

**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA**

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais

PPGE3M

**ANÁLISE DA VIDA EM FADIGA DE UNIÕES SOLDADAS DE PERFIS DE PAREDES
FINAS SUJEITOS A CARREGAMENTOS ATRAVÉS DE ANÁLISES COMPARATIVAS**

FELIPE BIONDO

**DISSERTAÇÃO PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE
EM ENGENHARIA**

Porto Alegre
2019

FELIPE BIONDO

ANÁLISE DA VIDA EM FADIGA DE UNIÕES SOLDADAS DE PERFIS DE PAREDES FINAS SUJEITOS A CARREGAMENTOS ATRAVÉS DE ANÁLISES COMPARATIVAS

Trabalho realizado no Departamento de Metalurgia da Escola de Engenharia da UFRGS, dentro do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGE3M, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Área de Concentração: Ciência e Tecnologia dos Materiais

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Favaro Borges

Porto Alegre

2019

CIP - Catalogação na Publicação

BIONDO, FELIPE

ANÁLISE DA VIDA EM FADIGA DE UNIÕES SOLDADAS DE
PERFIS DE PAREDES FINAS SUJEITOS A CARREGAMENTOS
ATRAVÉS DE ANÁLISES COMPARATIVAS / FELIPE BIONDO. --
2019.

95 f.

Orientador: Marcelo Favaro Borges.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do
Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de
Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de
Materiais, Porto Alegre, BR-RS, 2019.

1. Durabilidade. 2. Fadiga. 3. Aços de alta
resistência. 4. Ensaio de fadiga. I. Favaro Borges,
Marcelo, orient. II. Título.

Elaborada pelo Sistema de Geração Automática de Ficha Catalográfica da UFRGS com os
dados fornecidos pelo(a) autor(a).

FELIPE BIONDO

ANÁLISE DA VIDA EM FADIGA DE UNIÕES SOLDADAS DE PERFIS DE PAREDES FINAS SUJEITOS A CARREGAMENTOS COMBINADOS ATRAVÉS DE ANÁLISES COMPARATIVAS

Trabalho realizado no Departamento de Metalurgia da Escola de Engenharia da UFRGS, dentro do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGE3M, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Área de Concentração: Ciência e Tecnologia dos Materiais

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Favaro Borges

Aprovado pela Banca Examinadora em novembro de 2019.

Prof. Dr. Toni Roger Schifelbain de Lima, UFRGS

Prof. Dr. Afonso Reguly, UFRGS

Prof. Dr. Antonio Fernando Burkert Bueno, IFRS

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Objetivos Gerais	14
1.2	Objetivos Específicos	14
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1	Introdução a fadiga	15
2.2	Mecanismo de falha por fadiga	16
2.3	Acúmulo de dano	19
2.4	Curva tensão deformação cíclica	22
2.5	Curva S-N	24
2.6	Tensões flutuantes	26
2.7	Efeito da tensão média	28
2.8	Contagem de ciclos	31
2.8.1	Análise <i>Rainflow</i> 3 pontos	32
2.9	Método de análise de comparação de testes	33
2.10	Análise do seno equivalente ou amplitude constante	34
2.11	Comportamento a fadiga de juntas de aço soldadas	35
2.11.1	Comportamento à fadiga de perfis tubulares de seção retangular	35
2.12	Aços microligados	38
2.13	Soldabilidade de aços alta resistência e baixa liga	38
2.13.1	Estrutura e propriedades dos grãos grosseiros da zona afetada pelo calor (HAZ)	39
2.13.2	Efeito do nióbio na HAZ	41
2.13.3	Efeito do vanádio na HAZ	42
2.13.4	Efeito do manganês na HAZ	42
2.13.5	Presença de Zinco na HAZ	43
2.13.6	Aços bifásicos <i>Dual Phase (DP)</i>	43
3	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	46
3.1	Introdução ao trabalho	46

3.2	Definição da rota e determinação do carregamento.....	47
3.2.1	Definição dos pontos de instrumentação do veículo.....	48
3.2.2	Modelo de elementos finitos.....	48
3.2.3	Pontos instrumentados.....	51
3.2.4	Equipamentos utilizados.....	53
3.3	Coleta de dados.....	54
3.4	Análise dos dados coletados.....	57
3.5	Contagem de ciclos.....	57
3.6	Cálculo do dano.....	58
3.6.1	Curva de fadiga.....	59
3.7	Análise através do método do seno equivalente ou amplitude constante.....	61
4	MATERIAIS E MÉTODOS.....	63
4.1	Descrição dos materiais ensaiados.....	63
4.2	Composição química dos aços.....	64
4.3	Análise da microestrutura.....	65
4.4	Ensaio de microdureza.....	66
4.5	Ensaio de tração.....	68
4.6	Ensaio de fadiga dos materiais.....	69
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	73
5.1	Ensaio de tração.....	73
5.2	Ensaio de fadiga.....	76
5.2.1	Definição das forças de aplicação.....	76
5.2.2	Ensaio experimental.....	79
5.3	Metalografias.....	82
5.4	Ensaio de Microdureza.....	87
6	CONCLUSÃO.....	91
6.1	Trabalhos futuros.....	92

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1.1 - CLASSIFICAÇÃO DO ESTADO DAS VIAS NO BRASIL.....	13
FIGURA 2.1 - O PROCESSO DE FADIGA: UMA PLACA FINA SOB CARGA DE TENSÃO CÍCLICA	17
FIGURA 2.2 - COMPRIMENTO DE TRINCA VERSUS NÚMERO DE CICLOS - FRATURA INDICADA POR "X"	18
FIGURA 2.3 - MARCAS E ESTRIAS NA SUPERFÍCIE DA FRATURA.....	19
FIGURA 2.4 - CONSUMO DE VIDA LINEAR	20
FIGURA 2.5 - REGRA DE PALMGREN-MINER FIGURA (A): CARREGAMENTO ALEATÓRIO; FIGURA (B): HISTÓRICO DO CARREGAMENTO REDUZIDO E FIGURA (C): PARA FALHA (CURVA S-N).....	22
FIGURA 2.6 – ESQUEMA DE HISTERESE TÍPICO COM OS PARÂMETROS ENVOLVIDOS – EXEMPLO DE LAÇOS COM IDÊNTICOS $\Delta\sigma$ e $\Delta\varepsilon$	22
FIGURA 2.7 - CONDIÇÕES EM QUE O ENSAIO É EXECUTADO E REPRESENTAÇÃO	23
FIGURA 2.8 - DIAGRAMA S-N RESULTANTES DE ENSAIO DE FADIGA AXIAL COMPLETAMENTE INVERSA...24	
FIGURA 2.9 – EXEMPLO DE CORPO DE PROVA E CARREGAMENTO	25
FIGURA 2.10 - DETALHAMENTO DAS NOMENCLATURAS.....	26
FIGURA 2.11 - CURVA S-N ESQUEMÁTICA PARA UM AÇO.....	28
FIGURA 2.12 - VARIAÇÃO DA TENSÃO EM UM ENSAIO DE FLEXÃO ROTATIVA E DEFINIÇÃO DAS TENSÕES EM UM CASO GERAL.....	29
FIGURA 2.13 - CURVAS DE VIDA CONSTANTE	30
FIGURA 2.14 - CURVAS DE EQUIVALÊNCIA DE GERBER, GOODMAN E SODERBERG.....	31
FIGURA 2.15 - DEFINIÇÃO DE CICLOS E REVERSÕES	32
FIGURA 2.16 - MÉTODO CONTAGEM <i>RAINFLOW</i>	33
FIGURA 2.17 - SENO EQUIVALENTE.....	34
FIGURA 2.18 - EXEMPLO DE JUNTAS USADAS EM CARROCERIAS DE ÔNIBUS.....	36
FIGURA 2.19 - ESTRUTURA DE UMA CARROCERIA DE ÔNIBUS - LOCALIZAÇÃO DE FALHA POR FADIGA NUM NÓ DA CARROCERIA.....	37
FIGURA 2.20 - FALHA EM ESTRUTURA DE ÔNIBUS.....	38
FIGURA 2.21 - TAMANHO DE GRÃO AUSTENÍTICO VS. TAXA DE AQUECIMENTO PARA VÁRIOS AÇOS HSLA SUJEITOS A SOLDA	40
FIGURA 2.22 - EFEITO DA TEMPERATURA DE PICO E DA COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO AÇO SOBRE O TAMANHO DE GRÃO AUSTENÍTICO	40
FIGURA 2.23 – DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DE TRANSFORMAÇÃO DA AUSTENITA SOB RESFRIAMENTO CONTÍNUO, INDICANDO AS POSSÍVEIS MICROESTRUTURAS EM FUNÇÃO DA VELOCIDADE DE RESFRIAMENTO DE SOLDA	41
FIGURA 2.24 – MACROGRAFIA DE UMA AMOSTRA DE DP 1000 E SEU PERFIL DE MICRODUREZA; MB: METAL BASE; MBR: METAL BASE REVENIDO; RSC: REGIÃO SUBCRÍTICA; RIC: REGIÃO INTERCRÍTICA; RCG: REGIÃO DE CRESCIMENTO DE GRÃO; MS: METAL DE SOLDA	44
FIGURA 2.25 - RELAÇÃO ENTRE O TAMANHO MÉDIO DE GRÃOS NA MICRO-REGIÃO GG ZAC COM A INTENSIDADE DE CORRENTE DURANTE SOLDAGEM DE JUNTAS PLANAS DE AÇO DUALPHASE 980. ...44	
FIGURA 2.26 - RELAÇÃO ENTRE O COMPORTAMENTO MECÂNICO DAS JUNTAS PLANAS DO AÇO BIFÁSICO DP980 COM O APORTE TÉRMICO DURANTE A SOLDAGEM COM TIG.....	45
FIGURA 3.1 - FLUXOGRAMA DO PROJETO	46
FIGURA 3.2 – PLANEJAMENTO ROTA PARA EFETUAR COLETA DE DADOS	47
FIGURA 3.3 - DETALHE NA MALHA EM DIFERENTES REGIÕES DA CARROCERIA	49

FIGURA 3.4 - DISTRIBUIÇÃO DE TENSÕES NA CARROCERIA – CONDIÇÃO DE ACELERAÇÃO VERTICAL.....	49
FIGURA 3.5 – OBJETO DE ESTUDO COLUNA ENTRE JANELAS E PEITORIL – VISTA INTERNA	50
FIGURA 3.6 - ANÁLISE DE CONVERGÊNCIA DE MALHA DA REGIÃO DE INTERESSE	50
FIGURA 3.7 – DISTRIBUIÇÃO DOS PONTOS INSTRUMENTADOS NA CARROCERIA.....	51
FIGURA 3.8 – DISTRIBUIÇÃO DE EXTENSÔMETROS UNIAXIAIS NO OBJETO DE ESTUDO (PEITORIL E COLUNAS ENTRE JANELAS).....	51
FIGURA 3.9 - PONTOS INSTRUMENTADOS COM EXTENSÔMETROS UNIAXIAIS NA REGIÃO DE INTERESSE PARA ENSAIO EXPERIMENTAL.....	52
FIGURA 3.10 - PONTOS INSTRUMENTADOS NA REGIÃO DE INTERESSE PARA ENSAIO EXPERIMENTAL	52
FIGURA 3.11 – SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS ADS2002IP-B-3 (SF2034).....	53
FIGURA 3.12 – ACELERÔMETROS UTILIZADOS	53
FIGURA 3.13 – SENSOR DE PRESSÃO	54
FIGURA 3.14 - EXTENSÔMETRO UNIAXIAL.....	54
FIGURA 3.15 - RESULTADOS DOS ARQUIVOS DE GPS DE TRECHOS COM 20 MINUTOS DE DURAÇÃO	55
FIGURA 3.16 - EXEMPLO DE ARQUIVO DE GPS PARA UM TRECHO COLETADO	55
FIGURA 3.17 - CONDIÇÕES DAS VIAS MEDIDAS	56
FIGURA 3.18 - CONDIÇÕES DAS VIAS MEDIDAS	56
FIGURA 3.19 – EXEMPLO DE ESPECTRO NO TEMPO DAS COLETAS – EXTENSÔMETROS (μS); SENSOR DE PRESSÃO (BAR); ACELERÔMETRO (G'S)	57
FIGURA 3.20 – GRÁFICO DO ACÚMULO DE DANO PARA O CANAL E12 DE UM TRECHO COLETADO GERADO NO SOFTWARE AQDANALISE.....	58
FIGURA 3.21 – CLASSIFICAÇÃO DA JUNTA “T” SEGUNDO NORMA BS7908:2014.....	60
FIGURA 3.22 – CURVAS DE FADIGA	61
FIGURA 3.23 – MESMO DANO PARA CICLOS DIFERENTES	62
FIGURA 4.1 - ESQUEMA MOSTRANDO DE QUE FORMA AS AMOSTRAS FORAM SUBMETIDAS A AVALIAÇÕES METALOGRAFICAS.....	66
FIGURA 4.2 - MICROSCÓPIO ÓTICO ZEISS PRIMOTECH COM CAPACIDADE DE ATÉ 1000 VEZES	66
FIGURA 4.3 - EQUIPAMENTO PARA REALIZAR A ANÁLISE DE MICRODUREZA MARCA FUTURE-TECH SÉRIE F700.....	67
FIGURA 4.4 - ESQUEMA DE MEDIÇÃO DA MICRODUREZA	67
FIGURA 4.5 - DIMENSÕES CORPO DE PROVA PARA ENSAIO DE TRAÇÃO DE ACORDO COM ASM E8M	68
FIGURA 4.6 - ENSAIOS DE TRAÇÃO EM MÁQUINA DE ENSAIOS UNIVERSAL EMIC23-100	68
FIGURA 4.7 – DETALHE ESQUEMÁTICO DOS CORPOS DE PROVA PARA REALIZAÇÃO DE ENSAIOS EXPERIMENTAIS	69
FIGURA 4.8 - MÁQUINA DE FADIGA – LABORATÓRIO EXPERIMENTAL MARCOPOLO SA	70
FIGURA 4.9 - EQUIPAMENTOS UTILIZADOS PARA ENSAIO DE FADIGA	70
FIGURA 4.10 - FABRICAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA	71
FIGURA 4.11 - CORPO DE PROVAS INSTRUMENTADO NA BANCADA DE TESTES – EXTENSÔMETROS UNIAXIAIS 1, 2 E 3 UTILIZADOS PARA MONITORAMENTO DOS CARREGAMENTOS APLICADOS AOS CORPOS DE PROVA.....	72
FIGURA 5.1 – ENSAIO DO CORPO DE PROVA	73
FIGURA 5.2 - COMPARATIVO GRÁFICO ENTRE OS ENSAIOS DE TRAÇÃO DOS MATERIAIS ZAR230, ZSTE380 E DP980.....	74
FIGURA 5.3 - COMPARATIVO GRÁFICO ENTRE OS MATERIAIS ZAR230, ZSTE380 E DP980 SOLDADOS.....	75

FIGURA 5.4 - COMPARATIVO ENTRE MATERIAIS COM E SEM SOLDA	76
FIGURA 5.5 - DISTRIBUIÇÃO DE TENSÕES RESULTANTES DOS CARREGAMENTOS APLICADOS A CARROCERIA NO COMPONENTE ESTUDADO	77
FIGURA 5.6 - COMPARATIVO DE TENSÕES ENTRE ANÁLISES - (A) VEÍCULO COMPLETO - (B) ENSAIO EXPERIMENTAL DE BANCADA.....	77
FIGURA 5.7 - DIREÇÃO DA TENSÃO MÁXIMA PRINCIPAL - (A) VEÍCULO COMPLETO - (B) ENSAIO EXPERIMENTAL DE BANCADA.....	78
FIGURA 5.8 - DIREÇÃO DA TENSÃO MÍNIMA PRINCIPAL - (A) VEÍCULO COMPLETO - (B) ENSAIO EXPERIMENTAL DE BANCADA.....	78
FIGURA 5.9 - CARREGAMENTO APLICADO NA MÁQUINA DE FADIGA	79
FIGURA 5.10 - RESULTADOS DAS MEDIÇÕES DE MONITORAMENTO DOS EXTENSÔMETROS UNIAXIAIS PARA AMOSTRAS INSTRUMENTADAS EM LABORATÓRIO – E1: EXTENSÔMETRO 1; E2: EXTENSÔMETRO 2; E3: EXTENSÔMETRO 3.....	79
FIGURA 5.11 – COMPARATIVO ENTRE VALORES DE TENSÃO CALCULADOS E MEDIDOS	80
FIGURA 5.12 - COMPARATIVO DE VIDA ENTRE OS MATERIAIS	81
FIGURA 5.13 - MODO DE FALHA DAS AMOSTRAS (A) ZAR230, (B) ZSTE380 E (C) DP 980	82
FIGURA 5.14 – MACROGRAFIA PARA OS CORPOS DE PROVA DOS MATERIAIS ZAR230, ZSTE380 E DP980	83
FIGURA 5.15 – MICROESTRUTURA ZAR230 – MATERIAL BASE.....	83
FIGURA 5.16 – MICROESTRUTURA ZAR230 – REGIÃO DE CRESCIMENTO DE GRÃO.....	84
FIGURA 5.17 – MICROESTRUTURA ZAR230 – MATERIAL DE SOLDA	84
FIGURA 5.18 – MICROESTRUTURA ZSTE380 – MATERIAL BASE	85
FIGURA 5.19 – MICROESTRUTURA ZSTE380 – REGIÃO DE CRESCIMENTO DE GRÃO	85
FIGURA 5.20 – MICROESTRUTURA ZSTE380 – MATERIAL DE SOLDA.....	85
FIGURA 5.21 – MICROESTRUTURA DP 980 – MATERIAL BASE.....	86
FIGURA 5.22 – MICROESTRUTURA DP 980 – REGIÃO DE CRESCIMENTO DE GRÃO.....	86
FIGURA 5.23 - MICROESTRUTURA DP 980 – MATERIAL DE SOLDA.....	86
FIGURA 5.24 - COMPARATIVO DO TAMANHO DE GRÃO DOS DIFERENTES MATERIAIS AVALIADOS NESTE TRABALHO.	87
FIGURA 5.25 – MEDIÇÃO DA MICRODUREZA ZAR230	88
FIGURA 5.26 – MEDIÇÃO DA MICRODUREZA ZSTE380.....	88
FIGURA 5.27 – MEDIÇÃO DA DUREZA DO AÇO DP 980.....	89
FIGURA 5.28 – MEDIÇÃO DA DUREZA DO AÇO DP 980, TRABALHO REALIZADO POR XU, W. ET AL. (2013)	89
FIGURA 5.29 - SOBREPOSIÇÃO DOS DADOS DE MICRODUREZA ANALISADOS	90

LISTA DE TABELAS

TABELA 4.1 - COMPOSIÇÃO QUÍMICA DOS MATERIAIS	64
TABELA 4.2 - COMPARATIVO DO CARBONO EQUIVALENTE	65
TABELA 5.1 - PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS MATERIAIS ZAR230, ZSTE380 E DP980	73
TABELA 5.2 - PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS MATERIAIS ZAR230, ZSTE380 E DP980 SOLDADOS.....	74
TABELA 5.3 - REDUÇÃO NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DO ENSAIO DE TRAÇÃO QUANDO COMPARADAS AMOSTRAS RETIRADAS DO TUBO COM E SEM O PROCESSO DE SOLDAGEM.....	75
TABELA 5.4 - RESULTADOS DAS MEDIÇÕES DE MONITORAMENTO DOS EXTENSÔMETROS UNIAXIAIS PARA AMOSTRAS INSTRUMENTADAS EM LABORATÓRIO – E1: EXTENSÔMETRO 1; E2: EXTENSÔMETRO 2; E3: EXTENSÔMETRO 3	79
TABELA 5.5 - ENSAIO DE FADIGA	80

RESUMO

Projetos de estruturas de carrocerias de ônibus devem ser desenvolvidos levando em consideração os carregamentos dinâmicos que este tipo de veículo é submetido. Para realizar avaliações da sua vida em fadiga podem ser empregados métodos experimentais e numéricos a fim de determinar a durabilidade destes veículos. Tais estruturas são basicamente construídas utilizando perfis de aço de paredes finas que frequentemente são superdimensionadas devido ao desconhecimento de diversas características do produto como as condições de uso dos mesmos, falta de caracterização das uniões soldadas e a qualidade de seus materiais. Aliado a isso o sistema rodoviário brasileiro conta com diversos tipos de vias, apresentando trechos em boas condições de conservação até trechos em condições precárias ou praticamente inexistentes. Além desse fator, as normas de segurança veicular vêm intensificando seus requisitos exigindo cada vez veículos mais seguros. Com isso em mente, as empresas fabricantes de carrocerias de ônibus estão investindo em estruturas mais duráveis, eficientes e seguras, fomentando a busca pelo desenvolvimento de produtos melhores e mais competitivos. Este trabalho objetivou realizar análise da vida em fadiga de alto ciclo em uniões soldadas de perfis metálicos de paredes finas utilizadas em estruturas de ônibus sujeitos a carregamentos dinâmicos, avaliando comparativamente o uso de três matérias primas diferentes, para compreender quais são os impactos de substituir os materiais já utilizados por materiais com melhores propriedades mecânicas a fim de produzir estruturas com melhor desempenho estrutural no quesito segurança veicular. Este trabalho iniciou com o estudo para compreender a real aplicação de veículos de transporte de passageiros rodoviários, sendo que para realizar esta tarefa foi elaborado um procedimento experimental que englobasse as principais rotas utilizadas por estes veículos e, através de aquisição de dados experimentais foi possível encontrar os carregamentos que atuam nestas estruturas. Com os resultados obtidos através de sensores foi possível compreender os carregamentos que as vias produzem na estrutura do veículo e a partir destes dados elaborou-se um ensaio de bancada para representar a aplicação real do veículo. Os dados de campo foram inseridos no modelo matemático e através dele foi possível encontrar as forças e carregamentos para ser aplicada a junta soldada escolhidos como objeto de estudo para realizar o ensaio de fadiga experimental de bancada. Foram avaliadas três matérias primas diferentes, sendo duas delas comumente utilizadas em carrocerias de ônibus e um terceiro aço, bifásico laminado a frio, com limite de ruptura mínimo de 980 MPa, como uma microestrutura que consiste em ilhas martensíticas numa matriz ferrítica comercialmente chamado de DP980. Os materiais foram submetidos a diversos experimentos e baseado nos resultados encontrados é possível concluir que o aço DP980 substitui de forma muito superior os outros materiais. É também possível afirmar que utilizando o material DP980, por ter propriedades mecânicas superiores aos outros, é possível desenvolver estruturas mais eficientes no quesito de segurança veicular, onde este material apresenta uma capacidade de absorção de energia maior que os outros, permitindo que sejam projetadas estruturas mais seguras.

Palavras chave: Durabilidade; Fadiga; Aços de alta resistência; Ensaio de Fadiga.

ABSTRACT

Projects of bus body structures must be developed taking into consideration the dynamic loads that this type of vehicle is subjected to. Experimental and numerical methods can be used to evaluate fatigue life in order to determine the durability of these vehicles. Bus structures are basically constructed using welded thin walled profiles that are often oversized due to the lack of knowledge of several product characteristics such as the conditions of the pavements, deficiency of characterization of welded joints and the quality of the materials used. Allied to this the Brazilian road system counts on several types of roads, presenting roads in good conditions of conservation until roads in precarious conditions with extremely high severity. In addition, vehicle safety standards have been intensifying their requirements. With that in mind, bus body manufacturers are investing in research to produce more durable, efficient and safe buses, expanding the search through engineering tools to develop better and more competitive products. The aim of this work was to analyze high cycle fatigue life of welded joints of thin-walled profiles used in bus structures subject to dynamic loads, comparing the use of three different raw materials to understand the impacts of the replacement of the materials already used in these structures for materials with better mechanical properties in order to produce structures with better structural performance in terms of vehicular safety. This work began with the study to understand the real application of coaches. To perform this task was elaborated an experimental procedure that encompasses the main routes used by these vehicles, and through the acquisition of experimental data it was possible to evaluate the real loads that this kind of structures are submitted to. With the results obtained through the sensors it was possible to understand the loads that the roads produce in the structure of the vehicle and from these data a laboratory test was elaborated to represent the real application of the vehicle. The data acquired were inserted into the numerical model and through them it was possible to find the forces and loads that were applied to the welded joint that was chosen as object of study to perform the experimental fatigue test. Proof bodies were elaborated to represent the real application of the vehicle, those were produced using three different raw materials, two of them commonly used in bus bodies structures and a third steel, dual-phase cold-rolled, with a minimum rupture limit of 980 MPa, with a microstructure that consists of martensitic islands in a ferritic matrix, commercially called DP980. commercially called DP 980. The materials were submitted to several experiments and based on the results of the tests it is possible to conclude that DP 980 present a better performance than the others. This material has presented a fatigue life more than two times higher than the others for the same conditions. It was also possible to assure that, using DP 980 steel, it is possible to develop safer structures for buses, because this material has higher mechanical properties and greater capacity to absorb energy when compared to the others.

Keywords: Durability; Fatigue; High Strength Steel; Fatigue test.

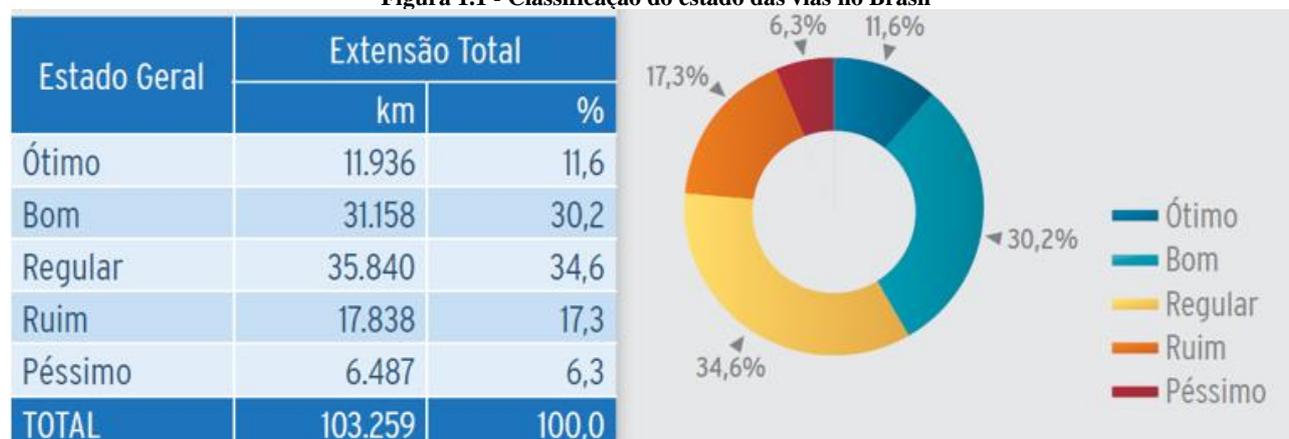
1 INTRODUÇÃO

Motivado pela busca de soluções que reduzam os níveis de emissões de CO₂, aumentem a segurança dos usuários e a busca pela redução no consumo de combustível, a indústria da mobilidade vem aplicando em seus produtos materiais mais leves e com melhores propriedades mecânicas.

Dentro da indústria da mobilidade, o nicho de veículos pesados vem se adequando a esta nova realidade fazendo investimentos em diversas áreas como sistemas de segurança ativa e passiva, desenvolvimento de novos materiais com maior desempenho estrutural e maior durabilidade. As fabricantes de carrocerias de ônibus vêm realizando diversos investimentos, sendo que grande parte do destino destes recursos é no desenvolvimento e utilização de novos materiais, devido ao fato da durabilidade dos veículos ser um grande diferencial deste mercado.

O sistema rodoviário brasileiro, devido ao seu tamanho e heterogeneidade, conta com trechos com boas condições de conservação até trechos em condições precárias ou praticamente inexistentes. Segundo levantamento feito pelo Departamento Nacional de Infraestrutura e Transporte (DNIT), o País conta com 1,7 milhão de quilômetros de estradas, porém, apenas 13%, ou 221.820 quilômetros, estão pavimentados. O restante – 87% das rodovias, não tem qualquer tipo de pavimentação (SANTOS, 2017). Segundo estudos realizados em 2016 pela Confederação Nacional dos Transportes (CNT), 58,2% das vias brasileiras asfaltadas apresentam algum tipo de deficiência, seja no pavimento, na sinalização ou na geometria da via. Desse total, 34,6% encontram-se em estado regular, 17,3% ruim e 6,3% péssimo, comprometendo significativamente o desempenho operacional e a segurança dos usuários (CNT, 2016).

Figura 1.1 - Classificação do estado das vias no Brasil



Fonte: CNT (2016)

A falta de conservação das vias aliado ao desconhecimento do uso torna difícil definir uma condição de projeto que represente a aplicação real destes veículos durante sua vida projetada,

levando as empresas a produzirem estruturas superdimensionadas, penalizando sua lucratividade e a eficiência energética. Além disso, os veículos que circulam em trajetos mais severos que os critérios de projeto, provavelmente irão falhar em campo, levando as empresas a realizar desembolsos em assistência técnica e insatisfação dos clientes.

Outra grande razão para a busca de novas tecnologias a serem implantadas em veículos de transporte coletivo é o desenvolvimento de carrocerias de ônibus mais seguras, onde através do uso de materiais mais eficientes é possível aumentar a absorção de energia destas estruturas quando se envolverem em acidentes. Este tema é bastante relevante pois segundo dados divulgados pela Polícia Rodoviária Federal (PRF), nos anos de 2011 a 2016 houve mais de 38.000 acidentes envolvendo este tipo de veículo em estradas federais (PRF, 2016).

1.1 Objetivos Gerais

O objetivo deste trabalho é realizar análise da vida em fadiga de alto ciclo em uniões soldadas de perfis de paredes finas utilizadas em estruturas de ônibus sujeitos a carregamentos combinados baseados em carregamentos reais medidos em campo e, através de comparações entre matérias-primas, definir se a utilização de um material com melhores propriedades mecânicas, sem alterar o processo produtivo poderá ser utilizado nestas estruturas sem comprometer sua vida em fadiga.

1.2 Objetivos Específicos

No contexto do objetivo geral os objetivos específicos são:

- Quantificar os sinais de entrada de pista para a carroceria;
- Gerar banco de dados com carregamentos que as vias produzem nas estruturas de ônibus;
- Calcular o dano que as vias causam na estrutura do ônibus;
- Criar metodologia de avaliação de durabilidade acelerada em laboratório que represente aplicação real de veículos em campo;
- Avaliar a vida em fadiga dos corpos de prova com diferentes materiais;
- Gerar dados que possibilitem otimizar projetos de estruturas de ônibus baseado em carregamentos reais.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Para realizar o estudo da vida em fadiga de alto ciclo em uniões soldadas de perfis de paredes finas sujeitos a carregamentos combinados, torna-se necessário fazer uma revisão bibliográfica revendo conceitos e definições de fadiga de alto ciclo, acúmulo de dano, *rainflow* e efeito dos concentradores de tensão. Nesta revisão também serão abordados assuntos referentes à aços microligados, aços bi-fásicos e seu comportamento quando submetidos a processos de soldagem.

2.1 Introdução a fadiga

Segundo a ASTM (2000) fadiga é o processo progressivo localizado de alteração estrutural permanente que ocorre em um material sujeito a condições de carregamento que produzem tensões e deformações flutuantes em algum ponto que pode culminar com trincas ou a completa fratura do material depois de um número suficiente de flutuações.

De acordo com Rosa (1994), dentre as distintas causas de falha de componentes mecânicos, a mais comum é a fadiga do material. Da quantidade total de falhas, as provocadas por fadiga variam de 50% a 90%, sendo na maioria das vezes falhas que ocorrem de forma inesperada, repentinamente, portanto bastante perigosas. Fadiga é a redução gradual da capacidade de carga do componente, pela ruptura lenta do material, consequência do avanço quase infinitesimal das fissuras que se formam no seu interior. Este crescimento ocorre para cada flutuação do estado de tensões.

Os carregamentos variáveis, sejam cíclicos ou não, fazem com que ao menos em alguns pontos, existam deformações plásticas também variáveis com o tempo. Estas deformações levam o material a uma deterioração progressiva, dando origem à trinca, a qual cresce até atingir um tamanho crítico, suficiente para a ruptura final, apresentando características macroscópicas de uma fratura frágil. A fadiga é um fenômeno de caráter estatístico e depende de diversos fatores como: carregamento, geometria, microestrutura do material, processos de fabricação, tensões residuais, acabamento superficial, tratamentos superficiais, defeitos além de fatores ambientais como temperatura e corrosão (TAKAHASHI, 2014).

Os valores de carregamentos que levam componentes a falhar por fadiga geralmente ocorrem a níveis de tensão inferiores ao limite de escoamento do material se comparado à um carregamento estático. Uma das formas de estimar a vida de um componente é utilizando as curvas

de fadiga do material que relaciona a tensão cíclica com o número de ciclos até a falha (Rosa, 1994).

Segundo Rosa (1994), prever a vida em fadiga de um componente estrutural sujeito a cargas variáveis é uma tarefa muito complexa. Um dos métodos mais utilizados para estimar a vida em fadiga é através do cálculo de dano, que se baseia no somatório de ciclos atuantes a uma determinada tensão. Em situações que o componente está sujeito a solicitações aleatórias e variáveis no tempo, como por exemplo, a que está sujeita a maioria dos componentes da carroceria de um ônibus, o simples cálculo de número de ciclos em determinado nível de tensão, não é mais um procedimento simples, e depende do histórico de carregamento presente na estrutura. Conhecer as solicitações atuantes em cada componente é essencial para uma análise confiável de fadiga (MOTTER, 2015).

Shigley (2005) cita que testes de fadiga em laboratório têm por objetivo reproduzir danos e os modos de falha encontrados em campo, de modo a acelerar a obtenção dos resultados. Os ensaios de fadiga para cargas de amplitude variável no tempo são realizados através das bases teóricas para relacionar o dano causado ao produto. Muitas vezes esses testes são longos e métodos são necessários para reduzir sua duração dos ensaios experimentais (PALIN-LUC et al., 2006).

Uma forma de encurtar os testes é submeter a estrutura a uma versão simplificada das solicitações previstas em serviço (Rosa, 1994). Assim, é possível em muitos testes eliminar os períodos de repouso e as cargas de amplitude muito pequena, sem afetar os resultados. Com base nisso para acelerar o processo da validação dos componentes de uma carroceria de ônibus, ensaios baseados em dados coletados em campo podem ser utilizados em bancadas de teste a fim de representar a utilização dos componentes e acelerar as respostas a futuros eventos.

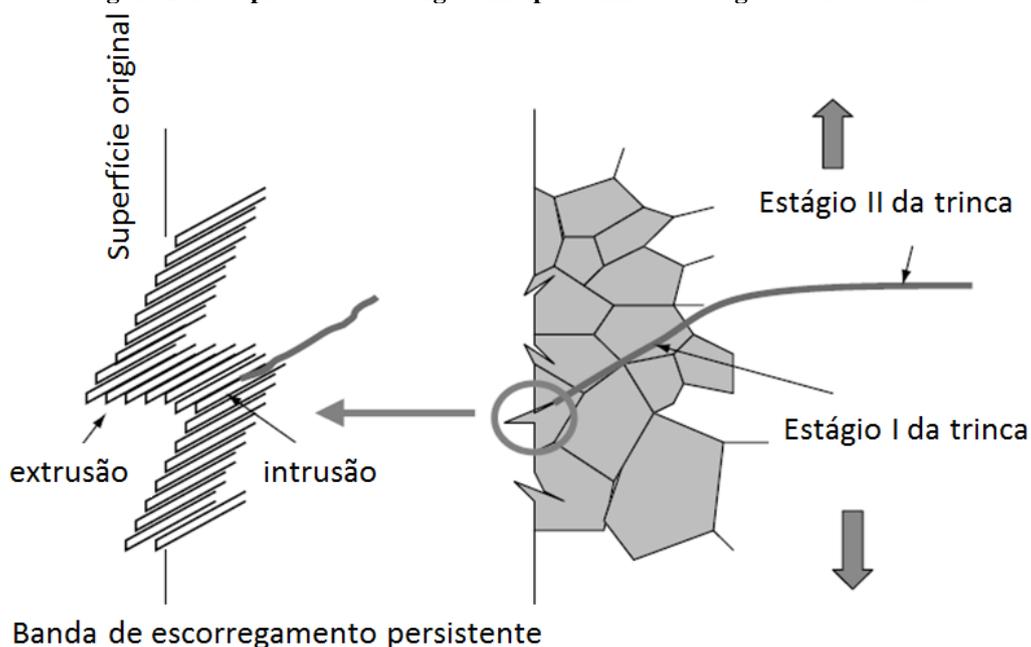
2.2 Mecanismo de falha por fadiga

O mecanismo de falha por fadiga em materiais metálicos é um processo cumulativo que envolve a iniciação da trinca, a propagação da trinca e a fratura final do componente. Durante o carregamento cíclico, a deformação plástica localizada pode ocorrer no local com maior concentração de tensão. Essas deformações plásticas geram um dano permanente ao componente gerando uma fissura. À medida que o componente experimenta um número crescente de ciclos de carregamento, o comprimento da trinca aumenta. Depois de certo número de ciclos a trinca irá causar o rompimento do componente (LEE et. al., 2005).

Segundo Lee et. al. (2005), o processo de fadiga envolve as seguintes etapas: nucleação da trinca, propagação da trinca e a fratura. As trincas são originadas no plano de cisalhamento ou na região com maiores concentrações de tensão, como bandas de deslizamento, inclusões, porosidade ou descontinuidade. O plano de cisalhamento localiza-se geralmente dentro dos limites de contorno de grão. A etapa de nucleação da trinca é o primeiro passo no processo de fadiga. Uma vez que a nucleação ocorre e a carga cíclica continua, a trinca tende a crescer ao longo do plano de cisalhamento máximo nos contornos de grão. Em materiais policristalinos, a deformação plástica ocorre inicialmente nos grãos orientados de forma mais desfavorável, ou seja, com planos de deslizamento próximos da direção da tensão cisalhante máxima (Rosa, 1994).

Lee et. al. (2005) mostra uma representação gráfica do processo de dano por fadiga onde a trinca inicia no ponto de maior concentração de tensão nas bandas de deslizamento (Figura 2.1). O próximo estágio é o de crescimento de trinca, que é dividido no estágio I e II. A nucleação e o crescimento do estágio I são geralmente considerados como a propagação inicial de fissuras curtas em um comprimento finito da ordem de um par de grãos no plano de tensão de cisalhamento máximo local. Nesta fase, a plasticidade da ponta de trinca é muito afetada pelas características de deslizamento, tamanho de grão, orientação e nível de carregamento, porque o tamanho da trinca é comparável à microestrutura do material. O crescimento da trinca na fase II refere-se à propagação de fissuras longas normais ao plano de tensão de tração principal e na direção máxima do esforço de cisalhamento. Neste estágio, as características das trincas longas são menos afetadas pelas propriedades da microestrutura do que no estágio I. Isso ocorre porque a zona plástica da ponta da trinca na fase dois é muito maior que a microestrutura do material.

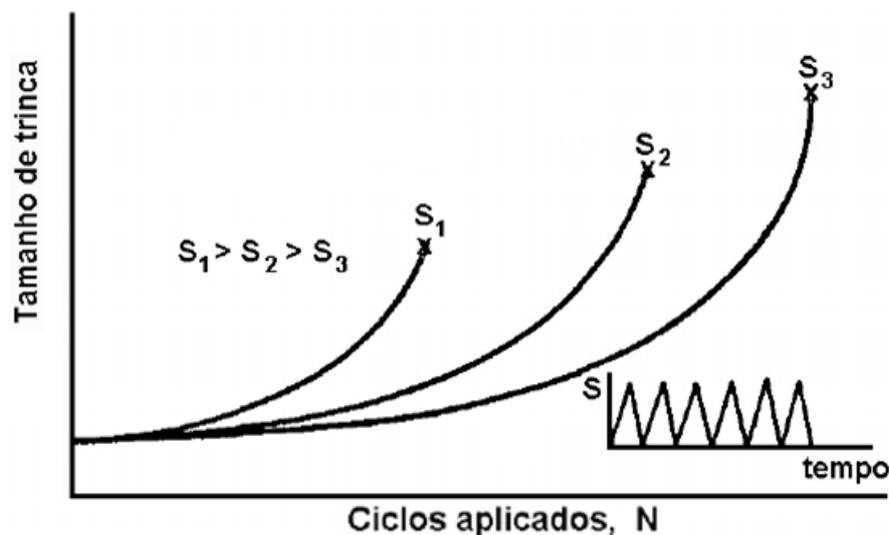
Figura 2.1 - O processo de fadiga: uma placa fina sob carga de tensão cíclica



Fonte: LEE et. al., 2005 (2005)

Para esta abordagem é necessário estabelecer o crescimento de uma trinca por fadiga. A Figura 2.2 mostra esquematicamente o registro de propagação de trinca em três corpos-de-prova, com pré-trincas iguais, submetidos a diferentes níveis de tensão cíclica, verifica-se que: para a tensão mais elevada a velocidade de crescimento de trinca é a maior e a vida em fadiga, conseqüentemente, é menor. Desta forma, o corpo-de-prova submetido ao maior carregamento suporta um número de ciclos consideravelmente menor, isto é, virá a romper em menor tempo (FORSYTH, 1963).

Figura 2.2 - Comprimento de trinca versus número de ciclos - Fratura indicada por "x"

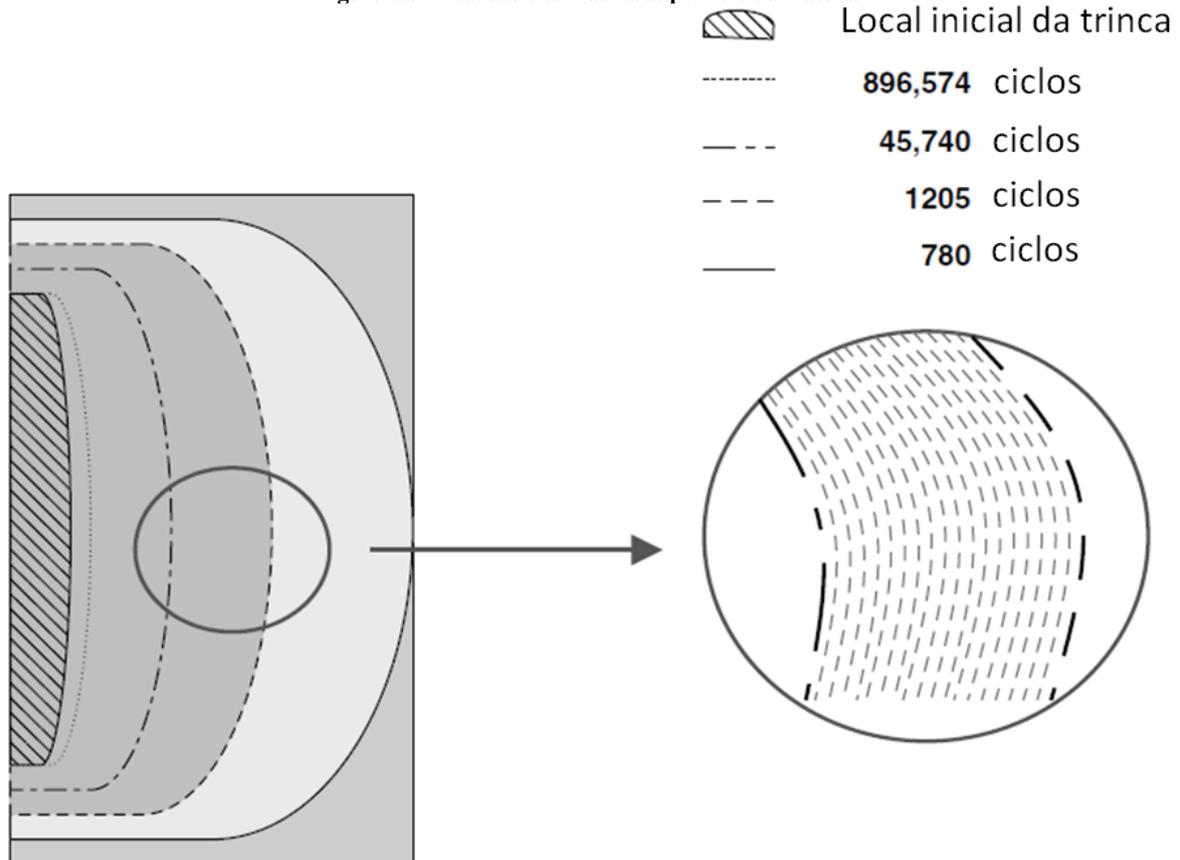


Fonte: Forsyth (1963)

Normalmente, o período de iniciação da trinca corresponde pela maior parte da vida em fadiga de um componente feito de aço no regime de alto ciclo (aproximadamente > 10.000 ciclos). No regime de baixo ciclo (aproximadamente <10.000 ciclos), a maior parte de vida em fadiga é utilizada na propagação das trincas (Lee et. al., 2005). De acordo com Lee et. al. (2005), uma vez que tenha ocorrido uma trinca ou falha total do componente sua superfície pode ser inspecionada. A fadiga axial ou de flexão geralmente deixa marcas de praia, esse comportamento pode ser visto na Figura 2.3. O local de nucleação da trinca é no centro da marca e ela se propaga para fora do local de nucleação geralmente de forma radial.

Em alguns casos, a inspeção do tamanho e localização das marcas de praia deixadas para trás podem indicar onde um período diferente de crescimento de trinca começou ou terminou. As estrias apresentadas na Figura 2.3 representam a extensão da trinca durante um ciclo de carregamento. No caso de uma falha, se forma uma região cisalhada, que é o último pedaço de material que suporta a carga antes da falha. O tamanho dessa região depende do tipo de carga, do material e de outras condições.

Figura 2.3 - Marcas e estrias na superfície da fratura



Fonte: Lee et. al. (2005)

2.3 Acúmulo de dano

A fadiga pode ser calculada com base nas curvas S-N utilizadas em conjunto com a hipótese de danos cumulativos lineares (regra de Miner), para prever o comportamento de componentes submetidos a condições de carregamento variável (SILVA, 2010). Um corpo de prova sujeito a um número de ciclos de carregamento inferior ao número necessário para causar sua ruptura sofre deterioração da sua estrutura, sendo esse fenômeno conhecido como dano (LAJE, 2008).

O acúmulo de dano provocado pelos carregamentos que ocasionam a falha do componente é afetado por uma quantidade tão grande de variáveis que geralmente torna-se necessário testar a estrutura para comprovar que ela é confiável, estes testes podem ser realizados em laboratórios ou em campos de prova. Os ensaios devem ser realizados de tal forma a representar da forma mais precisa a aplicação do componente permitindo através do experimento validar a capacidade da estrutura de resistir a fadiga, e ao mesmo tempo não devem ser excessivamente longos ou muito custosos (ROSA, 1994).

O acúmulo de danos em uma estrutura baseia-se na premissa de que à medida que o dano se acumula torna a vida dos componentes limitada a carregamentos futuros. Dano é definido como a relação entre ciclos aplicados a uma determinada amplitude de tensão e o número de ciclos para falhar (BRANCO et. al., 1999). Miner considerou que o fenômeno dos danos acumulados, ou seja, a deterioração da resistência é proporcional a energia absorvida pelo material. O parâmetro que define isso é a razão de ciclos mostrada na Equação (1) (LAGE, 2008 apud WEI LU, 2003).

$$D = \frac{n_1}{N_{1f}} \tag{1}$$

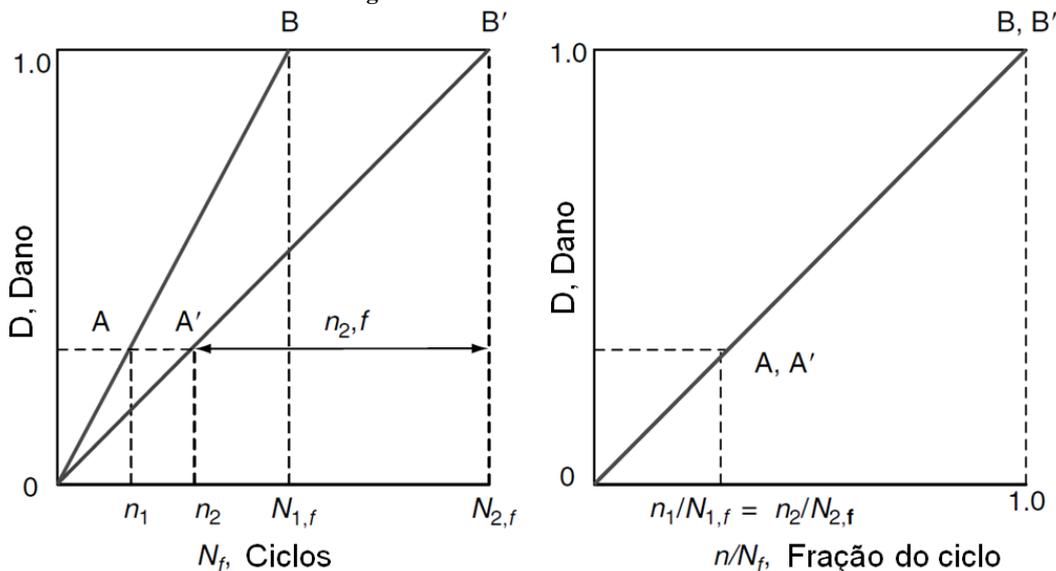
Onde:

N = Número do ciclos ensaio

N_{1f} = Número de ciclos até a falha na curva $S - N$

Se as curvas de dano no ciclo N_{1f} forem linearizadas, a regra de dano linear é desenvolvida reduzindo as curvas de dano a uma única linha na relação de ciclo $n_1 = N_{1f}$, como mostrado Figura 2.4. Neste caso, o dano à fadiga tem uma relação linear única com a relação do ciclo independentemente dos níveis de tensão. Assim, em um determinado nível de dano, a relação de ciclo para duas curvas de dano diferente será a mesma. Isto é ilustrado pela Figura 2.4, em que duas curvas de dano linear traçadas em um gráfico de danos versus ciclos em falhas são iguais entre si quando plotadas em um gráfico da relação de dano versus ciclo. A falha ocorrerá quando a soma das proporções em cada nível de tensão atingir um valor de 1,0.

Figura 2.4 - Consumo de vida linear



Fonte: Adaptado de Lee et. al. (2005)

A Equação (1) se aplica a teoria linear tendo ela sido desenvolvida por Miner em 1945 para prever falhas em estruturas. Por tratar-se de uma regra linear de acumulação de dano se for consumida metade da vida em fadiga num nível de tensão, ainda resta à outra metade em qualquer outro nível de carregamento.

Um exemplo dado por Lages (2008) apud Wei Lu (2003), considerando o carregamento mostrado na Figura 2.5 (a). Inicialmente faz-se a decomposição do espectro de carga de amplitude variável numa série de espectros parciais (blocos) de amplitude constante, ilustrado na Figura 2.5 (b) como σ_1 , σ_2 e σ_3 , aplicadas durante n_1 , n_2 e n_3 ciclos respectivamente. Para σ_1 tem-se um limite de resistência a fadiga de N_1 ciclos, como ilustrado na Figura 2.5 (c). Assim, devido a aplicação deste carregamento, a vida total do material foi reduzida por uma fração de n_1/N_1 . O dano é somado para todos os ciclos no histórico de carregamento sendo matematicamente expresso como mostrado na Equação (2), ocorrendo a falha por fadiga quando o dano chegar a 1.

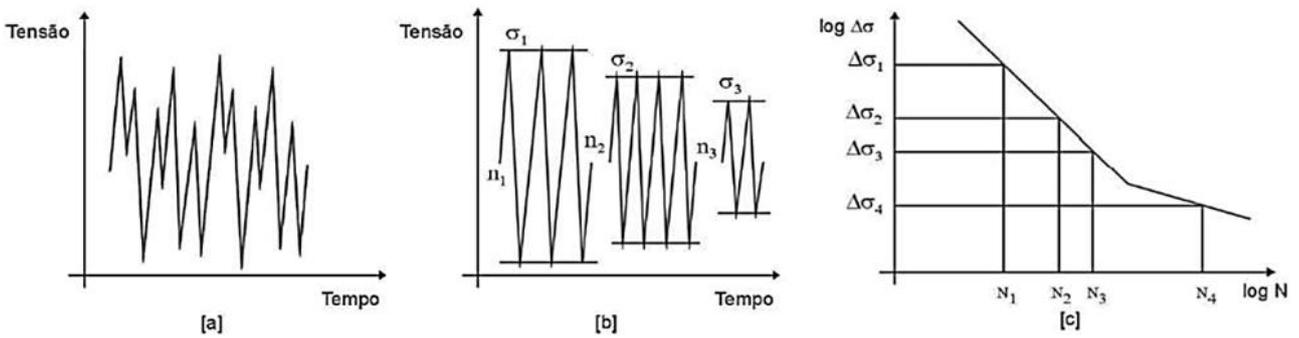
$$D = \sum_{i=1}^m \frac{n_i}{N_i} \quad (2)$$

n_i = número de ciclos aplicados no i – ésimos nível de tensão;

N_i = vida em fadiga do i -ésimo nível de tensão e corresponde ao número de ciclos até a falha nesse nível de tensão;

A regra de Palmgren-Miner pode não representar a realidade principalmente quando o nível de amplitude for muito alto ou muito baixo, necessitando recorrer nesses casos a alguma teoria que leve em consideração o dano cumulativo não linear. Apesar desse problema, a regra de Miner é amplamente utilizada, devido a sua facilidade se comparada a outras teorias mais complexas nem sempre trazem resultados mais significativos (SHIGLEY; MISCHKE; BUDYNAS, 2005).

Figura 2.5 - Regra de Palmgren-Miner Figura (a): carregamento aleatório; Figura (b): histórico do carregamento reduzido e Figura (c): Ciclos para falha (curva S-N)



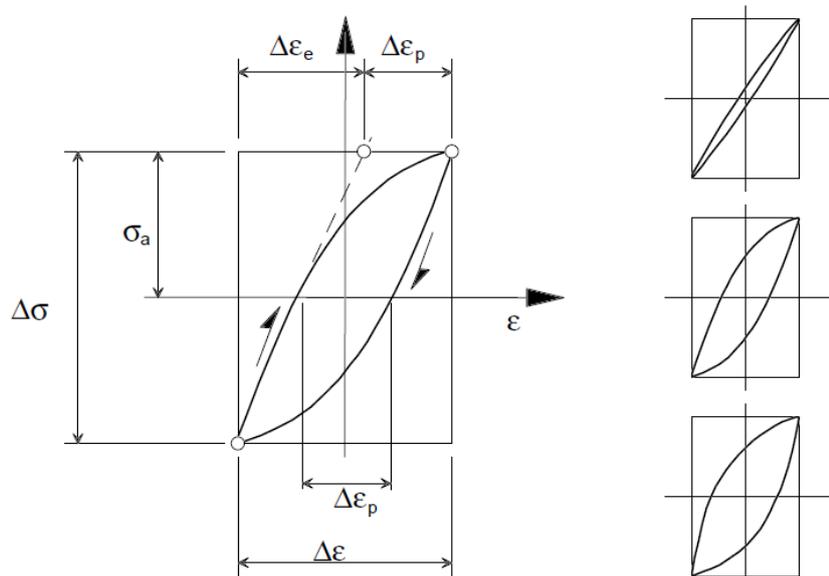
Fonte: Lages (2008) apud Wei Lu (2003)

2.4 Curva tensão deformação cíclica

De acordo com Rosa (1994), materiais que sofrem carregamentos, mesmo abaixo do limite de elasticidade, tem sua estrutura cristalina deformada. Isso significa dizer que não há limite elástico verdadeiro contanto que consigamos medir as deformações. Ao aplicar o menor dos carregamentos deformações plásticas ocorrem de forma quase imperceptível. Essas deformações levam a um rearranjo da estrutura cristalina do material.

Se a deformação plástica for grande é imediato o efeito de reorganização da estrutura cristalina. O melhor teste para o estudo destes aspectos é o de carregar um corpo de prova ciclicamente com valores fixos de deformação. Ao deformar-se ciclicamente desenvolve-se um laço de histerese provocado pela deformação plástica (Figura 2.6).

Figura 2.6 – Esquema de histerese típico com os parâmetros envolvidos – Exemplo de laços com idênticos $\Delta\sigma$ e $\Delta\varepsilon$



Fonte: Rosa (1994)

A deformação total, $\Delta\varepsilon$, forma-se através das componentes elásticas e plásticas. A parte plástica é representada por $\Delta\varepsilon_p$, correspondente a largura do laço de histerese. A altura deste laço é $\Delta\sigma = 2\sigma_a$, onde σ_a é a amplitude tensão cíclica.

$$\Delta\varepsilon = \Delta\varepsilon_e + \Delta\varepsilon_p \quad (3)$$

$$\Delta\varepsilon = \Delta\sigma/E \quad (4)$$

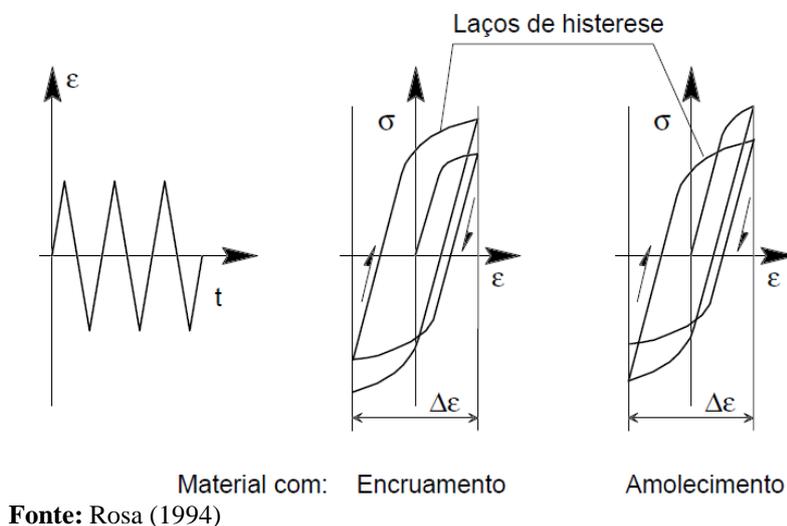
Através de ensaios experimentais é possível medir diretamente $\Delta\varepsilon$ e $\Delta\sigma$, dessa forma é possível calcular a faixa de variação da deformação plástica:

$$\Delta\varepsilon_p = \Delta\varepsilon - \Delta\varepsilon_e \quad (5)$$

De acordo com Rosa (1994), o mecanismo básico de alteração da curva tensão-deformação ocorre devido a plastificação cíclica, que está relacionada a movimentação de discordâncias no material. Para um material com bastante encruamento, as deformações plásticas movimentam-se produzindo o efeito de eliminação das discordâncias contrárias, minimizando o volume de discordâncias. Isto faz com que haja a redução do limite de escoamento do material. Para os materiais recozidos, ao serem deformados plasticamente, ocorre o aumento do número de discordâncias provocando o encruamento. O encruamento permanece até o material atingir uma condição de equilíbrio.

As alterações nas propriedades mecânicas dos materiais dependem basicamente da faixa de deformação que é aplicada, $\Delta\varepsilon$. A máxima variação ocorre nos primeiros 10% a 20% da vida de fadiga. A Figura 2.7 ilustra o comportamento de dois metais, um que encrua e outro que amolece ciclicamente.” Rosa (1994).

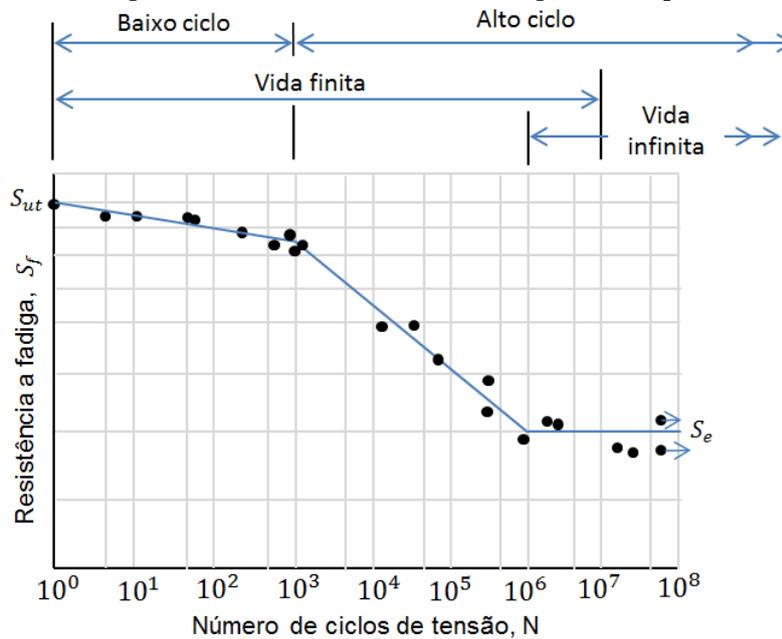
Figura 2.7 - Condições em que o ensaio é executado e representação



2.5 Curva S-N

Para determinar a resistência de materiais sob a ação de carga de fadiga, corpos de prova são sujeitos a forças repetidas variáveis de magnitudes especificadas ao passo que ciclos ou inversões são contados até sua destruição. Em decorrência da natureza estatística da falha por fadiga, muitos testes são necessários para estabelecer a resistência a fadiga de um material, sendo a primeira amostra testada a uma tensão um pouco inferior a resistência última do material, a segunda amostra a uma tensão um pouco abaixo da primeira sendo este processo continuado e os resultados traçados em um diagrama S-N como mostrado na Figura 2.8 (SHIGLEY; MISCHKE; BUDYNAS, 2005).

Figura 2.8 - Diagrama S-N resultantes de ensaio de fadiga axial completamente inversa



Fonte: Adaptado de Shigley, Mischke e Budynas (2005)

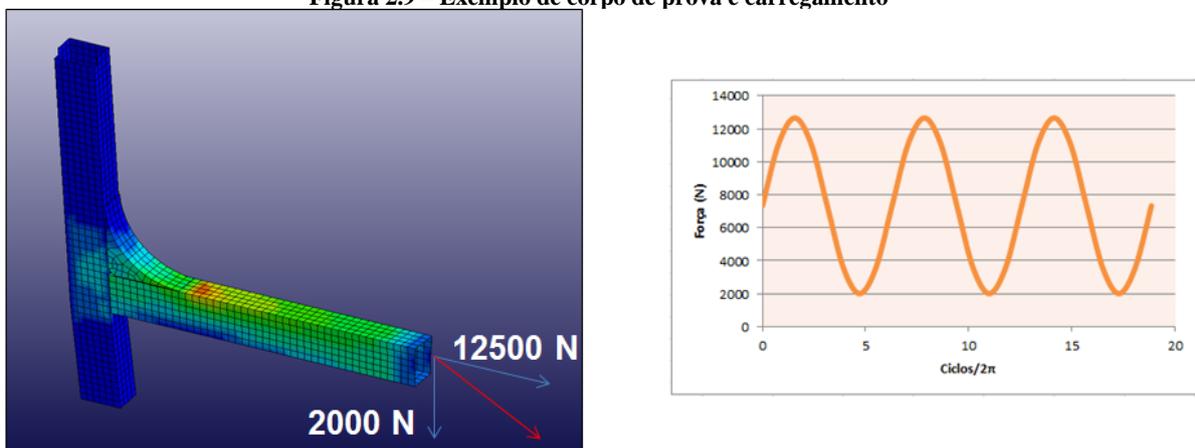
Segundo Norton (2013), Shigley, Mische e Budynas (2005), teorias de fadiga baseadas no dano estão fortemente associadas a uma combinação do número de carregamentos aplicados pela amplitude de tensões. A curva S-N é um dos métodos utilizados para representar o comportamento de materiais à fadiga sendo este baseado na tensão mecânica (*Stress Based Method*), e é distinguido de outras metodologias pelas seguintes características:

- Tensão cíclica é o parâmetro que governa a falha em fadiga;
- Regime de alto ciclo está presente;
 - Alto número de ciclos até a falha ($N > 10^4$);

- Pequena deformação plástica devido ao carregamento cíclico;
- Tensões atuantes nos pontos críticos da peça devem ser menores que a resistência de escoamento do material já que a análise de tensões utilizadas é no limite linear elástico.
- Não considera de forma explícita os efeitos plásticos cíclicos eventualmente presentes nas raízes dos entalhes e, como aquele, não reconhece a presença de trincas;
- O método SN só é apropriado às previsões de vidas longas.

As características descritas por este método estão presentes na maioria dos componentes de veículos sobre rodas, e por isso a escolha deste método. A determinação da tensão em corpos de prova depende do carregamento e da configuração da peça (Figura 2.9).

Figura 2.9 – Exemplo de corpo de prova e carregamento



Fonte: Autor (2019)

Qualquer carregamento que varie com o tempo pode potencialmente provocar falhas por fadiga. As cargas em máquinas rotativas tendem a ter a amplitude constante ao longo do tempo, já em equipamentos de serviço, essas cargas tendem a variar completamente sua amplitude em razão ao tempo, podendo assumir uma amplitude aleatória (NORTON, 2013).

As curvas de fadiga são obtidas em componentes simples como o da Figura 2.9, já as estruturas mais complexas necessitam de ferramentas e modelos computacionais para sua avaliação.

2.6 Tensões flutuantes

De acordo com Shigley, Mische e Budynas (2005), um carregamento aplicado a um componente é definido por um valor pico a pico de tensão (S_r) ou uma amplitude de tensão (S_a). A escala de tensão é a diferença entre a tensão máxima ($S_{m\acute{a}x}$) e mínima ($S_{m\acute{i}n}$) de um determinado ciclo, conforme mostrado na Figura 2.10.

$$S_r = S_{m\acute{a}x} - S_{m\acute{i}n} \quad (6)$$

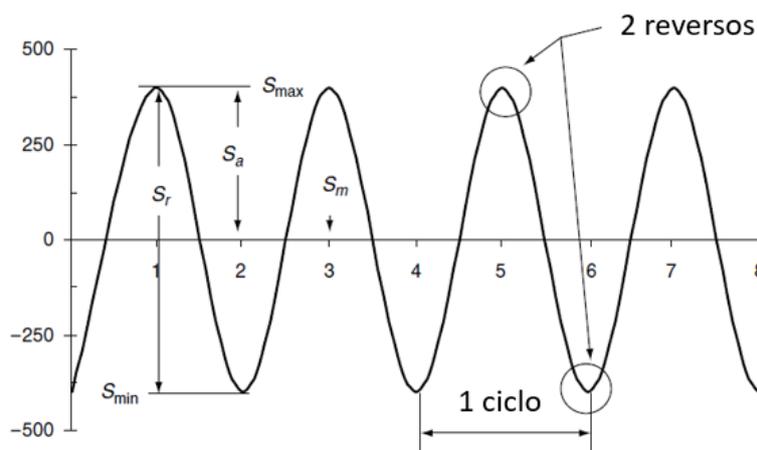
A amplitude da tensão é igual a metade da escala de tensão:

$$S_a = \frac{S_r}{2} = \frac{(S_{m\acute{a}x} - S_{m\acute{i}n})}{2} \quad (7)$$

É convencional para esforços de traao a tensão é positiva e para carregamentos de compressão a tensão é negativa. A magnitude da escala de tensão ou amplitude de tensão é a variável controlada e a variável resultante do número de ciclos (ou reversos) até a falha. Um ciclo é igual a dois reversos. A maioria das vezes a análise S-N é realizada usando carregamentos totalmente reversos, que indicam que a carga alterna em relaao a média zero. A tensão média é definida por:

$$S_m = \frac{(S_{m\acute{a}x} - S_{m\acute{i}n})}{2} \quad (8)$$

Figura 2.10 - Detalhamento das nomenclaturas



Fonte: Adaptado de Lee et. al. (2005)

Carregamentos maiores determinam vidas mais curtas e carregamentos menores vidas mais longas. Componentes e estruturas mecânicas reais são submetidas a cargas alternantes com tensão média. Nestes casos são utilizados dois parâmetros para descrever a tensão:

- Relação de tensões:

$$R = \frac{S_{mín}}{S_{máx}} \quad (9)$$

- Relação de amplitudes:

$$A = \frac{S_a}{S_m} = \frac{(1 - R)}{(1 + R)} \quad (10)$$

Segundo Lee et. al. (2005), para gerar dados úteis usando a abordagem tensão-vida, os testes de fadiga são geralmente realizados em vários corpos de prova em diferentes amplitudes de tensão totalmente reversas ($R = -1$) em uma variedade de vidas de fadiga para amostras preparadas de forma idêntica.

A vida em fadiga (ciclos ou reversões) refere-se à vida necessária para nuclear e crescer uma pequena trinca. O limite de fadiga representa a nucleação da trinca, que é contida pelo limite da primeira barreira de grãos o que impede a propagação. Apenas aços tem limite de fadiga claramente definidos, alumínio e estruturas metálicas soldadas não possuem esse limite.

A Equação (11) representa uma curva de fadiga típica, onde S_a refere-se à vida necessária para nuclear e crescer uma pequena rachadura para o comprimento da fenda visível.

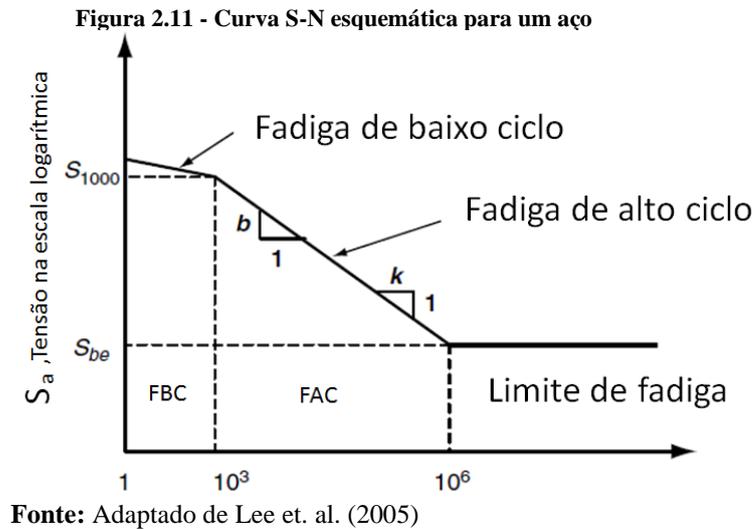
$$S_a = S'_f \times (N)^b \quad (11)$$

Onde:

- $b =$ expoente de fadiga do material
- $S'_f =$ coeficiente de resistência a fadiga
- $N =$ número de ciclos

Historicamente grandes quantidades de dados S-N foram gerados com base em testes de flexão giratórios totalmente reversos em amostras padronizadas. A curva S-N é derivada de amostras padrão sob carregamentos de flexão totalmente reversos podendo ser construída como uma curva contínua com três regiões lineares distintas quando construídas em forma de coordenadas log-log (Figura 2.11). Os dois segmentos lineares inclinados representam as regiões de fadiga de ciclo baixo (FBC) e fadiga de alto ciclo (FAC), e a assíntota horizontal representa o limite

de fadiga de flexão. O limite entre fadiga de ciclo baixo e alto não pode ser definido por um número específico de ciclos (Lee et. al, 2005).



Logo é possível estimar a vida em fadiga de componentes baseada na resistência a tração do material, Conhecendo um ponto da curva S-N (S_1, N_1), a inclinação da curva e o número de ciclos até a falha (N_2) para uma determinada amplitude de tensão (S_2) é dado por:

$$N_2 = N_1 \times \left(\frac{S_1}{S_2}\right)^{-1/b} \quad (12)$$

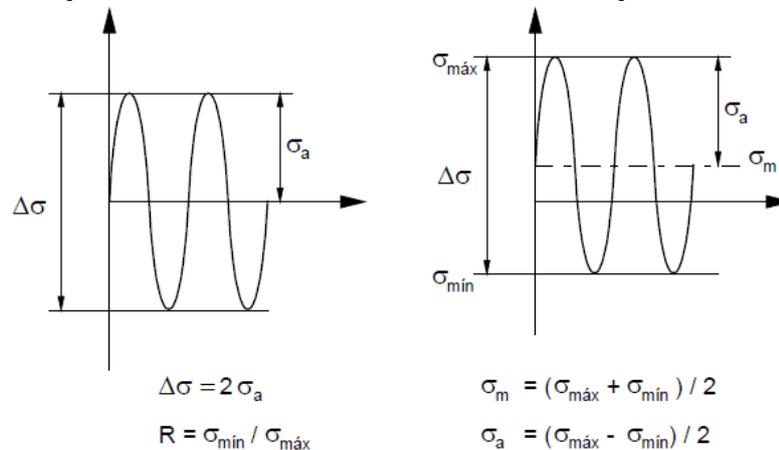
Em geral, se o comportamento a fadiga é determinado pelo mecanismo de propagação de trincas em juntas soldadas ou entalhes, a curva de fadiga tem uma inclinação abrupta ($b = 0,3$; $k = 3$). Por outro lado, se o comportamento de fadiga é controlado pelo modo de iniciação da trinca em componentes sem entalhes e lisos, a curva de fadiga tem uma inclinação mais suave ($b = 0,15$; $k = 7$). Por exemplo, aplicando um aumento de 10% na amplitude através da utilização da Equação (12) a vida em fadiga é reduzida em 53% (LEE et. al., 2005).

2.7 Efeito da tensão média

Os estudo da resistência a carregamentos cíclicos foi inicialmente realizado com corpos de prova de seção circular, estes que eram submetidos a esforços de flexão e carregamentos rotativos. Através da contagem do número de rotações até a ruptura do corpo de prova, obtemos o número de ciclos que o material suporta até sua falha, valor correspondente ao nível de tensão cíclica atuante. Embora a carga seja constante, neste tipo de ensaio a tensão varia de forma senoidal com o tempo, devido à rotação do corpo de prova (Figura 2.12). Em outros casos a tensão pode variar ciclicamente sobre um valor de tensão média diferente de zero, desta forma fazendo com que a

alternância não seja simétrica. Devido a este fator deve-se considerar não somente a influência da amplitude da tensão alternante, mas também a intensidade da tensão média sobre a resistência à fadiga (Rosa, 1994).

Figura 2.12 - Variação da tensão em um ensaio de flexão rotativa e definição das tensões em um caso geral



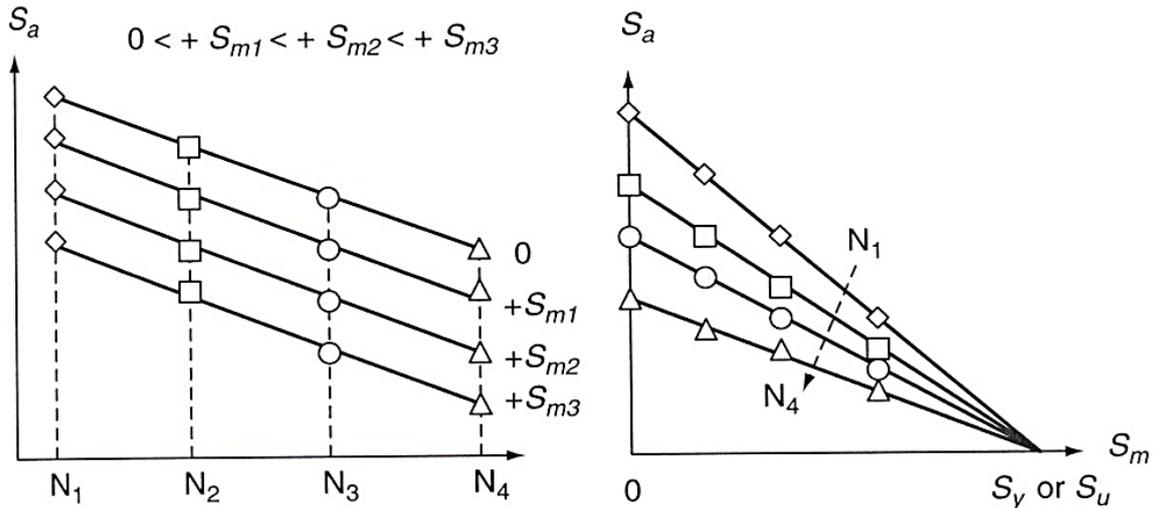
Fonte: Rosa (1994)

De acordo com Young-Li et al (2005), o dano de fadiga de um componente correlaciona-se fortemente com a amplitude de tensão aplicada e é influenciado pela tensão média (um fator secundário). Na região de fadiga de alto ciclo, as tensões médias têm um efeito significativo no comportamento a fadiga dos componentes, sendo responsáveis pela abertura e fechamento das microfissuras. Como a abertura de microfissuras acelera a taxa de propagação de trincas e o fechamento de microfissuras retarda o crescimento de trincas, logo, tensões médias normais de tração são prejudiciais e as de compressão são benéficas em termos de resistência à fadiga.

A tensão média de cisalhamento não influencia na abertura ou fechamento de microtrincas, e por essa razão, tem pouco efeito sobre a propagação de trincas. Para a fadiga de baixo ciclo o efeito da tensão média na resistência a fadiga é muito pequeno ou nenhum, isso ocorre, pois, a grande quantidade de deformação plástica praticamente elimina os efeitos benéficos ou prejudiciais da tensão média.

Os primeiros modelos empíricos criados, baseados em modelos experimentais, foram os de Gerber (1874), Goodman (1899), Haigh (1917) e Soderberg (1930) propostos para compensar os efeitos de tensão média na resistência à fadiga de alto ciclo. As representações gráficas mais úteis de dados de fadiga experimental são parcelas de vida constante de S_{\max} versus S_{\min} ou S_a e S_m . Conforme ilustrado na Figura 2.13, os modelos de vida constante podem ser determinados experimentalmente a partir de uma família de curvas S-N geradas com valores específicos de S_a e S_m .

Figura 2.13 - Curvas de vida constante



Fonte: Lee et. al. (2005)

Em 1874 Gerber propôs uma representação parabólica da curva de Wohler para correção da amplitude da tensão aplicada totalmente reversa ($R = -1$), sendo S_e o limite de fadiga para o carregamento totalmente equivalente a uma amplitude de S_a com média S_m , conforme mostrado na Equação (13):

$$S_e = \frac{S_a}{1 - \left(\frac{S_m}{S_u}\right)^2} \quad (13)$$

Goodman, em 1899, propôs uma dependência linear conforme mostrado na Equação (14):

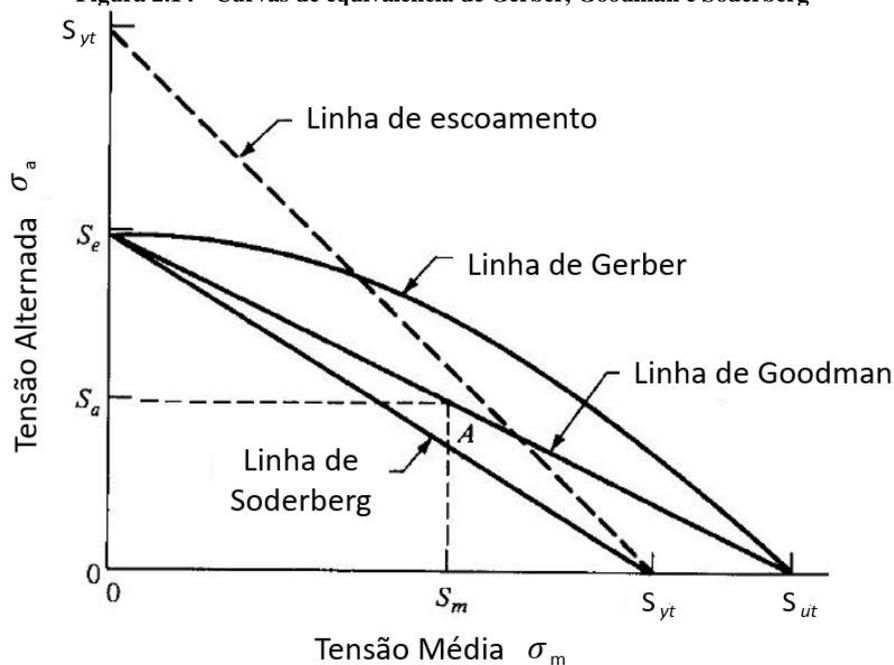
$$S_e = \frac{S_a}{1 - \frac{S_m}{S_u}} \quad (14)$$

Outro pesquisador, Soderberg sugeriu a normalização pela tensão de escoamento, S_y , ao invés da tensão de ruptura do material, S_u , conforme mostrado na Equação (15):

$$S_e = \frac{S_a}{1 - \frac{S_m}{S_y}} \quad (15)$$

A Figura 2.14 apresenta no mesmo gráfico as curvas de Gerber, Goodman e Soderberg, neste gráfico são apresentados os valores normalizados de S_a , que aplicados com diferentes amplitudes de média S_m , são equivalentes ao mesmo S_e (SHIGLEY; MISCHKE; BUDYNAS, 2005).

Figura 2.14 - Curvas de equivalência de Gerber, Goodman e Soderberg



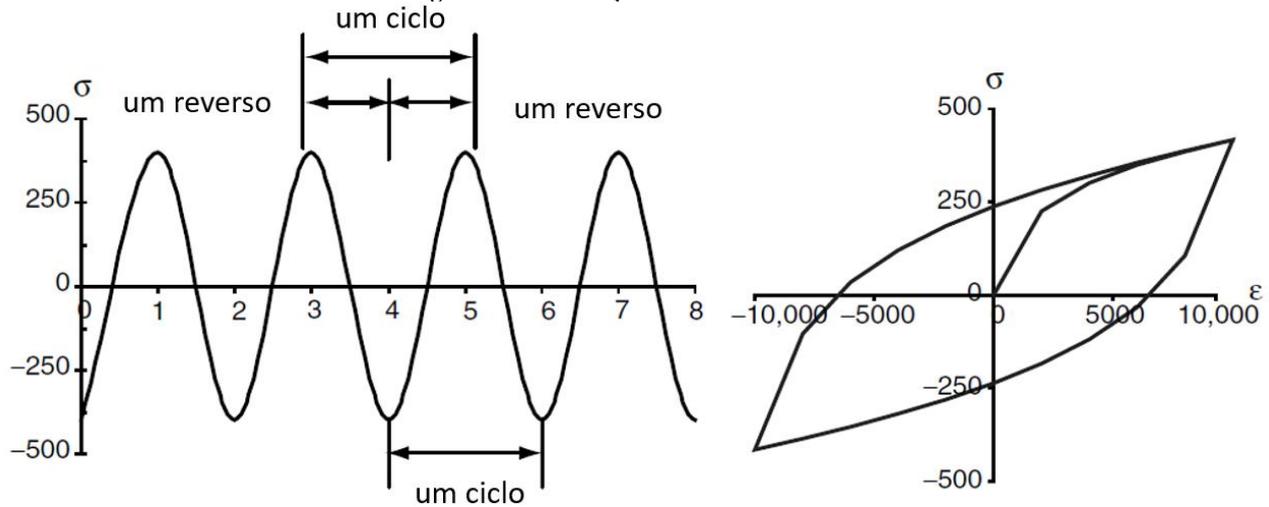
Fonte: Adaptado de Shigley, Mischke e Budynas (2005)

2.8 Contagem de ciclos

Os métodos de previsão da vida em fadiga relacionam a vida em fadiga aos ciclos de carregamento. Para componentes em serviço as cargas podem ter amplitudes constantes ou variáveis com o tempo. Para casos que exibem carga de amplitude constante a determinação da amplitude de um ciclo e o número de ciclos experimentados por um componente é um exercício direto. No entanto, se a amplitude do carregamento muda com o tempo, é mais difícil determinar o que constitui um ciclo e a amplitude correspondente desse ciclo (LEE et. al., 2005).

Os ciclos podem ser contados como históricos temporais do parâmetro de interesse como, força, torque, aceleração ou deflexão. Na Figura 2.15, um ciclo de tensão completo em um domínio do tempo está relacionado a um loop de histerese fechado na coordenada local de tensão-deformação e consiste em duas reversões. A reversão pode ser descrita como o evento de descarregamento ou carregamento (LEE et. al., 2005).

Figura 2.15 - Definição de ciclos e reversões



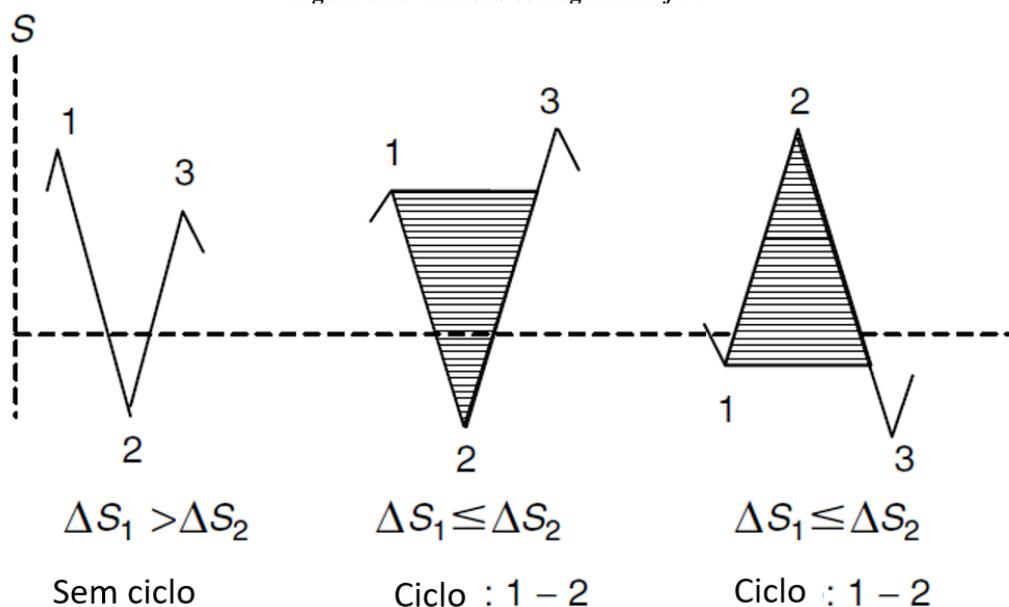
Fonte: Adaptado de Lee et. al. (2005)

2.8.1 Análise Rainflow 3 pontos

O método de contagem *rainflow* é uma das principais metodologias para contagem de ciclos, que é utilizada para reduzir históricos temporais de amplitude complexa em uma série de eventos discretos e simples de carregamentos que podem ser associados a dano em fadiga. É utilizado quando as cargas tendem a variar completamente sua amplitude com relação ao tempo, normalmente utilizado em equipamentos de serviço, nesses carregamentos somente os valores máximos e mínimos irão influenciar na vida em fadiga (LEE et. al., 2005).

Esta regra de contagem de ciclos usa três pontos consecutivos em um histórico de tempo de carga para determinar se um ciclo é formado. A Figura 2.16 mostra as regras que identificam os dois possíveis ciclos em uma história na qual a tensão é o parâmetro de carregamento. Os 3 pontos consecutivos de tensão (S_1, S_2, S_3) definem os dois intervalos consecutivos como $\Delta S_1 = |S_1 - S_2|$ e $\Delta S_2 = |S_2 - S_3|$. Se $\Delta S_1 \leq \Delta S_2$, um ciclo de carregamento é extraído, variando de S_1 a S_2 . Caso contrário, nenhum ciclo é formado. Este método requer que a história de carregamento seja rearranjada de modo a conter somente picos e vales, e inicia com o pico mais alto ou o vale mais profundo, aquele que for maior em valor absoluto. Então a regra de identificação de ciclos é aplicada para checar cada três pontos consecutivos. Os dois pontos formando um ciclo são descartados da história, e os pontos remanescentes são conectados entre si. O procedimento é repetido até que não reste nenhum evento de carregamento (LEE et. al., 2005).

Figura 2.16 - Método contagem Rainflow



Fonte: Adaptado de Lee et. al. (2005)

2.9 Método de análise de comparação de testes

Segundo Lee et. al. (2005), a comparação entre sinais é realizada de forma a estabelecer uma relação entre os danos de sinais diferentes. A fórmula que define a severidade entre dois sinais diferentes (S_{1base} e S_2), é mostrada na Equação (16):

$$Severidade_{s2/s1} = \frac{N_2 \times \sum D_2}{N_1 \times \sum D_1} \quad (16)$$

Onde:

- N_1 é o número de repetições do sinal 1;
- N_2 é o número de repetições do sinal 2;
- $\sum D_1$ é o somatório dos ciclos do sinal 1;
- $\sum D_2$ é o somatório dos ciclos do sinal 2;

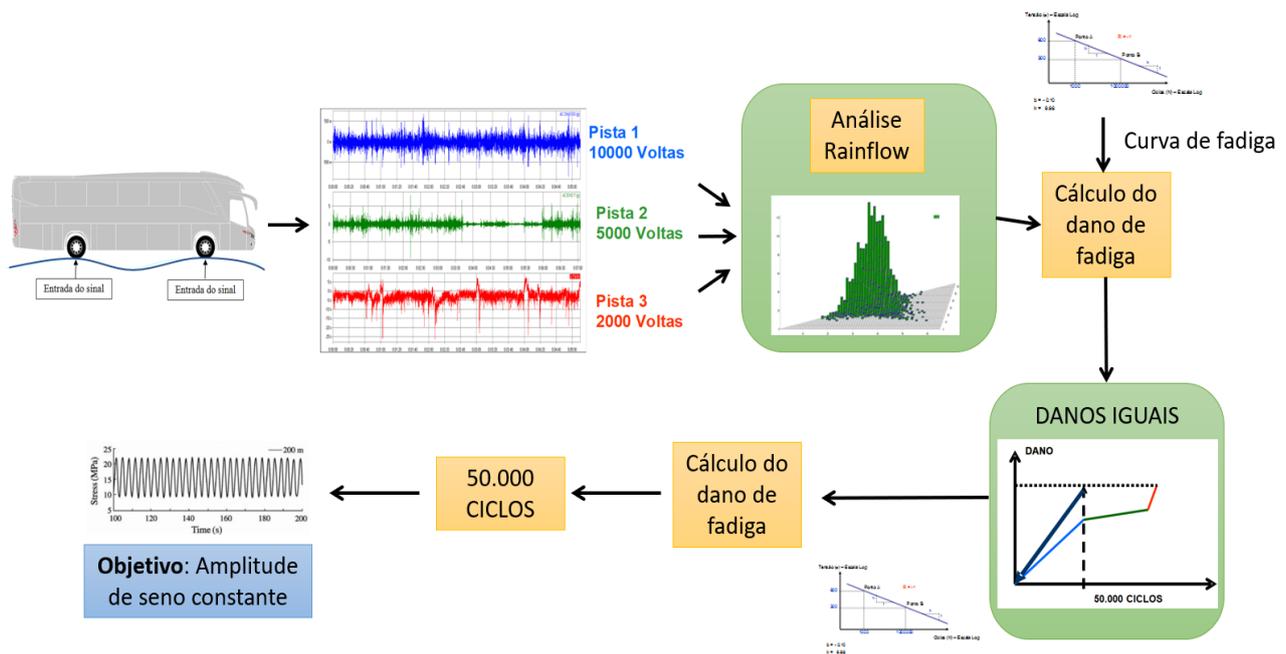
Sendo que a severidade entre dois procedimentos é:

$$Severidade_{p2/p1} = \frac{\sum_{i=1}^{SP2} (N_{2i} \times \sum D_2)}{\sum_{i=1}^{SP1} (N_{1i} \times \sum D_1)} \quad (17)$$

2.10 Análise do seno equivalente ou amplitude constante

Em algumas aplicações é necessário aplicar ondas senoidais durante um ensaio de fadiga. No dimensionamento de estruturas é necessário determinar as amplitudes de ondas senoidais, e, a partir disso surge o conceito de seno equivalente que é definido como “A amplitude de uma onda senoidal que, aplicada por um número determinado de ciclos (50.000, 100.000, 1.000.000) provoca o mesmo dano que um ciclo de durabilidade de pista (utilizando uma curva de fadiga)”. A Figura 2.17 mostra o fluxograma de obtenção do seno equivalente (GUELLER, 2009).

Figura 2.17 - Comparativo entre procedimentos de durabilidade



Fonte: Adaptado de Gueller (2009)

O seno equivalente é utilizado para fazer análises relativas utilizando canais, ou variáveis diferentes de tensões mecânicas tais como, por exemplo, forças, acelerações, deslocamentos. Neste caso, o dano “relativo” é facilmente obtido, pois o objetivo pode ser atingido com a inclinação da curva de fadiga (GUELLER, 2009).

2.11 Comportamento a fadiga de juntas de aço soldadas

De acordo com Branco, Fernandes e Castro (1999), o comportamento à fadiga das juntas soldadas por ser afetado por muitos parâmetros sendo que os de maior importância são os listados abaixo:

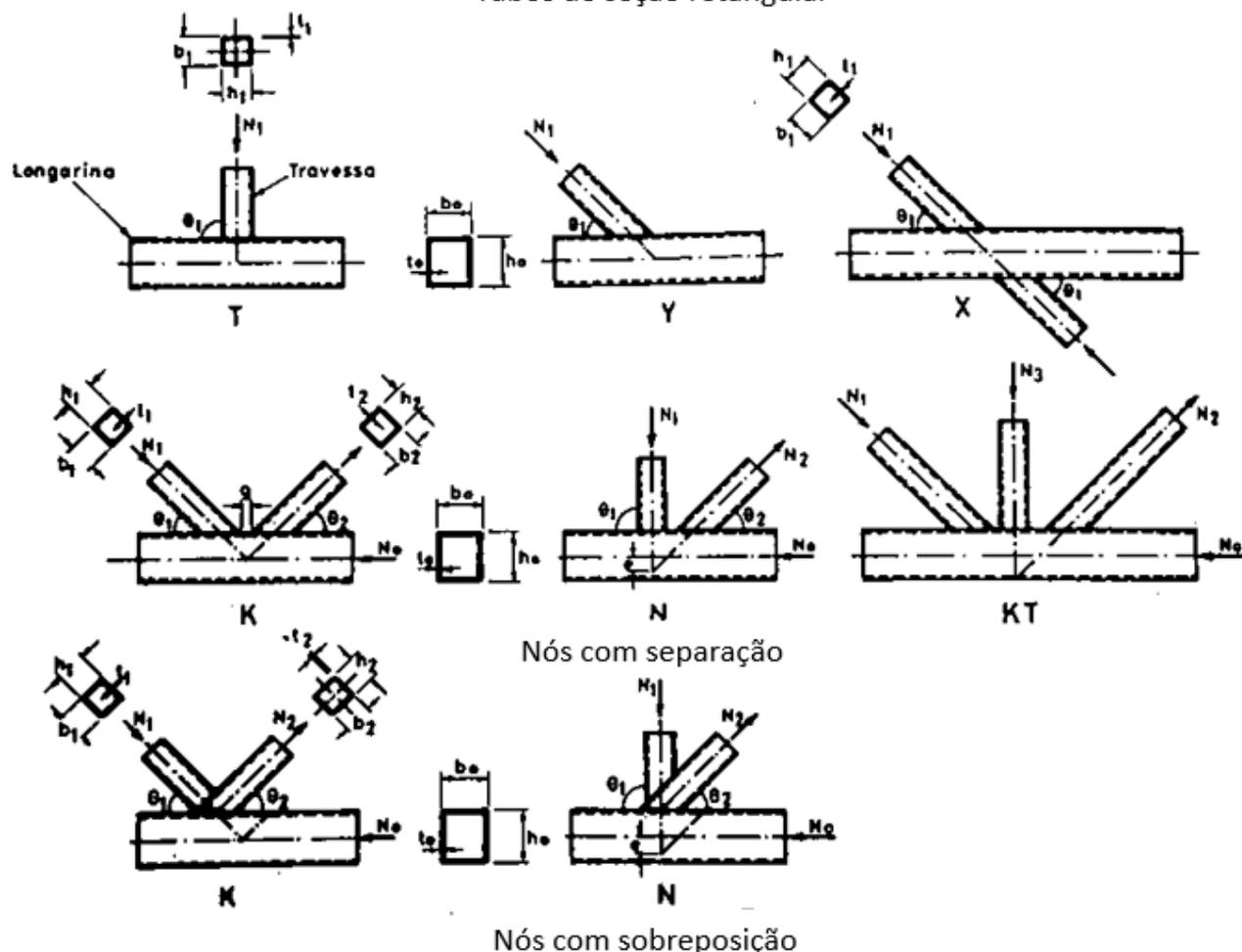
- Geometria da junta;
- Distribuição de tensões;
- Material e estado metalúrgico;
- Nível de tensões do ciclo;
- Tensão média do ciclo de tensões;
- Espectro de carga ou de tensões;
- Meio ambiente (fadiga com corrosão)
- Tensões residuais;
- Defeitos na solda.

O processo clássico de análise do comportamento a fadiga de juntas soldadas é realizado através de curvas S-N que utilizam a tensão nominal em ordenadas. Em veículos de transporte perfis de parede fina são amplamente utilizados nos chassis, carrocerias e outros elementos da estrutura. Um exemplo desse uso é em carrocerias de veículos de transporte de passageiro que são compostas por perfis tubulares de seção retangular e chapas. O estudo da fadiga nestes meios de transporte é complexo devido ao tipo de solicitações que estes estão submetidos, sofrendo essencialmente carregamentos dinâmicos (BRANCO; FERNANDES; CASTRO;1999).

2.11.1 Comportamento à fadiga de perfis tubulares de seção retangular

Nas carroceria de veículos de transporte de passageiros os perfis tubulares de paredes finas (espessura inferior a 4 mm) são largamente utilizados. Os nós mais habituais assumem a configuração da Figura 2.18 utilizando-se chapas de contornos circulares nas concordâncias entre tubos em regiões de portas e janelas.

Figura 2.18 - Exemplo de juntas usadas em carrocerias de ônibus
Tubos de seção retangular



Fonte: Branco, Fernandes; Castro (1999)

No estudo realizado por Branco, Fernandes, Castro (1999), uma frota de ônibus com a estrutura produzida conforme Figura 2.19 apresentou falha por fadiga no ponto indicado após alguns meses de uso do veículo. A trinca iniciou-se no pilar no canto de uma das portas do veículo.

Para este caso foram realizadas análises estruturais através do método dos elementos finitos, e como resultado das análises, foi determinado que a região de maior concentração de tensões na carroceria foi onde iniciaram as trincas de fadiga. Também foram realizados ensaios experimentais com extensômetros que também revelaram tensões elevadas na região, a análise experimental de tensões revelou que a amplitude de tensões era constante, com uma frequência, que em certos casos atingiu 10 Hz. Essas solicitações são provocadas essencialmente devido a má conservação dos pavimentos.

A Figura 2.20 mostra regiões com as localizações mais frequentes para a iniciação das trincas, no canto dos tubos, devido a mordeduras eventualmente existente no cordão, ou defeitos de clivagem, originados da fissuração do material depositado durante o ciclo térmico da solda.

Figura 2.20 - Falha em estrutura de ônibus



Fonte: Autor (2019)

2.12 Aços microligados

O desenvolvimento dos aços de alta resistência e baixa liga (HSLA) foi impulsionado por indústrias navais, petrolíferas e para usos estruturais, devido basicamente às melhores características de tenacidade para níveis relativamente altos de resistência mecânica (GORNI et al., 2003). Os principais mecanismos de endurecimento dos aços microligados são o refinamento de grãos e endurecimento por precipitação. Estes mecanismos permitiram aumentar a resistência mecânica sem elevar os teores de carbono. Atualmente para atingir os mesmos valores de resistência mecânica de aços que antigamente utilizavam de 0,15-0,25%C, utilizam-se percentuais de carbono de 0,06-0,12% (GLADMAN, 1997). Para aumentar a resistência mecânica destes aços são utilizadas pequenas quantidade de elementos de liga como cromo, níquel, molibdênio, cobre, nióbio, titânio, zircônio em diferentes proporções (CRUZ, 2006).

2.13 Soldabilidade de aços alta resistência e baixa liga

Devido à utilização de elementos de liga nos aços HSLA sua microestrutura é dramaticamente influenciada por ciclos térmicos como soldagem (CRUZ, 2006), sendo assim, esta revisão bibliográfica pretende mostrar o comportamento da zona termicamente afetada de aços microligados e os impactos nas suas propriedades mecânicas de acordo com as principais ligas utilizadas nestes aços.

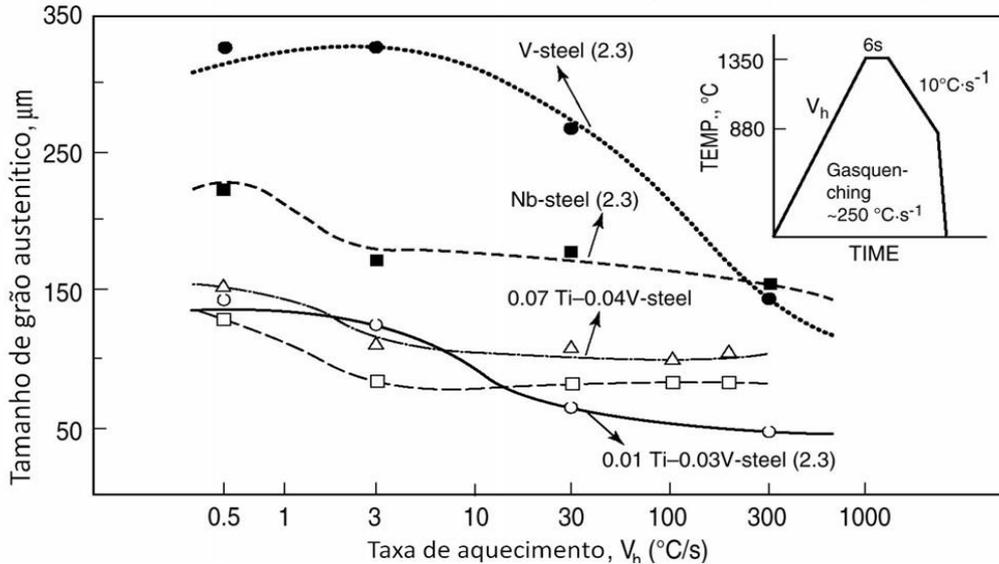
2.13.1 Estrutura e propriedades dos grãos grosseiros da zona afetada pelo calor (HAZ)

O equilíbrio entre a alta resistência e boa tenacidade nos aços de alta resistência e baixa liga (HSLA) pode ser alterado por ciclos térmicos experimentados durante a soldagem, sendo os processos mais comuns para aços estruturais o arco submerso (SAW) e soldagem com arco elétrico com gás de proteção (GMAW) (GLADMAN, 1997). Em ambos os casos a soldagem de HSLA pode produzir resultados que afetem a tenacidade na zona afetada pelo calor (HAZ). A tenacidade mais baixa é esperada nos grãos grosseiros da zona afetada por calor (GC HAZ), que é a parte da ZAC imediatamente adjacente à linha de fusão de solda (CROWTHER et al., 2000 apud EASTERLING, 1991). Durante a soldagem, o GC HAZ experimenta temperaturas de pico até o ponto de fusão, seguida por um rápido resfriamento. Estas altas temperaturas podem levar a um aumento significativo dos grãos de austenita, sendo que a combinação de grãos grosseiros de austenita aliado ao resfriamento rápido promove a formação de estruturas frágeis, que contém altas proporções de ferrita *Widmanstätte* e bainita.

Recentemente verificou-se que a parte mais degradada é a HAZ de grãos grosseiros reaquecidos intercriticamente (IC GC HAZ), que é a região da GC HAZ aquecida a temperaturas entre A_{c1} e A_{c3} por subsequentes passagens de solda (KIM et al., 1991, CROWTHER et al., 2000 apud DAVIS et al., 1994). Durante o ciclo térmico intercrítico, ocorre a transformação parcial em austenita, particularmente onde os estabilizadores de austenita, tais como carbono ou manganês, são segregados na microestrutura inicial. Essas áreas incluem zonas de perlita e bainita. Ao resfriar, essas regiões de alto carbono se transformam em perlita, bainita ou martensita-austenita (M-A), dependendo da dureza da austenita e da taxa de resfriamento. A presença de fase M-A é geralmente considerada como o principal fator de redução da tenacidade da zona afetada pelo calor. Contudo, também é relatado que a perda de tenacidade não é apenas devido à presença da fase M-A, mas está relacionada com a distribuição e morfologia do constituinte M-A e com a microestrutura da matriz (DAVIS, 1994).

Os grãos grosseiros da austenita durante a soldagem, que dependem das entradas de calor e da composição química do material tem uma influência significativa na dureza do aço, controlando a temperatura de transição dúctil frágil (HUTCHINSON et al., 1999). Estudos da variação dos grãos para vários aços estão mostrados na Figura 2.21 que mostra a variação do tamanho de grão médio na austenita após soldagem a taxas de aquecimento variáveis.

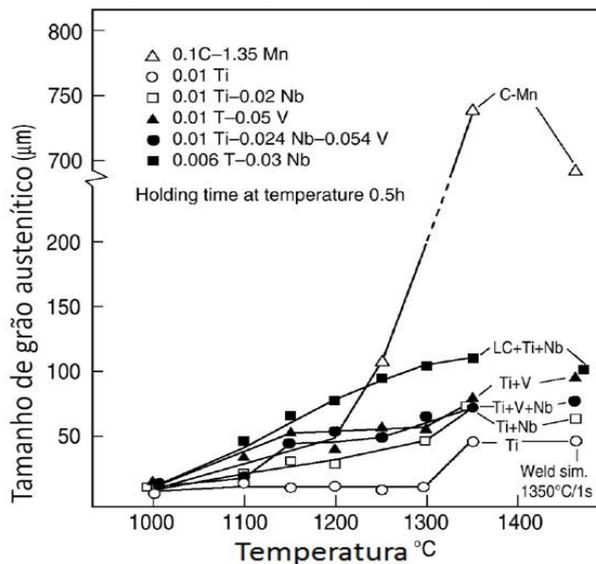
Figura 2.21 - Tamanho de grão austenítico vs. taxa de aquecimento para vários aços HSLA sujeitos a solda



Fonte: Hutchinson et. al (1999)

Baseado em resultados obtidos em 1999 por Hutchinson et al., a tendência para o crescimento do grão austenítico a diferentes temperaturas utilizando diferentes elementos de liga ocorre de acordo com resultados apresentado na Figura 2.22. Verifica-se que o tamanho médio do grão de austenita dos aços ao Ti é de 6-15 vezes menor que do aço C-Mn após serem mantidos por 30 minutos a uma temperatura de 1350 °C. Também é possível ver que aços microligados ao titânio apresentam uma excelente resistência ao crescimento de grão para temperaturas até 1300 °C. Também pode ser visto que a presença de vanádio e/ou nióbio em aços ao titânio deteriora a resistência dos grãos, entretanto ainda são melhores que aços ao C-Mn.

Figura 2.22 - Efeito da temperatura de pico e da composição química do aço sobre o tamanho de grão austenítico

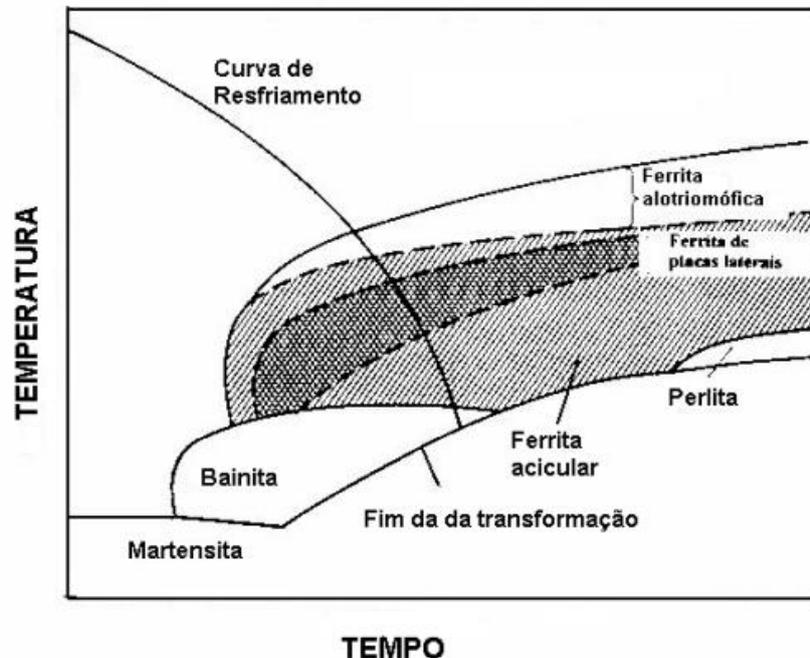


Fonte: Hutchinson et. al (1999)

Soldagem é uma operação complexa, tendo em vista que as transformações ocorrem com o aço no estado sólido durante o aquecimento e resfriamento. O ciclo térmico da solda não é muito

comum quando comparado com tratamentos térmicos usuais, no qual a taxa de aquecimento é elevada e o tempo do tratamento é curto, o que leva o metal de solda a elevadas temperaturas, tornando o metal de solda um local com elevado gradiente térmico. Para visualizar essas influências é necessária a utilização de um diagrama de transformação de fase sob resfriamento contínuo (BUENO, 2010).

Figura 2.23 – Diagrama esquemático de transformação da austenita sob resfriamento contínuo, indicando as possíveis microestruturas em função da velocidade de resfriamento de solda



Fonte: Bueno (2010)

Lembrando que a curva de resfriamento contínuo é particular de cada tipo de aço. Por exemplo, quanto maior o teor de carbono e de elementos de liga, mais para a direita a curva se desloca, facilitando assim a tempera.

2.13.2 Efeito do nióbio na HAZ

Nióbio é adicionado para aumentar a resistência dos aços HSLA. No entanto, sob condições de soldagem, este tem um efeito prejudicial sobre a tenacidade da zona afetada pelo calor, sendo altamente influenciado pela entrada de calor. Variações de média para altas entradas de calor, e independente do efeito de endurecimento por precipitação do Nb (C, N), nióbio tem uma influência prejudicial na tenacidade à fratura dos grãos grosseiros da zona afetada pelo calor (CROWTHER et al., 2000 apud BARNES et al., 1990; CROWTHER et al., 2000 apud WANG et al., 1990).

Nióbio reduz a ferrita no contorno de grão e promove a formação de uma estrutura grosseira de ferrita com M-A-C alinhado (Martensita-austenita-carbonetos), resultando em maior dureza.

A adição de nióbio ($\approx 0,02\%$) faz com que haja uma supressão da nucleação de ferrita nos contornos de grão da austenita e aumenta a fração volumétrica de martensita ou bainita. As principais vantagens da adição de nióbio são o refinamento do grão e a melhoria das propriedades mecânicas do metal de base, que compensa os possíveis efeitos prejudiciais quando aços com adição de nióbio são soldados (LEE; CHUN; KWON, 1992).

2.13.3 Efeito do vanádio na HAZ

O vanádio confere aos aços de alta resistência e baixa liga refinamento de grão e resistência mecânica por precipitação. Se comparado ao nióbio o efeito do vanádio sobre a microestrutura dos grãos grosseiros da HAZ é bastante diferente, sendo que este tem um efeito benéfico na tenacidade da GC HAZ, porque reduz o tamanho da região bainítica e promove a nucleação intragranular da ferrita acicular (HART; MITCHELL, 1995). Contudo, tem sido relatado que o vanádio tem um efeito prejudicial na tenacidade do IC GC HAZ, porque o vanádio pode promover a formação da fase M-A que é potencialmente frágil (CROWTHER et al., 2000 apud UCHINO; OHNO, 1987; CROWTHER et al., 2000 apud HARRISON; WEBSTER, 1995).

2.13.4 Efeito do manganês na HAZ

O manganês aumenta a dureza e a resistência à tração do aço, mas em menor grau do que o carbono. Ele também é capaz de diminuir a taxa de arrefecimento crítico durante o endurecimento, aumentando o endurecimento dos aços de forma muito mais eficiente do que qualquer outro elemento de liga. Quando as quantidades de carbono e manganês são muito elevadas pode ocorrer a fragilização do material. A soldagem de aços com manganês deve observar o teor inferior utilizado de 0,30%, onde este pode promover a porosidade interna e rachaduras no cordão de solda. Teores superiores a 0,80% também provocam rachaduras na região soldada. Aços com baixa proporção de sulfureto de manganês podem conter enxofre sob a forma de sulfureto de ferro, que pode causar fissuração na solda (BOSCH, 2011).

2.13.5 Presença de Zinco na HAZ

Aços microligados com revestimentos com presença de Zn, na região da solda podem causar bolhas e porosidade ao longo do cordão reduzindo dramaticamente a vida em fadiga dos componentes soldados. Isso geralmente ocorre devido a espessura da camada de Zn ser superior a 5 µm. Recomenda-se, para reduzir a quantidade de vapor de Zn retido na poça de fusão, aumentar o tamanho da poça de fusão fazendo com que o Zn tenha uma evaporação mais elevada nesta região (MARDER, 2000).

2.13.6 Aços bifásicos *Dual Phase* (DP)

Os aços bifásicos apresentam microestrutura que consiste em ilhas de martensita numa matriz ferrítica com ou sem a presença de austenita retida, onde a martensita é responsável pela resistência mecânica e a ferrita é responsável pela ductilidade. Normalmente, os aços DP são produzidos por recozimento intercrítico seguido por um resfriamento rápido. Durante o recozimento intercrítico, pequenas poças de austenita são formadas na matriz de ferrítica, que posteriormente se transformam em martensita após rápido resfriamento. Uma fase dura e resistente à deformação é assim introduzida na microestrutura durante a transformação da austenita em martensita e a expansão de volume conduz à formação de deslocamentos móveis na matriz ferrítica envolvente.

A mobilidade destes deslocamentos e suas interações entre si e com os limites de grão e fase são responsáveis pela alta taxa inicial de endurecimento do trabalho e comportamento de deformação contínua em diferentes graus de aços DP. Portanto, comparados com os aços de baixa liga de alta resistência (HSLA), os aços DP apresentam um limite de escoamento ligeiramente menor, mas um alongamento total maior e mais uniforme, uma taxa de endurecimento inicial maior em conjunção com maior resistência à tração final (FARABI, N.; CHEN, D. L.; ZHOU, Y., 2010).

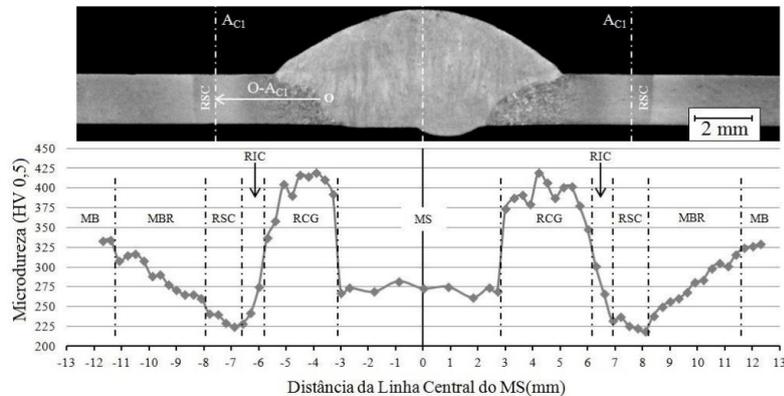
2.13.6.1 Soldabilidade dos aços bifásicos

De acordo com Rocha (2014) devido a composição química dos aços bifásicos é possível garantir um soldabilidade considerável destes aços. Isso ocorre devido aos valores de carbono

equivalente não serem elevados, além disso, estes aços possuem baixa quantidade de elementos de liga. Segundo Rocha (2014), os aços bifásicos podem ser soldados por basicamente todos os processos de soldagem.

As taxas de resfriamento nos aços bifásicos são frequentemente altas que permite a formação de fases metaestáveis duras a partir da decomposição da austenita, podendo formar bainita, martensita ou carbonetos. Desta maneira a distribuição de temperatura e o fluxo de calor geram fases de dureza mais elevada na ZTA interna, na ZTA externa ocorre o revenimento das fases mais duras diminuindo a dureza desta região ocasionada devido ao fluxo térmico que ocorre nesta região (HOLZ, 2014 apud PANDA et al., 2008).

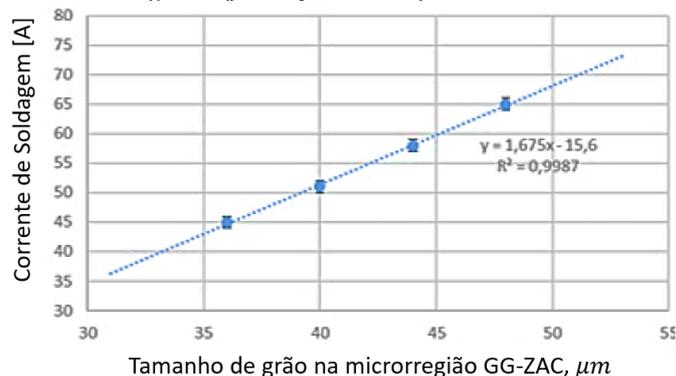
Figura 2.24 – Macrografia de uma amostra de DP 1000 e seu perfil de microdureza; MB: metal base; MBR: metal base revenido; RSC: região subcrítica; RIC: região intercrítica; RCG: região de crescimento de grão; MS: metal de solda



Fonte: Rocha (2014)

No trabalho de Holz (2017), ao analisar o tamanho de grão na região de granulação grosseira, foi constatado que há crescimento de grão proporcional ao aumento do aporte térmico. A Figura 2.25 apresenta a relação entre o tamanho de grão médio na microrregião de granulação grosseira e a variação da corrente de soldagem utilizada na fabricação das amostras soldadas pelo processo TIG. É possível verificar que o aumento da corrente de soldagem favorece o crescimento de grãos na zona afetada pelo calor.

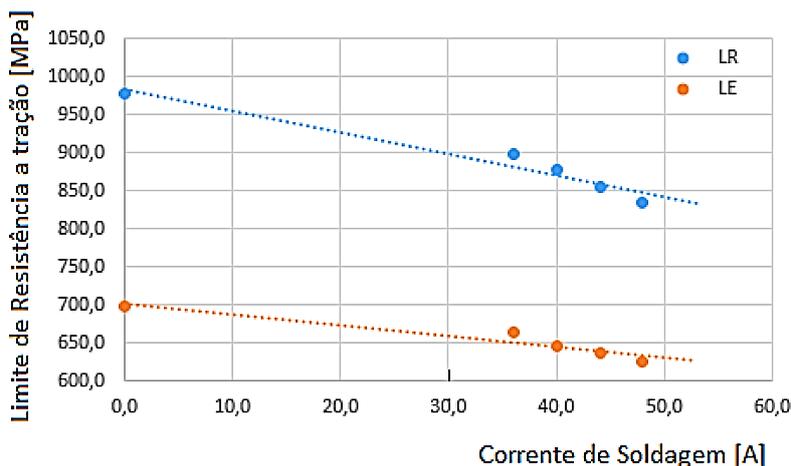
Figura 2.25 - Relação entre o tamanho médio de grãos na micro-região GG ZAC com a intensidade de corrente durante soldagem de juntas planas de aço DualPhase 980.



Fonte: Holz (2017)

Holz (2017) também avaliou a tendência do comportamento da resistência mecânica com a variação do aporte térmico onde se constata uma queda gradual tanto do limite de resistência à tração quanto do limite de escoamento. A queda gradual dos limites de resistência mecânica ocorre conforme o aumento da corrente de soldagem (Figura 2.26). De acordo com XU, W. et al. (2013) e Deng et al. (2012) essa queda na resistência mecânica pode ser mitigada utilizando altas velocidades de soldagem.

Figura 2.26 - Relação entre o Comportamento Mecânico das juntas planas do aço bifásico DP980 com o aporte térmico durante a soldagem com TIG.



Fonte: Holz (2017)

Em ensaios realizados por XU, W. et al. (2013), mostram que a ductilidade das amostras de DP980 soldadas pelo processo a laser foi notavelmente menor que a do material base, uma vez que todas as amostras do ensaio de tração falharam consistentemente na zona com redução de dureza. A menor ductilidade nas soldas do aço DP980 foi gerada devido ao fato de o escoamento ter ocorrido primeiramente nas zonas de menor dureza levando a falhas prematuras naquele local, o que resultou em uma redução de alongamento.

Segundo trabalho realizado por XU, W. et al. (2013) é possível constatar que devido ao processo de soldagem a vida em fadiga do aço bifásico DP980 é reduzida consideravelmente se comparado ao seu material base, apresentando uma redução em torno de 40%.

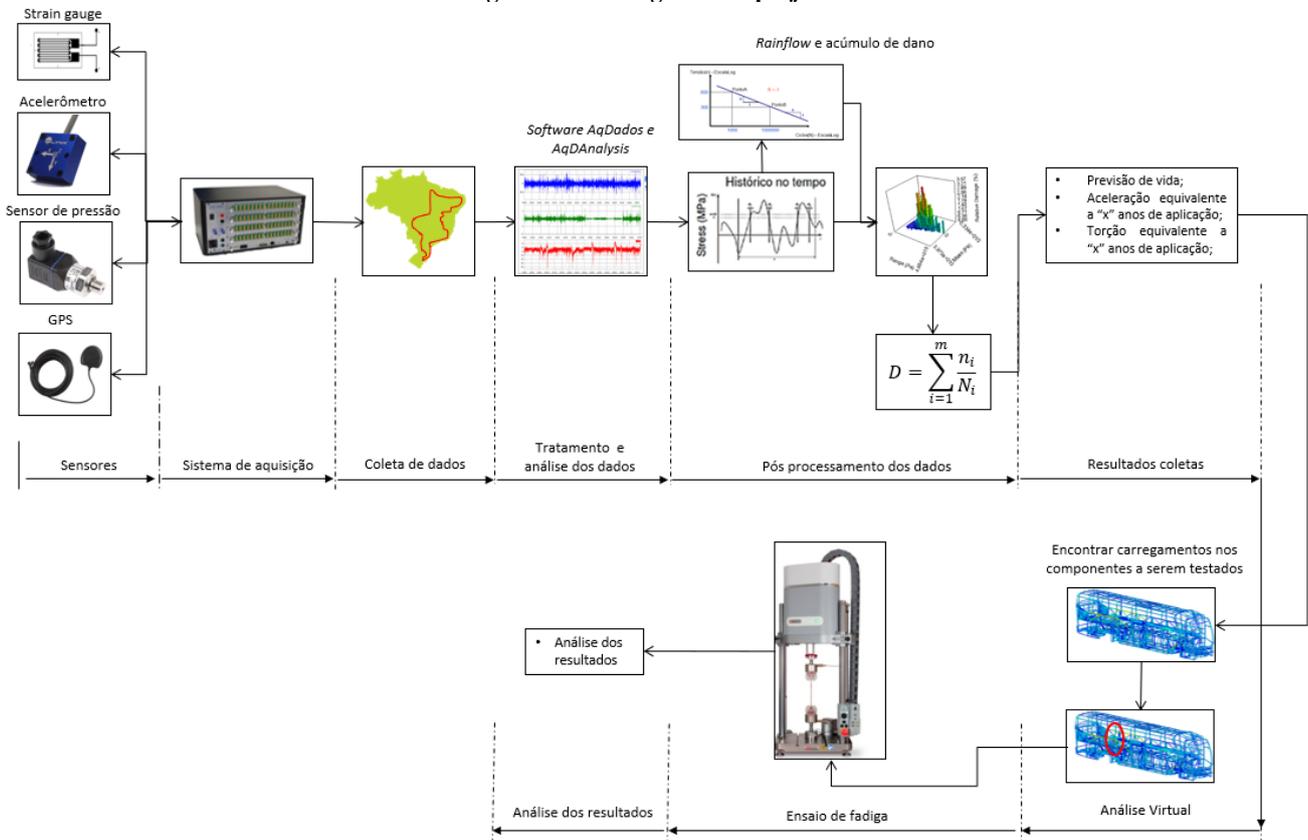
3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

3.1 Introdução ao trabalho

Para compreender de forma geral o que foi desenvolvido neste trabalho elaborou-se um fluxograma para apresentar o escopo do projeto. O trabalho iniciou pela definição de rotas onde foram coletados dados experimentais que são a base para o ensaio de fadiga que foi realizado. Através de resultados obtidos experimentalmente validaram-se componentes estruturais de uma carroceria de ônibus através da elaboração de um teste de bancada equivalente à aplicação do veículo em campo.

O objetivo da utilização destes carregamentos para o teste experimental é verificar que impactos o uso de aços de alta resistência ocasiona na vida em fadiga do produto. Para fazer a validação desta nova proposta de matéria prima três materiais diferentes foram ensaiados de forma comparativa mediante aos carregamentos encontrados. O fluxograma apresentado na Figura 3.1 mostra o escopo geral, iniciando pela instrumentação da carroceria, a aquisição de dados, tratamento e análise dos dados, definição dos carregamentos, ensaio experimental e análise dos ensaios.

Figura 3.1 - Fluxograma do projeto



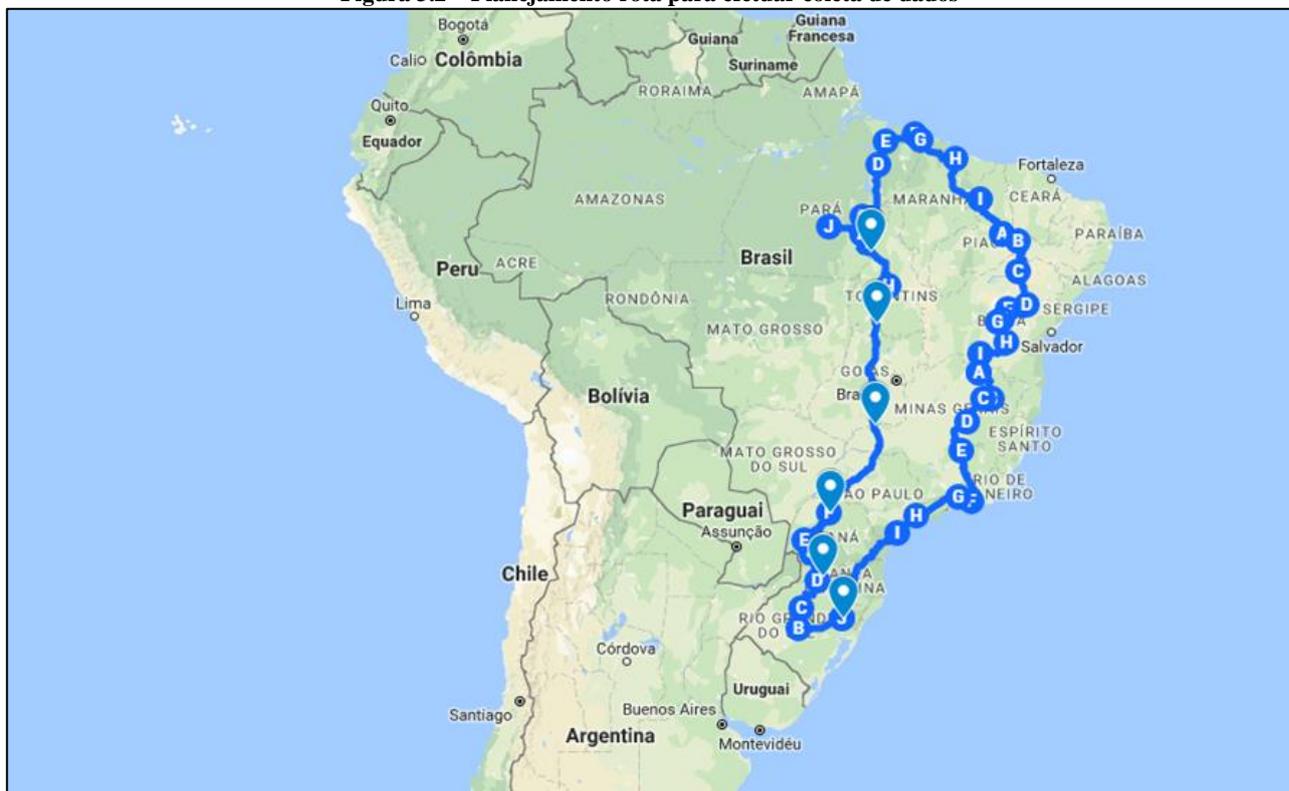
Fonte: Autor (2019)

3.2 Definição da rota e determinação do carregamento

A fim de determinar os carregamentos que representem a utilização do componente a ser avaliado torna-se necessário conhecer os carregamentos que o veículo sofre durante sua utilização. Para realizar a determinação destes carregamentos foram realizados ensaios experimentais a fim de encontrar os esforços que um veículo rodoviário de transporte de passageiros experimenta durante sua operação.

O roteiro definido para a coleta de dados foi elaborado visando varrer todo o território brasileiro focado em mapear os mercados com maiores operações destes tipos de veículos. Este roteiro também buscou abranger as mais diversas aplicações de ônibus, onde durante esta aquisição de dados foi trafegado em rodovias em bom estado de conservação até rodovias em condições precárias. Segundo o DNIT (2016) o Brasil possui apenas 13% de suas rodovias pavimentadas, logo dentre os trajetos coletados, grandes trechos de rodovias sem pavimentação ou com pavimentação quase inexistente foram medidos. A Figura 3.2 mostra o planejamento do trajeto total a ser medido que totaliza aproximadamente 11.000 km.

Figura 3.2 – Planejamento rota para efetuar coleta de dados



Fonte: Autor (2019)

3.2.1 Definição dos pontos de instrumentação do veículo

Para avaliar a estrutura de um veículo é necessário colocar diversos sensores na estrutura, no caso deste ensaio experimental foi medido aceleração, pressão das bolsas de ar da suspensão e deformação em diversos pontos da carroceria. A fim de elaborar um teste condizente com a realidade é necessário compreender como todas as regiões do veículo se comportam individualmente, para isso a carroceria do ônibus foi dividida em subconjuntos, e para cada um dos subconjuntos como lateral, traseira, base, frente, etc., foram instalados extensômetros nas regiões com maiores concentrações de tensão. Para a realização da aquisição de dados o veículo foi carregado com sua capacidade máxima de passageiros com bagagens.

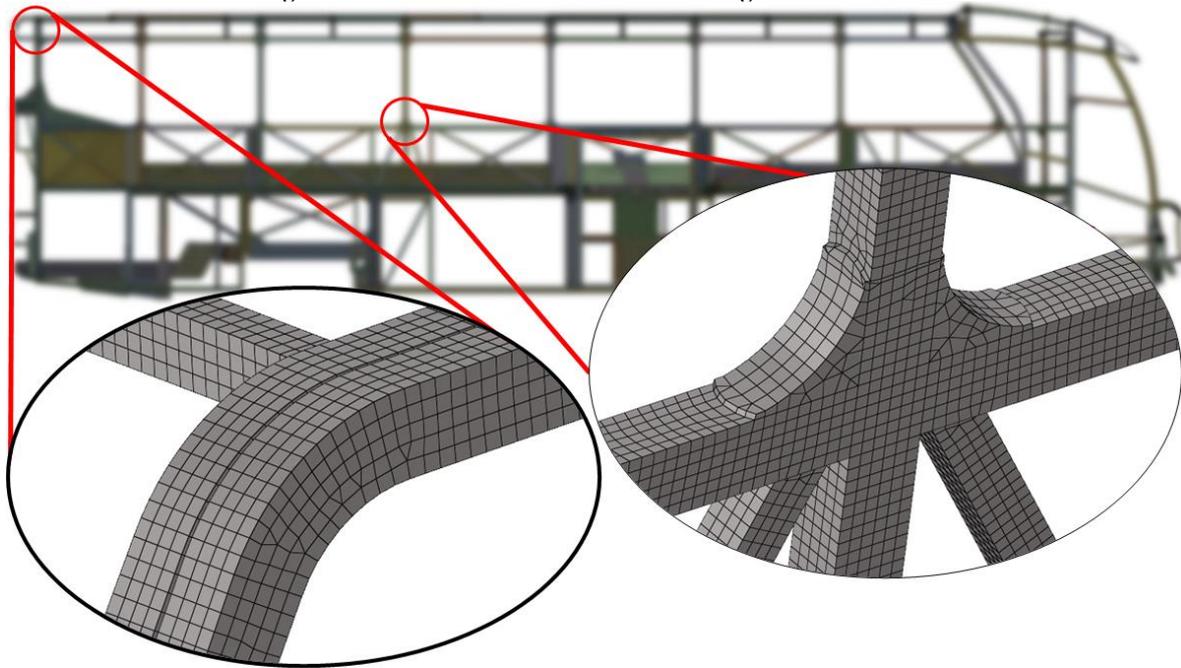
Os pontos instrumentados foram definidos através de análises estruturais estáticas via método dos elementos finitos. Utilizando alguns tipos de carregamento padrão para análises deste tipo como aceleração vertical, torção, curva e frenagem foi possível localizar os pontos quentes da estrutura, que são os pontos que sofrem os maiores esforços da carroceria. Com base nessa lista de regiões críticas foi possível estabelecer os pontos a serem instrumentados no veículo.

3.2.2 Modelo de elementos finitos

O modelo de elementos finitos iniciou-se com a importação do modelo 3D da estrutura da carroceria modelada no *software Solidworks 2018* para o software de elementos finitos *Ansys v19.2*. No *software Ansys Space Claim versão 19.2* foram geradas as superfícies médias da estrutura.

Utilizando o *software Ansys Workbench v19.2* foi gerada a malha da carroceria completa. Os contatos entre as partes do modelo foram gerados através do comando “*share topology*”, que possibilita criar ligações de malha entre os componentes de forma a não adicionar rigidez ao modelo. Este modelo de elementos finitos utilizou elementos de casca na estrutura da carroceria, sendo a formulação utilizada *Shell181* do *software Ansys*. Esta formulação é adequada para analisar estruturas de paredes finas a moderadamente grossas, onde cada elemento desta malha apresenta quatro nós com seis graus de liberdade em cada nó, sendo as translações nas direções x, y e z, e as rotações em torno dos eixos x, y e z (Ansys Guide 2010). Este modelo numérico foi calculado considerando três pontos de integração ao longo da espessura. A malha em algumas regiões da estrutura pode ser vista na Figura 3.3.

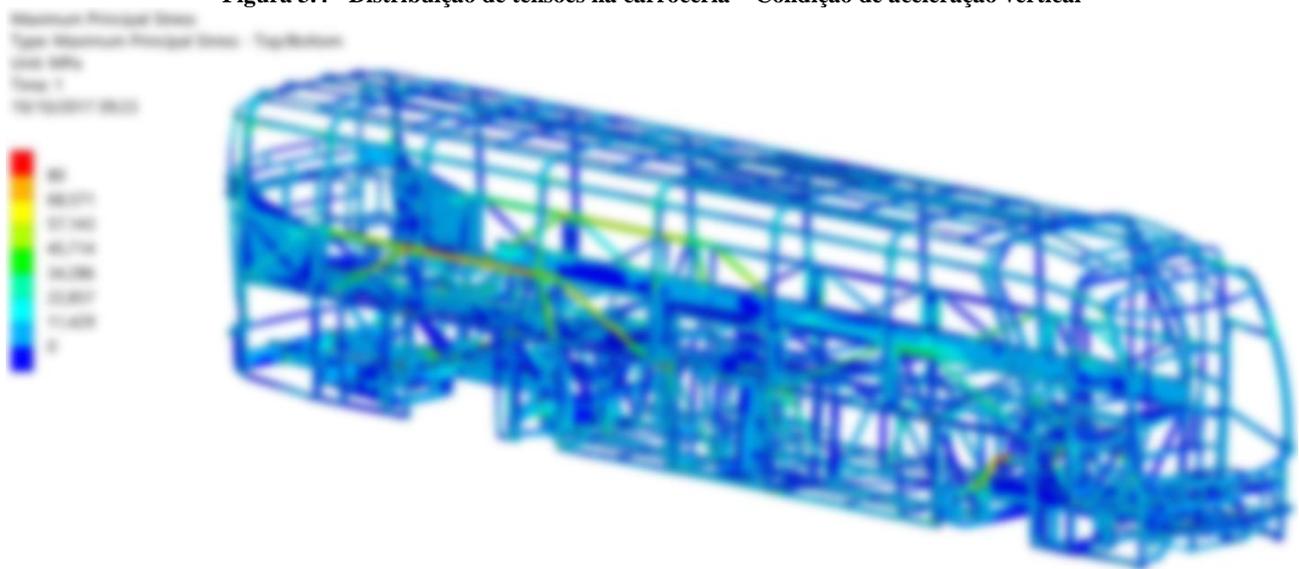
Figura 3.3 - Detalhe na malha em diferentes regiões da carroceria



Fonte: Autor (2019)

O modelo numérico da estrutura teve sua massa e seu centro de gravidade calibrada levando em consideração que o veículo estava em sua capacidade máxima de passageiros, com bagageiros carregados, na mesma condição em que foram adquiridos os dados experimentais. Para a realização da análise foi respeitado o peso admissível de cada eixo do veículo e o centro de gravidade. A Figura 3.4 mostra a distribuição de tensões no veículo para o carregamento de aceleração vertical.

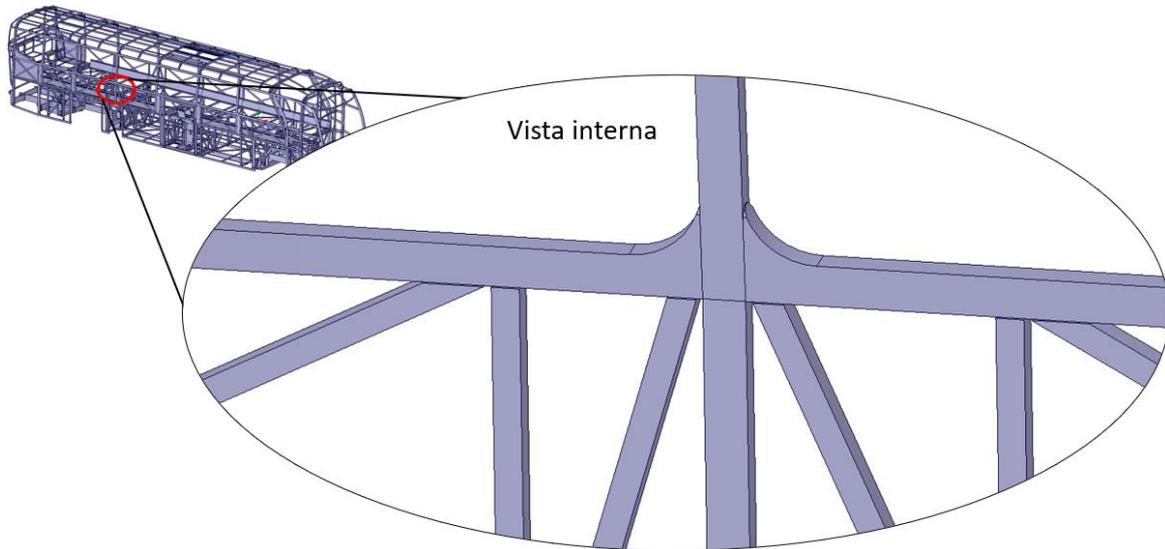
Figura 3.4 - Distribuição de tensões na carroceria – Condição de aceleração vertical



Fonte: Autor (2019)

Para o estudo que será realizado neste trabalho os principais pontos de instrumentação são encontrados na lateral da estrutura do veículo, sendo que nesta região foram obtidas as medições de deformação na região do objeto de estudo que é a coluna entre as janelas e a travessa do peitoril da janela mostrada na Figura 3.5. Esta região foi definida, pois se pretende utilizar o material proposto nas colunas entre janelas, que são os principais componentes do anel estrutural do veículo, que tem como função preservar a região de sobrevivência dos ocupantes quando este se envolver num capotamento.

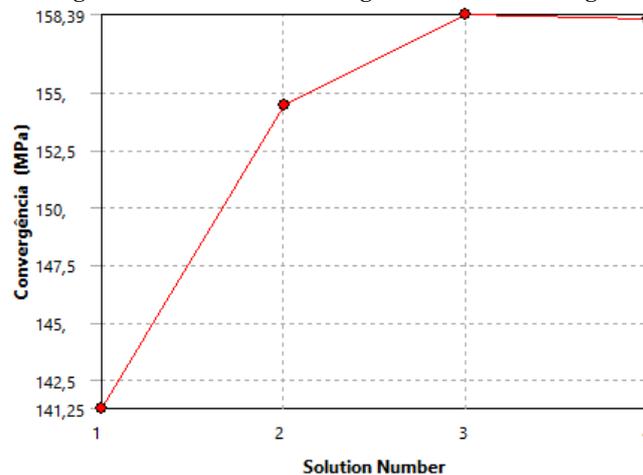
Figura 3.5 – Objeto de estudo coluna entre janelas e peitoril – Vista interna



Fonte: Autor (2019)

Para a região de interesse utilizou-se a análise de convergência de malha, com a finalidade de encontrar o tamanho de elementos mais adequado para obter resultados confiáveis através do método dos elementos finitos. A malha iniciou com um tamanho de elemento de 10 mm e ao final das interações, utilizando um fator de convergência entre as tensões principais de 10%, resultou num tamanho final de elemento de 2 mm.

Figura 3.6 - Análise de convergência de malha da região de interesse

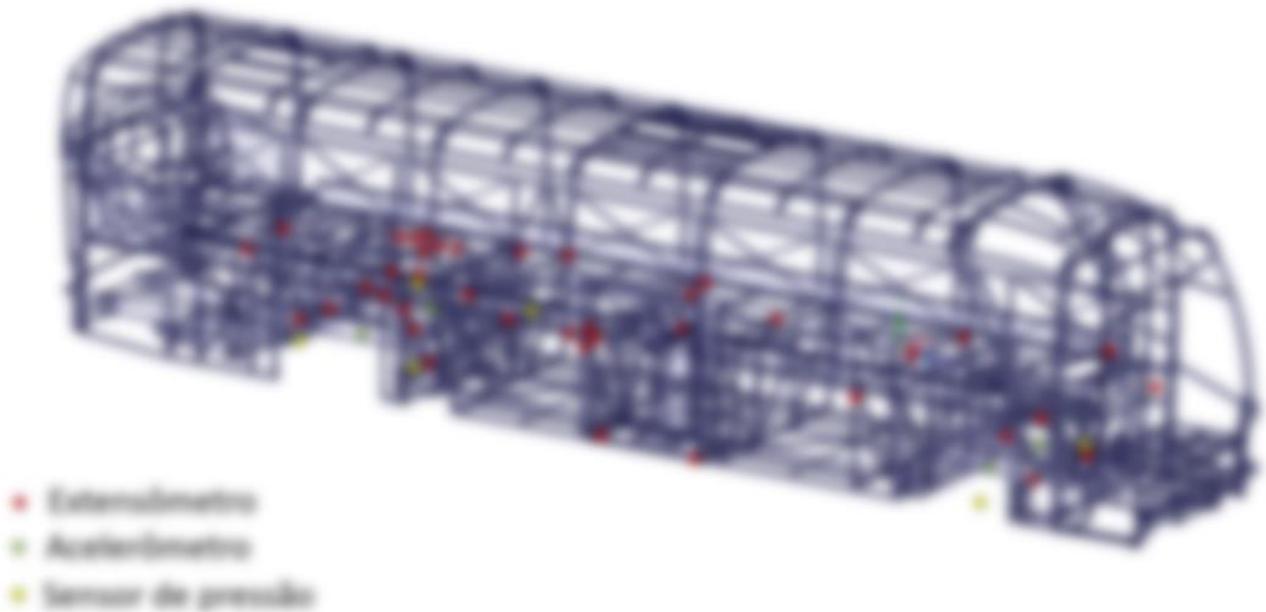


Fonte: Autor (2019)

3.2.3 Pontos instrumentados

Para realizar a avaliação do veículo foram utilizados 59 sensores, sendo 47 deles são extensômetros, 6 deles acelerômetros e 6 sensores de pressão. A Figura 3.7 mostra a distribuição de pontos de pontos ao longo da carroceria tendo este contemplado os principais subsistemas do veículo.

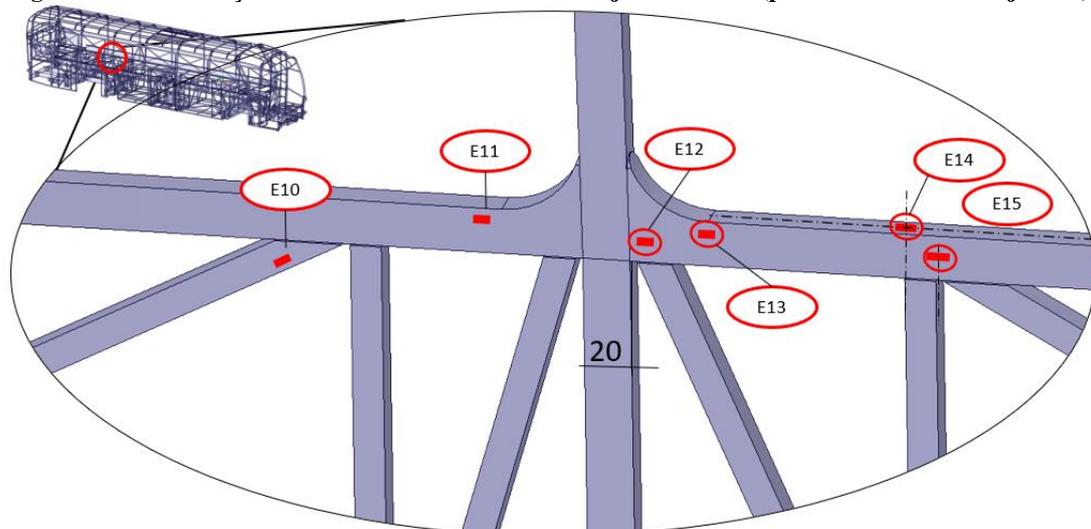
Figura 3.7 – Distribuição dos pontos instrumentados na carroceria



Fonte: Autor (2019)

A região que será estudada neste trabalho está mostrada de forma esquemática na Figura 3.8, para esta região foram utilizados diversos extensômetros posicionados de acordo com a direção e magnitude das tensões principais nestas regiões.

Figura 3.8 – Distribuição de extensômetros uniaxiais no objeto de estudo (peitoril e colunas entre janelas)



Fonte: Autor (2019)

A Figura 3.9 e Figura 3.10 mostram as fotos da instrumentação realizada no veículo que foi submetido ao ensaio experimental.

Figura 3.9 - Pontos instrumentados com extensômetros uniaxiais na região de interesse para ensaio experimental



Fonte: Autor (2019)

Figura 3.10 - Pontos instrumentados na região de interesse para ensaio experimental



Fonte: Autor (2019)

3.2.4 Equipamentos utilizados

Para a realizar a aquisição dos dados foram utilizados os equipamentos listados abaixo:

- **Aquisitor de dados:** A aquisição de dados foi realizada através do equipamento ADS2002 produzido pela empresa Lynx. Este equipamento é utilizado para adquirir dados de forma modular. O sistema utilizado pode ser ligado a qualquer computador e através dele é possível medir simultaneamente dados de extensômetros, células de carga, acelerômetros, transdutores de deslocamento, sensores de pressão dentre outros (Figura 3.11).

Figura 3.11 – Sistema de aquisição de dados ADS2002IP-B-3 (SF2034)



Fonte: Lynxtech (2018)

- **Acelerômetros:** Os acelerômetros utilizados são da marca Lynx, biaxiais e com capacidade de 50g (Figura 3.12).

Figura 3.12 – Acelerômetros utilizados



Fonte: Lynxtech (2018)

- **Sensores de pressão:** sensor de pressão da marca WIKA com capacidade de -1 a 30 bar (Figura 3.13)

Figura 3.13 – Sensor de pressão



Fonte: HBM (2018)

- **Extensômetros uniaxiais:** extensômetros uniaxiais da marca *Excel Sensores*, modelo *PA-06-125AC-350LL7-11* com 350 ohms com tamanho de grelha de 3 mm de comprimento e 1,5 mm de largura (Figura 3.14).

Figura 3.14 - Extensômetro uniaxial



Fonte: HBM (2018)

- **Software de aquisição de dados:** O *software* utilizado para aquisição de dados foi o *Lynx AqDados 7.5* da empresa Lynx utilizado para adquirir sinais e armazená-los em arquivos de séries temporais.
- **Software de análise de dados:** Para a avaliação dos dados foi utilizado o *software Lynx AqDAnalisys 7.5* da empresa Lynx que permite o pós-processamento de sinais armazenados em séries temporais e sua visualização em forma gráfica ou em forma de tabela de dados.

3.3 Coleta de dados

A coleta de dados experimentais foi realizada conforme planejamento elaborado na seção 3.2. Os trechos aquisitados foram realizados em intervalos de 20 minutos. Juntamente com os arquivos temporais, foi feita a coleta de dados de GPS que mostram o deslocamento real do veículo, a variação de velocidade, variação de altitude para permitir uma compreensão melhor dos dados

durante sua avaliação. A Figura 3.15 mostra no mapa o resultado da variação de deslocamentos medidos pelo GPS.

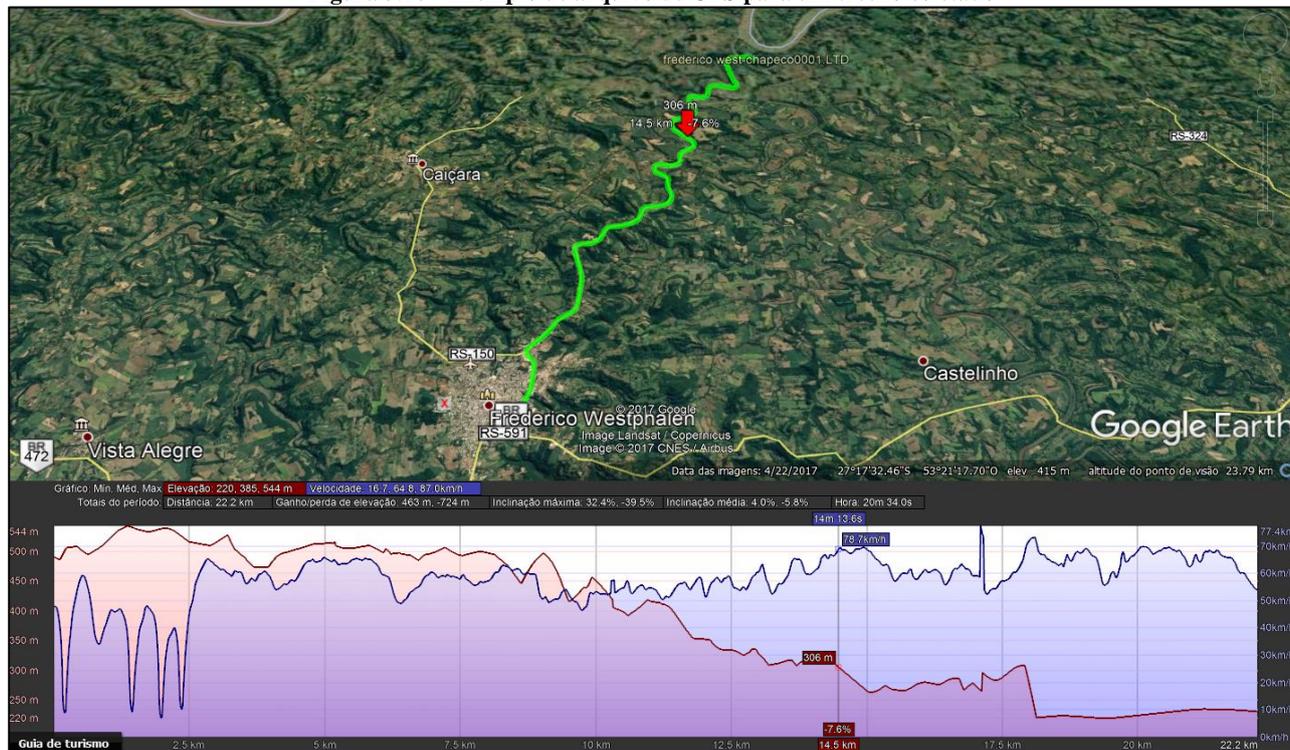
Figura 3.15 - Resultados dos arquivos de GPS de trechos com 20 minutos de duração



Fonte: Autor (2019)

O resultado da coleta de um arquivo de GPS mostra as informações apresentadas na Figura 3.16, onde pode ser visualizado que o trecho medido é uma região de serra, com muitas curvas e variação de altitude. Além disso, no início do arquivo há alguns trechos com eventos determinísticos que pode ser observado através da análise de variação de velocidade neste pequeno trecho percorrido, neste caso os eventos encontrados eram quebra-molas.

Figura 3.16 - Exemplo de arquivo de GPS para um trecho coletado



Fonte: Autor (2019)

Durante a etapa de aquisição de dados foram medidas rodovias nas mais diversas condições, englobando rodovias em bom estado de conservação até trechos em péssimas condições ou com pavimento inexistente. A Figura 3.17 e Figura 3.18 mostram a qualidade dos mais diversos pavimentos e nas mais diversas regiões.

Figura 3.17 - Condições das vias medidas

Curitiba (PR)



Palmas (TO)



Jacobina (BA)



Panambi (RS)



Fonte: Autor (2019)

Figura 3.18 - Condições das vias medidas

Aliança (TO)



Brumado (BA)



Viseu (PA)



Mato Verde (MG)



Fonte: Autor (2019)

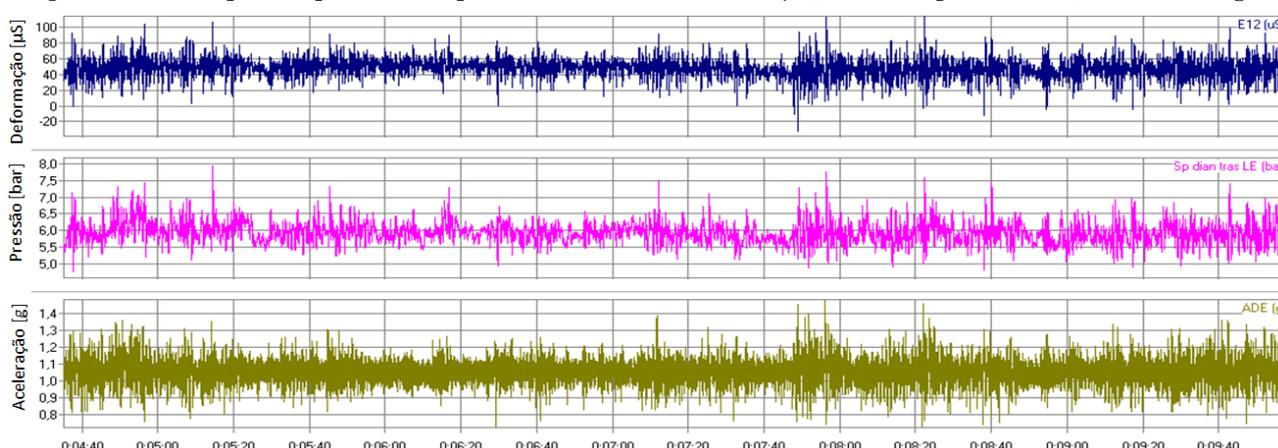
Ao final do trabalho de coleta de dados foram gerados mais de 500 arquivos temporais que totalizam mais de 11.000 quilômetros de rodovias mapeadas. Dentre estes arquivos foram adquiridos dados em todas as regiões do país e nas mais diversas condições como mostrado nas Figura 3.17 e Figura 3.18.

3.4 Análise dos dados coletados

Para a realização da análise de dados foi utilizado o *software* da empresa *Lynx AqdAnalises*, programa de análise de sinais que permite o pós-processamento de sinais armazenados em séries temporais, sua visualização em forma gráfica ou em forma de tabela de dados. Os arquivos resultantes das aquisições geram dados distribuídos ao longo do tempo, sendo que para cada um dos sensores os resultados são diferentes. Os sensores utilizados foram extensômetros, acelerômetros e sensores de pressão, que medem respectivamente *microstrain* (μS), aceleração em g's e pressão em *bar*.

Os históricos temporais de alguns dos sinais medidos estão mostrados na Figura 3.19, onde podem ser vistos os resultados de um extensômetros, um acelerômetro e um sensor de pressão.

Figura 3.19 – Exemplo de espectro no tempo das coletas – extensômetros (μS); sensor de pressão (*bar*); acelerômetro (g's)



Fonte: Autor (2019)

Após avaliar a qualidade dos sinais checando se é necessário fazer algum corte no arquivo, foi realizada a etapa de tratamento de sinais, onde foram removidos *spikes*, *drift* e a feita a filtragem dos mesmos. Para todos os sinais foi utilizado um filtro passa baixa de 30 Hz com o intuito de eliminar ruídos do sinal. Com esta etapa concluída foi realizada a contagem dos ciclos.

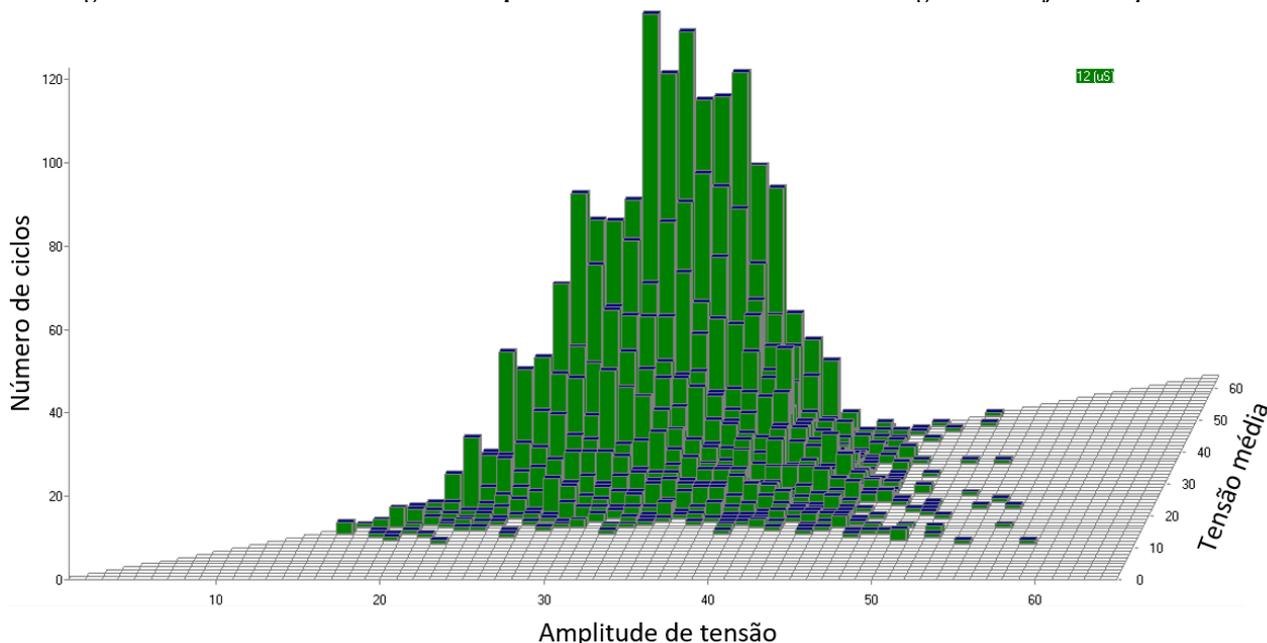
3.5 Contagem de ciclos

Como os resultados dos dados coletados são em forma de históricos temporais é necessário realizar a contagem dos ciclos de carregamento. Neste trabalho foi utilizado o método *rainflow*, que consiste em um algoritmo de contagem que reduz os históricos temporais de amplitude complexa

em uma série de eventos discretos e simples de carregamentos que podem ser associados a dano em fadiga (LEE et. al, 2005).

Para a contagem dos ciclos utilizou-se o *software* da empresa *Smarttech* chamado de *Rainview*. O motivo da escolha deste aplicativo é que possibilita utilizar o método *rainflow* a diversos arquivos temporais de forma simultânea. A Figura 3.20 mostra o acúmulo de dano para o canal E12 de um trecho coletado durante a aquisição dos dados. Esta mesma análise foi realizada em todos os canais para todos os arquivos de dados e para todos os canais (extensômetros, acelerômetros e sensores de pressão).

Figura 3.20 – Gráfico do acúmulo de dano para o canal E12 de um trecho coletado gerado no *software* *AqdAnálise*.



Fonte: Autor (2019)

3.6 Cálculo do dano

Com as etapas descritas nas seções anteriores realizadas foi possível avaliar o dano em cada um dos canais para todos os arquivos coletados. O dano é definido como a relação entre ciclos aplicados a uma determinada amplitude de tensão e o número de ciclos para falhar. Considerando todos os ciclos medidos no histórico de carregamento o dano pode ser descrito matematicamente como mostrado na Equação (1), tendo-se a previsão de falha por fadiga quando o dano chegar a 1.

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

Segundo Lee et. al. (2005), é possível estimar a vida em fadiga de componentes baseada na resistência a tração do material conhecendo um ponto da curva S-N (S_1, N_1), a inclinação da curva (b) e o número de ciclos até a falha (N_2) para uma determinada amplitude de tensão (S_2) é dado pela Equação (12). Em juntas soldadas ou entalhes, a curva de fadiga geralmente tem uma inclinação abrupta ($b = 0,3; k = 3$).

$$N_2 = N_1 \times \left(\frac{S_1}{S_2}\right)^{-1/b} \quad (12)$$

Considerando as Equações (1) e (12) o cálculo da vida em fadiga pode ser escrito como:

$$Dano_x = Dano_1 \times \left(\frac{S_x}{S_1}\right)^k \quad (18)$$

Logo:

$$Vida_x = \frac{1}{Dano_x} \rightarrow Vida_x = Vida_1 \times \left(\frac{S_1}{S_x}\right)^k \rightarrow S_x = S_1 \times \left(\frac{Vida_1}{Vida_x}\right)^{1/k} \quad (19)$$

O dano de todos dos dados coletados foi calculado utilizando o *software Rainview* da empresa *Smarttech*, que permite calcular os danos em diversos canais de forma simultânea. Para poder prever a vida em fadiga é necessário utilizar uma curva de fadiga de material que represente o componente que está sendo estudado, logo como o objeto de estudo é uma junta soldada de topo foi utilizada a norma BS7608, e baseado na norma e no processo de união dos tubos foi selecionada uma curva que representa a aplicação.

3.6.1 Curva de fadiga

Para realizar o cálculo do dano é necessário a utilização de curvas de fadiga, sendo assim, foi utilizada a norma BS7608:2014 para definição da curva a ser utilizada. A norma consiste em um guia para desenvolvimento e avaliação de produtos fabricados em aço sob ação de carregamentos cíclicos. A aplicação desta norma é recomendada para aços com tensão de escoamento entre 200 e 960 MPa e tensão de ruptura entre 360 e 1200 MPa, valores que compreendem os aços utilizados neste trabalho.

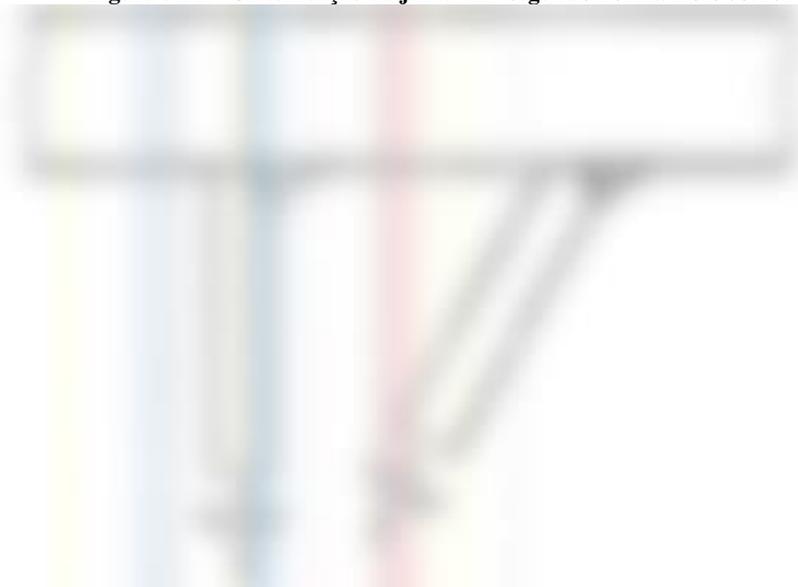
As curvas apresentadas na Figura 3.22 são referentes à curva média de fadiga e a curva padrão de fadiga para 97,7% de probabilidade de sobrevivência, isto é, dois desvios padrões abaixo da curva média, assumindo que os dados estão apresentados com uma distribuição logarítmica.

Com o propósito de projetar a vida em fadiga de componentes, as juntas são divididas em diversas classes, cada uma com uma curva S-N correspondente. Esta classificação depende dos fatores listados abaixo:

- Tipo de tensão utilizada no detalhe (nominal ou *hot-spot*);
- Disposição geométrica e proporções do detalhe;
- A direção das tensões flutuantes em relação ao detalhe;
- A possível localização de iniciação da trinca;
- Métodos de inspeção e manufatura.

Baseado nesses resultados a junta que será analisada é classificada na norma BS7608:2014 como união “T” com solda onde o filete suporta a carga, na norma item 7.9 (Figura 3.21).

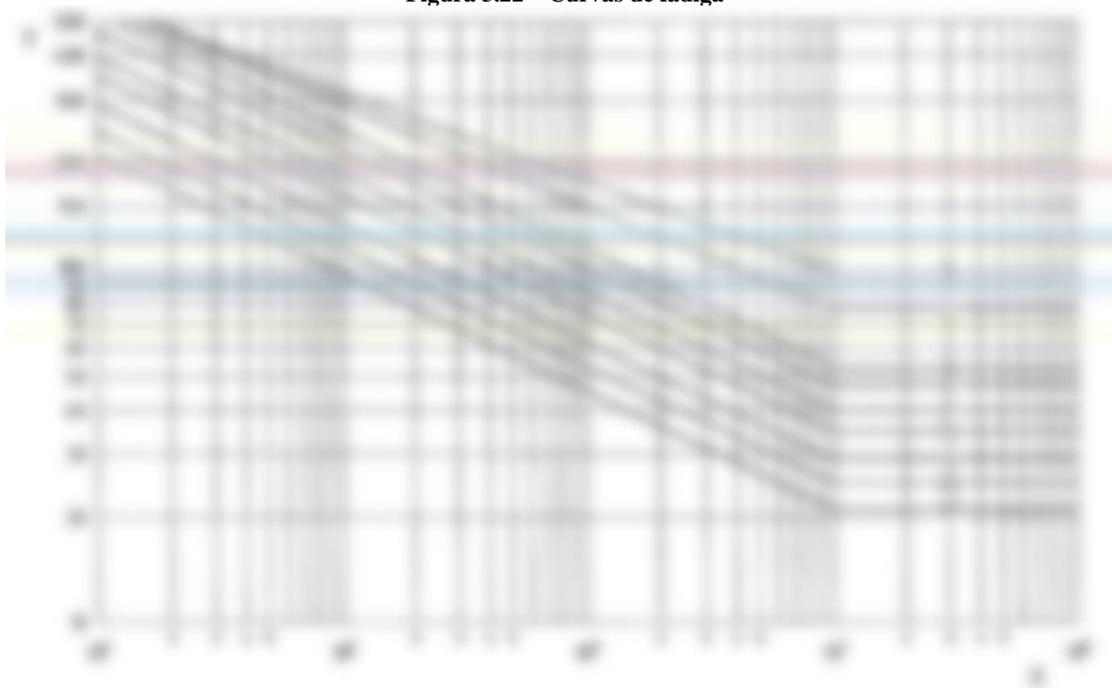
Figura 3.21 – Classificação da junta “T” segundo norma BS7908:2014



Fonte: BS7908:2014 (2014)

Considerando os fatores de classificação acima, a curva de fadiga selecionada foi escolhida levando em consideração que a região estudada é soldada e contém incertezas quanto aos carregamentos, processos de fabricação e materiais utilizados. Baseado na norma a curva selecionada para avaliar a previsão de vida deste componente é a “F” mostrada na Figura 3.22.

Figura 3.22 – Curvas de fadiga



Fonte: BS7608 (2014)

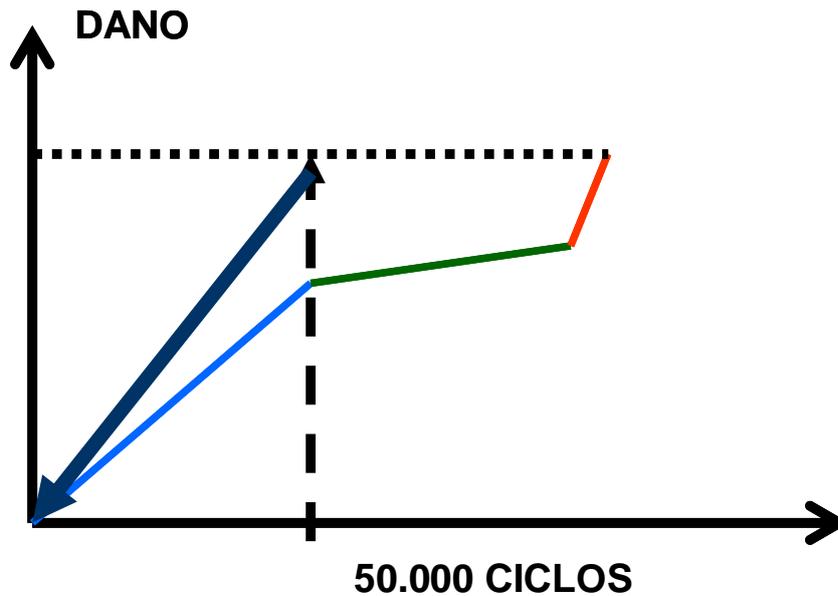
3.7 Análise através do método do seno equivalente ou amplitude constante

De acordo com Gueller (2009) a amplitude de uma onda senoidal que, aplicada por um número determinado de ciclos provoca o mesmo dano que os ciclos de pistas. Para fazer a análise do seno equivalente, ou comparar a severidade entre procedimentos, utiliza-se a curva de fadiga do material ($k=3$ para solda). Esta curva serve também para fazer análises relativas utilizando canais, ou variáveis diferentes de tensões mecânicas tais como, por exemplo, forças, acelerações, deslocamentos. Neste caso, o “dano relativo” é facilmente obtido, pois o objetivo pode ser atingido com a inclinação da curva de fadiga.

Baseado nisso é possível encontrar um valor de aceleração e momento torsor equivalente à aplicação do veículo para a vida em que foi projetado. Para encontrar esses valores são utilizados os dados medidos por acelerômetros e sensores de pressão coletados em cada trecho.

Para realizar este procedimento deve-se calcular o *rainflow* e o dano de fadiga para estes canais (utilizando a curva de fadiga escolhida) e encontrar os “danos relativos” para os acelerômetros e sensores de pressão. Com isso realizado, verifica-se os níveis de tensões na junta soldada, que serão referentes a um seno equivalente aplicado N_1 vezes à junta. A Figura 2.18, mostrada na revisão bibliográfica ilustra o procedimento, já a Figura 3.23 mostra a obtenção do mesmo dano para diferentes históricos de carregamento.

Figura 3.23 – Mesmo dano para ciclos diferentes



Fonte: Gueller (2009)

A relação matemática que expressa isso está mostrada na Equação (20).

$$\frac{N_2}{N_1} = \left(\frac{S_1}{S_2}\right)^b \rightarrow S_2 = \frac{S_1}{\left(\frac{N_2}{\frac{\sum \text{DANO.RELATIVO}}{N_1}}\right)^{(1/b)}} \quad (20)$$

Onde:

S_1 = limite de resistência a fadiga da curva escolhida [MPa];

S_2 = nível de tensão para o qual se quer encontrar o dano relativo [MPa];

N_1 = número de ciclos correspondente ao limite de fadiga da curva S_1 ;

N_2 = número de ciclos correspondente à S_2 ;

b = inclinação da curva de fadiga;

DANO RELATIVO = dano relativo ao histórico de carregamentos.

Com esse procedimento realizado, os carregamentos calculados são aplicados ao modelo numérico do veículo completo, com o objeto de encontrar os esforços sofridos pelos componentes da estrutura e verificar se os mesmos suportarão a vida a que foram projetados.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Buscando validar a utilização de um novo aço de alta resistência e baixa liga (HSLA) na estrutura de um ônibus são necessários diversos testes e ensaios para comprovar sua eficiência estrutural. A principal motivação para a utilização deste tipo de aço é para aumentar a segurança nestes veículos, onde aços de alta resistência permitem aumentar consideravelmente a absorção de energia destas estruturas em casos onde estas venham a se envolver em acidentes, como colisões frontais e capotamentos. Além deste motivo, com aços mais eficientes é possível aumentar o desempenho estrutural através da redução de massa do veículo.

Com este objetivo em mente, torna-se necessário validar a utilização destes materiais mediante os carregamentos de fadiga que representem a utilização real veículo, especialmente, pois o processo de união destes componentes é através de solda, que provoca mudanças na microestrutura do material podendo resultar em falhas estruturais.

Com base nestas hipóteses foi elaborada uma sequência de ensaios e análises para avaliar o comportamento do novo material de forma comparativa aos já utilizados. Foram realizados ensaios de tração, análise microestrutural, microdureza e ensaio de fadiga nos materiais em estudo.

4.1 Descrição dos materiais ensaiados

Para a realização deste trabalho foram comparadas três matérias primas diferentes com características mecânicas e microestruturais bastante distintas. Duas delas são comuns no universo da fabricação de carroceiras de ônibus e a outra, uma matéria prima de maior desempenho mecânico, ainda não muito explorado neste mercado. Abaixo uma breve descrição destes materiais.

- **Material ZAR230:** este aço é um material que apresenta como requisito de fabricação ter tensão de escoamento mínima de 230 MPa. Este é um material que possui revestimento galvanizado com zinco. (PERINI, 2008);
- **Material ZSTE380:** este é um aço microligado que apresenta como característica mecânica principal sua tensão de escoamento mínima superior a 380 MPa. Este possui revestimento galvanizado de zinco (PERINI, 2008);
- **Material DP980:** aço de alta resistência, bifásico laminado a frio, com limite de ruptura mínimo de 980 MPa. Este material possui revestimento galvanizado de zinco (SSAB, 2017).

De acordo com Farabi (2010), a microestrutura dos aços *dual phase* (DP) consiste em ilhas martensíticas numa matriz ferrítica com ou sem a presença de austenita retida, onde a martensita é responsável pela resistência mecânica e a ferrita pela ductilidade.

4.2 Composição química dos aços

As propriedades dos aços são influenciadas por sua composição química, logo é necessário compreender as diferenças entre os aços para entender de que forma os elementos de liga influenciam suas propriedades. A Tabela 4.1 apresenta a composição química dos aços investigados, sendo os resultados apresentados para os materiais ZAR230 e ZSTE380 obtidos através de ensaios realizados nos laboratórios da empresa Marcopolo SA. A composição química do aço DP 980 foi obtida através de informações do fornecedor do material.

Tabela 4.1 - Composição química dos materiais

Material	Composição Química												
	C	Si	Mn	P	S	Cu	Al	Nb	V	Mo	N	Ni	Cr
ZAR 230	0,05	0,009	0,307	0,023	0,019	0,013	0,044	0,024	0,004	0,005	0	0,015	0,023
ZSTE 380	0,046	0,047	1,167	0,022	0,006	0,016	0,056	0,062	0,006	0,001	0	0,022	0,035
DP 980	0,14	0,49	1,48	0,012	0,002	0,1	0,042	0,015	0,02	0	0,004	0,03	0

Fonte: Autor (2018)

Com as composições químicas é possível calcular o carbono equivalente de cada um dos materiais, e segundo IIW (*International Institute of Welding*) este parâmetro pode ser calculado a partir da Equação (21). A Tabela 4.2 mostra o cálculo do carbono equivalente para os materiais que estão sendo avaliados.

$$C_{eq} = \%C + \frac{\%Mn}{6} + \frac{\%Cr + \%Mo + \%V}{5} + \frac{\%Ni + \%Cu}{15} \quad (21)$$

De acordo com Modenesi (2011), materiais com carbono equivalente (CE) inferiores a 0,4 apresentam boa soldabilidade, para materiais com CE entre 0,4 e 0,6 usar pré-aquecimento e materiais com CE superiores a 0,6 fazer pré e pós aquecimento da junta. Os materiais estudados apresentam os carbonos equivalentes como mostrado na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 - Comparativo do carbono equivalente

Material	C_{eq}
ZAR 230	0,1091
ZSTE 380	0,2511
DP 980	0,3941

Fonte: Autor (2018)

Dependendo da espessura do material pode tornar-se necessário realizar pré-aquecimento dos materiais, porém neste caso não se torna necessário devido à baixa espessura da parede dos tubos que são de 1,95 mm. A Equação (22) mostra o cálculo do carbono equivalente total que leva em consideração o carbono equivalente e a espessura do material (FORTES; ARAÚJO, 2005).

$$C_{eqtotal} = 0,005 \times C_{eq} \times espessura \quad (22)$$

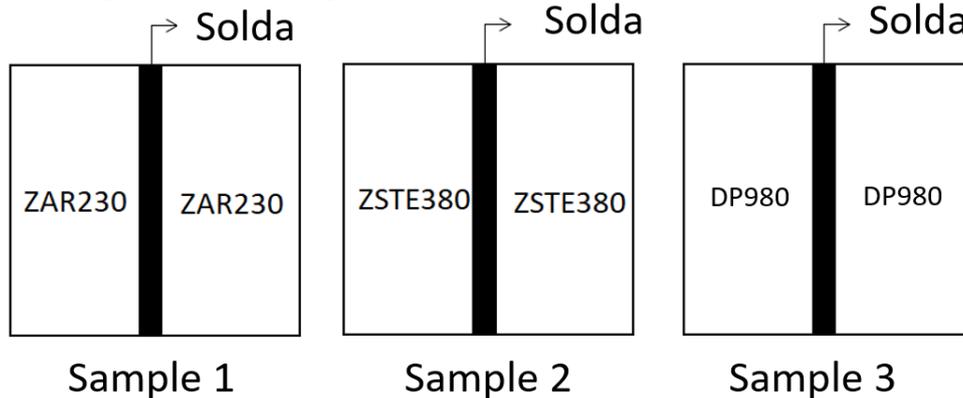
4.3 Análise da microestrutura

Através de análises microscópicas será possível avaliar a microestrutura do material com o objetivo de revelar características do material investigado. Informações como formato, tamanho de grão e fase do material podem ser vistas através desta técnica. Além disso, este tipo de análise é utilizado para verificar se há falhas e anormalidades no material e permite mensurar a extensão de falhas e trincas, detectar mudanças nos metais devido a processos como de soldagem, usinagem, tratamentos térmicos, exposição a produtos químicos, efeitos ambientais dentre outros (DUNBAR, 2016).

Os aços avaliados no trabalho apresentam composições químicas e propriedades bastante distintas, desta forma tornando a análise microestrutural via microscopia ótica uma ferramenta essencial para compreender as diferenças entre os materiais avaliados.

A avaliação metalográfica dos aços analisados foi obtida através do corte de amostras dos corpos de prova soldados. A Figura 4.1 mostra de forma esquemática como foram produzidas as amostras, todas são originadas da união soldada entre dois tubos de dimensões 40x40x1,95 mm, sendo a diferença entre elas o material base de cada um dos conjuntos. As regiões analisadas neste trabalho foram as do metal base, zona afetada pelo calor e metal de solda.

Figura 4.1 - Esquema mostrando de que forma as amostras foram submetidas a avaliações metalográficas



Fonte: Autor (2019)

A preparação das amostras e a observação das imagens foi realizada nos laboratórios do Instituto de Tecnologia Mecatrônica SENAI de Caxias do Sul. O microscópio ótico utilizado é da marca *ZEISS Primotech* com capacidade de aumento de até 1000 vezes.

Figura 4.2 - Microscópio ótico ZEISS Primotech com capacidade de até 1000 vezes



Fonte: Autor (2019)

4.4 Ensaio de microdureza

A dureza é uma característica do material e ela é definida pela resistência a penetração sendo determinada pela profundidade permanente de indentação. Os ensaios de microdureza são descritos

pela norma ASTM E92 (2017). Este ensaio é de fácil uso e permite encontrar uma dureza relativa entre os materiais segundo uma mesma referência (SHIGLEY; MISCHKE; BUDYNAS, 2005).

Neste trabalho a microdureza será medida como forma de avaliar a variação de dureza entre o material base, a zona termicamente afetada do material e o material de solda, buscando compreender o que aconteceu com o perfil de dureza dos materiais nas regiões próximas a solda. O objetivo desta análise é comparar os resultados encontrados e relacioná-los com as características microestruturas e a vida em fadiga dos materiais ensaiados.

A realização do ensaio de microdureza nos materiais testados utilizou as mesmas amostras preparadas para a análise microestrutural. Este ensaio foi realizado nos laboratórios do Instituto de Tecnologia Mecatrônica SENAI de Caxias do Sul e para a realização desta análise utilizou-se um equipamento fabricado pela empresa *Future-Tech* da série *F700*, este equipamento foi utilizado para medir a microdureza (HV) das amostras Figura 4.3.

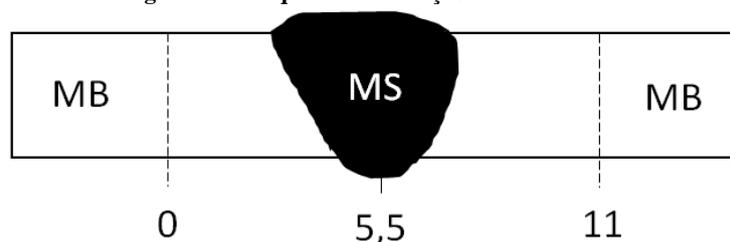
Figura 4.3 - Equipamento para realizar a análise de microdureza Marca Future-Tech série F700



Fonte: Autor (2019)

Todas as amostras foram medidas da mesma forma, a medição foi iniciada a 5,5 mm do centro do metal de solda como indicado no esquema mostrado na Figura 4.4. A medição foi realizada de forma equidistante sendo a medida entre as indentações de 0,25 mm.

Figura 4.4 - Esquema de medição da microdureza

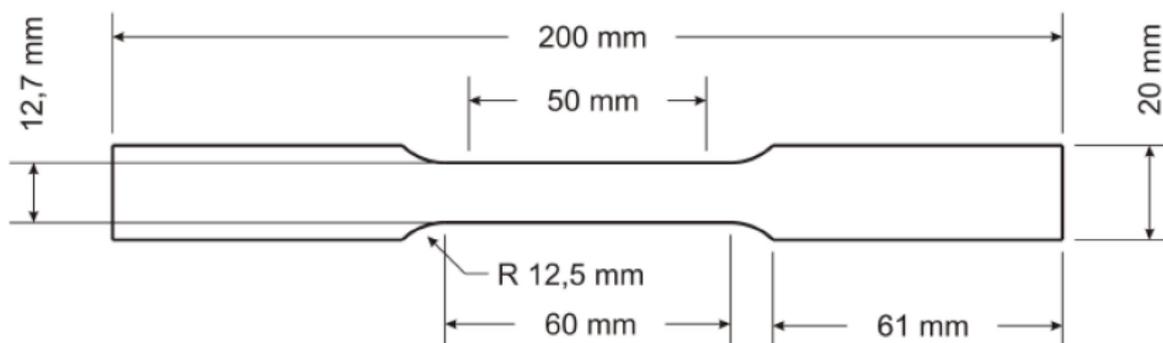


Fonte: Autor (2019)

4.5 Ensaio de tração

Para verificar a resistência mecânica dos aços avaliados foram realizados ensaios de tração em todas as amostras. Para realizar o ensaio de tração foi seguida a norma ASM E8M (2016), que prescreve o procedimento para este ensaio. Segundo a norma os corpos de prova têm as dimensões mostradas na Figura 4.5.

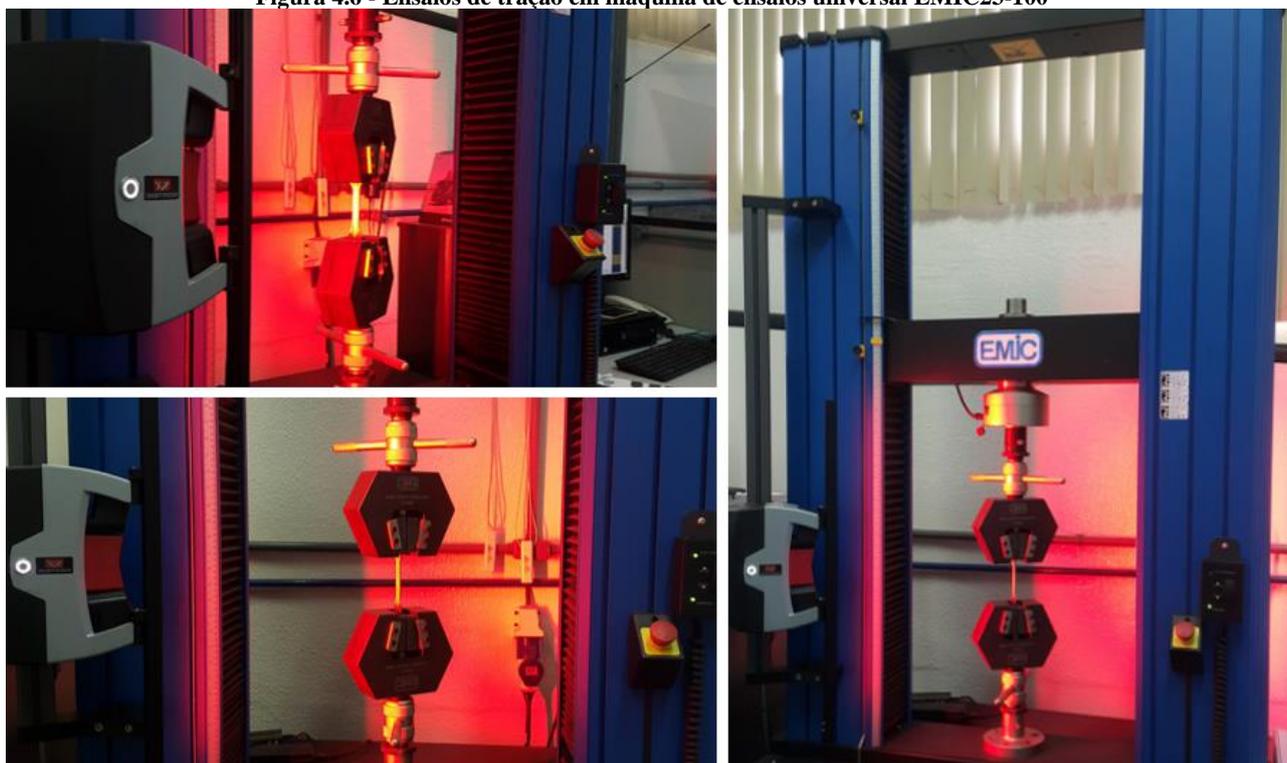
Figura 4.5 - Dimensões corpo de prova para ensaio de tração de acordo com ASM E8M



Fonte: Adaptado pelo autor ASM E8M (2016)

Os ensaios de tração foram realizados nos laboratórios da empresa Marcopolo numa máquina universal de ensaios de marca *Instron EMIC23-100*, registrada com código interno Marcopolo ME10012024, com sua última calibração realizada em 18/04/2018.

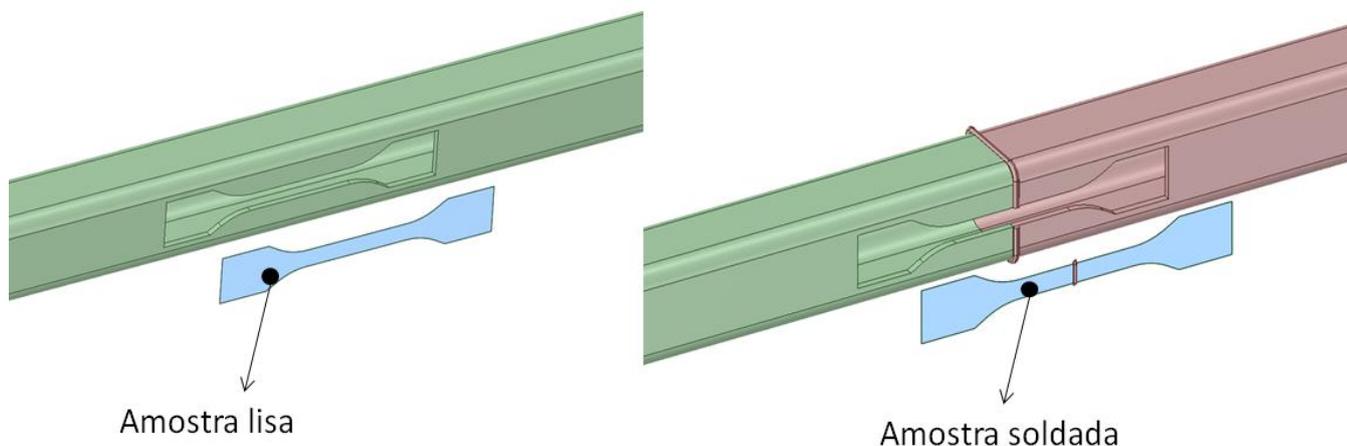
Figura 4.6 - Ensaios de tração em máquina de ensaios universal EMIC23-100



Fonte: Autor (2019)

Como o material estudado é um tubo, os corpos de prova foram retirados do mesmos como mostrado na Figura 4.7 onde foram removidas amostras do tubo sem solda e com solda entre as duas peças utilizando o mesmo material.

Figura 4.7 – Detalhe esquemático dos corpos de prova para realização de ensaios experimentais



Fonte: Autor (2019)

4.6 Ensaio de fadiga dos materiais

Os ensaios de fadiga foram elaborados a partir dos dados coletados experimentalmente e calculados através da metodologia descrita na seção 3.7. Os carregamentos encontrados experimentalmente foram aplicados ao modelo numérico do veículo completo que resultaram em valores de tensão nos componentes estudados. A partir destes valores foi desenvolvido um corpo de prova que representou a mesma condição do modelo numérico permitindo realizar um ensaio de fadiga em bancada baseado em dados coletados experimentalmente. O ensaio foi aplicado aos três diferentes tipos de materiais estudados para verificar seu comportamento mediante a fadiga.

Foi elaborado um corpo de prova de geometria similar ao da carroceria com o objetivo de representar o comportamento real do componente em bancada de testes. A partir do perfil de tensões encontrados neste componente, o corpo de prova foi modificado até representar da forma mais semelhante o possível a condição real. A Figura 4.8 mostra a máquina de fadiga que foi utilizada para realizar os ensaios.

Figura 4.8 - Máquina de fadiga – Laboratório Experimental Marcopolo SA



Fonte: Autor (2019)

O ensaio de fadiga experimental foi realizado dentro dos laboratórios da empresa Marcopolo SA utilizando a máquina mostrada na Figura 4.8. Esta máquina foi fabricada internamente a empresa com a finalidade de realizar estes ensaios. A unidade hidráulica e atuador do equipamento são da marca *Control Tech*. O controlador e a servo válvula foram desenvolvidos pela empresa *Moog*. A Figura 4.9 mostra uma foto do equipamento utilizado nos testes com um dos corpos de prova instrumentados. Além disso, nesta mesma imagem está mostrado o aquisitor de dados da marca *Lynx* para medir os pontos instrumentados.

Figura 4.9 - Equipamentos utilizados para ensaio de fadiga



Fonte: Autor (2019)

Para obter resultados que não sejam afetados por variáveis geométricas todas as amostras foram confeccionadas com as mesmas dimensões sendo a única variante entre uma e outra o material base. Todas as amostras tubulares foram cortadas através de serra automática, estas foram montadas em gabaritos e unidas através do processo de soldagem. O processo de soldagem utilizado para unir estas amostras foi o GMAW seguindo as especificações de processos de soldagem (EPS) utilizadas na Marcopolo.

Este novo material deve ser avaliado sem causar distúrbios no processo produtivo da fábrica, pois pretende-se utilizar os três materiais analisados neste trabalho de forma conjunta na mesma linha de produção cada um com um objetivo diferente na estrutura. Neste trabalho foi utilizada a mesma EPS e o mesmo metal de adição em todas as amostras que é o arame comercial especificado como ER70 S6. Este arame não é o mais indicado para fazer a união soldada do aço DP 980 (Figura 4.10).

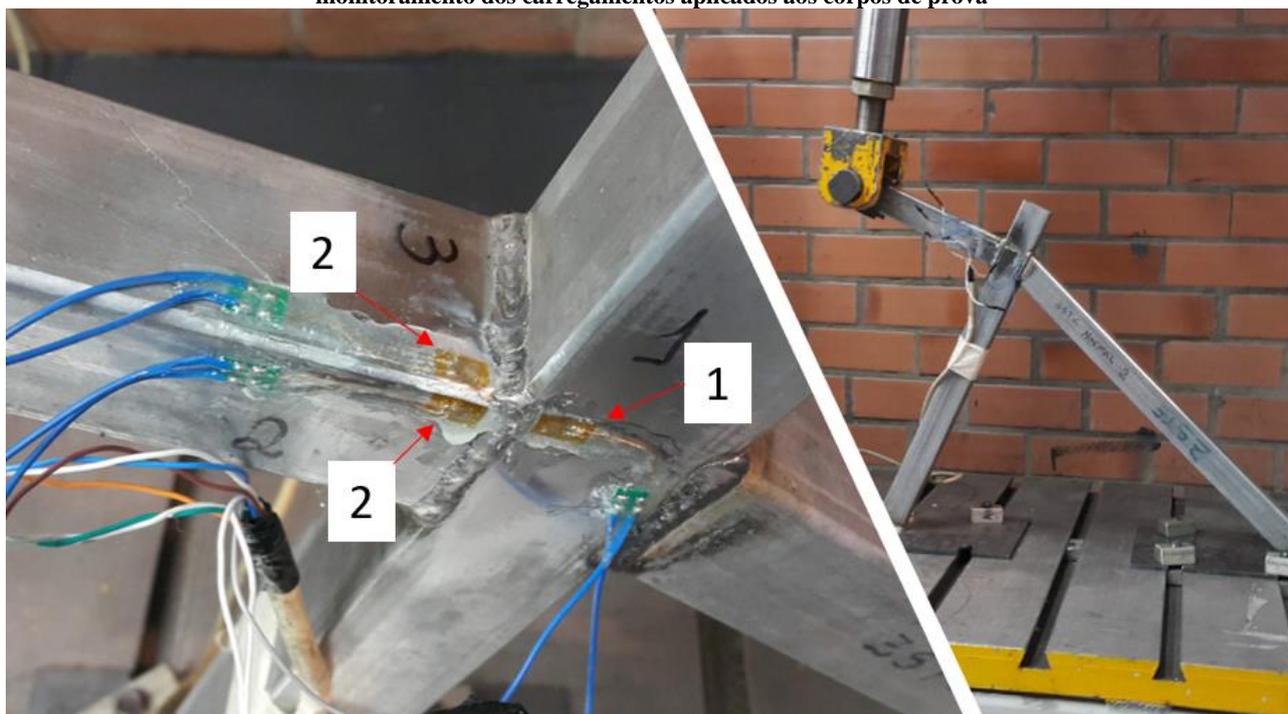
Figura 4.10 - Fabricação dos corpos de prova



Fonte: Autor (2019)

Para que o teste fosse realizado de forma idêntica em todas as amostras, estas foram instrumentadas com extensômetros a fim de ajustar, controlar e monitorar a aplicação de carga nos corpos de prova. Em todas as amostras ensaiadas três extensômetros uniaxiais foram instalados com o objetivo de verificar se o perfil de tensões aplicado na amostra é o mesmo do calculado via *software* de elementos finitos. A Figura 4.11 mostra um dos corpos de prova com a posição de cada um dos extensômetros.

Figura 4.11 - Corpo de provas instrumentado na bancada de testes – Extensômetros uniaxiais 1, 2 e 3 utilizados para monitoramento dos carregamentos aplicados aos corpos de prova



Fonte: Autor (2019)

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção serão apresentados os resultados dos ensaios experimentais propostos no capítulo 4, comparando as três amostras analisadas. Serão vistos os resultados para o ensaio de tração, fadiga, metalografias e microdureza.

5.1 Ensaio de tração

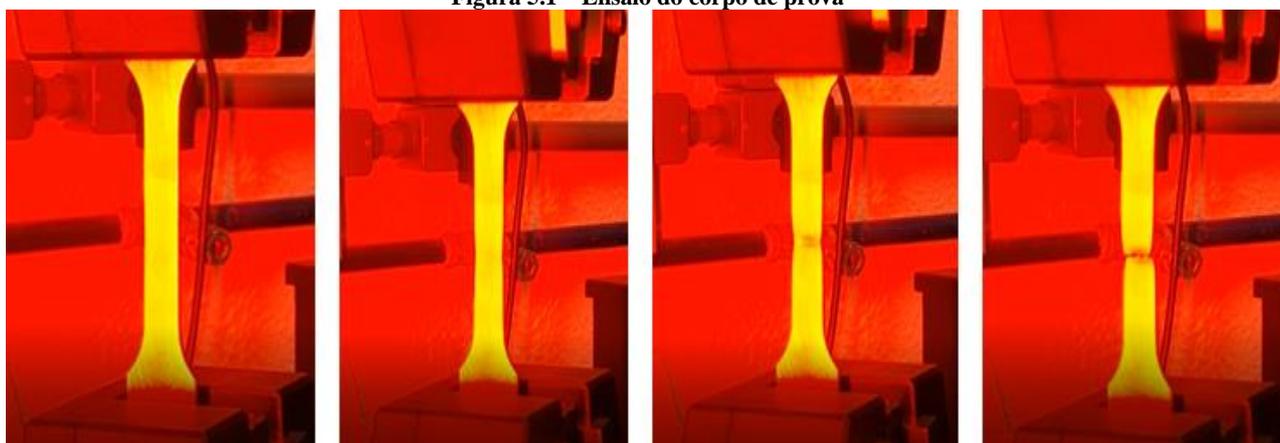
Conforme proposto na seção 4.5, os resultados do ensaio de tração para os corpos de prova retirados dos tubos sem solda, podem ser vistos de forma resumida na Tabela 5.1, que mostra as principais propriedades mecânicas destes materiais. A Figura 5.1 mostra a evolução do carregamento ao longo do tempo para um dos corpos de prova ensaiados.

Tabela 5.1 - Propriedades mecânicas dos materiais ZAR230, ZSTE380 e DP980

Material	LE	LR	Alongamento (%)
Aço ZAR230	291 MPa	369 MPa	23,5 %
Aço ZSTE380	543 MPa	597 MPa	17,7 %
Aço DP980	839 MPa	1103 MPa	10,5 %

Fonte: Autor (2019)

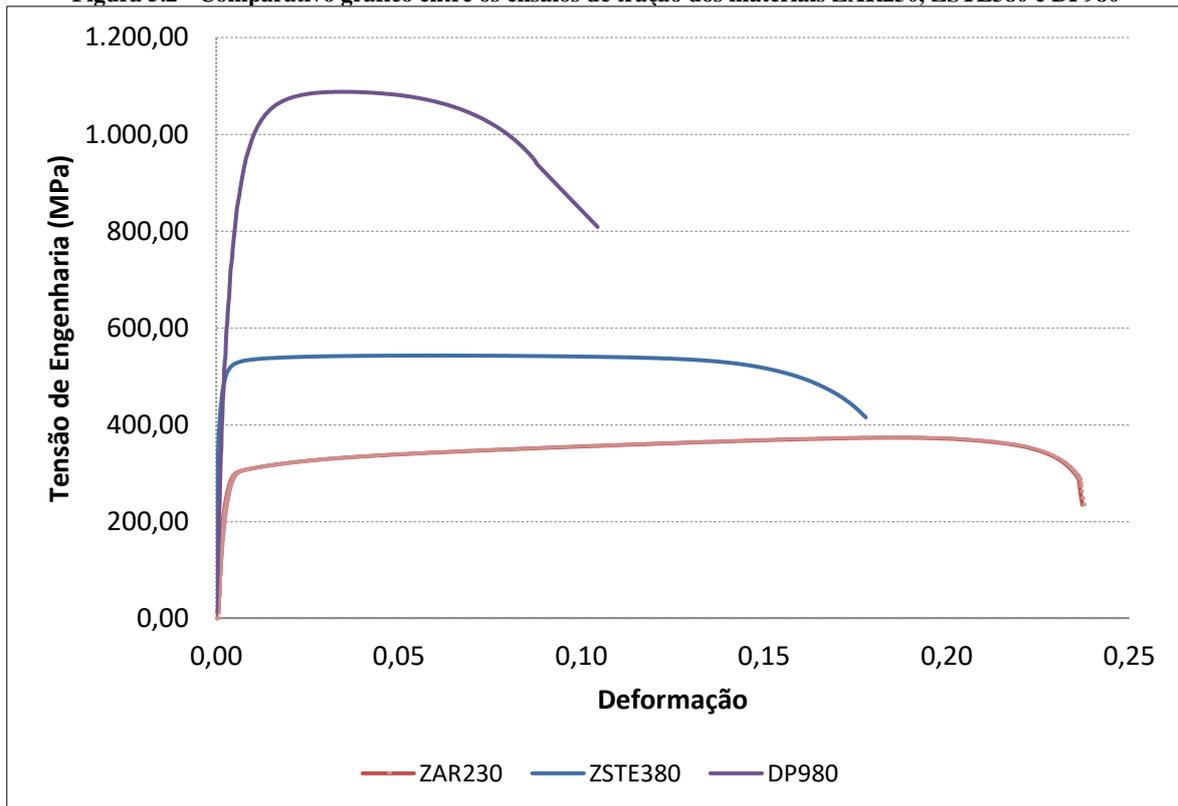
Figura 5.1 – Ensaio do corpo de prova



Fonte: Autor (2019)

A Figura 5.2 mostra a relação da curva tensão deformação para cada um destes materiais permitindo avaliá-los de forma comparativa.

Figura 5.2 - Comparativo gráfico entre os ensaios de tração dos materiais ZAR230, ZSTE380 e DP980



Fonte: Autor (2019)

Ao analisar os gráficos é possível constatar que o material ZAR 230 apresenta o maior alongamento, porém a menor resistência mecânica. O aço ZSTE380 está numa faixa intermediária entre os três aços, apresentando uma boa resistência mecânica e um bom alongamento. O aço DP 980 possui resistência mecânica muito superior aos outros dois, porém um alongamento menor. O resultado obtido no ensaio do aço DP 980 é condizente com os experimentos realizados por Deng et al. (2012) e XU, W. et al. (2013), onde nestes trabalho a tensão de escoamento e de ruptura foram 720 MPa e 1095 MPa respectivamente.

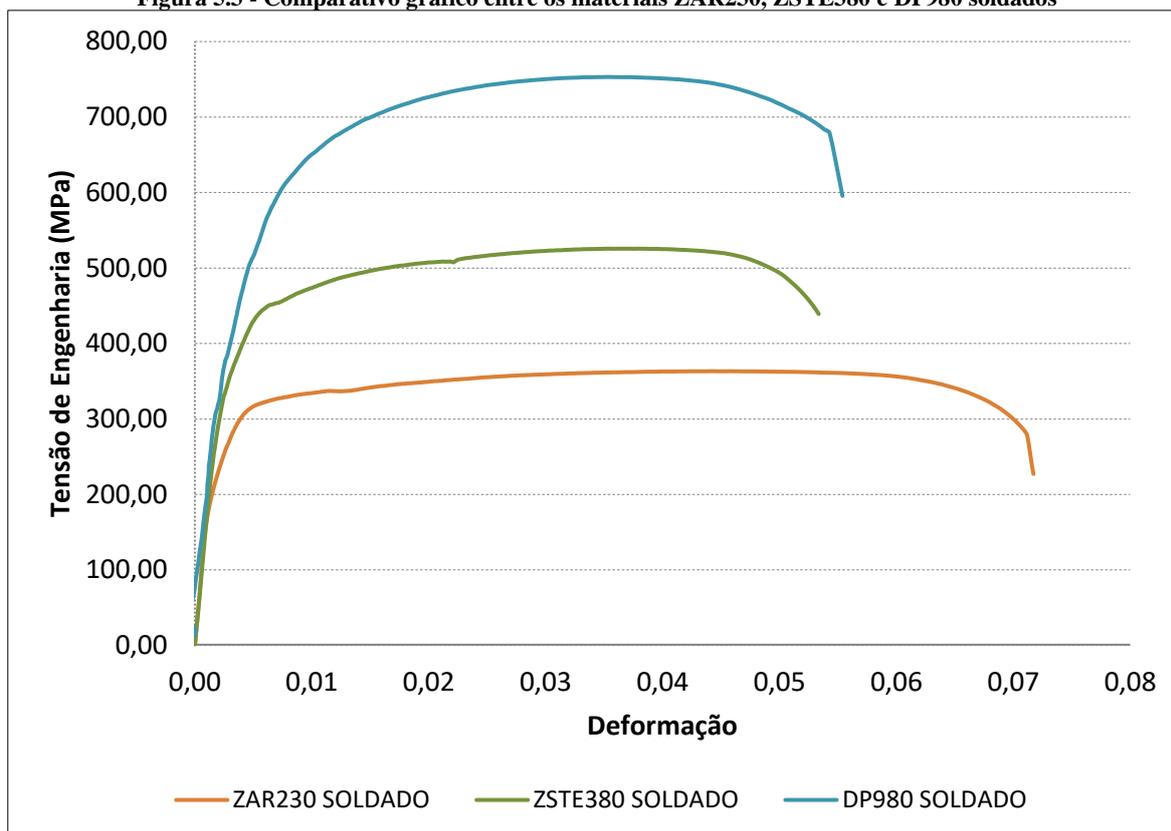
Ao soldar estas amostras é possível afirmar que o comportamento de todos estes materiais se altera drasticamente. A Tabela 5.2 mostra os resultados do ensaio de tração para estes tubos soldados, nela é possível observar como as propriedades dos aços se alteraram mediante o processo de soldagem. O gráfico apresentado na Figura 5.3 mostra o comparativo da relação tensão deformação destes aços.

Tabela 5.2 - Propriedades mecânicas dos materiais ZAR230, ZSTE380 e DP980 soldados

Material	LE	LR	Alongamento (%)
Aço ZAR230 - Soldado	253 MPa	378 MPa	5,50%
Aço ZSTE380 - Soldado	368 MPa	528 MPa	4,30%
Aço DP980 - Soldado	523 MPa	756 MPa	7,10%

Fonte: Autor (2019)

Figura 5.3 - Comparativo gráfico entre os materiais ZAR230, ZSTE380 e DP980 soldados



Fonte: Autor (2019)

Como pode ser visto houve uma redução muito grande na ductilidade e na resistência mecânica dos aços. Uma característica que chama bastante a atenção é a perda de alongamento dos aços ZAR230 e ZSTE 380, que apresentaram um redução no alongamento de aproximadamente 300%. A Tabela 5.3 mostra o comparativo entre os ensaios realizados, os resultados estão expressos em forma percentual e comparam a Tabela 5.1 com a Tabela 5.2. É possível afirmar através dos resultados mostrados que o processo de soldagem compromete a resistência mecânica e a ductilidade dos materiais de forma bastante significativa.

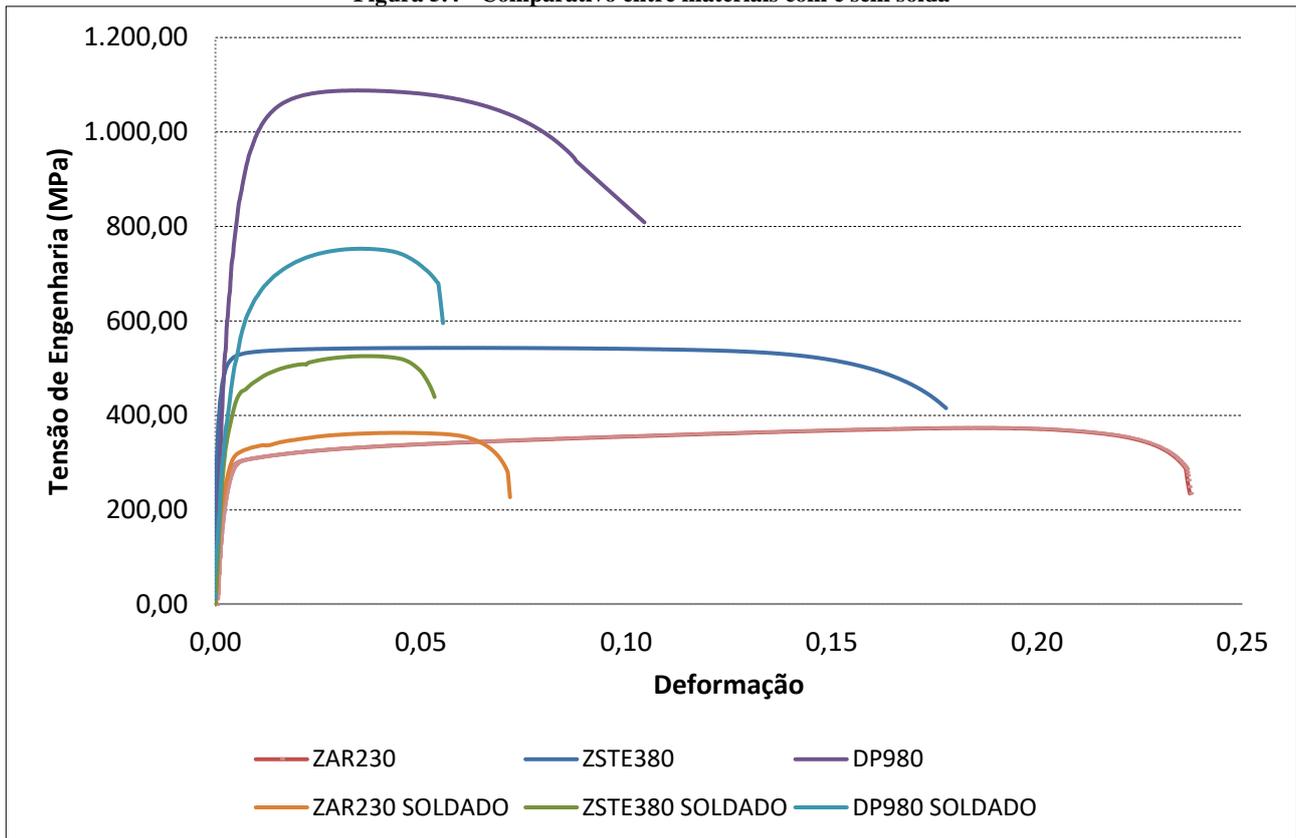
Tabela 5.3 - Redução nas propriedades mecânicas do ensaio de tração quando comparadas amostras retiradas do tubo com e sem o processo de soldagem

Material	Redução no LE	Redução no LR	Redução no Along (%)
Aço ZAR230	-13%	2%	-327%
Aço ZSTE380	-32%	-12%	-312%
Aço DP980 – Soldado	-38%	-31%	-48%

Fonte: Autor (2019)

Ao associar os dois gráficos já apresentados é possível verificar quão grande é a perda de resistência mecânica e de alongamento para todos os casos analisados (Figura 5.4).

Figura 5.4 - Comparativo entre materiais com e sem solda



Fonte: Autor (2019)

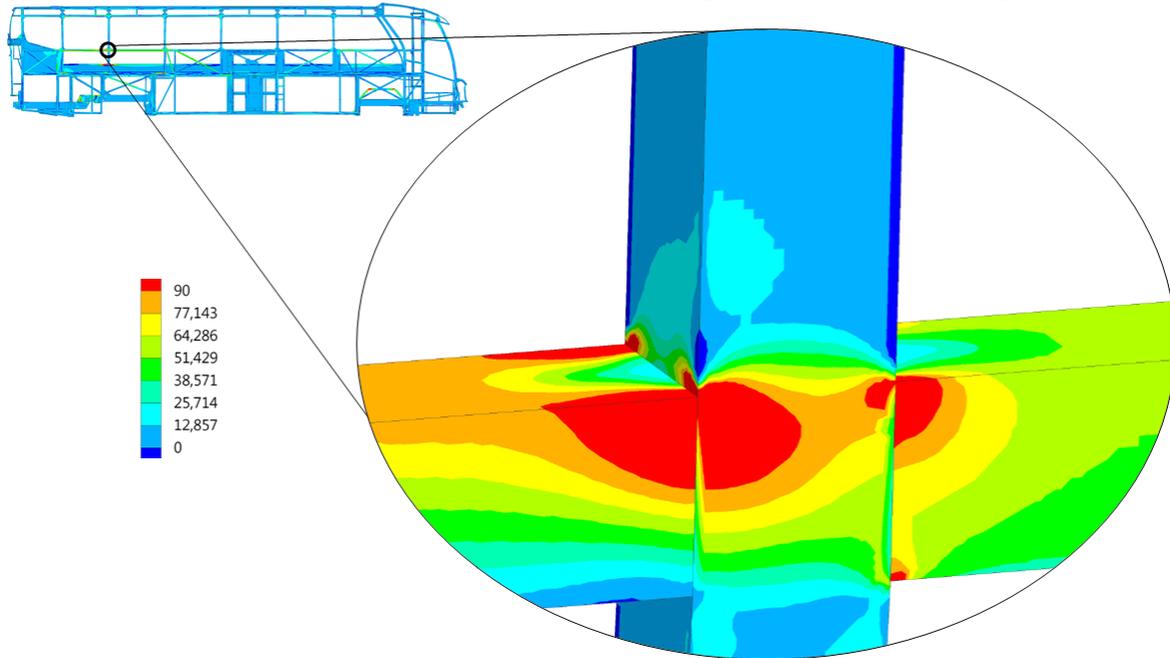
No caso do aço *dual phase* o mesmo comportamento foi observado pelos autores Deng et al. (2012) e XU, W. et al. (2013), onde nos trabalhos desenvolvidos por estes autores o processo de união das amostras foi através de solda laser por fibra (FLW), e para amostras testadas o limite de resistência mecânica do material também foi afetado, tendo sua resistência mecânica reduzida em aproximadamente 34% em ambos os trabalhos, valor similar ao encontrado.

5.2 Ensaio de fadiga

5.2.1 Definição das forças de aplicação

Como descrito na seção 4.6 o ensaio de fadiga foi elaborado de acordo com os carregamentos calculados a partir dos dados medidos experimentalmente. Visando compreender quais os esforços que chegam à região da carroceria que será estudada, um modelo numérico completo da carroceria foi modelado via *software* de elementos finitos e nele os esforços medidos foram aplicados. Para a realização dos cálculos estruturais foi utilizado o *software* para análise de elementos finitos *Ansys Workbench Versão 19.2*. Os resultados desta análise estão apresentados na Figura 5.5 sendo a região que será estudada em destaque.

Figura 5.5 - Distribuição de tensões resultantes dos carregamentos aplicados a carroceria no componente estudado

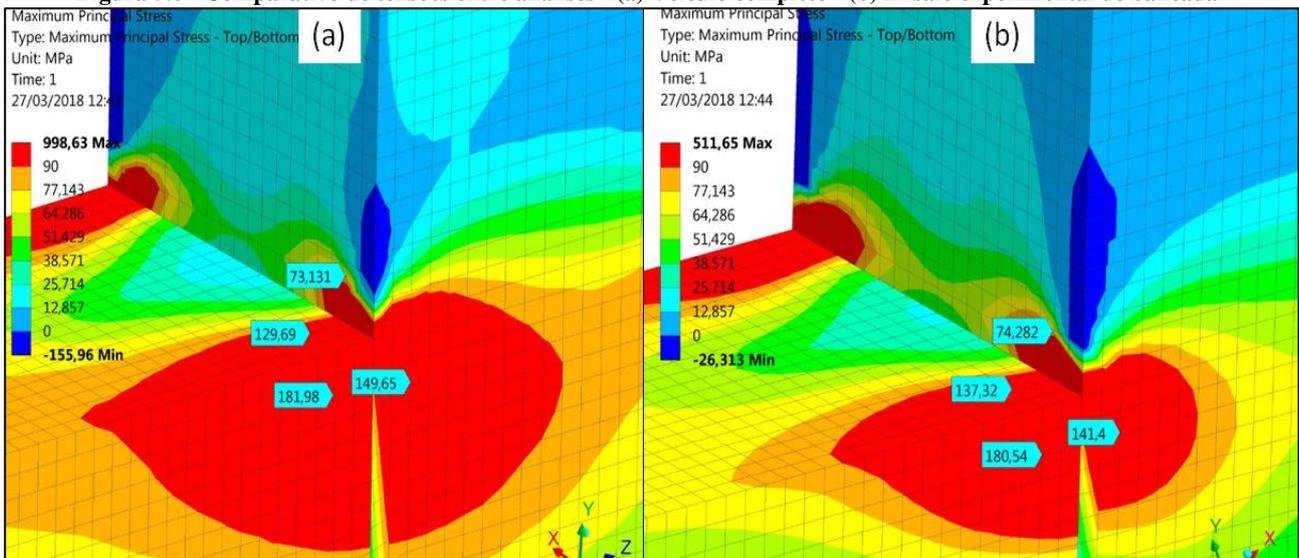


Fonte: Autor (2019)

Baseados na geometria do componente estudado e nas dimensões do equipamento de que será utilizado para realizar os ensaios de fadiga, foram elaborados diversos conjuntos similares ao caso real até que fosse encontrado um com geometria que representasse de forma satisfatória o componente que será avaliado.

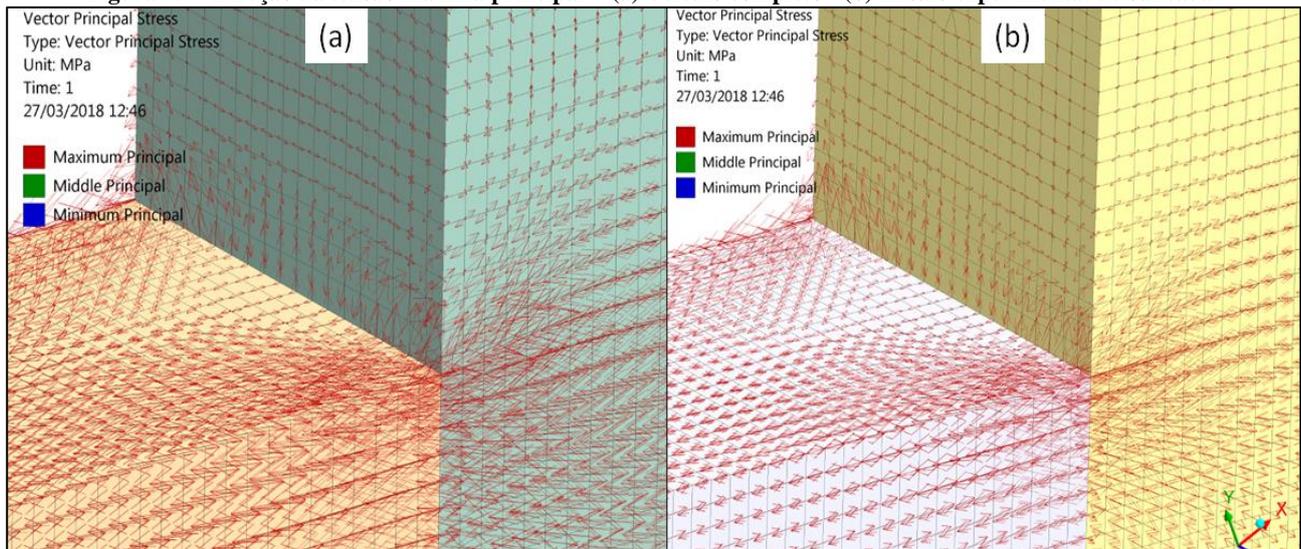
A definição da amostra que foi ensaiada foi obtida através de comparações entre as tensões principais e suas direções entre os dois modelos de elementos finitos, o do carro completo e do ensaio simplificado de bancada (Figura 5.6, Figura 5.7 e Figura 5.8). Após diversas iterações foi possível obter através de uma combinação de forças, uma correlação que representasse no ensaio de bancada a aplicação real do veículo.

Figura 5.6 - Comparativo de tensões entre análises - (a) Veículo completo - (b) Ensaio experimental de bancada



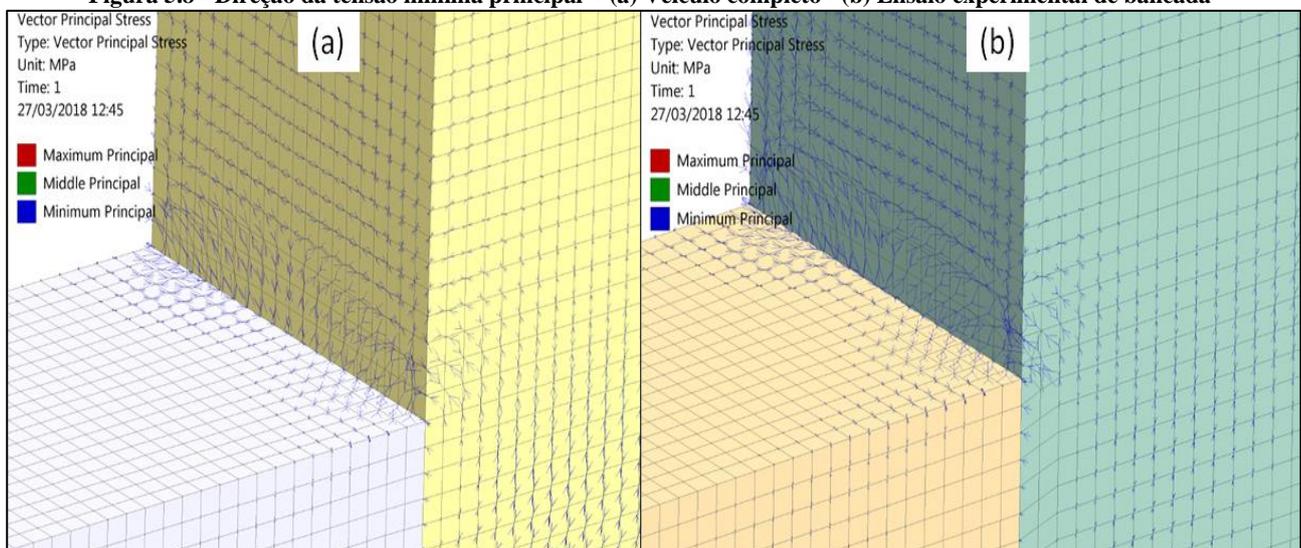
Fonte: Autor (2019)

Figura 5.7 - Direção da tensão máxima principal - (a) Veículo completo - (b) Ensaio experimental de bancada



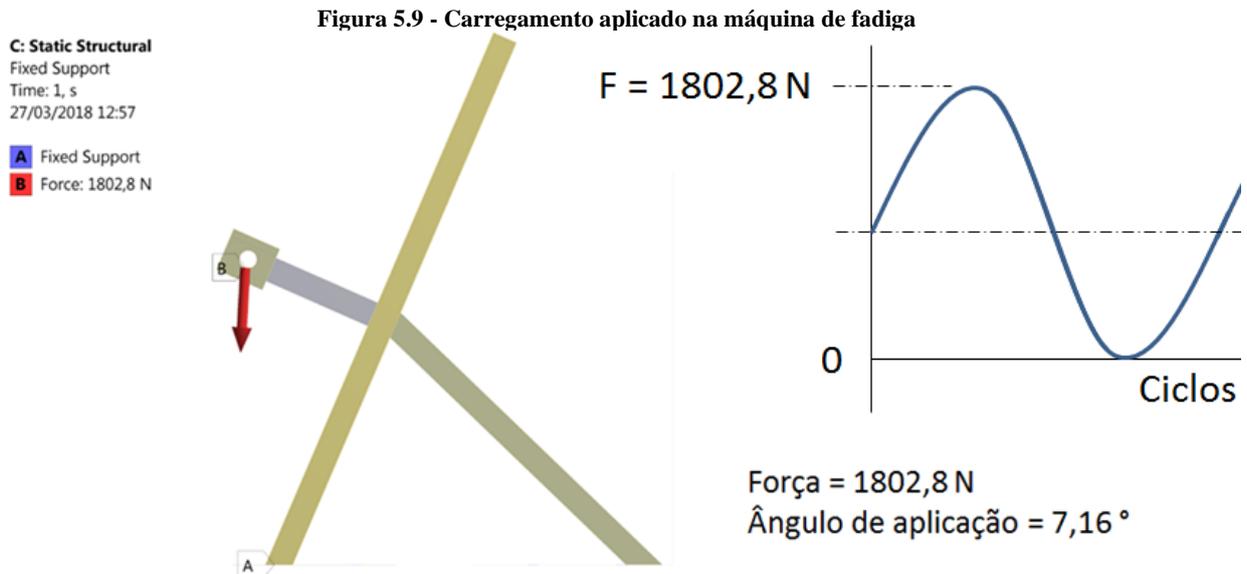
Fonte: Autor (2019)

Figura 5.8 - Direção da tensão mínima principal - (a) Veículo completo - (b) Ensaio experimental de bancada



Fonte: Autor (2019)

Através da análise de elementos finitos foi possível encontrar as forças que devem ser aplicadas ao corpo de prova. Essa força foi aplicada através de um atuador controlado hidraulicamente e aplicada de forma senoidal, sendo a frequência de aplicação de 10 Hz e $R_{ratio} = 0$. A Figura 5.9 mostra um desenho esquemático do corpo de prova ensaiado e a maneira que as forças foram aplicadas no ensaio experimental realizado em laboratório.



Fonte: Autor (2019)

5.2.2 Ensaio experimental

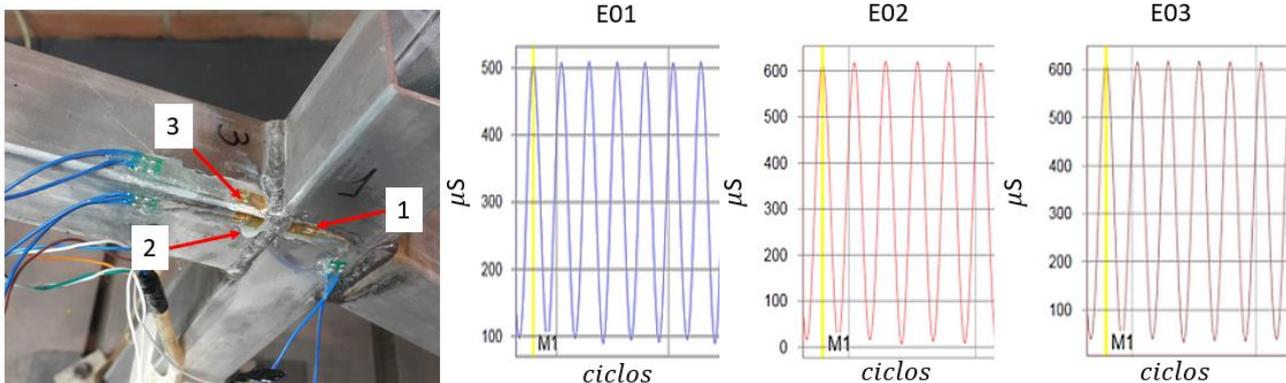
As condições de carga do teste foram aplicadas como descrito na seção 5.2.1, e para elas os resultados medidos com os extensômetros instalados na amostra estão apresentados na Tabela 5.4 e Figura 5.10.

Tabela 5.4 - Resultados das medições de monitoramento dos extensômetros uniaxiais para amostras instrumentadas em laboratório – E1: extensômetro 1; E2: extensômetro 2; E3: extensômetro 3

Arquivo	Sinal	Unidade	Min / Max	Média / RMS	M1 / M2 / dT
ZSTE_NORMAL_20002_F.TEM 04/06/18 14:50	▽ E01 Tempo	uS	90,68 510,58	299,42 333,07	508,03 / 508,26 00:00:03.000,000
ZSTE_NORMAL_20002_F.TEM 04/06/18 14:50	▽ E02 Tempo	uS	7,36 622,73	314,35 380,47	618,18 / 620,04 00:00:03.000,000
ZSTE_NORMAL_20002_F.TEM 04/06/18 14:50	▽ E03 Tempo	uS	33,31 619,16	325,12 384,26	616,21 / 616,53 00:00:03.000,000

Fonte: Autor (2019)

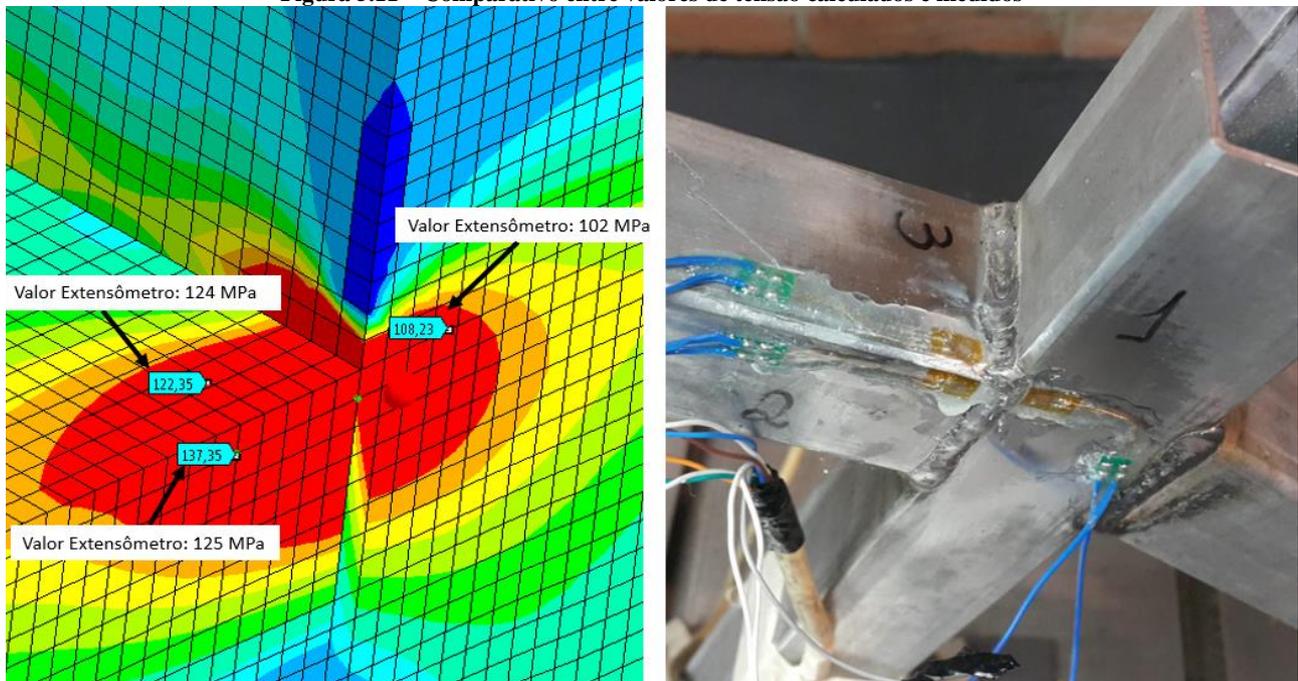
Figura 5.10 - Resultados das medições de monitoramento dos extensômetros uniaxiais para amostras instrumentadas em laboratório – E1: extensômetro 1; E2: extensômetro 2; E3: extensômetro 3



Fonte: Autor (2019)

A Figura 5.11 mostra um comparativo entre a tensão medida no extensômetros e os resultados do modelo numéricos. Através da imagem é possível constatar que os níveis de tensão estão muito próximos e representam com precisão os carregamentos encontrados em campo.

Figura 5.11 – Comparativo entre valores de tensão calculados e medidos



Fonte: Autor (2019)

Após fazer a verificação de que o ensaio experimental está condizendo com os valores de tensão encontrados no modelo numérico, foi realizado o teste em bancada considerando os carregamentos descritos anteriormente. Este ensaio de fadiga foi executado em três amostras de cada tipo de material, sendo este procedimento realizado até a falha do componente.

Após a execução do ensaio de fadiga para todos os materiais, os resultados do teste foram compilados na Tabela 5.5. Como pode ser visto nesta tabela, o comportamento das amostras de mesmo material apresentou uma tendência similar de números de ciclo até a falha. Quando comparados os diferentes materiais é possível constatar que para o mesmo nível de tensão aplicada o comportamento a fadiga é bastante diferente.

Tabela 5.5 - Ensaio de fadiga

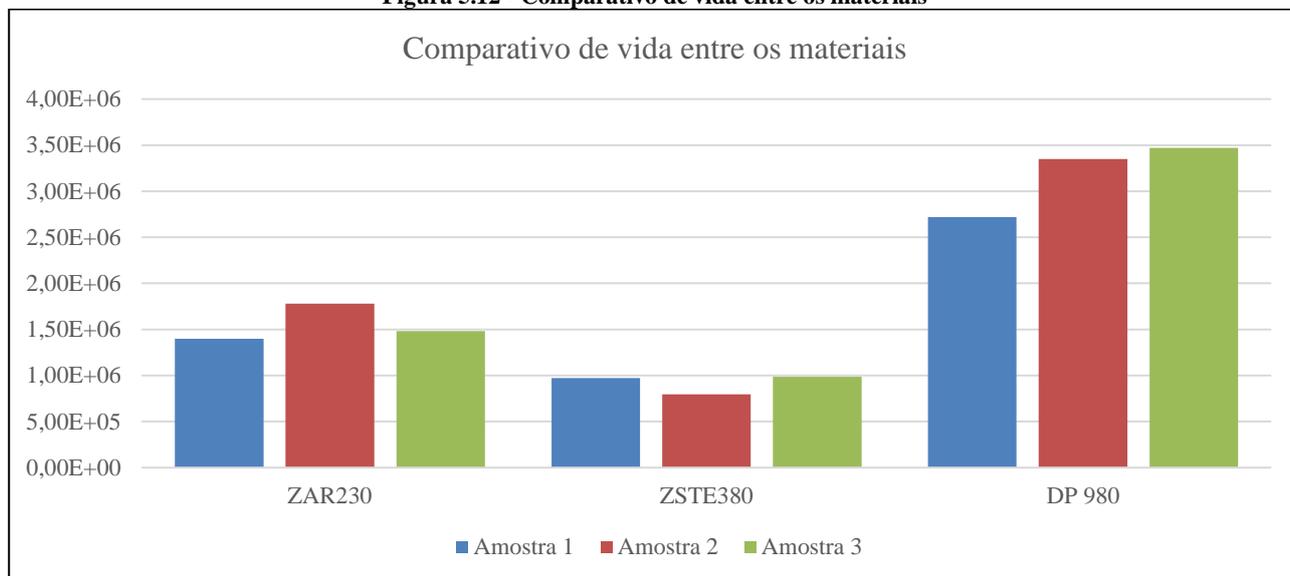
Material	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Média	Desvio Padrão
ZAR230	1,40E+06 Ciclos	1,78E+06 Ciclos	1,48E+06 Ciclos	1,55E+06 Ciclos	1,91E+5 Ciclos
ZSTE380	9,74E+05 Ciclos	7,94E+05 Ciclos	9,85E+05 Ciclos	9,18E+05 Ciclos	1,02E+5 Ciclos
DP 980	2,72E+06 Ciclos	3,35E+06 Ciclos	4,35E+06 Ciclos	3,47E+06 Ciclos	4,03E+5 Ciclos

Fonte: Autor (2019)

Nota-se que os ensaios realizados com o material ZAR230 apresentaram uma vida média de aproximadamente 1,5E6 ciclos. O mesmo não aconteceu para o material ZSTE380, que se comparado ao ZAR 230 apresentou uma vida bastante inferior, tendo a média da vida para este material reduzida a 9,2E5 ciclos. A diferença de vida entre estes materiais pode ser explicada devido ao menor alongamento do material ZSTE380 se comparado ao ZAR230, dessa forma este material consegue absorver mais energia até sua falha.

Quando os materiais ZAR230 e ZSTE380 são comparados ao DP 980, é possível afirmar que este apresentou um resultado muito superior aos dois, a vida média para este componente para suportar o mesmo carregamento das amostras com outros materiais é de aproximadamente 3,5E6 ciclos, mais que o dobro dos outros materiais. O gráfico mostrado na Figura 5.12 ilustra bem a diferença de vida entre os materiais, onde é possível observar a nítida diferença entre os aços analisados neste estudo.

Figura 5.12 - Comparativo de vida entre os materiais



Fonte: Autor (2019)

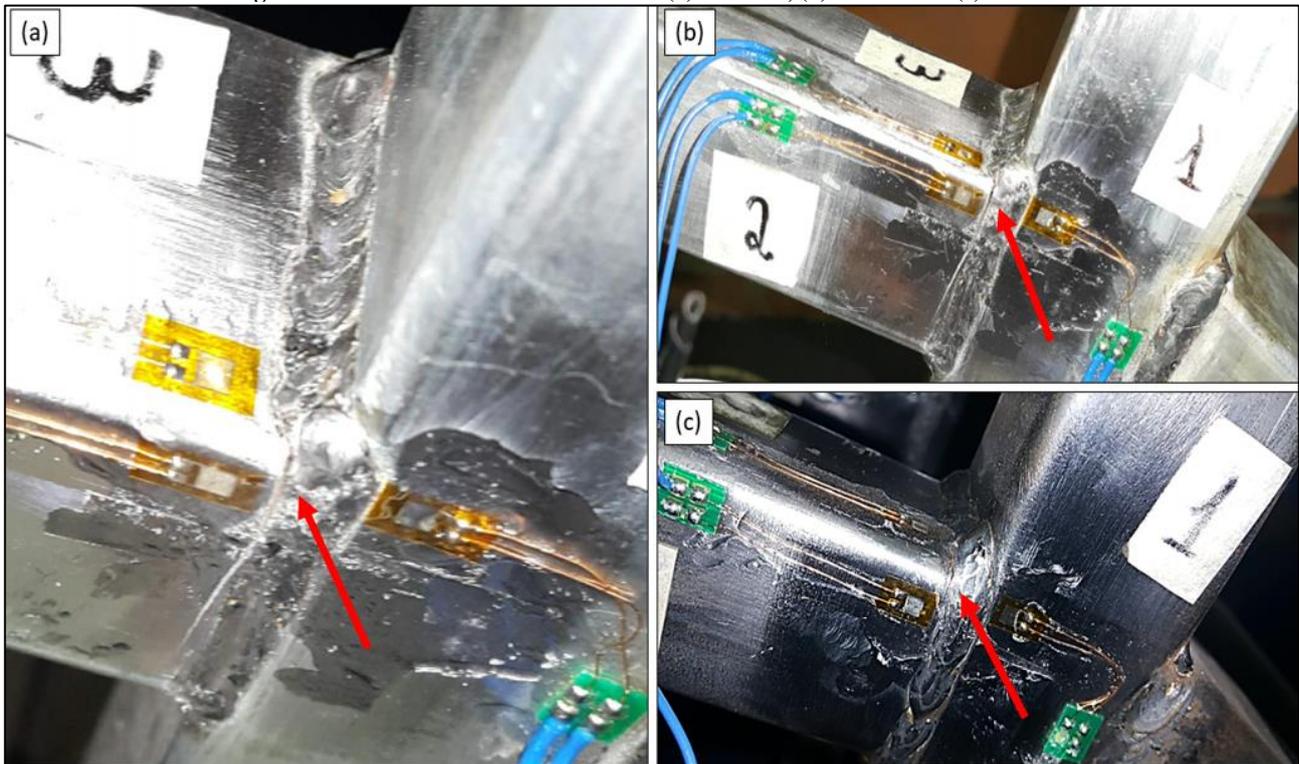
Os resultados obtidos para o aço DP 980 podem ser vistos nos trabalhos realizados por XU, W. et al. (2013) e Deng et al. (2012). Nos artigos realizados por estes autores, o material DP 980 apresentou diferença de vida em fadiga de 40% entre o material base e o material soldado, o material base apresentou um limite de fadiga para a vida infinita de 250 MPa, enquanto o este limite para o material soldado é de 150 MPa. Segundo estes autores o motivo da redução do limite de fadiga é devido à redução da dureza da zona afetada pelo calor devido ao processo de soldagem, que acelerou o processo de falha de fadiga.

Para estes autores, as amostras soldadas apresentaram falhas em torno de 10 milhões de ciclos para o carregamento de 150 MPa. A diferença da vida em fadiga entre os ensaios realizados

pelos autores citados e o ensaio realizado neste trabalho pode ser atribuída aos processos de soldagem utilizados. Nos ensaios realizados por estes autores, XU, W. et al. (2013) e Deng et al. (2012), o processo de solda utilizado foi o de solda a laser (FLW), processo esse que gera uma menor energia de soldagem se comparada ao processo utilizado neste trabalho que foi o GMAW. Para estes aços quanto menor a energia de soldagem e menor a zona termicamente afetada pelo calor maior seu desempenho mediante a carregamentos de fadiga (XU, W. et al., 2013).

Através do modo de falha de todas as amostras é possível constatar que a fratura do componente aconteceu da mesma forma para todas as peças. A falha iniciou-se no canto da junta soldada na face superior que sofre os maiores esforços de tração. A Figura 5.13 mostra a falha em cada uma das amostras.

Figura 5.13 - Modo de falha das amostras (a) ZAR230, (b) ZSTE380 e (c) DP 980



Fonte: Autor (2019)

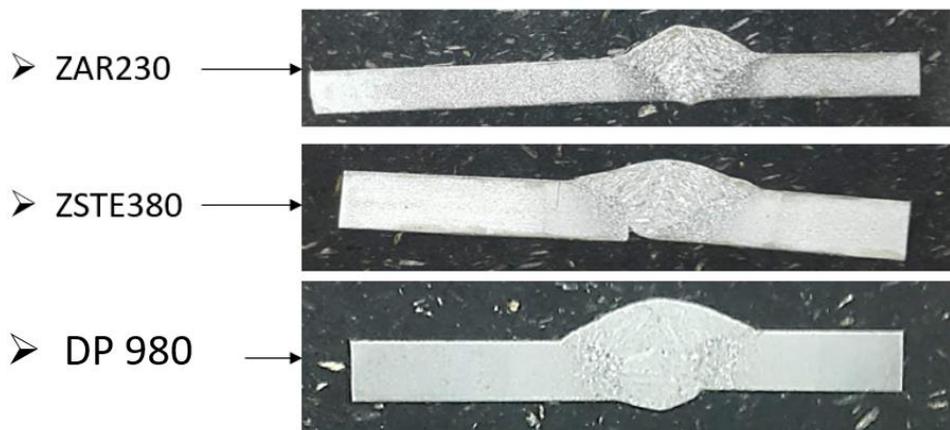
5.3 Metalografias

As metalografia foram executadas conforme descrito na seção 4.3. A primeira etapa do processo de análise foi realizar a macrografia das uniões soldadas onde na Figura 5.14 pode ser visto para cada uma das amostras o material base, a zona afetada pelo calor (ZAC) e a zona fundida. É possível afirmar que a ZAC é diferente para cada um dos materiais ao observamos esta imagem.

Os materiais ZAR230 e ZSTE380 apresentaram uma menor quantidade de metal de adição se comparadas ao material DP980, essa diferença entre os materiais pode ser explicada pelo fato de ter sido utilizado o mesmo parâmetro de soldagem para todos os corpos de prova que seguem a especificação de processo de soldagem da empresa.

Ainda ao analisar a imagem é possível observar que a zona de crescimento de grão é maior para o material ZAR230 e ZSTE380, fato que não é tão evidente ao analisarmos o aço DP 980. Também é possível verificar que houve uma maior penetração do material de solda no aço DP 980 se comparado aos outros.

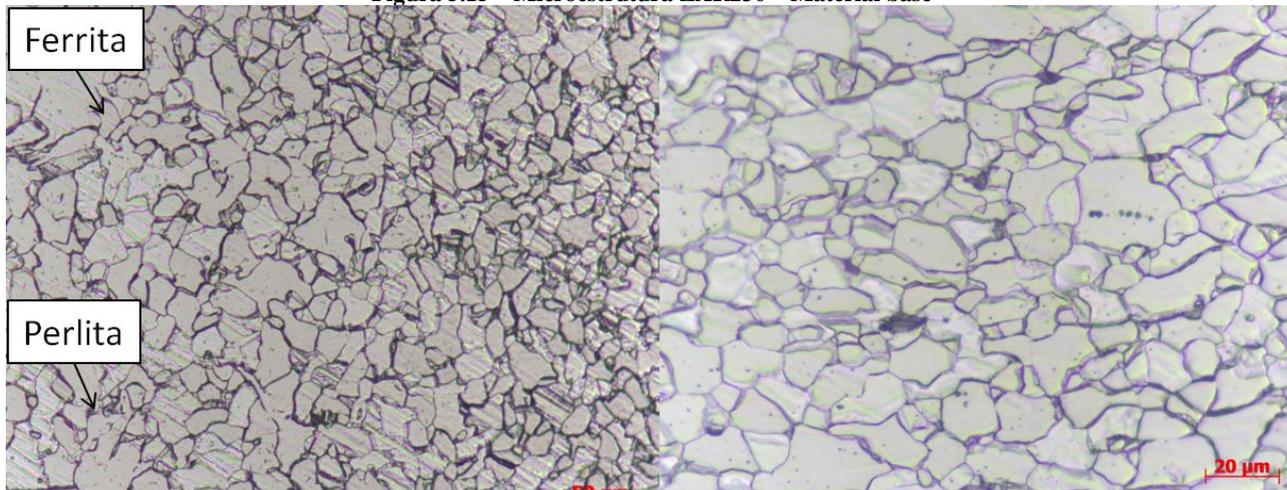
Figura 5.14 – Macrografia para os corpos de prova dos materiais ZAR230, ZSTE380 e DP980



Fonte: Autor (2019)

A Figura 5.15 mostra o resultado das análises metalográficas para o material ZAR230. Na imagem é possível verificar que o material analisado é basicamente composto por ferrita e pouca perlita, microestrutura comum entre aços com baixo teor de elementos de liga.

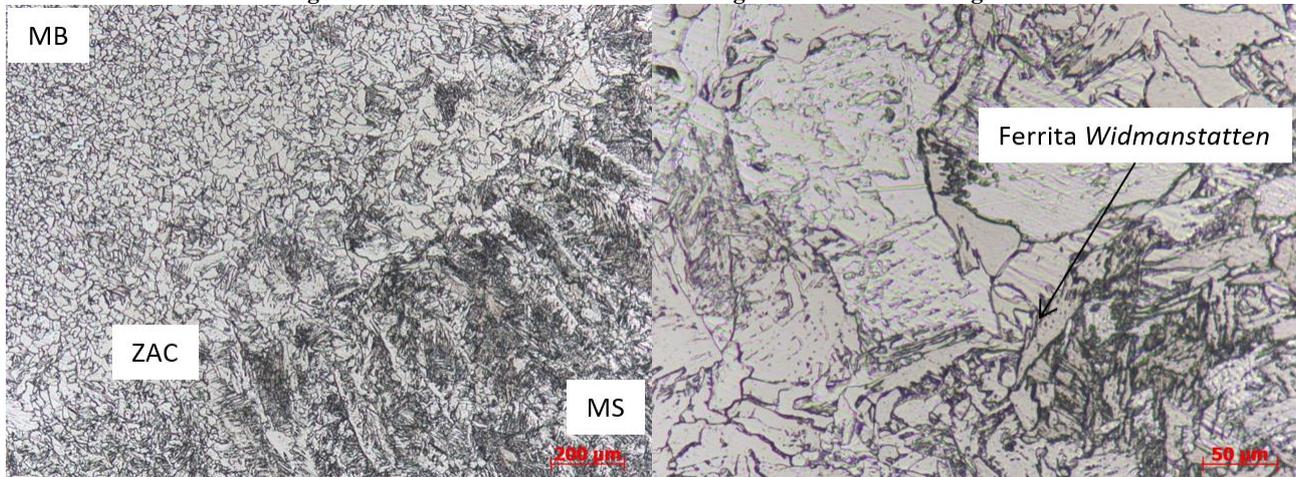
Figura 5.15 – Microestrutura ZAR230 – Material base



Fonte: Autor (2019)

Na zona afetada pelo calor (Figura 5.16) pode notar-se que houve um grande crescimento de grão na ZAC, onde é possível observar a variação do tamanho de grão do metal base até o material de solda. A imagem mostra que após o processo de soldagem, além do crescimento de grão, houve a formação de ferrita *widmanstatten*.

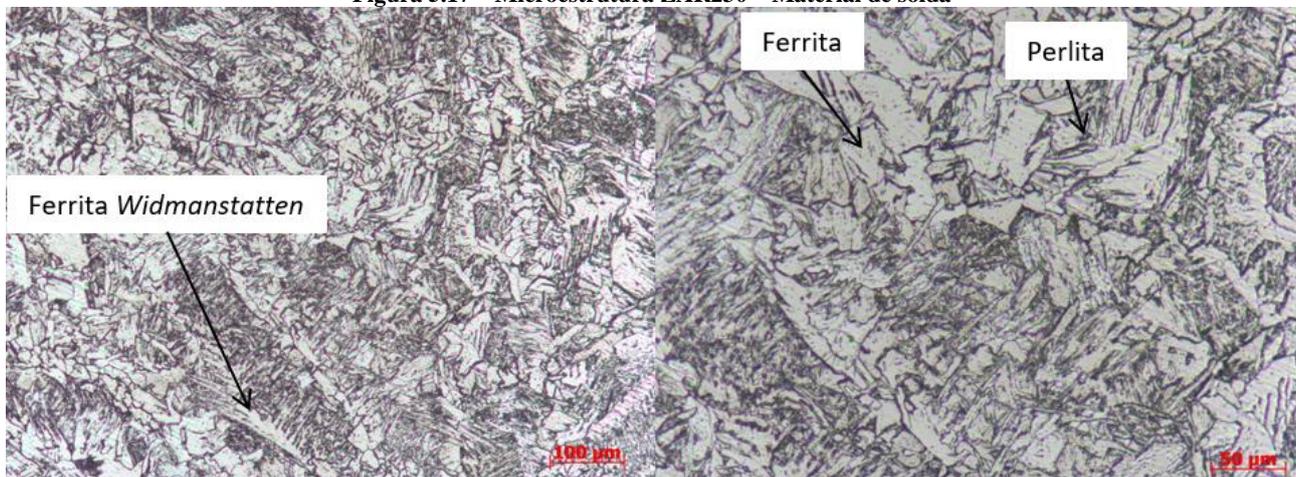
Figura 5.16 – Microestrutura ZAR230 – Região de crescimento de grão



Fonte: Autor (2019)

A região mostrada na Figura 5.17 é a microestrutura do material de solda. Nesta imagem pode ser visto perlitas, ferrita e ferrita *widmanstatten*.

Figura 5.17 – Microestrutura ZAR230 – Material de solda

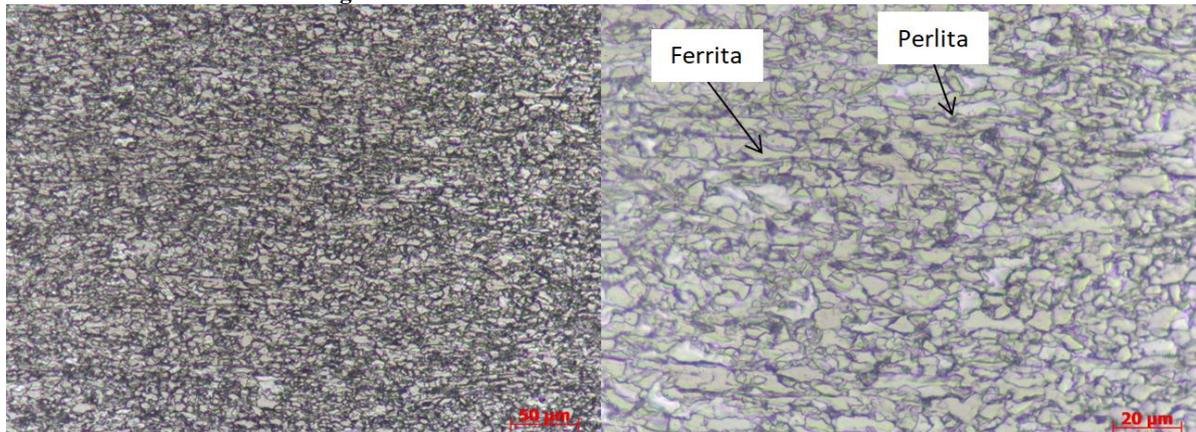


Fonte: Autor (2019)

O aço ZSTE380, apresentou uma microestrutura bastante diferente do ZAR 230, onde nesta micrografia foi possível observar que o material base apresentou uma quantidade equivalente de ferrita e perlita, fato não apresentado pelo material ZAR 230 que possui sua matriz metálica basicamente composta por ferrita. Esta matriz metálica é criada a partir da adição de elementos de liga no aço para aumentar suas propriedades mecânicas, fazendo com que se tenha uma quantidade

mais elevada de perlita aumentando sua resistência mecânica. A Figura 5.18 mostra o material de base do aço ZSTE380, onde podem ser vistos ferrita e perlitas.

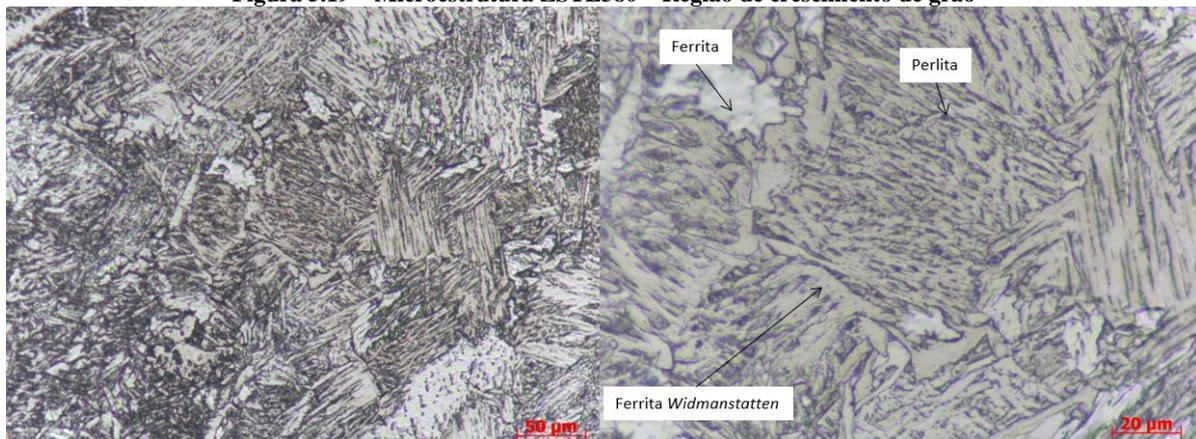
Figura 5.18 – Microestrutura ZSTE380 – Material base



Fonte: Autor (2019)

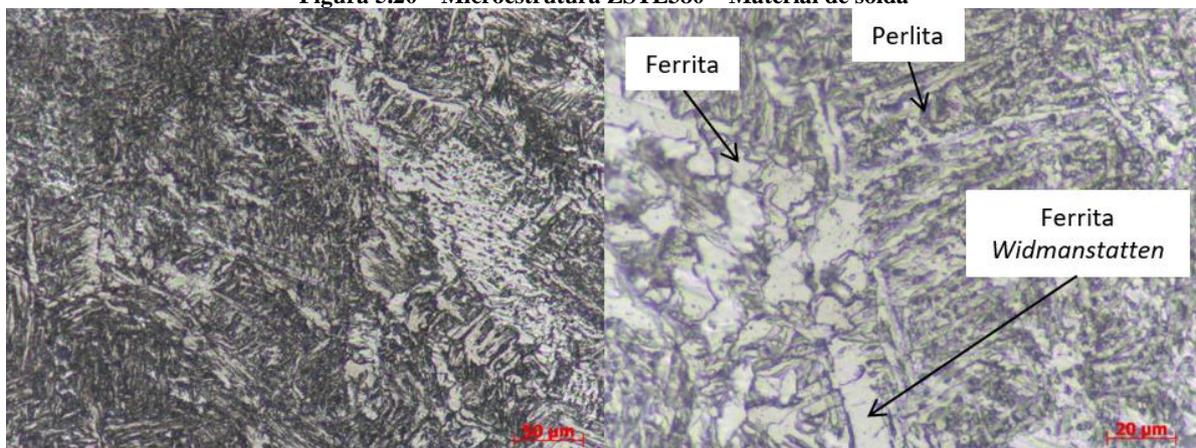
A ZAC, mostrada na Figura 5.19, apresentou crescimento de grão e formação de perlitas. A região do material de solda, Figura 5.20, é formada por ferrita, perlita e ferrita *widmanstatten*.

Figura 5.19 – Microestrutura ZSTE380 – Região de crescimento de grão



Fonte: Autor (2019)

Figura 5.20 – Microestrutura ZSTE380 – Material de solda

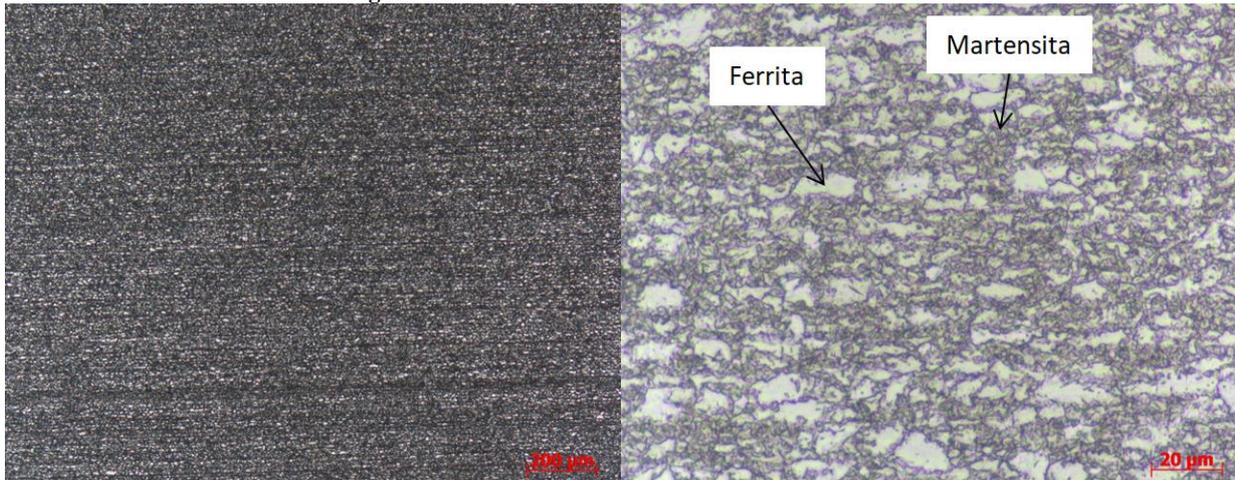


Fonte: Autor (2019)

Através das análises metalográficas do aço DP 980, foi possível verificar que a microestrutura do material base deste material é bifásica composta por ferrita e martensita, como

consta na literatura (Figura 5.21).

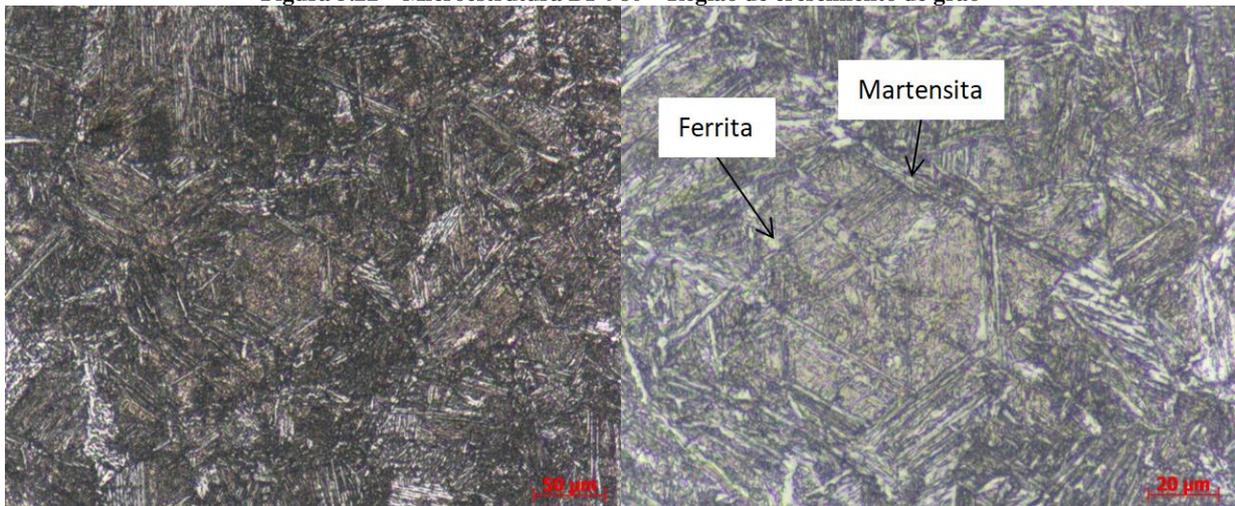
Figura 5.21 – Microestrutura DP 980 – Material base



Fonte: Autor (2019)

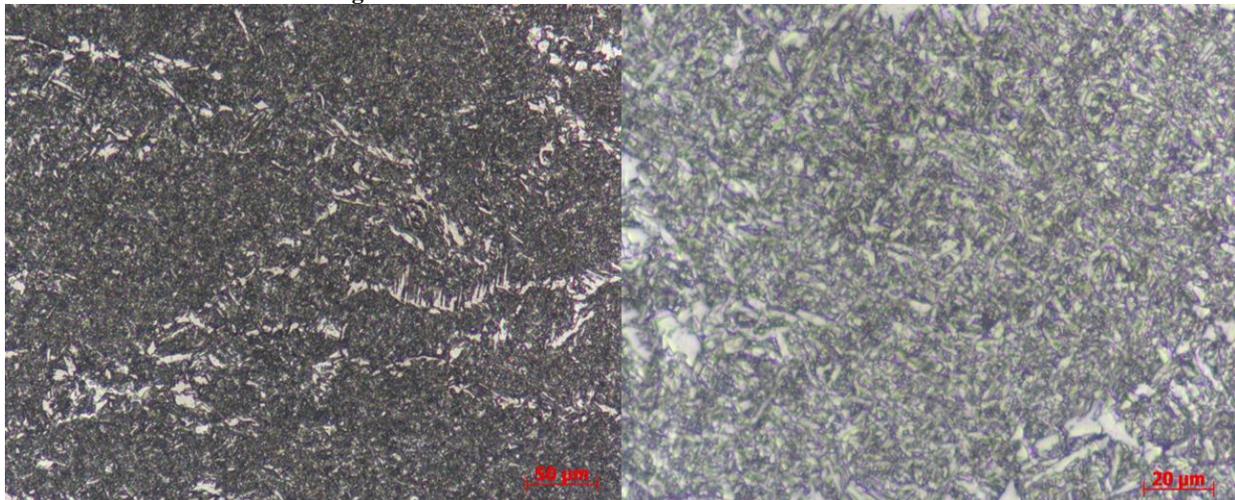
Na zona afetada pelo calor houve o crescimento do grão e a formação de martensita e ferrita que podem ser vistas nas Figura 5.22. No material de solda é possível visualizar ferrita e martensita.

Figura 5.22 – Microestrutura DP 980 – Região de crescimento de grão



Fonte: Autor (2019)

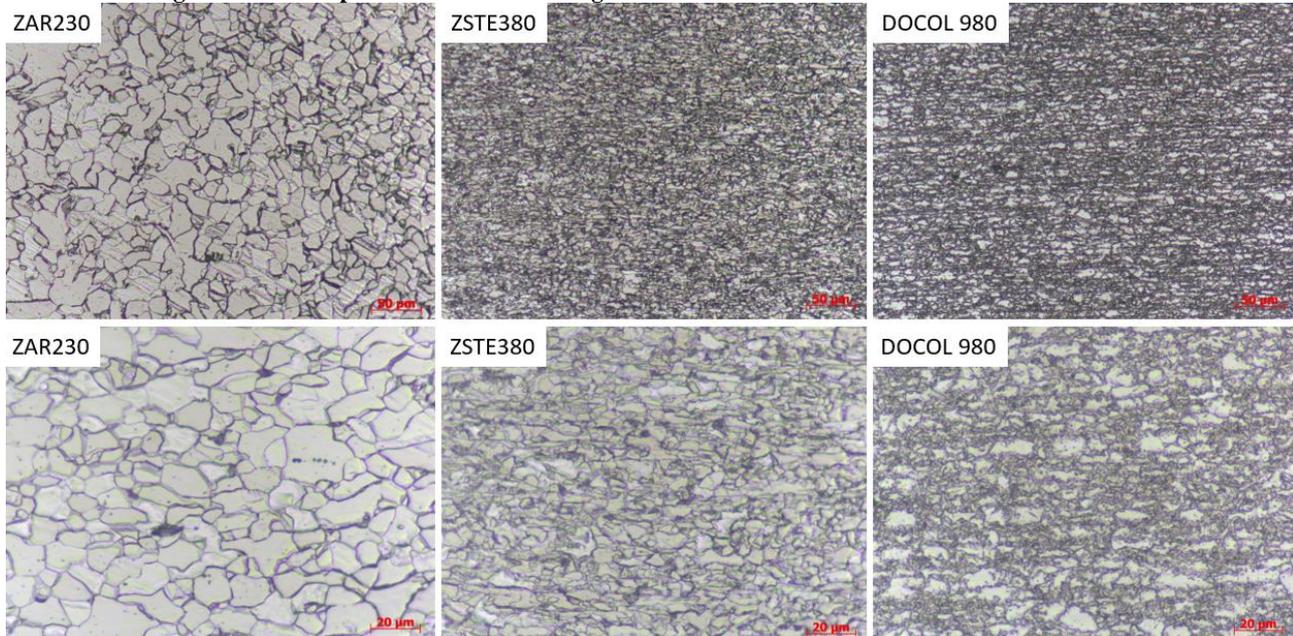
Figura 5.23 - Microestrutura DP 980 – Material de solda



Fonte: Autor (2019)

Ao comparar os tamanhos de grão dos três materiais base é possível afirmar que há uma discrepância muito grande entre os mesmos. Na Figura 5.24, pode-se observar que os grãos do aço ZAR230 muito maior que dos materiais ZSTE380 e DP 980. Com isso é possível sugerir que um dos mecanismos de aumento da resistência mecânica destes aços é devido ao tamanho de grão reduzido destes materiais.

Figura 5.24 - Comparativo do tamanho de grão dos diferentes materiais avaliados neste trabalho.



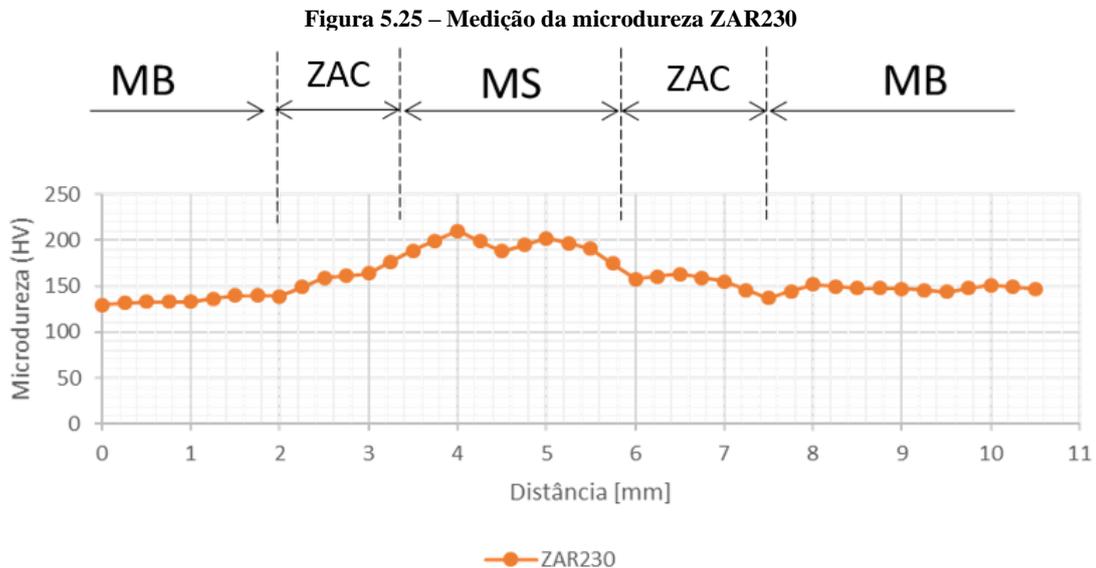
Fonte: Autor (2019)

Outro fator que explica a maior resistência mecânica do aço ZSTE380 se comparado ao ZAR230 é a maior quantidade de perlita contida na matriz metálica. Quando avaliamos o aço DP 980 e comparamos ao ZSTE 380, os dois apresentam um tamanho de grão semelhante, porém a resistência mecânica apresentada no capítulo 5.1 do DP 980 é muito superior à do ZSTE 380, isso é explicado pelo fato de o material DP 980 apresentar duas fases, uma martensítica com maior dureza responsável pelo aumento da resistência do material, e outra ferrítica responsável pela ductilidade, esta combinação permite a este material apresentar uma resistência mecânica superior à dos outros aços analisados.

5.4 Ensaio de Microdureza

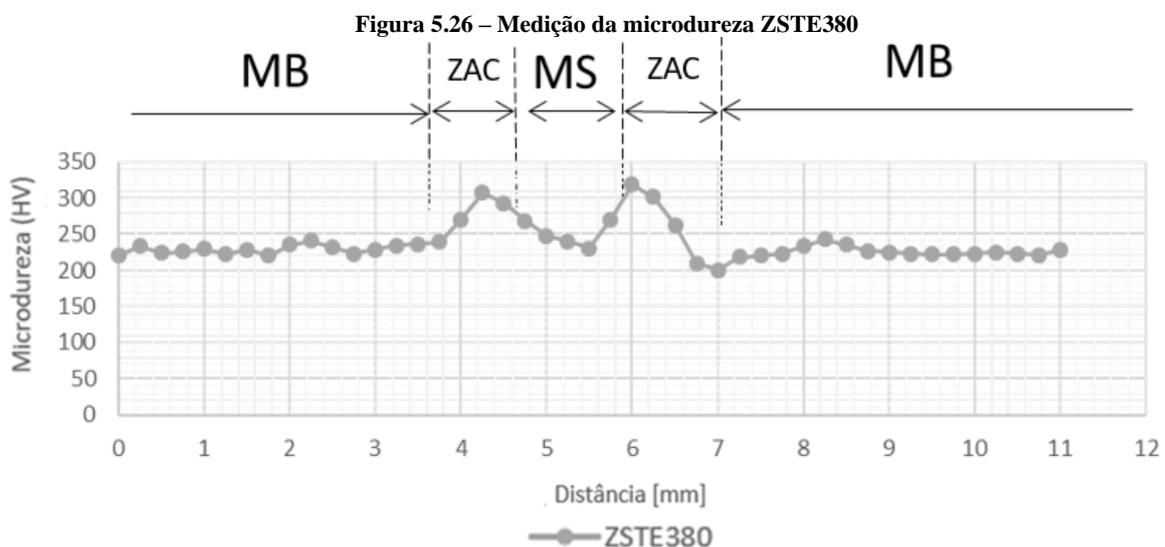
Os resultados de microdureza serão apresentados de forma individual para cada um dos materiais e após isso será feita uma sobreposição das regiões soldadas para poder comparar as microdurezas entre os materiais.

Como foi observado na análise microestrutural, o aço ZAR230 apresenta uma microestrutura composta basicamente por ferrita. Isso pode ser comprovado ao analisarmos a microdureza deste material, onde na região do material base a dureza média é de 130 HV (Figura 5.25), muito característico deste tipo de estrutura cristalina. Pode-se observar que na região fundida e no metal de solda há um aumento na dureza que chega a 200 HV devido a adição do metal de solda.



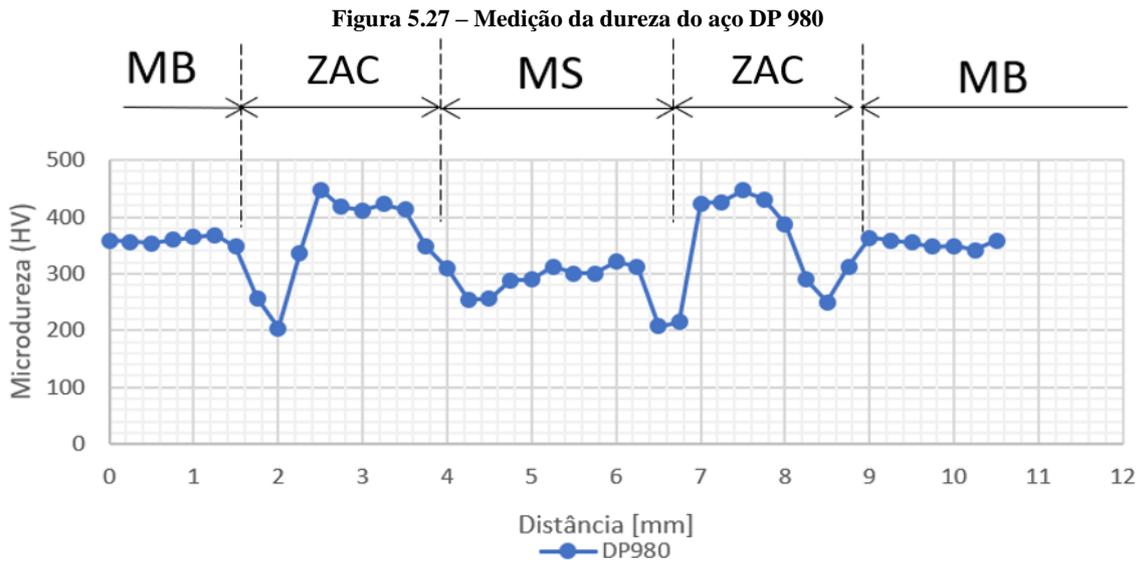
Fonte: Autor (2019)

O material ZSTE380 apresentou dureza média em torno de 230 HV (Figura 5.26), que é muito característica de materiais que possuem estrutura cristalina com bastante quantidade de perlita que é o caso deste material. Na zona afetada pelo calor temos uma elevação na microdureza que vai de 230 HV para aproximadamente 300 HV devido ao aumento da fração volumétrica de perlita.



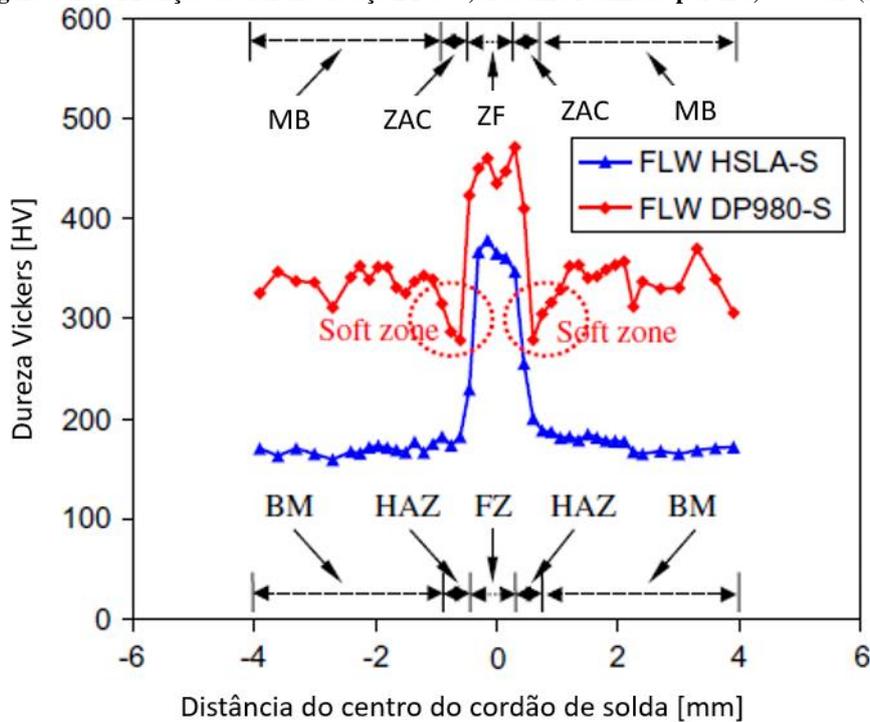
Fonte: Autor (2019)

O aço DP 980 apresenta uma microestrutura composta de duas fases, uma de ferrita e outra de martensita, a dureza média do material base mensurado é em torno de 350 HV, valor muito similar aos encontrados na literatura e nos trabalhos desenvolvidos por XU, W. et al. (2013) e Deng et al. (2012). Um fato evidenciado por estes autores (Figura 5.28) e também neste trabalho (Figura 5.27), é uma zona de perda de dureza na região da região termicamente afetada pelo calor, onde a dureza do material base cai de 350 HV para 200 HV e logo na sequencia há uma elevação considerável nesta dureza saindo de 200 HV para 420 HV, valor superior a dureza do material base.



Fonte: Autor (2019)

Figura 5.28 – Medição da dureza do aço DP 980, trabalho realizado por XU, W. et al. (2013)

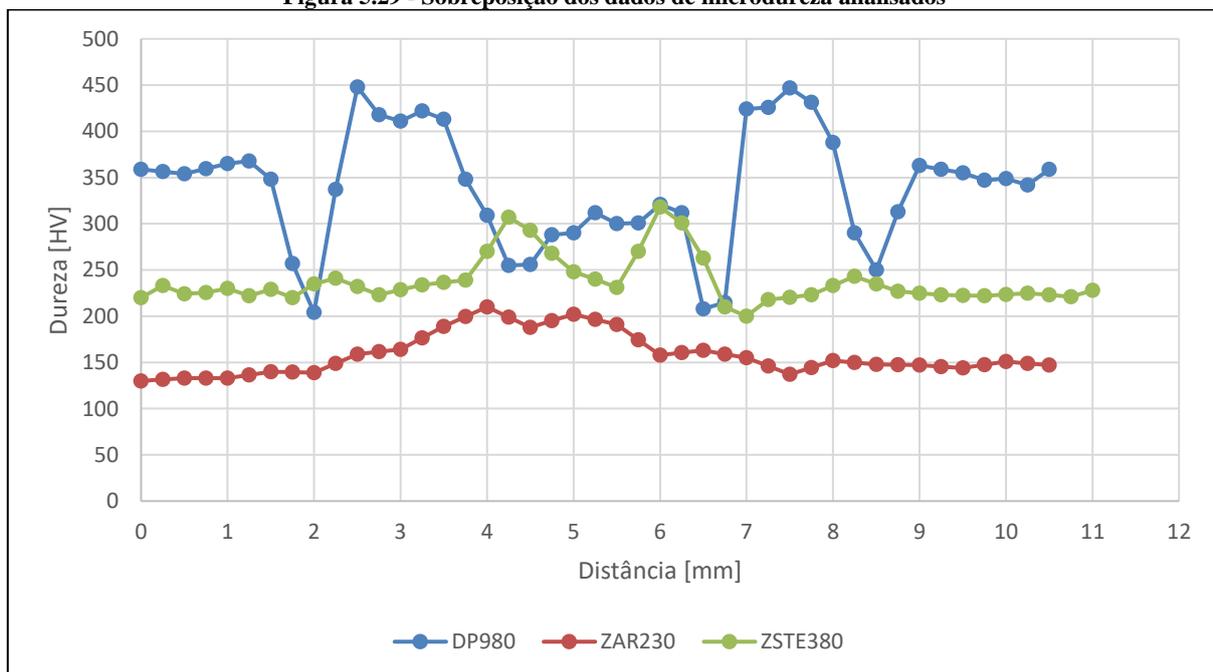


Fonte: XU, W. et al. (2013), adaptado pelo autor

Segundo XU, W. et al. (2013) e Deng et al. (2012) a zona de menor dureza pode comprometer a vida em fadiga na soldagem destes materiais, no trabalho realizado por estes autores, devido a esta região apresentar menor dureza ela gera concentração de tensões reduzindo a vida em fadiga dos componentes.

Ao sobrepor os gráficos das microdurezas é possível comparar todos os resultados obtidos. Ao analisá-los podemos afirmar que o ZAR230 apresenta a menor dureza que comprova o que foi visto nos ensaios metalográficos de ser composto basicamente por ferrita. Ao comparar o ZSTE380 e o DP 980, vemos que o DP 980 apresenta uma dureza no material base superior ao ZSTE380, porém na região soldada, o aço DP 980 apresenta uma região com redução de dureza e na sequência uma região com dureza superior a do material base, fato que não é evidenciado no aço ZSTE380. Essa variação de dureza pode comprometer a vida em fadiga dos componentes que utilizam aços soldados com essa característica por gerar uma região de concentração de tensões. É possível afirmar através da análise de microdureza que os resultados das micrografias correspondem com os resultados de microdureza confirmando o que as microestruturas foram avaliadas corretamente (Figura 5.29).

Figura 5.29 - Sobreposição dos dados de microdureza analisados



Fonte: Autor (2019)

6 CONCLUSÃO

O objetivo deste trabalho foi fazer a análise comparativa da vida em fadiga de três materiais distintos avaliando uma das uniões soldadas que durante um capotamento sofre elevadas solicitações estruturais. Para esta união foi proposto a utilização de um novo material com propriedades mecânicas superiores aos aços já utilizados de forma a implementar esta mudança sem alterar o processo produtivo e sem afetar a vida em fadiga destas estruturas.

Com a realização deste trabalho foi possível compreender a real aplicação de veículos de transporte de passageiros rodoviários através da elaboração de um plano de aquisição de dados experimentais que englobou as principais rotas utilizadas por estes veículos. Com a aquisição de dados experimentais, foi possível encontrar, quantificar e calcular o dano que as vias produzem nestas estruturas e gerar um banco de dados com estas informações. Os valores medidos foram transformados em condições de contorno para as análises numéricas via método dos elementos finitos, e com isso foi possível criar uma metodologia de validação de fadiga baseada em dados experimentais.

Baseado nos resultados apresentados neste trabalho fica identificada a superioridade do aço DP 980 frente aos demais. Este material pode ser utilizado para substituir os outros aços já utilizados em carrocerias de ônibus, tendo este apresentado uma vida em fadiga mais de duas vezes superior aos outros

Também é possível salientar, que devido a significativa melhora na vida em fadiga deste material é possível estudar uma redução de espessuras dos tubos já utilizados nas carrocerias. Isso possibilita otimizar a estrutura do veículo fazendo com que o mesmo reduza sua massa contribuindo para reduzir as emissões de CO₂.

É também possível afirmar que utilizando o material DP 980, por ter propriedades mecânicas superiores se comparado aos outros, é possível desenvolver estruturas mais eficientes no quesito de segurança veicular, onde este material apresenta uma capacidade de absorção de energia muito maior, permitindo que sejam projetadas estruturas mais seguras para os ocupantes do veículo.

Através da análise microestrutural e de microdureza é possível afirmar que os materiais analisados foram fabricados conforme suas especificações normativas tendo os valores de suas propriedades mecânicas e microestruturas dentro do especificado. Concluindo, tecnicamente é possível fazer a substituição dos materiais atuais para o aço DP 980, onde este é superior nos quesitos de vida em fadiga e resistência mecânica.

6.1 **Trabalhos futuros**

Com o objetivo de dar sequência a este desenvolvimento, abaixo estão listadas algumas possíveis formas de dar continuidade a este trabalho.

- Desenvolver um procedimento de soldagem específico para o aço DP 980;
- Fazer o levantamento das curvas de fadiga para os materiais utilizados neste trabalho;
- Desenvolver uma metodologia dinâmica da avaliação de fadiga das carrocerias de ônibus baseada em coleta de dados utilizando perfilômetros laser;
- Desenvolver metodologia dinâmica baseada em reconstituição de carregamentos utilizando avaliações de fadiga experimental e numérica no domínio da frequência;
- Elaborar método utilizando manufatura aditiva com o intuito de correlacionar a vida em fadiga de modelos impressos em 3D com modelos de durabilidade reais.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

ABE K., SHIMIZU M., TAKASHIMA S., KAJI H., **Int. Conf. on Physical Metallurgy of Thermomechanical Processing of Steels and Other Metals**, edited by I. Tamura, ISIJ, Tokyo, (1988), 322.

ASM HANDBOOK. Fatigue and Fracture. Materials Park: American Society for metals, 2000. V.19.

ASTM **E92-17**, Standard Test Methods for Vickers Hardness and Knoop Hardness of Metallic Materials, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017.

ASTM INTERNATIONAL. **E18M**: Standard Test Method for Tension Testing of Metallic Materials. West Conshohocken: Astm International, 2016.

ANSYS Guide. 2010. Disponível em: <https://repositorio.ipl.pt/bitstream/10400.21/5948/2/Anexo%20A_Elemento%20tipo%20Shell%20181%20de%20ANSYS.pdf>. Acesso em: 03 dez. 2019.

BARNES, A. Local Brittle Zone In C-Mn Steel Multipass Welds, **Welding Institute Bulletin**, September/October, 1990, p. 94.

BHATTACHARYA, Debanshu Microalloyed Steel for the automotive industrie

BOSCH (ORG.). **Automotive handbook**. Bentley, USA: John Wiley Professional, 2011. 1266 p. v. 8.

BRANCO, C. M.; FERNANDES, A. A.; CASTRO, P. M. S. T. (1999) **Fadiga de estruturas metálicas**. 2 ed. Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa

BURDEKIN, M. F. e STONE, D. E. W., "The Crack Opening Displacement Approach to Fracture Mechanics in Yielding Materials", *Journal of Strain Analysis*, vol. 1, n^o2, 1966.

CRUZ, Magnus G. H. **Estudo da substituição de aço convencional por aço de baixa liga e alta resistência em módulo estrutural**. 2006. 104 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Materiais, Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2006.

CROWTHER D. N. Report No. SL/PP/RSC/S12005/1/95/X, **British Steel plc.**, Swinden Laboratories, (1995).

DAVIS, C. L.; KING, J. E. Cleavage initiation in the intercritically reheated coarse-grained heat-affected zone: Part I. Fractographic evidence. **Metallurgical and materials transactions A**, v. 25, n. 3, p. 563-573, 1994.

DENG, Kunkun et al. Microstructure and elevated tensile properties of submicron SiCp/AZ91 magnesium matrix composite. **Materials & Design**, v. 38, p. 110-114, 2012.

DUNBAR, Brian. **Microstructural Analysis**. Disponível em: <https://www.nasa.gov/centers/wstf/supporting_capabilities/materials_testing/microstructural_analysis.html>. Acesso em: 9 ago. 2016.

ELLYN, F. **Fatigue damage, crack growth and life prediction**. London: Chapman & Hall, 1997.

EASTERLING K., **Introduction to the Physical Metallurgy of Welding**, Butterworth-Heinemann, Oxford, (1992).

FORSYTH, P. J. E., **Acta Metalurgica**, 1963, 11, 109.

FORTES, Claber; ARAÚJO, Welerson. **Apostila de Metalurgia da Soldagem**. Contagem: ESAB Indústria e Comércio Ltda, 2005.

FRICKE, W. **Fatigue Analysis of welded joints**: state of development. *Marine Structures* 16, 2003

GLADMAN, T. **The Physical Metallurgy of Microalloyed Steels**, First Edition, London, England, The institute of Materials, University of Leeds, 1997.

GORNI, A.A.; MEI, P. R. **Aços alternativos ao HY-80 sem necessidade de aplicação de têmpera e revenido**. Metalurgia e Materiais. Ouro Preto, 2003.

GOMES, Eliane et al. Gestão de auto-estradas: análise de eficiência das auto-estradas federais brasileiras com portagens. **Revista de Gestão dos Países de Língua Portuguesa**, v. 11, n. 2-3, p. 55-62, 2012.

GOES, Keurrie Cipriano. **Um modelo para previsão de vida à fadiga de juntas soldadas submetidas a carregamentos combinados**. 2010. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

GUELLER, Gabriel. **Durabilidade em Estruturas Automotivas**; Platina, 2009.

HART P. H. M., MITCHELL P. S.: **Weld. Journal**, 74 (1995), 239.

HARRISON P. L.; WEBSTER S. E.: **36th MWSP Conf. Proc. ISSAIME**, Warrendale, PA. XXXII, (1995), 551.

HUTCHINSON, Rune Lagneborg; TADEUSZ Siwecki; STANISLAW Zajac. **The Role Of Vanadium In Microalloyed Steels**. Stockholm, Sweden: The Scandanavian Journal Of Metallurgy, 1999. 86 p.

HOLZ, Guilherme Krug. **Estudo da soldabilidade do aço dual phase 980 aplicável na fabricação de chassi de veículo de competição fórmula sae**. 2017. 70 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Automotiva, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2017.

<http://www.steelforge.com/literature/steelog-the-5000-word-metals-glossary/>. Acessado em: 10/05/2017

<https://www.terra.com.br/noticias/brasil/estradas/brasil-tem- apenas-13-das-estradas-pavimentadas,7474a9670cb9f1e0180774a18f84b1ca5dzs3j5k.html>. Acessado em 18/07/2017

<http://www.lynxtec.com.br/> Acessado em 03/12/2018

HIBBELER, R. C. **Resistência dos materiais**. 5. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2004.

IIW (*International Institute of Welding*)

KIM, B.C et al. Microstructure and Local Brittle Zone Phenomena in High-Strength Low-Alloy Steel Welds. **Korea: Research Institute Of Industrial Science And Technology**, 1991. 11 p.

LEE S., CHUN B., KWON D., **Metall. Transforamtion A**, 23A (1992), 2803.

- LEE, Y.; PAN, J.; HATHAWAY, R.; BARKEY, M.; **Fatigue Testing and Analysis: Theory and Practice.** Burlington: Elsevier Inc., 2005.
- LESSA, Cleber Rodrigo de Lima. **Soldagem FHPP - Processo e Metalurgia nas Transformações das Fases de um aço C-Mn.** 2011. 120 p. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011
- LAGE, Carmem Miranda. **Fadiga em estruturas metálicas tubulares soldadas.** 2008.
- LITTLE, R.E. & EKVALL, J.C. **Statistical Analysis of Fatigue Data.** American Society for Testing and Materials, ASTM, 1979. 141PP.
- LU, Wei; MÄKELÄINEN, Pentti. **Advanced Steel Structures: Structural fire design; 2. Fatigue design.** Helsinki University of Technology, 2003.
- MARDER A.R., Progress in Materials Science 45 (2000) **SOLUTIONS FOR WELDING ZINC COATED STEELS.** Cleveland, Ohio: Lincoln Electric Company, dez. 15.
- MODENESI, Paulo J. **Soldabilidade de Algumas Ligas Metálicas.** 2011. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, UFMG, Belo Horizonte, 2011.
- NORTON, R. L. **Projeto de máquinas: uma abordagem integrada.** 4. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.
- OKAGUCHI S., HASHIMOTO T., OHTANI H., **Int. Conf. on Physical**
- PALIN-LUC T.; BANVILLET A.; VITTORI J.F. How reduce the duration of multiaxial fatigue tests under proportional service loadings. **International Journal of Fatigue.** n. 28, p. 554 563, 2006.
- PARIS, P. C., GOMEZ, M. P. and ANDERSON, W. E., “A Rational Analytic Theory of Fatigue”, *The Trend in Engineering*, 13, pp. 9-14, 1961.
- PARIS, P. and ERDOGAN, F., “*J. Basis Eng. Trans. ASME*”, ser. D, 1963.
- PERINI, Felipe Gustavo. **Propriedades mecânicas e microestruturais de aços de alta resistência e baixa liga soldados.** 2014.
- Pesquisa CNT de rodovias 2016: relatório gerencial. – 20.ed.– Brasília : CNT : SEST : SENAT, 2016.
- ROCHA, I. C. L. **Propriedades mecânico/metalúrgicas de juntas soldadas de dp1000 e o efeito de bake hardening.** 2014. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Minas Metalurgia e Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.
- ROSA, Edison da. **Análise de Resistência Mecânica: Mecânica da Fratura e Fadiga.** Florianópolis: UFSC, 1994.
- SHIGLEY, J. E.; MISCHKE, C. R.; BUDYNAS, R. G. **Projeto de engenharia mecânica.** 7. ed. Porto Alegre: Bookman, 2005.
- STROHAECKER, Telmo. **Mecânica da Fratura.** Porto Alegre: Ufrgs, 2015. 136 p.

TAKAHASHI, Bruno Ximenes. **Metodologia moderna para análise de fadiga baseada em elementos finitos de componentes sujeitos a fadiga uni e multiaxial**. 2014. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

UCHINO K., OHNO, Y., **Proc. 6th Int. Offshore Mechanics and Arctic Engineering Symposium**, Houston, Texas, March (1987), 159.

WANG G. R.; NORTH T. H.; LEWIS K. G. **Weld. Jornal**, 69 (1990), 14.

Wei Lu Mäkeläinen P. (2003). **Advanced Steel Structures**. Helsinki University of Technology

XU, W. et al. Tensile and fatigue properties of fiber laser welded high strength low alloy and DP980 dual-phase steel joints. **Materials & Design**, v. 43, p. 373-383, 2013.

Y. LI, D. N. CROWTHER, M. J. W. GREEN, P. S. MITCHELL and T. N. BAKER, **THE Effect of Vanadium and Niobium on the Properties and Microstructure of the Intercritically Reheated Coarse Grained Heat Affected Zone in Low Carbon Microalloyed Steels**. Metallurgy And Engineering Materials Group, Department Of Mechanical Engineering, University Of Strathclyde, Glasgow, G1 1XJ, UK: [s.n.], 2000.