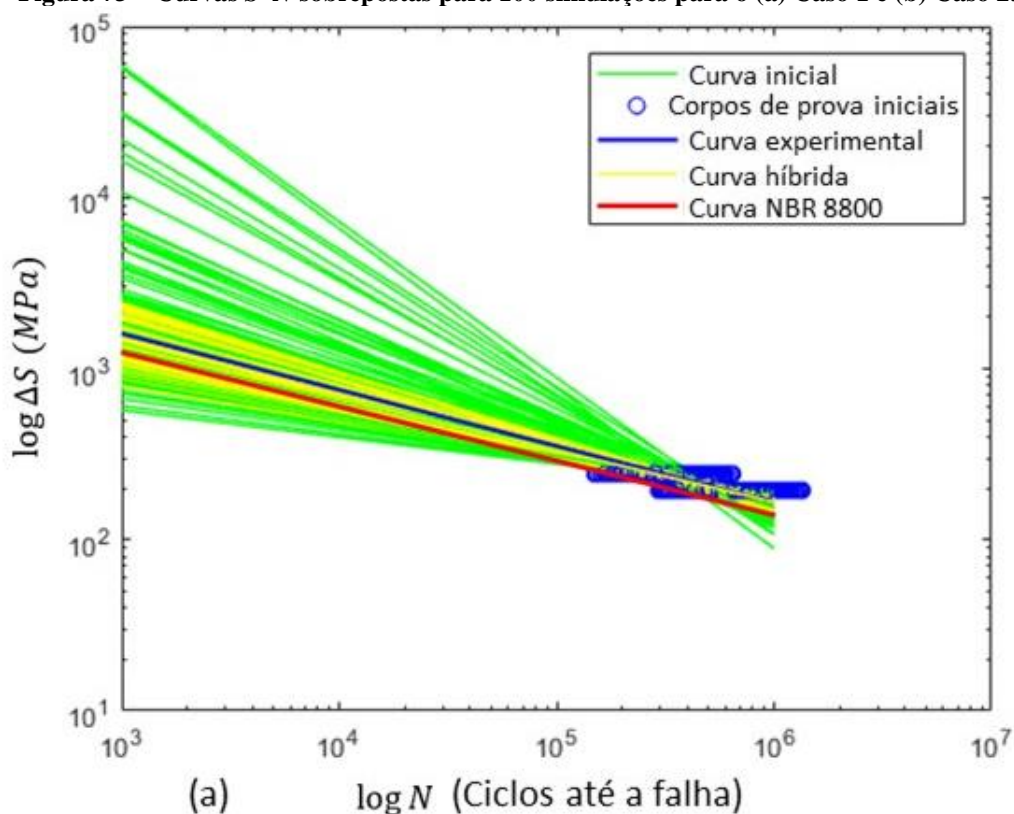
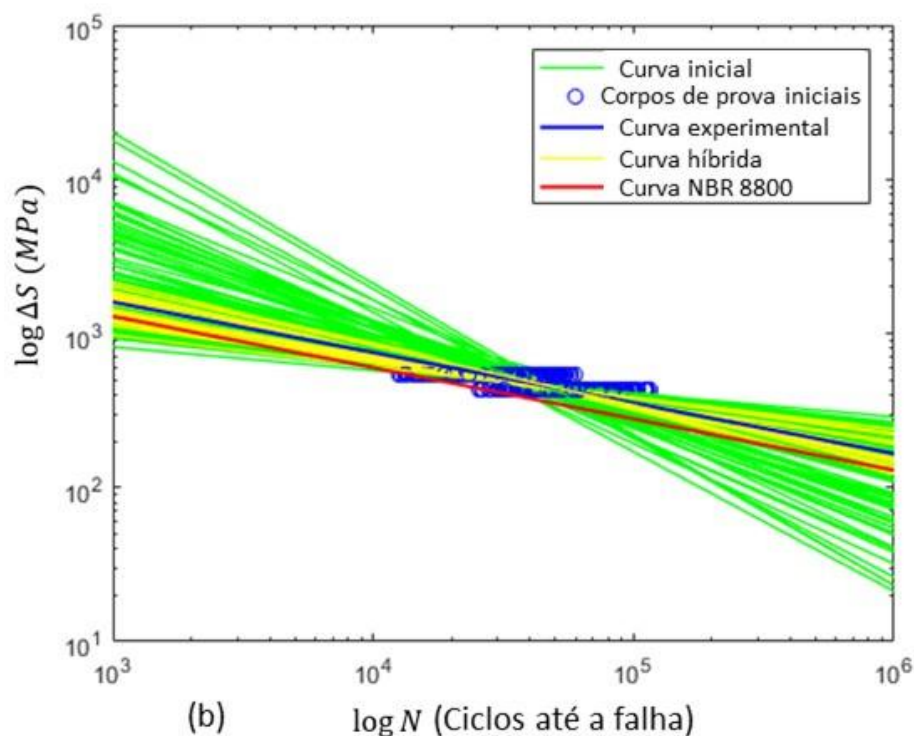


Figura 73 (continuação) – Curvas $S-N$ sobrepostas para 100 simulações para o (a) Caso 1 e (b) Caso 2.



Fonte: do autor

Nota-se pela análise qualitativa da Figura 73, que as inclinações das curvas (em escala log-log) obtidas pelo método híbrido não variam tanto quanto às curvas iniciais, mantendo as curvas híbridas dentro de uma faixa estreita, que possui significado físico para a junta soldada, de acordo com dados disponíveis na literatura, obtendo maior precisão nos resultados de fadiga.

O resumo quantitativo dos resultados é apresentado na Tabela 23, para os Casos 1 e 2. As Figura 74 e 75 apresentam resultados complementares para curva inicial e abordagem híbrida, apresentando uma distribuição de densidade de probabilidade (distribuição de *Weibull* de 3 parâmetros) para a *DRP* do dano e da vida de fadiga, respectivamente.

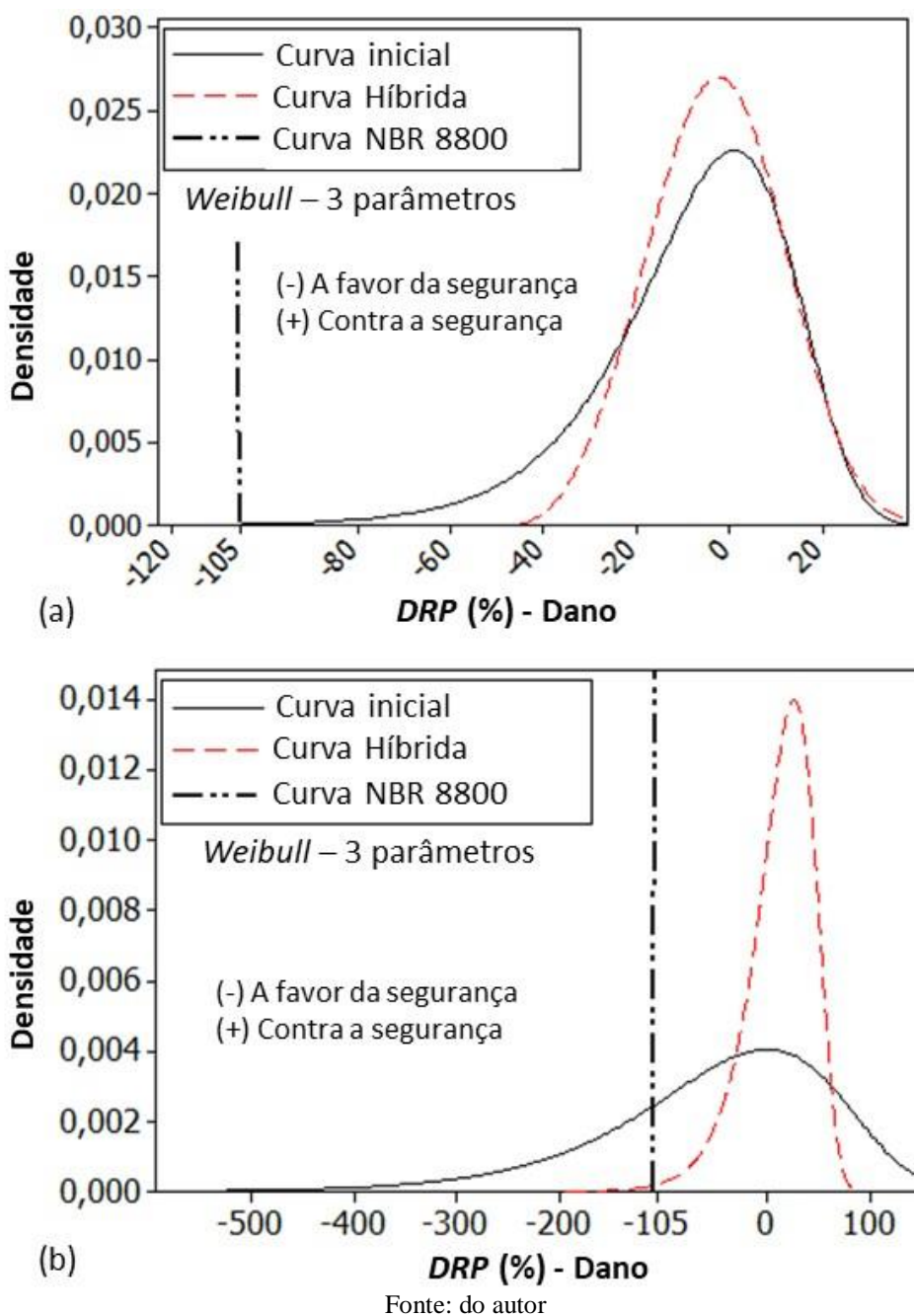
Tabela 23 – Resultados obtidos para as 100 curvas simuladas.

Parâmetro	Métodos			
	Experimental (Referência)	NBR 8800	Curva inicial e abordagem híbrida	
			Caso 1	Caso 2
<i>DRP</i> – Vida (%)	0 (ref.)	53 (AS)	Ver Figura 75 (a)	Ver Figura 75 (b)
<i>DRP</i> – Dano (%)	0 (ref.)	-105 (AS)	Ver Figura 74 (a)	Ver Figura 74 (b)
Dano	1.00 (ref.)	2.05 (AS)	-	-

Nota: (AS) a favor da segurança; (CS) Contra a Segurança

Fonte: do autor

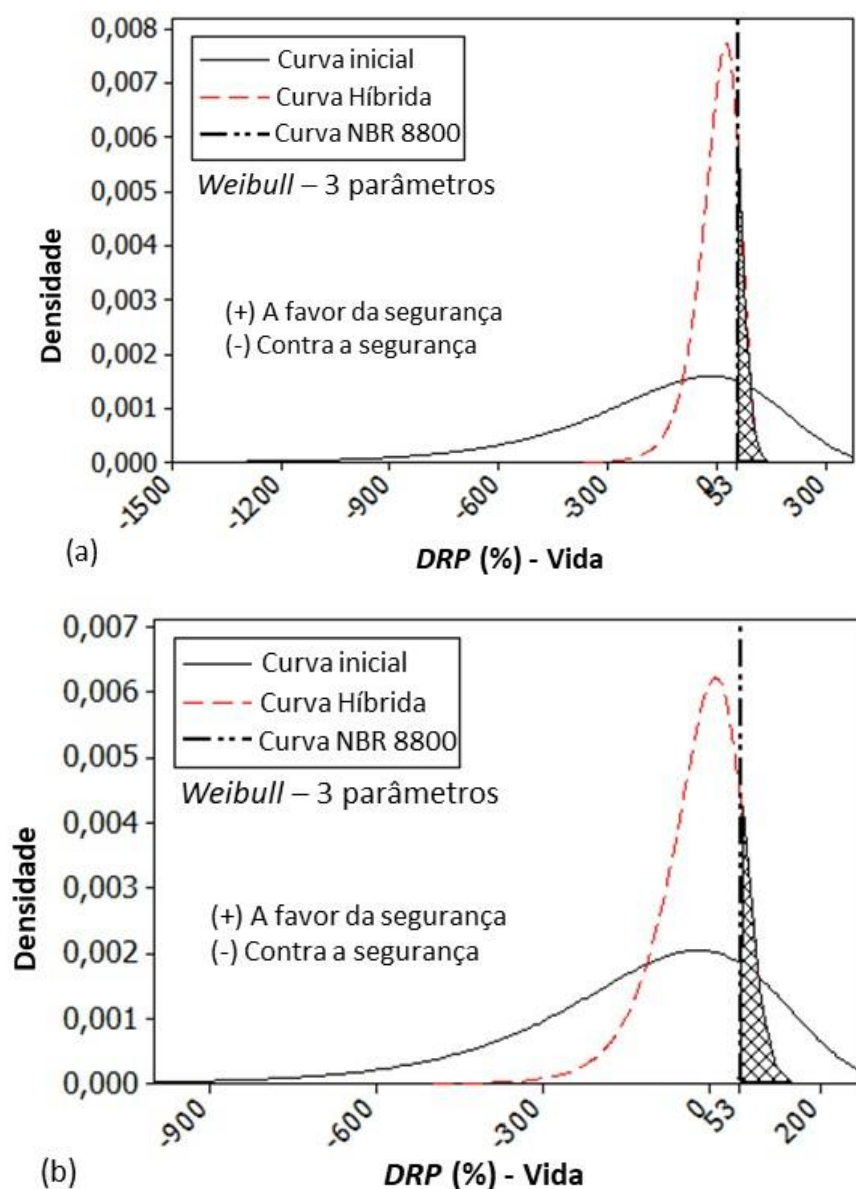
Figura 74 – Densidade de probabilidade para o *DRP* para o dano estimado para o (a) Caso 1 e (b) Caso 2.



Comparando o método proposto com a curva *S-N* de acordo com a NBR 8800 (2008) para o dano estimado, conforme Figura 74, a *DRP* para ambos os casos de estudo é menor quando a Abordagem Híbrida é considerada. Note que para a curva da NBR 8800, o *DRP* é -105% (AS – A favor da segurança), enquanto que para o método híbrido para o Caso 1, o *DRP* é de -30% (AS) a 25% (CS - Contra a segurança), considerando 95% de probabilidade de ocorrência. Para o Caso 2, o dano é de -66 a 62%, também considerando 95% de probabilidade de ocorrência. Também se pode concluir que quando se utiliza a Abordagem Híbrida, para o

Caso 1, a probabilidade de exceder a *DRP* obtida pela ABNT NBR 8800 (2008) é desprezível, e para o Caso 2, a probabilidade de ultrapassar é de 0,52%, sendo em ambos os casos muito pequena.

Figura 75 – Densidade de probabilidade para a *DRP* para a vida em fadiga estimada para o (a) Caso 1 e (b) Caso 2.



Fonte: do autor

Sobre os resultados da avaliação da vida em fadiga apresentados na Figura 75, a *DRP* da curva da norma ABNT NBR 8800 (2008), para ambos os casos de estudo, está dentro da distribuição de probabilidade para a curva híbrida. A Abordagem Híbrida tem 17.9% (Caso 1) e 12.7% (Caso 2) de probabilidade de exceder a *DRP* obtida usando a curva da ABNT NBR 8800 (2008), como pode ser visto na Figura 75, sendo que as áreas sombreadas representam

esta probabilidade. Observe que a vida útil de fadiga da *DRP* referente a ABNT NBR 8800 (2008) é de 53% (AS), enquanto que para o método híbrido do Caso 1 é de -140% (CS) a 90.2% (AS) e para o Caso 2 é de -201% (CS) 88% (AS), ambos considerando 95% de probabilidade de ocorrência.

Pode-se concluir a partir das avaliações acima que existem vantagens na utilização do método proposto. Avaliando os resultados para o dano usando o método híbrido, tanto para o Caso 1 como para o Caso 2, apresentaram uma redução considerável da *DRP*, conforme pode ser visto na Figura 74, mesmo quando a faixa da *DRP* para as estimativas de vida são bastante grandes, tal como pode ser visto na Figura 75. Portanto, para projetos que considerem critérios de vida finita para análise de dano em fadiga, o método proposto é bastante eficiente.

Cabe salientar que nas duas curvas estudadas (híbrida e NBR 8800) foram consideradas as curvas médias, ou seja, a curva com confiabilidade de 50%. Para fins de projeto, um coeficiente apropriado deve ser usado para ajustar a curva para a probabilidade de falha desejada e nível de confiança, que garantam confiabilidade desejável na análise de fadiga, diminuindo assim o *DRP* para o lado inseguro.

4.2.2 Procedimento de validação final com base em dados experimentais reduzidos (dados de ZHAO, GAO e SUN (1998)) associados a dados simulados – Parte 2

Nesta seção foi utilizado o algoritmo apresentado na Figura 51 (Seção 3.2.1), apenas modificando a Etapa 2. Nesta etapa, originalmente, corpos de prova reais devem ser testados, porém nesta seção, os dados experimentais obtidos por ZHAO, GAO e SUN (1998) foram empregados para validação da metodologia híbrida proposta. Um número reduzido de dados experimentais (dois espécimes) foi selecionado aleatoriamente entre os resultados apresentados por ZHAO, GAO e SUN (1998) em cada nível de tensão, conforme já apresentado na Tabela 14. Essas amostras aleatórias iniciais são apresentadas na Tabela 24, para cada nível de tensão considerado, permitindo comparar a abordagem híbrida com a curva experimental *S-N* obtida com alta replicação.

Tabela 24 – Dados experimentais de fadiga iniciais selecionados randomicamente a partir da Tabela 14.

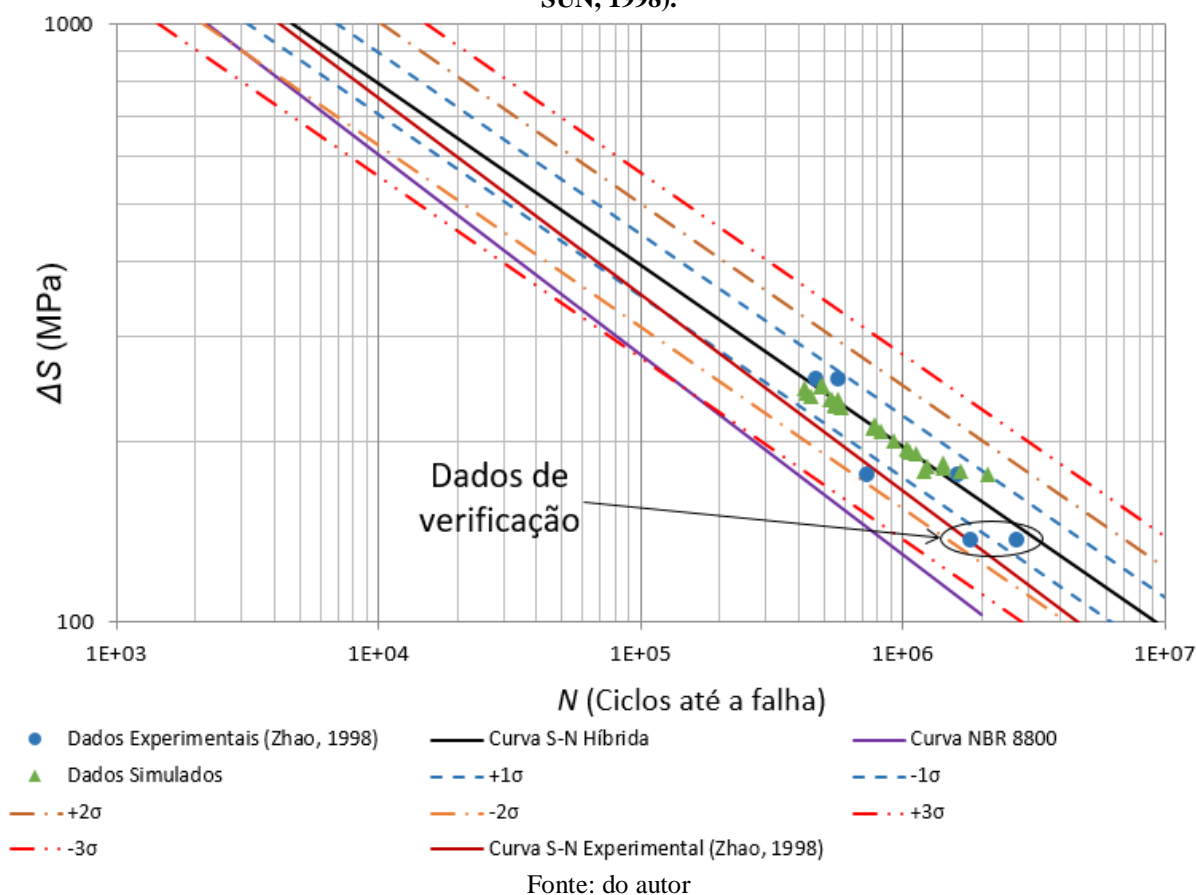
Faixa de Tensão (MPa)	CP1 (Ciclos)	CP2 (Ciclos)
254.8	467000	569000
176.4	730000	1610000
137.2	1810000	2730000

Fonte: do autor

O critério de validação, consiste em avaliar se os dados de verificação estão dentro do intervalo 3σ da curva híbrida média, onde σ foi considerado igual a 0.17, segundo ERIKSSON, LIGNELL et al. (2003).

Pode-se observar na Figura 76 que os dados experimentais de verificação estão dentro da faixa de 2σ , aprovando o método proposto de acordo com o critério estabelecido, o qual já foi utilizado por MARIN e NICOLETTO (2009). Note que todos os dados experimentais (seis espécimes testados) estão dentro das curvas de $\pm 2\sigma$ deslocadas da curva híbrida. Portanto, com base nos resultados da Figura 76, conclui-se que a abordagem híbrida apresenta uma boa aproximação, principalmente considerando o tempo necessário para obter uma curva $S-N$ totalmente experimental.

Figura 76 – Gráfico comparativo para verificação do método proposto usando dados de (ZHAO, GAO e SUN, 1998).



4.2.3 Procedimento de validação final com base em dados experimentais reduzidos (do autor) associados a dados simulados – Parte 3

Inicialmente são apresentados os resultados das propriedades de fadiga da junta soldada testada, obtidos utilizando a abordagem híbrida proposta. Dois corpos de prova foram testados

em dois níveis de tensão (4 corpos de prova no total) para gerar a curva $S-N$ inicial de acordo com a Etapa 2 da Figura 51 (Seção 3.2.1), sendo os resultados dos ensaios de fadiga, listados na Tabela 25. Os valores de faixa de tensão nos níveis de tensão usados para gerar os dados iniciais foram 700 e 450 MPa. Outros dois corpos de prova foram testados com 380 MPa para uso no processo de validação.

Tabela 25 – Dados experimentais de fadiga iniciais da junta soldada testada.

Faixa de Tensão (MPa)	1	2
700	8089	8580
450	154006	106296
380	287612	361919

Fonte: do autor

A Tabela 26 mostra os dados de entrada usados para gerar a curva $S-N$ Híbrida.

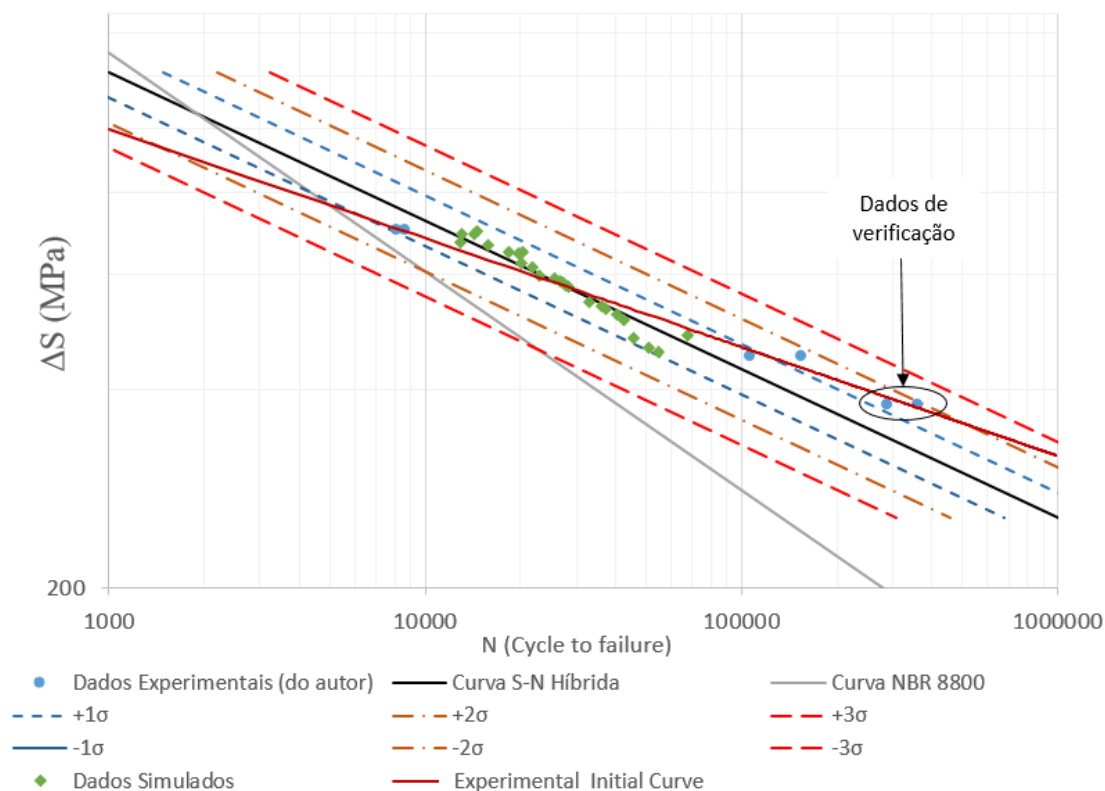
Usando o fluxograma da Figura 51 (Seção 3.2.1) e os dados das Tabelas 25 e 26, foi possível obter as propriedades de fadiga da junta soldada, usando a metodologia proposta com um número reduzido de ensaios, os quais são importantes para melhorar a qualidade dos corpos de prova simulados. As propriedades de fadiga obtidas com a abordagem híbrida foram $C=2.04133E+16$ e $m=4.3$. A Figura 77 exhibe gráficos dos dados experimentais, a curva $S-N$ de acordo com a ABNT NBR 8800 (2008) e a curva híbrida (incluindo a curva média e as curvas correspondentes a $\pm 1\sigma$, $\pm 2\sigma$ e $\pm 3\sigma$). Dois corpos de prova no nível mais baixo de tensão foram testados para verificação da abordagem híbrida (identificados na Figura 77). O critério utilizado para a validação é verificar se os dados de verificação se encontram dentro do intervalo $\pm 3\sigma$ da curva híbrida média, onde σ é o desvio padrão igual a 0.17 segundo ERIKSSON, LIGNELL, et al. (2003).

Tabela 26 – Valores dos parâmetros de entrada para a estimativa da curva $S-N$ híbrida.

Item	Parâmetros de entrada	Valores
1	Número total de corpos de prova a serem testados experimentalmente	4
2	Tensão máxima do ciclo de carregamento para os níveis de tensão superior e inferior, respectivamente (kS_y)	0.86 S_y e 0.55 S_y
3	Razão de tensão (R)	-1
4	Propriedades estáticas do material S_y e S_{ut} (obtidas em ensaios de tração simples)	$S_y = 408$ MPa $S_{ut} = 500$ MPa
5	Número de corpos de prova virtuais a serem simulados (i)	25
6	Distribuição de probabilidade do expoente m	Ver Figura 53

Fonte: do autor

Figura 77 – Gráfico comparativo para verificação do método proposto com dados do autor.



Fonte: do autor

Pode-se observar na Figura 77 que os dados experimentais de verificação estão dentro da faixa de $\pm 2\sigma$, aprovando o método proposto de acordo com o critério estabelecido. Observe que todos os dados experimentais (seis amostras testadas) mostrados na Tabela 25 estão dentro das curvas de $\pm 2\sigma$ deslocadas da curva híbrida. Portanto, com base nos resultados da Figura 77, conclui-se que a abordagem híbrida apresenta uma boa aproximação.

4.3 Resultados dos procedimentos experimentais

Nesta seção são apresentados os resultados dos procedimentos experimentais, os quais foram importantes para a caracterização dos materiais utilizados e para a obtenção dos dados de fadiga, os quais foram usados para a validação da metodologia híbrida proposta, após a mesma já ter sido exaustivamente avaliada através de simulações estatísticas de Monte Carlo.

4.3.1 Caracterização do material base e material de adição

Nesta seção serão apresentados os resultados dos ensaios realizados para caracterização do material base utilizado na fabricação dos corpos de prova soldados.

Os dados do material base são apresentados na Tabela 27, sendo os dados do material de adição no processo de soldagem (arame ER70S6), as quais foram obtidas através do certificado emitido pela Lincoln Electric, são apresentados na Tabela 28.

Tabela 27 – Propriedades químicas do aço NBR 6656 LNE 38.

Composição química (%)							
	C	Si	Mn	P	S	Al	Nb
Especificação de norma	0.12 máx.	0.35 máx	1.60 máx.	0.025 máx	0.015 máx	0.015 máx	0.12 máx
Medido	0.092	0.077	0.85	0.022	0.005	0.038	0.034

Fonte: do autor

Tabela 28 - Propriedades químicas do material de adição ER70S6.

Composição química (%)			Propriedades mecânicas típicas		
C	Si	Mn	S_y (MPa)	S_{ut} (MPa)	Alongamento (%)
0.08	0.9	1.50	470	560	26

Fonte: (ESAB, 2017)

Os resultados dos ensaios de tração para obtenção das propriedades mecânicas dos corpos de prova estão apresentados na Tabela 29, sendo apresentados os valores de resistência mecânica médias obtidas através 5 amostras. O valor médio das propriedades mecânicas será utilizado como dado de entrada nos estudos e definições dos ensaios de fadiga.

Tabela 29 - Propriedades mecânicas do material base.

Identificação	S_{ut} (MPa)	S_y (MPa)
CP 16	500.66	410.11
CP 17	498.91	407.97
CP 18	497.25	408.36
CP 19	498.27	404.50
CP 20	504.17	410.52
Média	499.85	408.29
Desvio Padrão	2.71	2.39

Fonte: do autor

4.3.2 Corpos de prova Fabricados

Nesta seção são apresentados os corpos de prova fabricados para possibilitar os ensaios de fadiga com número de corpos de prova reduzidos, a fim de obter as propriedades de fadiga da junta soldada. Foram confeccionados 6 corpos de prova. As dimensões dos corpos de prova já foram apresentadas na Tabela 19. O material de adição e suas propriedades foram apresentadas na Seção 4.3.1.

Alguns dos corpos de prova finalizados são apresentados na Figura 78.

Figura 78 - Corpos de prova finalizados.

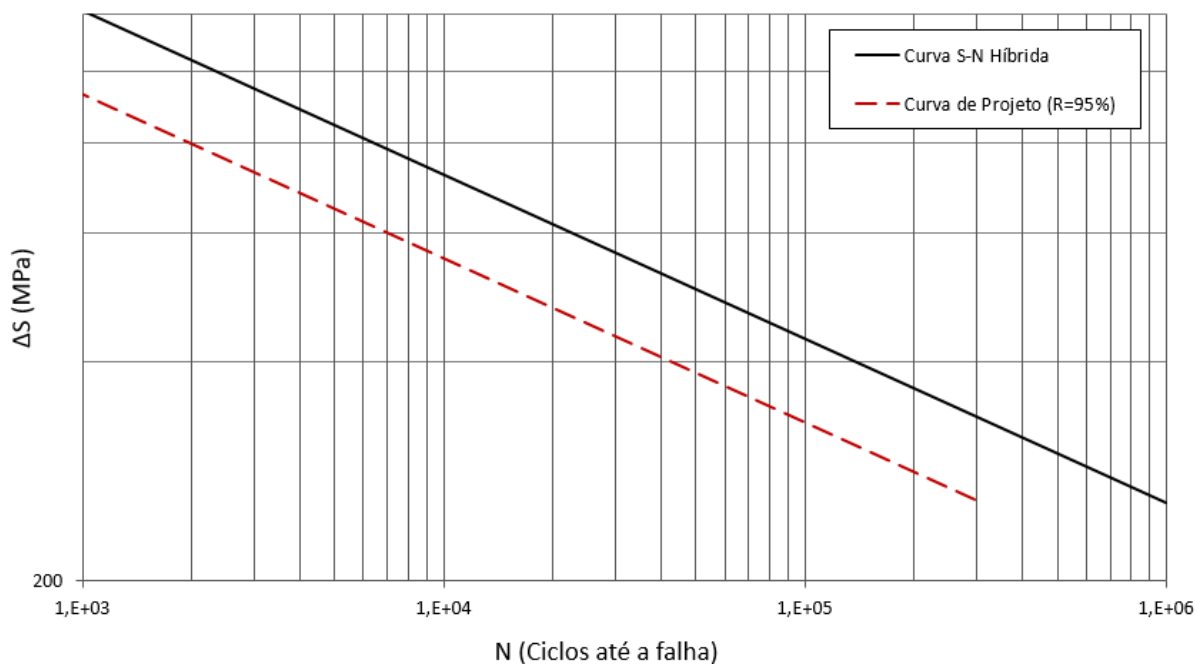


Fonte: do autor

4.3.3 Resultados dos ensaios de fadiga (Curva $S-N$ de projeto)

Os resultados de fadiga já foram apresentados na Seção 4.2.3 na Tabela 25, pois os mesmos foram utilizados no procedimento de validação da metodologia proposta. Nesta seção é apresentada na Figura 79 a curva $S-N$ híbrida média (50% de confiabilidade) e a curva $S-N$ híbrida de projeto com 95% de confiabilidade, gerada com a aplicação do coeficiente de confiabilidade, procedimento padrão apresentado por SHIGLEY e MISCHKE (2005).

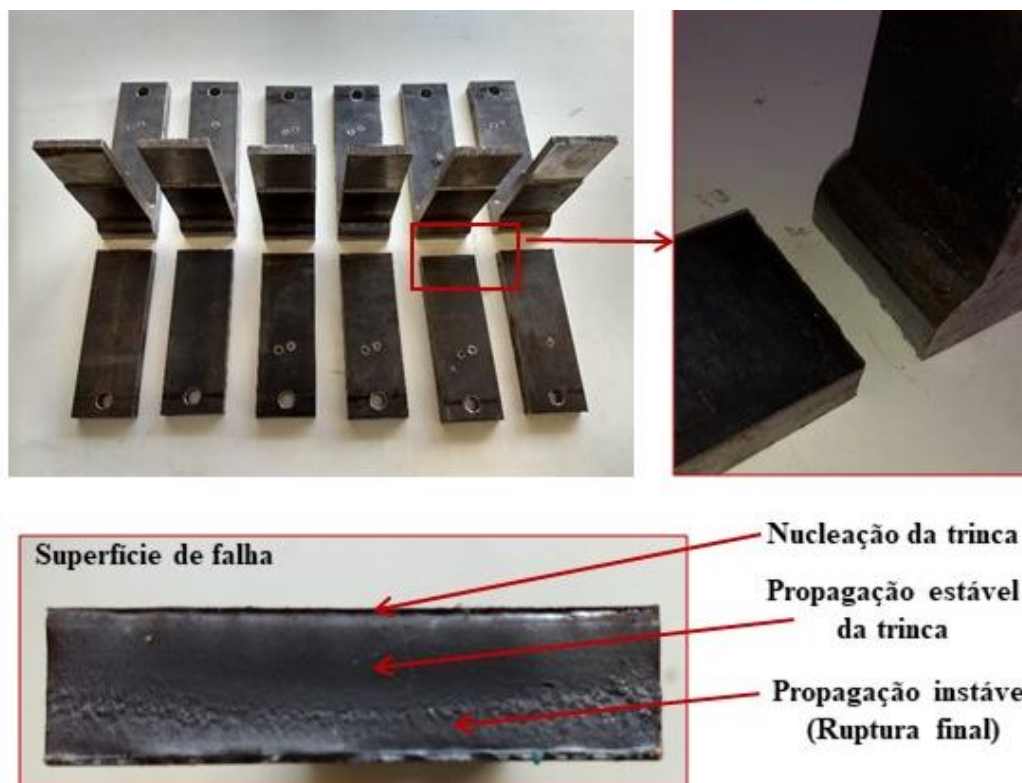
Figura 79 - Curva $S-N$ híbridas média e de projeto, com 50% e 95% de confiabilidade, respectivamente.



Fonte: do autor

Na Figura 80 são apresentados os corpos de prova fraturados, os quais apresentaram o mesmo modo de falha global. Como os ensaios foram conduzidos até a fratura total do corpo de prova, estão presentes as três fases no processo de falha por fadiga, sendo elas: 1) nucleação da trinca no pé da solda, 2) propagação estável e 3) ruptura final.

Figura 80 – Corpos de prova fraturados no ensaio de fadiga e análise da superfície de falha.



Fonte: do autor

4.4 Aplicação da metodologia de projeto à fadiga de uma junta soldada

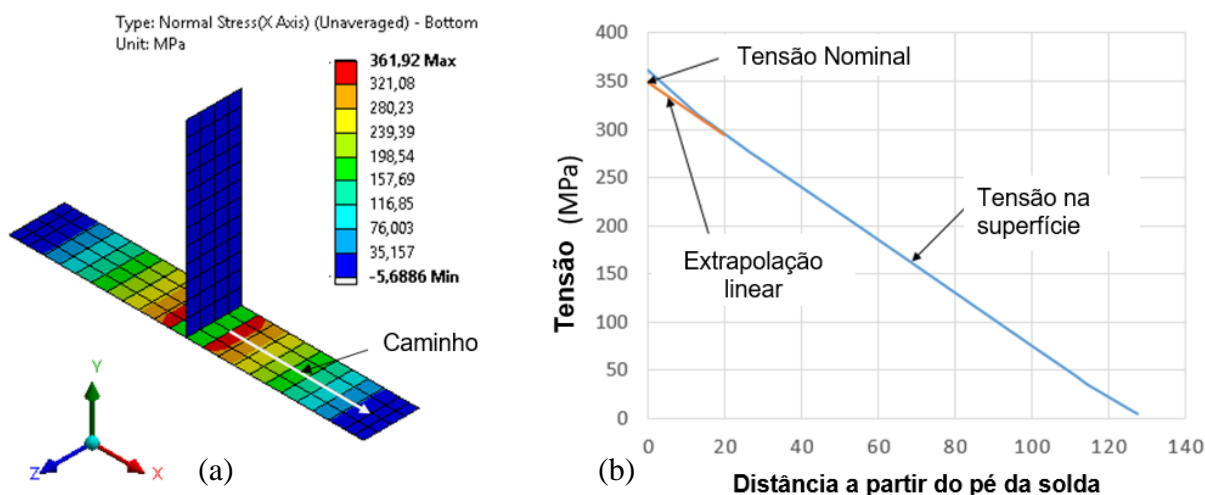
Na Seção 3.4 foi apresentada uma metodologia para projeto de estruturas soldadas, sendo desenvolvido o fluxograma da Figura 61, o qual tem como objetivo principal apresentar de uma forma completa e compacta, as principais decisões que o engenheiro deve tomar com base nos recursos e tempo disponível, para que a análise de durabilidade seja executada dentro de parâmetros aceitáveis e controlados de confiabilidade e segurança. Objetiva-se nesta seção fazer a comparação entre a curva $S-N$ híbrida e a curva da norma ABNT NBR 8800 (2008).

Nesta seção, utilizando a metodologia conforme fluxograma da Figura 61, desenvolveu-se um caso de aplicação de uma junta soldada de filete, utilizando a abordagem da tensão nominal para a obtenção da tensão no pé da solda. A junta foi modelada usando o método elementos finitos através do software *Ansys 19.0*, sendo que para obtenção das propriedades de fadiga do material foi utilizada a metodologia híbrida proposta, pois a mesma mostrou-se

satisfatória, atendendo aos recursos e tempo disponíveis, bem como se mostrou aceitável do ponto de vista de confiabilidade e segurança, quando comparada com a norma NBR 8800. Para avaliar o dano em fadiga, foi utilizado carregamento de amplitude variável representado por um espectro conforme já apresentado na Seção 3.2.2, Tabela 18.

O resultado da análise de elementos finitos é mostrado na Figura 81. Na Figura 81(a), apresenta-se a distribuição da tensão normal na direção x. A trajetória destacada foi usada para traçar as tensões, começando no pé da solda e estendendo-se perpendicularmente à solda (uma vez que, a tensão principal máxima ocorre nessa direção). A Figura 81 (b) mostra o método de extrapolação utilizado de acordo com ERIKSSON, LIGNELL et al. (2003), o qual foi utilizado obter a tensão nominal no pé da solda. A tensão nominal máxima do ciclo de carga de fadiga é de 350 MPa, para o nível de tensão superior.

Figura 81 – Resultados da análise de elementos finitos para a tensão no pé da solda.



Fonte: do autor

O próximo passo realizado foi a análise de fadiga para obter o dano e a vida de fadiga, usando a curva $S-N$ baseada na abordagem híbrida e na norma ABNT NBR 8800 (2008). Os resultados para junta soldada testada são apresentados na Tabela 30.

Tabela 30 – Resultados para a junta testada.

	Abordagem híbrida (V_a)	NBR 8800 (V_b)	DRP $= (V_a - V_b)/V_a \times 100$
Resistência à fadiga para 10^3 ciclos	1261 MPa	1301 MPa	-3.2 %
Resistência à fadiga para 10^6 ciclos	256 MPa	130 MPa	49.2 %
Dano	2.48	10.83	-336.7 %

Fonte: do autor

De acordo com a Tabela 30, a abordagem híbrida leva a resultados com boa precisão, como visto anteriormente na Seção 4.1 e 4.2. Avaliando a resistência para 10^3 ciclos, verifica-se que as duas abordagens são muito próximas. Para 10^6 ciclos, a diferença relativa entre as abordagens é maior. A resistência da NBR 8800 é cinquenta por cento menor que a resistência da abordagem híbrida para 10^6 ciclos.

Avaliando o dano, a diferença percentual relativa é ainda maior, sendo que o dano de acordo com a NBR 8800 é 336.7% maior do que a abordagem híbrida, e pode ser visto que a abordagem híbrida permite resultados mais precisos e menos conservadores que a norma NBR 8800. Segundo ERIKSSON, LIGNELL et al. (2003), os códigos de projeto e realidade não são a mesma coisa, uma vez que os códigos de projeto são geralmente muito gerais, permitindo um pouco de abordagens inovadoras e para aplicações estruturais que eles dão normalmente do “lado seguro”.

5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

O objetivo principal deste trabalho foi desenvolver um procedimento para obtenção de curvas $S-N$ baseado em dados experimentais com número de corpos de prova reduzidos e utilizar simulações estatísticas para completar os dados da análise para obtenção dos parâmetros do material, a fim de assegurar um desempenho adequado de vida útil de estruturas de aço e componentes mecânicos soldados. Dessa forma, nesse trabalho foram realizadas inicialmente simulações estatísticas utilizando o método de Monte Carlo, com intuito de entender os principais parâmetros que influenciam na qualidade das curvas $S-N$ obtidas experimentalmente, bem como quantificar as diferenças relativas percentuais (DRP) envolvidas nas previsões quando diferentes parâmetros são variados, ou seja, na primeira parte do desenvolvimento, efetuou-se uma análise paramétrica para identificar a sensibilidade de cada fator envolvido. Diferentes análises estatísticas foram executadas variando-se o número de corpos de prova, replicação, número de níveis de tensão, sendo que apenas um fator foi variado por vez, mantendo-se todos os outros fixos.

Para que o objetivo principal do presente trabalho fosse atingido, fez-se necessário avaliar de forma exploratória o estado da arte de métodos de obtenção de curvas $S-N$, o que possibilitou identificar possíveis aspectos que poderiam ser melhorados nos métodos existentes, possibilitando assim, o desenvolvimento e estabelecimento de uma proposta de metodologia para obtenção de curvas $S-N$ com número de corpos de prova reduzidos.

Este trabalho introduziu uma abordagem híbrida para obter a curva $S-N$, que combina dados estatísticos simulados com dados de testes de fadiga reais obtidos com um número reduzido de amostras. Inicialmente utilizando uma metodologia própria baseada no método de Monte Carlo que permite gerar várias curvas $S-N$, foi possível avaliar o desempenho do método proposto para obter curvas $S-N$ com boa precisão e menores custos. Posteriormente, a abordagem híbrida foi aplicada em um caso real (uma junta soldada de filete) para obter a curva $S-N$ usando apenas quatro corpos de provas como dados experimentais iniciais e, portanto, avaliar a vida em fadiga e dano acumulado. O MEF foi empregado para obter as tensões no pé da solda, e os espectros de carga e regra do Miner da DIN 15018 (1984) foram utilizados para a estimativa do dano. Os resultados obtidos para o caso real mostram que a abordagem proposta melhorou a precisão em comparação com a curva $S-N$ obtida pela norma ABNT NBR 8800 (2008) para a mesma classe de detalhe, tanto para a vida em fadiga quanto para as estimativas do dano. Alguns comentários adicionais podem ser feitos sobre a abordagem híbrida:

1. A metodologia proposta apresenta um custo-benefício equilibrado;
2. A metodologia proposta fornece uma avaliação do dano por fadiga com menor conservadorismo e maior precisão, principalmente levando em conta o tempo requerido para obtenção da curva $S-N$ híbrida;
3. Sempre que possível, ao trabalhar com fadiga em vida finita, é uma boa prática realizar os testes para valores mais altos de vida (fadiga de alto ciclo), já que nas condições reais de trabalho de vários equipamentos, o número de ciclos que ocorre nesta região é maior, e sendo possível reduzir os erros associados na vida de fadiga e dano. Entretanto, mesmo ao testar amostras com baixo/médio número de ciclos de vida, a metodologia proposta mostrou-se satisfatória, obtendo melhores resultados que os demais métodos utilizados para comparação;
4. A precisão da abordagem híbrida está ligada às probabilidades de distribuição da inclinação m , que devem ser obtidas levando-se em conta os detalhes da solda e os tipos de carga. Diversos dados estão disponíveis na literatura, sendo necessária uma busca para compilar esses dados e, posteriormente, realizar uma análise estatística.

Mesmo não sendo o objetivo principal deste trabalho, é importante salientar, que na área da fadiga de metais, alguns fatores experimentais tratados neste trabalho (por exemplo, *DRP* envolvidos em diferentes configurações de testes de fadiga) ainda não foram claramente discutidos. As informações geradas com base nas simulações de Monte Carlo e apresentadas no Anexo 2, são relevantes para engenheiros de teste, que independente do grau de conhecimento, permite um planejamento de teste de fadiga com mais embasamento e precisão, de acordo com o objetivo do teste. As normas fornecem informações importantes, mas nem sempre são claras e objetivas. Esta parte do trabalho ligada à avaliação de normas de ensaios, teve como objetivo apresentar informações complementares que podem auxiliar nas decisões sobre qual a melhor configuração, incluindo o número de espécimes, o número de níveis de tensão e o percentual de replicação. As recomendações apresentadas no Anexo 2, são um bom começo para o planejamento do teste de fadiga, e este trabalho espera ter acrescentado algumas informações sobre este assunto, porque o comportamento do material sob fadiga é complicado e depende de muitos fatores. As normas sempre que disponíveis, devem sempre ser tratado como um documento oficial.

Como desvantagens do método proposto, pode-se citar:

1. O método proposto depende do conhecimento da distribuição de probabilidades do coeficiente de inclinação m para o detalhe objeto de estudo ou de juntas similares;

2. As curvas híbridas tendem a ficar influenciadas pelos valores de inclinação m que apresentam maior probabilidade de ocorrência, de acordo com a distribuição de probabilidade adotada.

Como trabalhos futuros podem ser listados seguintes tópicos:

1. Realização de mais ensaios do mesmo tipo de junta T soldada, a fim de aumentar a replicação do teste, principalmente, buscando gerar uma curva $S-N$ conforme a norma (ASTM, E. 739, 2015) com dados com confiabilidade estatística, buscando possibilitar que a curva híbrida e a curva da NBR 8800, possam ser comparadas em relação a curva experimental de alta replicação e com dados com confiabilidade estatística;

2. A presente metodologia pode ser validada para outros tipos de juntas soldadas possibilitando generalizar sua aplicação;

3. A presente metodologia pode ser aplicada para novos estudos, os quais podem ter como objetivo a avaliação da influência do aumento da replicação nos dois níveis de tensão escolhidos para a realização dos ensaios de fadiga, sendo que no presente trabalho foi avaliado apenas replicação de 50%, podendo ser ainda avaliado para outros valores de replicação.

Como resultado do presente trabalho foram produzidos três artigos, sendo (1) um para um congresso da área de engenharia estrutural e (2) dois periódicos com fator de impacto, os quais estão referenciados no Anexo 4.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AASHTO. **Guide Specifications for fatigue Evaluation of Existing Steel Bridges**. AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION. USA. 1990.
- ABNT NBR 8800. **Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios**. Associação brasileira de normas técnicas. Rio de Janeiro. 2008.
- ALVES FILHO, A. **Elementos finitos: a base da tecnologia CAE**. 6. ed. São Paulo: Editora Érica, 2013.
- AMZALLAG, C. E. A. Standardization of the rainflow counting method for fatigue analysis. **International journal of fatigue**, v. 16, p. 287-293, 1994.
- ARIDURU, S. **Fatigue Calculation by Rainflow Cycle Counting Method**. MSME thesis - Middle East Technical University. Ankara, Turkey. 2004.
- ASTM E 1049. **Standard Practices for Cycle Counting in Fatigue Analysis**. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. 2005.
- ASTM E-9. **Guide for Fatigue Testing and the Statistical Analysis of Fatigue Data**. ASTM STP 91-A. American Society for Testing and Materials. 1963.
- ASTM, E. 466. **Standard practice for conducting force controlled constant amplitude axial fatigue tests of metallic materials**. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. 2015.
- ASTM, E. 739. **Standard Practice for Statistical Analysis of Linear or Linearized Stress-Life (SN) and Strain-Life**. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. 2015.
- ATZORI, B. et al. Fatigue design of complex welded structures. **International Journal of Fatigue**, v. 31, n. 1, p. 59-69, 2009.
- AYGÜL, M. **Fatigue analysis of welded structures using the finite element method**. CHALMERS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY. Gothenburg. 2012.
- BANNANTINE, J. A.; COMER, J. J.; HANDROCK, J. L. **Fundamentals of metal fatigue analysis**. Englewood Cliffs: NJ: Prentice-Hall, v. 480, 1990.
- BARSOM, J. M.; ROLFE, S. T. **Fracture and fatigue control in structures: Applications of fracture mechanics**. 2ª. ed. [S.l.]: ASTM International, 1977.
- BASQUIN, O. H. The exponential law of endurance tests. **American Society of Testing Materials**, v. 10, p. 625-630, 1910.
- BISHOP, N. W.; SHERRATT, F. **Finite element based fatigue calculations**. UK: NAFEMS, 2000.
- BRANCO, C. M.; FERNANDES, A. A.; CASTRO, P. M. S. T. **Fadiga de estruturas soldadas**. 2. ed. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 1999.
- BS 5400. **Steel, concrete and composite bridges. Code of practice for fatigue**. British Standard. London. 1980.

- BS 7608. **Fatigue of steel structures**. British Standard. London. 1993.
- BS ISO 12107. **Metallic materials–Fatigue testing–Statistical planning and analysis of data**. [S.l.]: International Organization for Standardization, 2015.
- BSK 99. **Swedish Regulations for Steel Structures**. Boverket: Sweden, 2003.
- CASAVOLA, C.; PAPPALLETTERE, C. Discussion on local approaches for the fatigue design of welded joints. **International Journal of fatigue**, v. 31, n. 1, p. 41-49, 2009.
- CASTILLO, E.; FERNANDEZ-CANTELI, A. **A unified statistical methodology for modeling fatigue damage**. Spain: Springer Science & Business Media, 2009.
- COLEMAN, J. J. Methods of Estimating Fatigue-Curve Parameters with a Limited Number of Specimens. **The Journal of the Acoustical Society of America**, v. 35, n. 6, p. 817-820, 1963.
- COSTA, L. P. **Avaliação da incerteza de medição no levantamento de curvas de fadiga SN de materiais metálicos a temperatura ambiente**. UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL. Dissertação de Mestrado. 2010.
- DIETER, G. E. **Metalurgia Mecânica**. 2. ed. Rio de Janeiro: Guanabara – Koogan, 1981.
- DIN 15018. **Guindastes; Estruturas de Aço; Verificação e Análises**. Instituto Alemão de Normalização. Alemanha. 1984.
- DIXON, W. J.; MOOD, A. M. A method for obtaining and analyzing sensitivity data. **Journal of the American Statistical Association**, v. 43, n. 241, p. 109-126, 1948.
- DNV-RP-C203. **Recommended practice - Fatigue design of offshore steel structures**. Det Norske Veritas. DNV. 2011.
- DONG, P. A structural stress definition and numerical implementation for fatigue analysis of welded joints. **International Journal of Fatigue**, v. 23, n. 10, p. 865-876, 2001.
- DOWLING, N. E. Mean stress effects in stress-life and strain-life fatigue. **SAE Technical Paper**, 2004.
- DOWLING, N. E. **Mechanical behavior of materials: engineering methods for deformation, fracture, and fatigue**. 4. ed. New Jersey: Pearson, 2012.
- ECHER, L. **Uma metodologia para obtenção de parâmetros ótimos para simulação numérica de filetes de solda**. UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL. Dissertação de Mestrado. 2015.
- EFRON, B.; TIBSHIRANI, R. Bootstrap methods for standard errors, confidence intervals, and other measures of statistical accuracy. **Statistical science**, p. 54-75, 1986.
- EN 1993-1-9. **Eurocode 3: Design of steel structures – Part 1-9: Fatigue**. CEN. Brussels. 2005.
- ERIKSSON, Å. et al. **Weld evaluation using FEM: a guide to fatigue-loaded structures**. Översättning: Teknikytex AB: Industrilitteratur, 2003.
- ESAB. ESAB. ESAB, 2017. Disponível em: <<http://www.esab.com.br/br/pt/support/documentation/upload/catalogo-consumiveis-esab.pdf>>. Acesso em: 30 jul. 2017.

ESDEP, W. G. Fatigue-European Steel Design Education Program. 12. **ESDEP**, 2017. Disponível em: <<http://fgg-web.fgg.uni-lj.si/~pmoze/ESDEP/master/wg12/toc.htm>>. Acesso em: 02 jul. 2017.

FISHER, J. W. **Fatigue strength of welded steel beam details and design considerations**. LEHIGH UNIV BETHLEHEM PA FRITZ ENGINEERING LAB. Bethlehem. 1972.

FISHER, J. W. **Bridge fatigue guide-design and details**. Chicago: AISC - American Institute of Steel Construction, 1977.

FISHER, J. W. **Fatigue and fracture in steel bridges. Case studies**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 1984.

FOUCHEREAU, R.; CELEUX, G.; PAMPHILE, P. Probabilistic modeling of S–N curves. **International Journal of Fatigue**, v. 68, p. 217-223, 2014.

FRICKE, W. Fatigue analysis of welded joints: state of development. **Marine structures**, v. 16, n. 3, p. 185-200, 2003.

GOPE, P. C. Determination of sample size for estimation of fatigue life by using Weibull or log-normal distribution.. **International journal of fatigue**, v. 21, n. 8, p. 745-752, 1999.

GOPE, P. C. Determination of minimum number of specimens in SN testing. **Journal of engineering materials and technology**, v. 124, n. 4, p. 421-427, 2002.

HOBACHER, A. E. A. **Recommendations for fatigue design of welded joints and components**. New York: Welding Research Council, 2009.

ISRAEL, C. **Procedimento para Ensaio de Fadiga em Uniões com Solda de Filete**. Universidade de Passo Fundo. Passo Fundo. 2015.

JOHANNESON, P.; SPECKERT, M. **Guide to load analysis for durability in vehicle engineering**. Chichester, West Sussex, United Kingdom: John Wiley & Sons, 2014.

JSME S 002. **Standard method of statistical fatigue testing**. Japan Society of Mechanical Engineers. 1994.

JUVINALL, R. C.; MARSHEK, K. M. **Fundamentos do projeto de componentes de máquinas**. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.

LASSEN, T.; RECHO, N. **Fatigue Life Analyses of Welded Structures: Flaws**. Newport Beach: John Wiley & Sons, 2006.

LEE, Y.-L. **Fatigue Testing and Analysis: Theory and Practice**. Burlington: Butterworth-Heinemann, 2005.

LEITÃO, F. N. **Verificação à Fadiga de Pontes Rodoviárias Mistas (Aço-Concreto)**. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil. Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2009.

LIN, S.-K.; LEE, Y.-L.; LU, M.-W. Evaluation of the staircase and the accelerated test methods for fatigue limit distributions. **International journal of fatigue**, v. 23, n. 1, p. 75-83, 2001.

LITTLE, R. **Mechanical reliability improvement: probability and statistics for experimental testing**. New York: CRC Press, 2002.

LITTLE, R. E. **Manual on Statistical Planning and Analysis**. ASTM STP 588. American Society for Testing and Materials. 1975.

- LOTSBERG, I. **Fatigue design of marine structures**. [S.l.]: Cambridge University Press, 2016.
- MACDONALD, K.; SONSINO, C. M. **Fracture and fatigue of welded joints and structures**. Woodhead Publishing: Elsevier, 2011.
- MADDOX, S. J. Fatigue design rules for welded structures. **Progress in Structural Engineering and Materials**, v. 2, n. 1, p. 102-109, 2000.
- MADDOX, S. J. Fatigue design rules for welded structures. **Fracture and fatigue of welded joints and structures**, p. 168-207, 2011.
- MADDOX, S. J. **Fatigue strength of welded structures**. Cambridge: Woodhead publishing, 2014.
- MARIN, T.; NICOLETTO, G. Fatigue design of welded joints using the finite element method and the 2007 ASME Div. 2 Master curve. **Frattura ed Integrità Strutturale**, v. 3, n. 9, p. 76-84, 2009.
- MASON, R. L.; GUNST, R. F.; HESS, J. L. **Statistical design and analysis of experiments: with applications to engineering and science**. 2 Ed. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2003.
- MATLAB, 2018. Disponível em: <<https://www.mathworks.com/help/matlab/>>. Acesso em: 20 jun. 2018.
- METROPOLIS, N.; ULAM, S. The monte carlo method. **Journal of the American statistical association**, v. 44, n. 247, p. 335-341, 1949.
- MILELLA, P. P. **Fatigue and Corrosion in Metals**. Verlag: Springer, 2013.
- MINER, M. A. Cumulative Damage in Fatigue. **Journal of Applied Mechanics Transactions – ASME**, v. 12, p. A159-A164, 1945.
- MINITAB. **Minitab Support**, 2017. Disponível em: <<https://support.minitab.com/en-us/minitab/18/>>. Acesso em: 23 jun. 2017.
- NELSON, W. Fitting of fatigue curves with nonconstant standard deviation to data with runouts. **Journal of Testing and Evaluation**, v. 12, n. 2, p. 69–77, 1984.
- NIEMI, E. **Stress determination for fatigue analysis of welded components**. The International Institute of Welding (IIW): Woodhead Publishing, 1995.
- NIEMI, E.; FRICKE, W.; MADDOX, J. **Fatigue analysis of welded components**. The International Institute of Welding (IIW): Woodhead Publishing, 2006.
- NORTON, R. L. **Projeto de máquinas: uma abordagem integrada**. 4. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.
- PAOLINO, D. S.; CHIANDUSSI, G.; ROSSETTO, M. A unified statistical model for S-N fatigue curves: probabilistic definition. **Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures**, v. 36, p. 187-201, 2013.
- PASCUAL, F. G.; MEEKER, W. Q. Estimating fatigue curves with the random fatigue-limit model. **Technometrics**, v. 41, n. 4, p. 277-289, 1997.
- PEDERSEN, M. M. . M. O. Ø. . H. M. R. . A. J. G. . & W. J. Comparison of post-weld treatment of high-strength steel welded joints in medium cycle fatigue. **Welding in the World**, v. 54, n. 7-8, p. R208-R217, 2010.

- POOK, L. **Metal Fatigue: What it is, why it matters**. Dordrecht: Springer, 2007.
- POUTIAINEN, I.; MARQUIS, G. A fatigue assessment method based on weld stress. **International journal of fatigue**, v. 28, n. 9, p. 1037-1046, 2006.
- PRAVIA, Z. M. C. **Estabilidade de estruturas de pontes metálicas com fraturas**. Tese de Doutorado. UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO. Rio de Janeiro. 2003.
- RADAJ, D.; SONSINO, C. M.; FRICKE, W. **Fatigue assessment of welded joints by local approaches**. Cambridge: Woodhead publishing, 2006.
- SCHIJVE, J. **Fatigue of structures and materials**. 2. ed. Dordrecht: Kluwer Academic, 2001.
- SEMPRUCH, J.; STRZELECKI, P. Verification of selected methods for rapid determination of wöhler curve considering high-cycle fatigue. **Journal of Polish CIMAC**, v. 5, n. 3, p. 167-176, 2010.
- SEMPRUCH, J.; STRZELECKI, P. Error of fatigue life determined according to the FITNET method. **Engineering Mechanics**, v. 2011, p. 531-534, 2011.
- SHEEHY, P.; MARTZ, E. Minitab Support. **Minitab**, 2017. Disponível em: <<https://www.minitab.com/en-us/Published-Articles/Doing-Monte-Carlo-Simulation-in-Minitab-Statistical-Software/>>. Acesso em: 23 jun. 2017.
- SHEN, C.-L. **The statistical analysis of fatigue data**. The University of Arizona. Tese de Doutorado. 1994.
- SHIGLEY, J. E.; MISCHEKE, C. R. **Projeto de engenharia mecânica**. 7. ed. Porto Alegre: Bookman, 2005.
- SHOHEL, M. S. N. **Painting fatigue of welded steel tee details**. University of Akron. Akron. 2015.
- SILVEIRA, J. A.; MEZZOMO, G. P.; GOEDEL, F. Avaliação dos métodos da tensão estrutural e curva mestre para determinação da vida em fadiga de junta soldada.. **Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería**, v. 33, n. 3, p. 318-328, 2017.
- SOBOL, I. M. **A primer for the Monte Carlo method**. Boca Raton: CRC press, 1994.
- STEPHENS, R. I. E. A. **Metal fatigue in engineering**. 2. ed. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2000.
- STRZELECKI, P.; SEMPRUCH, J. Modification of selected methods of rapid determination of fatigue characteristics in the range of limited fatigue life. **Journal of Polish Cimac - Selected problems of designing and operating technical systems**, v. 6, n. 3, p. 289-296, 2011b.
- STRZELECKI, P.; SEMPRUCH, J. Analytical-experimental method of determining fatigue characteristics for design elements. **Journal of Polish CIMAC**, v. 7, n. 3, p. 285-292, 2012.
- STRZELECKI, P.; SEMPRUCH, J. Experimental verification of the analytical method for estimated SN curve in limited fatigue life. **Materials Science Forum.**, Trans Tech Publications, v. 11-16, 2012.
- STRZELECKI, P.; SEMPRUCH, J. Probabilistic approach for analytically-determined fatigue curve. **POLISH CIMAC**, p. 103, 2013.
- STRZELECKI, P.; SEMPRUCH, J. Hybrid method for determining fatigue characteristic in high-cycle life. **20th International Conference Engineering Mechanics**, 2014.

STRZELECKI, P.; SEMPRUCH, J. Experimental method for plotting SN curve with a small number of specimens. **Polish Maritime Research**, v. 23, n. 4, p. 129-137, 2016a.

STRZELECKI, P.; SEMPRUCH, J.; NOWICKI, K. Comparing guidelines concerning construction of the SN curve within limited fatigue life range. **Polish Maritime Research**, v. 22, n. 3, p. 67-74, 2015.

STRZELECKI, P.; SEMPRUCH, J.; TOMASZEWSKI, T. Alternative Method for the Determination of a Full SN Fatigue Profile. **Solid State Phenomena**, v. 250, 2016c.

STRZELECKI, P.; TOMASZEWSKI, T. Application of Weibull distribution to describe SN curve with using small number specimens. **AIP Conference Proceedings**, AIP Publishing, 2016b. p. 020007.

TARQUINIO, J. E. **Fatigue strength of welded attachments with large eccentricity**. Lehigh University. Bethlehem. 1993.

TEIXEIRA, R. S. **Metodologia de análise de fadiga em componentes estruturais de aço baseada na mecânica da fratura**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas)- Curso de Pós-Graduação em Engenharia das Estruturas da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais da Escola de Engenharia da UFMG. Belo Horizonte. 2004.

YIN, F.; CERKOVNIK, M. Assessment of fatigue damage from variable amplitude loads in risers. **The Twenty-fourth International Ocean and Polar Engineering Conference**, International Society of Offshore and Polar Engineers. Busan, Korea, 2014.

ZHANG, J.; KECECIOGLU, D. B. New approaches to determine the endurance strength distribution. **Proceedings of the 4th ISSAT International Conference on Reliability & Quality in Design**, Seattle, WA, 1998. 297-301.

ZHAO; GAO; SUN. A statistical investigation of the fatigue lives of Q235 steel-welded joints. **Fatigue & fracture of engineering materials & structures**, 1998. 781-790.

ANEXO 1 – Relatórios de ensaio visual de solda e por partículas magnéticas

Com objetivo de garantir que todos os corpos de prova estavam atendendo aos critérios de qualidade esperados e definidos conforme normas AWS D1.1, foram realizados os ensaios de inspeção visual e por partículas magnéticas, sendo que os relatórios estão anexos abaixo. Um controle dimensional foi realizado com o auxílio de paquímetro.

METASARelatório de Ensaio Visual de Solda
Visual Welding Report

Cliente/Client: Fábio Goedel		Data/Date: 20/10/2017
Obra/Job: Fadigas em Estruturas Soldadas		Nº: UMA001
Norma de Referência/ Standard reference: AWS D1.1	Procedimento Procedure: PQ-MC-46	Material: Aço Carbono LNE 380 / Carbon Steel LNE 380
Prep. Superfície/Surface Preparation: Escovada / Brushed	Iluminação/Lighting: 1150 Lux	F/L : 1 / 2

Desenho / Drawing	Código da peça / Code of Piece	Nota / Note
-----	CP 1, CP 2	-----
-----	CP 3, CP 4	-----
-----	CP 5, CP 6	-----
-----	CP 7, CP 8	-----
-----	CP 9, CP 10	-----
-----	CP 11, CP 12	-----
-----	CP 13, CP 14	-----
-----	CP 15, CP 16	-----
-----	CP 17, CP 18	-----
-----	CP 19, CP 20	-----
-----	CP 21, CP 22	-----
-----	CP 23	-----
-----	CP 24	-----
-----	CP 25	-----
-----	CP 26	-----
-----	CP 27	-----

Laudo / Result:

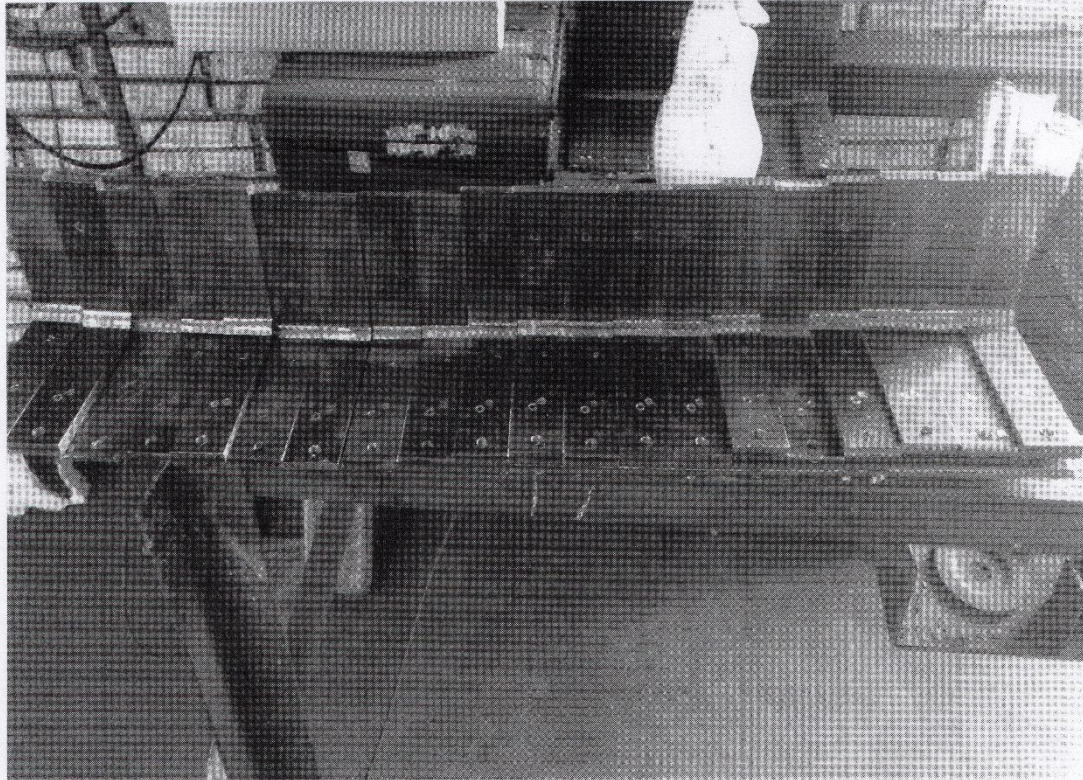
APROVADO/APPROVED

REPROVADO/DISAPPROVED

Inspetor / Inspector	Verificador / Examiner	Cliente / Customer
Victor M. Santana Insp. LEPMEVSUS-1254 SNGC-19760	Tassia Casanova Controle da Qualidade	
DATA: 20 / 10 / 2017	DATA: 20 / 10 / 17	DATA: / /

METASA®Relatório de Ensaio Visual de Solda
Visual Welding Report

Cliente/Client: Fábio Goedel		Data/Date: 20/10/2017
Obra/Job: Fadigas em Estruturas Soldadas		Nº: UMA001
Norma de Referência/ Standard reference: AWS D1.1	Procedimento Procedure: PQ-MC-46	Material: Aço Carbono LNE 380 / Carbon Steel LNE 380
Prep. Superfície/Surface Preparation: Escovada / Brushed	Iluminação/Lighting: 1150 Lux	F/L : 2 / 2

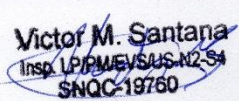
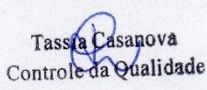


Inspetor / Inspector	Verificador / Examiner	Cliente / Customer
Victor M. Santana Insp. LPI/MEVSAUS N2-S4 SNQC-19760	Tassia Casanova Controle de Qualidade	
DATA: 20 / 10 / 2017	DATA: 20 / 10 / 17	DATA: / /

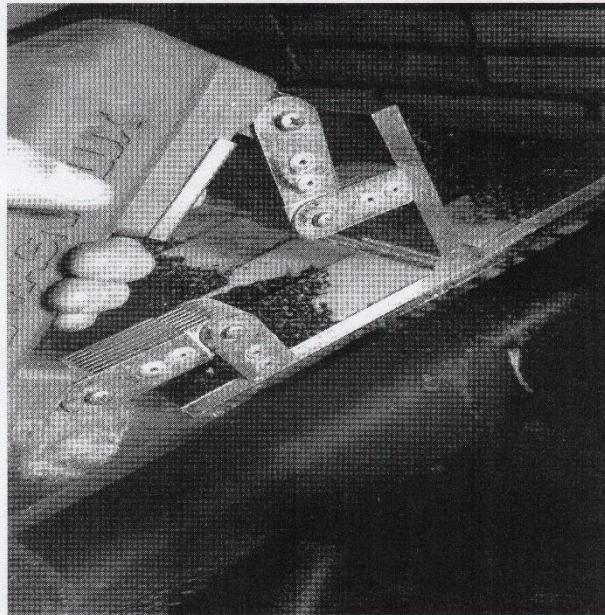
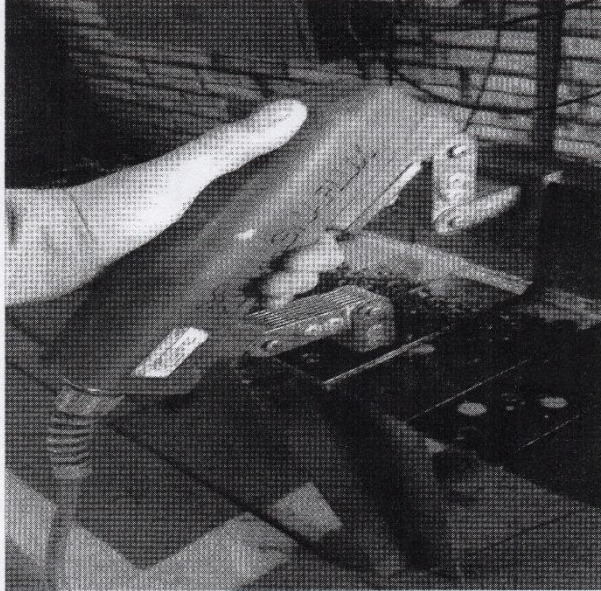
METASA[®] Relatório de Ensaio Por Partícula Magnética

Magnetic Test Report - MT

Cliente / Client: Fábio Goedel		Data / Date: 20/10/2017
Obra / Job: Fadiga em Estruturas Soldadas		Nº: 001
Procedimento / Procedure: PQ-MC-40		Norma de Referência/ Standard reference: AWS D1.1
Material: Aço Carbono LNE 380 / Carbon Steel LNE 380		
Superfície / Surface Preparation: Escovada / Brushed		
Luminosidade / Lighting: 1150 Lux		
Método de Inspeção / Inspection Method: YOKE		Tipo de PM / PM Type: Colorida / Visible
Via: Umida / Wet		Tinta de Contraste / Ink of Contrast: ----
Partícula Magnética / Magnetic Particles: CWW 555 AG/SN - 24014		Aditivo / Additive: BC-502-24067
Decantação / Decantation: 1.9 ml/100ml		Concentração / Concentration: 10 g/l
Aditivo/conc / Additive: 50 ml/l		
Desenho / Drawing	Código da peça / Code of Piece	Nota / Note
-----	CP 1, CP 2, CP 3	-----
-----	CP 4, CP 5, CP 6	-----
-----	CP 7, CP 8, CP9	-----
-----	CP 10, CP 11	-----
-----	CP 12, CP 13	-----
-----	CP 14, CP 15	-----
-----	CP 16, CP17	-----
-----	CP 18, CP19	-----
-----	CP 20, CP 21	-----
-----	CP 22, CP 23	-----
-----	CP 24	-----
-----	CP 25	-----
-----	CP 26	-----
-----	CP 27	-----
<p>Lauda / Result:</p> <p> <input checked="" type="checkbox"/> APROVADO/APPROVED <input type="checkbox"/> REPROVADO/DISAPPROVED </p>		

Inspetor / Inspector  Insp. LPPME/SUS N2 S4 SNQC-19760	Verificador / Examiner  Tassia Casanova Controle da Qualidade	Cliente / Customer
DATA: 20/10/2017	DATA: 20/10/17	DATA: / /

METASA® Relatório de Ensaio Por Partícula Magnética
Magnetic Test Report - MT



Inspetor / Inspector	Verificador / Examiner	Cliente / Customer
Victor M. Santana Insp. LPIPM/ENSAIOS N2-54 SNGC-19760	Tassia Casanova Controle da Qualidade	
DATA: 20 / 10 / 2017	DATA: 20 / 10 / 17	DATA: / /

ANEXO 2 - Recomendações propostas e boas práticas no planejamento de testes de fadiga

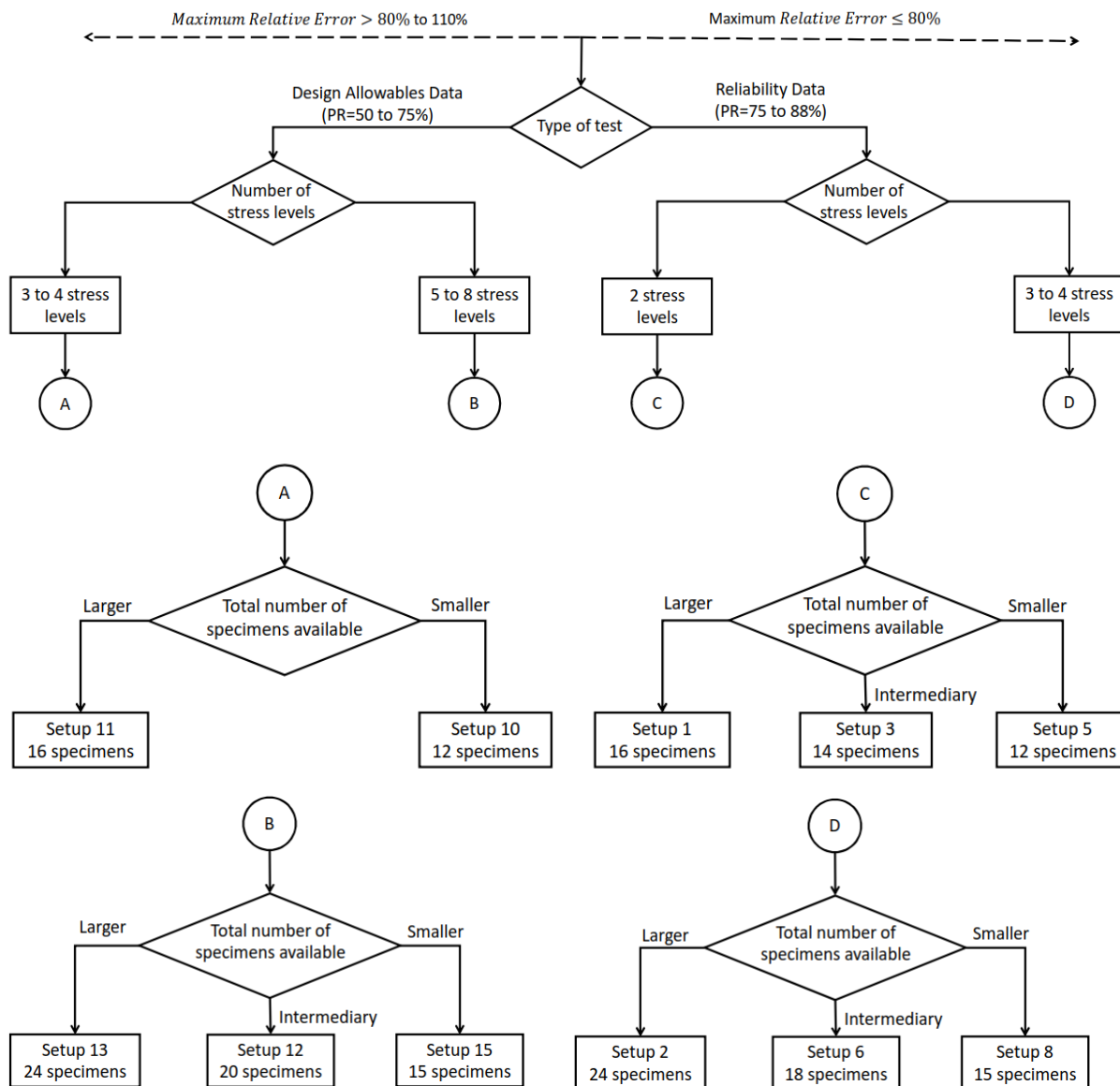
Quando um engenheiro experimental define a configuração de um experimento de fadiga, vários aspectos relacionados à sua aplicação subsequente devem ser considerados. Por exemplo, o engenheiro pode estar interessado em fadiga de alto ciclo; portanto, a configuração do teste deve ser projetada para reduzir o *DRP* nessa faixa, escolhendo adequadamente o valor das tensões em cada nível. Nesta seção, foram propostas algumas contribuições em aspectos relevantes que muitas vezes não são incluídos no momento do planejamento do teste de fadiga.

A Figura A.1 mostra um fluxograma com as melhores escolhas para a configuração de um teste de fadiga com os principais aspectos envolvidos, isto é, as escolhas que levam a menor *DRP* (considerando o envelope da *DRP* da Tabela 21). O tipo de teste define principalmente a faixa de porcentagem de replicação e o número de amostras a serem testadas.

O uso do fluxograma da Figura A.1 é explicado da seguinte forma: imagine um engenheiro de teste definindo a configuração de um teste de fadiga, em que a primeira decisão que o engenheiro deve tomar, é a aplicação dos dados gerados, ou seja, o tipo de teste. Para decidir se os dados aplicados a projetos ou os dados de confiabilidade serão usados (de acordo com a Tabela 1), a aplicação final dos dados obtidos através do teste deve ser conhecida. Para ajudar nesta decisão, o envelope da *DRP* foi quantificado por simulações de Monte Carlo, permitindo a escolha da faixa da *DRP* permitida para cada aplicação. Por exemplo, se a classe de dados aplicáveis a projeto for escolhida, o engenheiro de teste conhece o intervalo de *DRP* e pode passar para a próxima opção. A segunda decisão é o número de níveis de tensão. Se a forma da curva é conhecida e é uma linha reta ou curvatura suave na escala log-log, um número menor de níveis de tensão é usado (dois, três ou quatro níveis de tensão); caso contrário, são necessários mais de cinco níveis) (LITTLE, 1975). Em quase todos os casos, principalmente para aços dentro da faixa de vida de 10^3 a 10^6 , a forma da curva é uma linha reta e três níveis de tensão são suficientes. Em casos especiais, nos quais as condições e materiais não são bem conhecidos, mais níveis podem ser usados. A última escolha é o número de amostras disponíveis, uma vez que um aumento no número de corpos de prova nem sempre diminui a *DRP*. Isso acontece, porque a porcentagem de replicação diminui quando o número de níveis de tensão aumenta e o tamanho da amostra é constante. Os estudos mostraram que a porcentagem de replicação influencia grandemente a redução da *DRP* quando a replicação

umenta. Finalmente, o fluxograma final apresenta a melhor escolha possível com tamanho de amostra menor, intermediário e maior.

Figura A.1 – Fluxograma com melhores escolhas para configurações de testes de fadiga.



Fonte: do autor

Estabelecer uma configuração de teste de fadiga é um desafio, pois os aspectos envolvidos são conflitantes. No presente trabalho foram investigadas melhores configurações que permitiram uma redução da *DRP* para o caso de estudo, com base nos dados de fadiga de (ZHAO, GAO e SUN, 1998). Cada caso é único, portanto, as informações apresentadas devem considerar as especificidades dos processos, materiais e outros fatores que têm um efeito significativo.

Considerando o tipo de teste, o uso dos dados de fadiga obtidos, o nível de confiança e a probabilidade de falha desejada, o número de corpos de prova é geralmente minimizado devido à falta de tempo e a fatores econômicos. A Tabela A.1 apresenta as melhores escolhas considerando o número disponível de corpos de prova a serem utilizados nos estudos.

Tabela A.1 – Melhores configurações de testes de fadiga considerando o número de corpos de prova de acordo com a norma ASTM E739.

Número de Corpos de Prova	Configuração
12	5
14	3
15	8
16	1
18	6
20	9
21	4
24	2

Fonte: do autor

Outra boa prática na modelagem de fadiga está relacionada à faixa de vida de fadiga testada, evitando a extrapolação dos limites do experimento de fadiga. Não extrapolar os limites do modelo é um conceito fundamental de estatística. Entretanto, o engenheiro de aplicação, muitas vezes, não segue essa diretriz por falta de conceitos básicos de estatística ou devido às limitações da razão de tensão R e à dificuldade em definir o valor da tensão em cada nível, conforme anteriormente citado. No entanto, observe que a extrapolação leva a um alto DRP nas estimativas de vida de fadiga, portanto o engenheiro deve ter cuidado com esse fator.

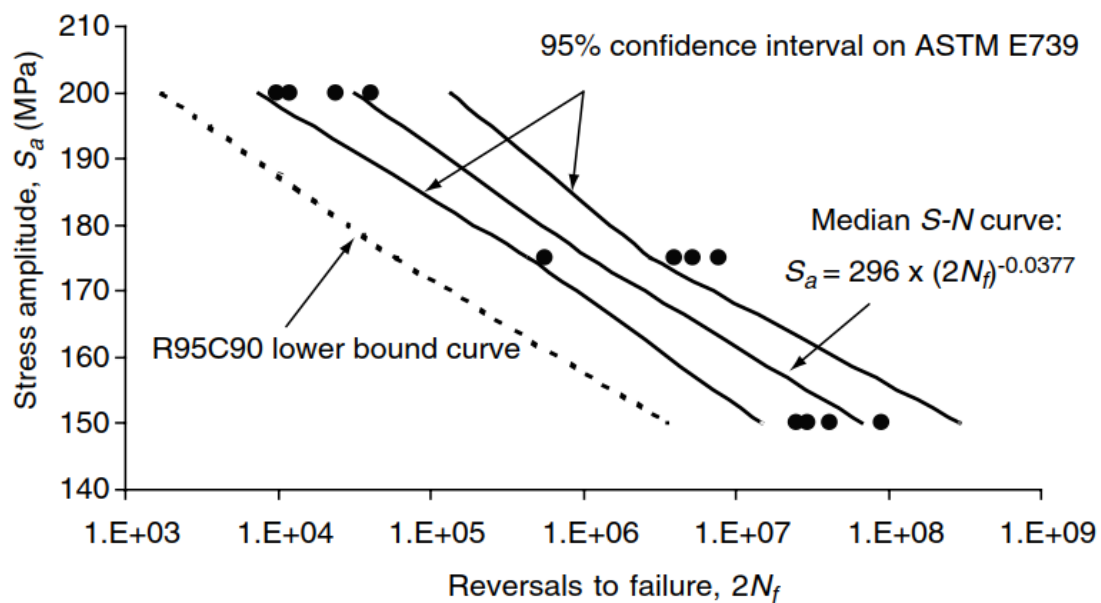
A prática de extrapolar o modelo de fadiga obtido fora dos limites da vida de fadiga testada deve ser evitada, e os valores de tensão em cada nível devem ser cuidadosamente definidos (níveis de tensão superiores e inferiores). O nível de tensão superior é mais fácil de definir devido ao uso da metodologia da curva $S-N$ para fadiga de alto ciclo. Por conseguinte, é desejável que a tensão máxima aplicada no teste não exceda a resistência ao escoamento do material. Valores do fator k de 80% a 90% da tensão de escoamento do material são algumas vezes usados para fins de segurança e para garantir a validade da metodologia da curva $S-N$. Definir o valor de tensão é mais complicado para níveis mais baixos de tensão, considerando que a amostra pode não falhar. Isto é indesejável, uma vez que os dados não podem ser usados para obter as propriedades de fadiga na região de vida finita.

Na maioria das vezes, duas abordagens são usadas para definir a faixa de vida de fadiga desejável. O primeiro consiste em realizar testes exploratórios sem replicação em diferentes

níveis de tensão, a fim de definir a faixa de vida de fadiga desejável. Por exemplo, pode-se usar uma amostra testada com tensões máximas de 90%, 80% e 70% da tensão de escoamento, e assim por diante, até que a faixa de vida de fadiga de interesse seja encontrada. Posteriormente, mais corpos de prova são testados para melhorar a qualidade dos resultados usando dados de replicação para avaliar a variabilidade em cada nível de tensão. A segunda abordagem faz uso de testes preliminares e exploratórios durante os experimentos e pode ajudar o engenheiro de teste a fazer uma melhor escolha do próximo valor do nível de tensão quando não for possível definir antes do teste. O engenheiro de teste pode realizar análises estatísticas preliminares com poucos dados replicados. Por exemplo, se a Configuração 10 for usada (três níveis de tensão com quatro amostras em cada nível e 75% de porcentagem de replicação), inicialmente quatro amostras podem ser testadas na parte superior (por exemplo, $k = 0,8$ e $R = -1$) e nível de tensão ($k = 0,7$ e $R = -1$) com dois corpos de prova por nível. O próximo passo é realizar uma análise estatística para obter a estimativa das propriedades de fadiga, e subsequentemente usando a Equação 12 e uma vida desejada para o nível inferior, obtendo o novo valor de tensão a ser testado em um nível de tensão mais baixo. Além disso, a análise estatística pode ser modificada para cada etapa do teste para melhorar a qualidade da estimativa de acordo com os novos corpos de prova testados até que todas as amostras tenham sido testadas.

Neste trabalho, diversas boas práticas para obter uma curva $S-N$ com 50% de probabilidade de falha com base em testes de fadiga foram apresentadas. (LEE, 2005) apresenta um método prático para construir uma curva $S-N$ com uma probabilidade de falha e um nível de confiança desejado. Uma representação esquemática da curva $S-N$ de projeto é mostrada na Figura A.2. A escolha da curva $S-N$ de limite inferior (a chamada curva $S-N$ de projeto) é bastante arbitrária e depende do custo dos materiais, da política de segurança, e padrões da indústria. Por exemplo, se um valor de R95C90 é usado para projetos de componentes, esse valor particular garante que existe uma possibilidade de sobrevivência de 95% (confiabilidade) com um nível de confiança de 90% para uma vida de fadiga em um nível de tensão específico. Como o tamanho da amostra é geralmente limitado, o nível de confiança de 90% é introduzido para garantir que haja 90% de possibilidade de que os 95% reais do valor da confiabilidade possam ficar acima desse limite inferior (LEE, 2005).

Figura A.2 – Representação das curvas $S-N$ experimental e de projeto.



Fonte: (LEE, 2005)

A construção de uma curva $S-N$ de projeto pode ser resumida nas seguintes etapas:

Etapa 1: Planejamento do teste;

Etapa 2: Executar os testes;

Etapa 3: Análise dos dados de fadiga para obtenção da *curva S-N* média com 50% de probabilidade de falha;

Etapa 4: Construir a curva de projeto considerando o nível de confiança e a probabilidade de falha desejada.

ANEXO 3 – Análise estatística do coeficiente de inclinação m

Neste anexo são apresentados os dados e as referências bibliográficas, nas quais foram encontradas propriedades de fadiga de juntas semelhantes à junta objeto de estudo no presente trabalho.

Tabela A.2 – Dados de fadiga utilizados para obter a estatística do coeficiente m .

Referências	Coeficiente m
(ZHAO, GAO e SUN, 1998)	4,4
	4,5
	2,9
	2,9
	4,1
	4,9
	5,6
(ISRAEL, 2015)	5,3
(PEDERSEN, 2010)	4,2
	5,1
	5,9
	7,1
(FISHER, 1977)	7,7
(KIRT, 1975)	3,3
(KONDO, 2002)	3,9
(BAE, 2004)	3,3
(TARQUINIO, 1993)	2,9
	3,2
	3,0
	2,8
	2,5
	2,6
	4,3
	3,7
	4,0
	3,8
	3,8
(SHOHEL, 2015)	6,7
(FISHER, 1972)	2,9
	3,1
	3,4

Fonte: do autor

ANEXO 4 – Produção científica relacionada com a tese

GOEDEL, Fábio; MEZZOMO, Gustavo P.; PRAVIA, Zacarias M. Chamberlain. Fatigue lifespan of a fillet welded joint - Hybrid approach to obtain the SN curve with a reduced number of tests. **Latin American Journal of Solids and Structures**, v. 15, n. 10, 2018. <http://dx.doi.org/10.1590/1679-78255194>

GOEDEL, Fábio; CHAMBERLAIN PRAVIA, Zacarias Martin; MEZZOMO, Gustavo Prates. Methodology for assessment of statistical planning effects on the S-N curve determination using Monte Carlo simulations. **Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures**, 2018. <https://doi.org/10.1111/ffe.12957>

GOEDEL, Fábio; CHAMBERLAIN PRAVIA, Zacarias Martin. Algoritmo para contagem de ciclos pelo método Rainflow de quatro pontos. **IV Seminário Regional de Engenharia Estrutural**, 2017.

ANEXO 5 – Algoritmo para simulação de curvas $S-N$ através de simulações de Monte Carlo e Geração de curvas $S-N$ híbridas

Os algoritmos apresentados nas Seções 3.1.1 e 3.2.1 foram implementados em MATLAB, sendo bastante extensos, o que geraria uma grande quantidade de páginas para apresentá-los. Caso o leitor tenha interesse, os algoritmos podem ser solicitados diretamente ao autor pelo contato de e-mail: goedel@upf.br

