



CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS



Dissertação de Mestrado

Fabiano Ferreira Silva

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO EM FADIGA DE ALTO CICLO DE SOLDA A
PONTO EM AÇOS DE DP 780, TRIP 780 E DC04**

Belo Horizonte

Fevereiro de 2023

Fabiano Ferreira Silva

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO EM FADIGA DE ALTO CICLO DE SOLDA A
PONTO EM AÇOS DE DP 780, TRIP 780 E DC04**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais do CEFET-MG, na área de concentração de Ciência e Desenvolvimento de Materiais, na Linha de Pesquisa em Seleção, Processamento e Caracterização, como parte integrante dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Marcello Rosa Dumont.

Coorientador: Prof. Dr. Hermano Nascimento Junior.

Belo Horizonte
Fevereiro de 2023

Silva, Fabiano Ferreira.
S586e Estudo do comportamento em fadiga de alto ciclo de solda a ponto em aços de DP 780, TRIP 780 e DC04 / Fabiano Ferreira Silva. – 2023.
77 f. : il.

Orientador: Marcello Rosa Dumont
Coorientador: Hermano Nascimento Junior

Dissertação (mestrado) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais, Belo Horizonte, 2023.
Bibliografia.

1. Aço de alta resistência. 2. Soldagem por resistência. 3. Desgaste mecânico. 4. Aço - Propriedades mecânicas. I. Dumont, Marcello Rosa. II. Nascimento Junior, Hermano. III. Título.

CDD: 620.11292



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS - NS



ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO Nº 7 / 2023 - POSMAT (11.52.07)

Nº do Protocolo: 23062.007936/2023-37

Belo Horizonte-MG, 27 de fevereiro de 2023.

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

?ESTUDO DO COMPORTAMENTO EM FADIGA DE ALTO CICLO De SOLDA A PUNTO EM AÇOS DE DP 780, TRIP 780 E DC04?

Autor: Fabiano Ferreira Silva

Orientador: Prof. Dr. Marcello Rosa Dumont

A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou em 27 de fevereiro de 2023 esta Dissertação:

Prof. Dr. Marcello Rosa Dumont (ORIENTADOR)
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG

Prof. Dr. Hermano Nascimento Júnior (COORIENTADOR)
Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais - PUCMinas

Prof. Dr. Ernane Rodrigues da Silva (EXAMINADOR INTERNO)
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG

Prof. Dr. José Rubens Gonçalves Carneiro (EXAMINADOR EXTERNO)
Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais ? PUCMinas

(Assinado digitalmente em 28/02/2023 07:05)
ERNANE RODRIGUES DA SILVA
PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO
CEMAT (11.51.06)
Matricula: 392338

(Assinado digitalmente em 27/02/2023 16:40)
MARCELLO ROSA DUMONT
PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO
DEMAT (11.55.06)
Matricula: 2143739

(Assinado digitalmente em 04/04/2023 15:09)
JOSE RUBENS GONÇALVES CARNEIRO
ASSINANTE EXTERNO
CPF: 282.987.996-15

(Assinado digitalmente em 03/03/2023 16:17)
HERMANO NASCIMENTO JUNIOR
ASSINANTE EXTERNO
CPF: 530.452.036-04

Visualize o documento original em <https://sig.cefetmg.br/public/documentos/index.jsp> informando seu número: 7, ano: 2023, tipo: ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO, data de emissão: 27/02/2023 e o código de verificação: 2e0197b2a6

AGRADECIMENTOS

Começo agradecendo a Deus, pois sem Ele a frente nada seria possível.

A minha família, pais, irmãos, minha sobrinha Giovana e a Dayana por todo apoio, motivação e paciência.

Ao meu orientador, o Professor Dr. Marcello Rosa Dumont, por todo conhecimento compartilhado, diretrizes e disponibilidade durante a realização deste trabalho.

Ao meu coorientador, Dr. Hermano Nascimento Junior pelo seu incentivo na execução do trabalho, mentorias e questionamentos enriquecedores.

Ao Roberto Rossy Chaves pela disponibilidade, constantes conversas, pontos de vista e ensinamentos.

Ao meu primo Rafael Fagundes Ferreira, pela parceria não só familiar, mas também profissional.

À Stellantis pelo incentivo ao crescimento profissional dos colaboradores, disponibilidade de recursos, desenvolvimento metodológico e testes experimentais.

E a todos os colaboradores do grupo Stellantis que ajudaram na execução deste trabalho, em especial Adauto Soares, Alexander Assenção, Bernardo Peixoto, Bruno Augusto, Carlos Graziane, Diego Leonardo, Geraldo Sales, Hercílio Lima, Herivelton Ferreira, Hudson Monteiro, Jhonatan Andrade, Leonardo Dutra, Leonardo Gomes, Lérida Silva, Lucas Bicalho, Luiz Aniceto, Orlando Leon, Roger Araújo e Vagner Lopes.

Ao CEFET-MG pela grata oportunidade de realizar este sonho e ao departamento de Engenharia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais por todo apoio prestado.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

RESUMO

A soldagem a ponto é um dos principais métodos para unir chapas metálicas em componentes automotivos. Uma vez que estes componentes são submetidos a condições de carregamentos complexos, vários estudos foram realizados para analisar o comportamento em fadiga destas uniões. Entretanto, a metodologia do ensaio de fadiga para elaboração das curvas S-N e os corpos de prova que melhor representam a aplicação da solda a ponto na carroceira não são definidos ou normatizados dificultando a correlação entre os resultados. Neste trabalho foi avaliado o comportamento dos aços DP 780, TRIP 780 e DC04 unidos por solda a ponto e submetidos à fadiga de alto ciclo com o carregamento uniaxial de tração/tração e realizado o levantamento das curvas de Wohler (S-N), com a abordagem de Owen R90C90. Foram comparados os tipos de fraturas, a influência da resistência mecânica e a espessura dos materiais. Foram realizados ensaios de ultrassom para a parametrização e análise da qualidade dos pontos de solda, análise micrográfica para validação dos parâmetros e análises das fraturas. Foi conhecida a importância da análise e validação dos dados encontrados antes da utilização nos cálculos. Definida a metodologia com 05 níveis de força e números de ciclos distribuídos até a faixa de 1.000.000 ciclos e elaborado o corpo de prova com 03 pontos de solda, para minimizar a dispersão dos resultados. Observou-se nos resultados das curvas S-N para os aços, TRIP 780, DP 780 e DC04 uma maior dispersão na faixa de 1.000 ciclos, com a tendência de aproximação das curvas com o aumento do número de ciclos. Observado também a influência da espessura do material onde a distância entre as curvas S-N manteve-se constante, mesmo com o aumento do número de ciclos.

PALAVRAS-CHAVE: Aços Avançados de Alta Resistência, Solda a Ponto, Fadiga, Curva S-N.

STUDY OF HIGH CYCLE FATIGUE BEHAVIOR OF SPOT WELDING IN DP 780, TRIP 780 AND DC04 STEELS

ABSTRACT

Spot welding is one of the main methods for joining sheet metal in automotive parts. Since these components are subjected to complex loading conditions, several studies have been carried out to analyze the fatigue behavior of these joints. However, the fatigue test methodology to plot the S-N curves and the test specimens that represent the best application of spot welding on bodywork are not yet defined or standardized, making it difficult to correlate the results. In this study, the behavior of DP 780, TRIP 780 and DC04 steels joined by spot welding and subjected to high-cycle fatigue with uniaxial tension/tension loading was evaluated and the Wohler curves (S-N) were plotted with the approach by Owen R90C90. The types of fractures, the influence of mechanical resistance, and the thickness of the materials were compared. Ultrasound tests were conducted for the parameterization and analysis of the quality of the weld points, micrographic analysis for parameter validation, and fracture analysis characterization. The importance of analyzing and validating the data found before using them in the calculations was verified. Defined the methodology with 05 levels of force and number of cycles distributed up to near of 1,000,000 cycles. The test specimens were made with 03 welding points, to minimize the dispersion of the results. It was observed in the results from the S-N curves for the steels, TRIP 780, DP 780 and DC04 a greater dispersion in the range of 1,000 cycles, with the trend of approximation of the curves with the increase in the number of cycles. The influence of material thickness was also observed, where the distance among the S-N curves remained constant, even with the increase in the number of cycles.

KEYWORDS: Advanced High Strength Steels, Spot Welding, Fatigue, S-N Curve.

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 01 – Processo de soldagem a ponto.....	23
Figura 02 – Dimensional das chapas	28
Figura 03 – Localização dos pontos de solda.....	28
Figura 04 – Fluxograma	29
Figura 05 – Dispositivo de soldagem	31
Figura 06 – Microestrutura do aço DC04, espessura 0,70 mm, com diferentes ampliações....	37
Figura 07 – Microestrutura do aço DC04, espessura 1,20 mm, com diferentes ampliações....	37
Figura 08 – Microestrutura do aço DP 780, espessura 1,20 mm, com diferentes ampliações .	38
Figura 09 – Microestrutura do aço TRIP 780, espessura 1,20 mm, com diferentes ampliações	38
Figura 10 – Seção transversal da solda a ponto no aço DC04, espessura 0,70 mm	43
Figura 11 – Seção transversal da solda a ponto no aço DC04, espessura 1,20 mm	44
Figura 12 – Seção transversal da solda a ponto no aço DP 780, espessura 1,20 mm.....	45
Figura 13 – Seção transversal da solda a ponto no aço TRIP 780, espessura 1,20 mm	46
Figura 14 – Corpo de prova soldado	47
Figura 15 – Resultados dos ensaios de ultrassom no aço DC04, espessura 0,70 mm.....	48
Figura 16 – Resultados dos ensaios de ultrassom no aço DC04, espessura 1,20 mm.....	48
Figura 17 – Resultados dos ensaios de ultrassom no aço DP 780, espessura 1,20 mm	49
Figura 18 – Resultados dos ensaios de ultrassom no aço TRIP 780, espessura 1,20 mm.....	50
Figura 19 – Curvas S-N dos aços DC04 com espessuras de 0,70 e 1,20 mm, DP 780 e TRIP 780 com espessura de 1,20 mm	57
Figura 20 – Curvas S-N com a abordagem de Owen dos aços DC04 com espessuras de 0,70 e 1,20 mm e DP 780 e TRIP 780 com espessura de 1,20 mm	60
Figura 21 – Fraturas nos corpos de prova no aço DC04, espessura 0,70 mm.....	61
Figura 22 – Fraturas nos corpos de prova no aço DC04, espessura 1,20 mm.....	62

Figura 23 – Fraturas nos corpos de prova no aço DP 780, espessura 1,20 mm	63
Figura 24 – Fraturas nos corpos de prova no aço TRIP 780, espessura 1,20 mm.....	63
Figura 25 – Identificação das regiões das fraturas analisadas no MEV	64
Figura 26 – Análise no MEV dos corpos de corpo de prova 04 e 14, aço DC04, espessura 0,70 mm.....	65
Figura 27 – Análise no MEV dos corpos de corpo de prova 05 e 14, aço DC04, espessura 1,20 mm.....	66
Figura 28 – Análise no MEV dos corpos de corpo de prova 01 e 13, aço DP 780, espessura 1,20 mm.....	67
Figura 29 – Análise no MEV dos corpos de corpo de prova 01 e 14, aço TRIP 780, espessura 1,20 mm.....	69

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 01 – Propriedades mecânicas do aço DC04.....	18
Tabela 02 – Propriedades mecânicas do aço DP 780	20
Tabela 03 – Propriedades mecânicas do aço TRIP 780.....	21
Tabela 04 – Parâmetros de soldagem dos corpos de prova	32
Tabela 05 – Resultados das propriedades mecânicas dos aços DC04.....	39
Tabela 06 – Resultados das propriedades mecânicas do aço DP 780	40
Tabela 07 – Resultados das propriedades mecânicas do aço TRIP 780.....	40
Tabela 08 – Resultados das composições químicas dos aços DC04	41
Tabela 09 – Resultados da composição química do aço DP 780	41
Tabela 10 – Resultados da composição química do aço TRIP 780.....	42
Tabela 11 – Parâmetros da solda a ponto no aço DC04, espessura 0,70 mm	43
Tabela 12 – Parâmetros de solda a ponto no aço DC04, espessura 1,20 mm	44
Tabela 13 – Parâmetros de solda a ponto no aço DP 780, espessura 1,20 mm.....	45
Tabela 14 – Parâmetros de solda a ponto no aço TRIP 780, espessura 1,20 mm	46
Tabela 15 – Resultados dos ensaios de fadiga do aço DC04, espessura 0,70 mm.....	51
Tabela 16 – Cálculos para a curva S-N do aço DC04, espessura 0,70 mm.....	51
Tabela 17 – Resultados dos cálculos para a curva S-N do aço DC04, espessura 0,70 mm	52
Tabela 18 – Resultados dos ensaios de fadiga do aço DC04, espessura 1,20 mm.....	52
Tabela 19 – Cálculos para a curva S-N do aço DC04, espessura 1,20 mm.....	53
Tabela 20 – Resultados dos cálculos para a curva S-N do aço DC04, espessura 1,20 mm	53
Tabela 21 – Resultados dos ensaios de fadiga do aço DP 780, espessura 1,20 mm	54
Tabela 22 – Cálculos para a curva S-N do aço DP 780, espessura 1,20 mm	54
Tabela 23 – Resultados dos cálculos para a curva S-N do aço DP 780, espessura 1,20 mm...	55
Tabela 24 – Resultados dos ensaios de fadiga do aço TRIP 780, espessura 1,20 mm.....	55
Tabela 25 – Cálculos para a curva S-N do aço TRIP 780, espessura 1,20 mm	56
Tabela 26 – Resultados dos cálculos para a curva S-N do aço TRIP 780, espessura 1,20 mm	56

LISTA DE ABREVIACÕES

- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
- AHSS – Aços Avançados de Alta Resistência (*Advanced High Strength Steels*)
- ANSI – Instituto Nacional Americano de Normas (*American National Standards Institute*)
- AWS – Sociedade Americana de Soldagem (*American Welding Society*)
- BH – Endurecimento por temperatura (*Bake Hardening*)
- BIW – Carroceria do veículo (*Body-in-White*)
- BS – Norma Britânica (*British Standards*)
- CA – Corrente Alternada
- CC – Corrente Contínua
- CP – Aço de fase complexa (*Complex Phase*)
- DC – Aço baixo carbono
- DIN – Instituto Alemão de Normalização (*Deutsches Institut für Normung*)
- DP – Aço duas fases (*Dual Phase*)
- IF – Aço livre de elementos intersticiais (*Interstitial Free*)
- HSNb – Aço de alta resistência microligado ao Nióbio.
- MART – Aço martensítico (*Martensitic Steels*)
- Máx. – Máximo
- Mín – Mínimo
- P-S-N – Curva probabilidade tensão número de ciclos
- Q&P – Têmpera e particionamento (*Quenching and Partitioning*)
- RSW – Solda a ponto por resistência (*Resistance Spot Welding*)
- S-N – Curva tensão número de ciclos
- TRIP – Aço de transformação induzida pela deformação plástica (*Transformation Induced Plasticity*)
- TWIP – Aço de plasticidade induzida por maclação mecânica (*Twinning Induced Plasticity*)
- ZTA – Zona Termicamente Afetada

LISTA DE SÍMBOLOS

A_1 – Área

A – Coeficiente de regressão

Al – Alumínio

b – Expoente da resistência a fadiga

\hat{B} – Coeficiente angular

B – Boro

bar – unidade de medida de pressão

C – Carbono

CO – Monóxido de carbono

Cr – Cromo

d – Diâmetro

D – Diâmetro

F – Profundidade de penetração

$F_{\text{máx}}$ – Força máxima

$F_{\text{mín}}$ – Força mínima

H₂ – Hidrogênio

Hz – Hertz (frequência)

l – Pulso

k – Fator de inclinação da curva S-N

kN – Quilo Newton

kVA – Quilovolt Ampere

l/min – Vazão (litro/minuto)

mm – Milímetro

Mn – Manganês

Mo – Molibdênio

MPa – Mega Pascal

n – Coeficiente de encruamento

N₂ – Nitrogênio

NA – vida de fadiga no joelho da curva S-N

Nb – Nióbio

ns – Número de amostras
P₁ - Pressão
P₂ – Profundidade de indentação
P – Fósforo
r – Coeficiente de anisotropia
R₁ – Resfriamento
R – Razão
S₁ – Espessura Superior
S₂ – Espessura Inferior
s – Desvio padrão
S – Enxofre
SA – Força de fadiga no joelho da curva S-N
Si – Silício
t – Espessura
T – Tempo
Ti – Titânio
V – Vanádio
VAC – Voltagem corrente alternada
X – Variável
Y – Vida em fadiga
2N_f – Número de reversões
 σ – Tensão
 σ_f – Coeficiente da resistência a fadiga
% - Porcentagem

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	14
2. OBJETIVOS.....	16
2.1. Objetivo Geral.....	16
2.2. Objetivos Específicos	16
3. FUNDAMENTOS TEÓRICOS E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	17
3.1. Aço.....	17
3.1.1 Aço Intersticial Free	18
3.1.2 Aços Avançados de Alta Resistência.....	18
3.1.3 Aço Dual Phase	19
3.1.4 Aço de Transformação Induzida por Plasticidade.....	20
3.2. Soldagem	21
3.2.1 Solda a Ponto.....	22
3.2.2 Parâmetros de Solda a Ponto.....	23
3.2.3 Fatores que Influenciam a Solda a Ponto	24
3.3. Fadiga em Solda a Ponto	25
3.4 Curva S-N.....	26
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	28
4.1 Materiais	28
4.2 Métodos	29
4.2.1 Fluxograma.....	29
4.2.2 Metalografia	30
4.2.3 Análise Química.....	30
4.2.4 Ensaio de Tração	30
4.2.5 Solda a Ponto.....	31
4.2.6 Ensaio de Ultrassom.....	33
4.2.7 Ensaio de Fadiga	33
4.2.8 Curva S-N.....	34
4.2.9 Análise das Fraturas	36
4.2.10 Microscopia Eletrônica de Varredura	36
5. RESULTADOS	37
5.1 Metalografia	37
5.2 Ensaio de Tração	39
5.3 Composição Química	41

5.4 Parâmetros de Solda	42
5.5 Ensaio de Ultrassom.....	47
5.6 Ensaio e Cálculos de Fadiga	50
5.7 Curvas S-N	57
5.8 Análise Visual das Fraturas dos Corpos de Prova.....	61
5.9 Análise das Fraturas no Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV).....	64
6. CONCLUSÃO.....	71
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICA	73

1. INTRODUÇÃO

A soldagem a ponto é a técnica de união predominante para estruturas de chapas finas de aço na construção de carroceria de veículo. Os veículos normalmente contêm milhares de pontos de solda. Como os locais de solda frequentemente representam os elos mais fracos em um componente em relação à sua vida útil e o comportamento mecânico da solda, não depende apenas das propriedades mecânicas das chapas, mas também da resistência das juntas soldadas, as características do comportamento destes pontos são fundamentais para a seleção de parâmetros adequados de soldagem, bem como a localização e o número de soldas é de grande relevância para indústria automobilística. A necessidade de características mecânicas relevantes tornou-se necessária para as análises numéricas de estruturas soldadas e previsões de vida útil (XU, 2004; DANCETTE et al., 2011).

A estrutura da carroceria do veículo, também conhecida como *Body-in-White* (BIW), é uma das partes mais importantes de um veículo. A falha de alguns pontos de solda e juntas soldadas na carroceria de um veículo pode causar ruídos e vibrações indesejáveis dentro do carro e levar à redução da resistência ao choque do veículo. Além disso, otimizar o número de soldas por pontos, considerando a resistência à fadiga da estrutura da carroceria, rigidez, dentre outros, reduzem o custo de produção (FARRAHI; AHMADI; REZA KASYZADEH, 2020).

Vários autores têm pesquisado extensivamente a solda a ponto e o efeito combinado de parâmetros como propriedade do material e espessura, geometria de solda e entalhe, zona termicamente afetada, microestrutura e condição de carregamento no comportamento de fadiga em solda a ponto (RAY et al., 2020). Verifica-se na literatura a falta de metodologia de fadiga para elaboração da curva S-N, especificamente para a solda a ponto, a definição de corpo de prova que melhor represente a aplicação da solda a ponto e a forma de tratar a dispersão dos resultados.

Este trabalho estudou o comportamento da solda a ponto quando submetida a um ensaio de fadiga, foi definida a parametrização do ensaio, avaliado seu desempenho e construídas as curvas S-N utilizando abordagem de Owen R90C90, através de materiais de classes diferentes, TRIP 780, DP 780 e DC04. A influência da espessura do material também foi considerada. Foi definida e padronizada a confecção dos corpos de prova, foram realizados os ajustes para minimizar a dispersão nos resultados em fadiga, bem como avaliada a influência das variáveis

do ensaio. Com o estudo comparativo da solda a ponto entre os aços com espessura de 1,20 mm, foi possível avaliar o comportamento e a influência da resistência do material em relação à fadiga, e os aços DC04 com espessuras de 0,70 mm e 1,20 mm foi possível avaliar o comportamento e a influência do aumento da espessura do material.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo Geral

Levantar o comportamento mecânico, quanto à fadiga de alto ciclo, em solda a ponto nos aços DP 780, TRIP 780 e DC04.

2.2. Objetivos Específicos

- Definir e parametrizar um procedimento experimental para análise de fadiga em solda a ponto;
- Levantar o comportamento da solda a ponto no ensaio dinâmico pela curva S-N, utilizando abordagem de Owen R90C90, nos aços DP 780 e TRIP 780, com espessura nominal de 1,20 mm e o aço DC04, com as espessuras nominais de 0,70 mm e 1,20 mm;
- Avaliar a influência da resistência mecânica e espessura dos materiais no comportamento dinâmico;
- Comparar os tipos de fraturas evidenciadas na solda a ponto após o ensaio de fadiga.

3. FUNDAMENTOS TEÓRICOS E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Aço

O aço está presente em nosso dia a dia em edifícios, pontes, torres de transmissão de energia, aviões, navios e veículos, todos usam quantidades significativas de aço em sua construção. Como resultado, a demanda por aço aumentou mais de três vezes desde 1970 e é responsável por 95 % de todo o metal produzido anualmente no mundo. O setor é globalmente extenso e massivo gerando cerca de US\$ 2,5 trilhões em receita, representando 3,0 % do Produto Interno Bruto global. A alta taxa de reciclagem é outro atributo do aço, segundo a *World Steel Association*, as taxas de recuperação global do aço são estimadas em torno de 90 % para o setor automotivo e máquinas, 85 % para construção e 50 % para o setor elétrico e equipamentos (KIM et al., 2022a).

Na produção de aço na indústria siderúrgica, atualmente, o alto-forno é responsável por cerca de 70 % da produção mundial, para redução do minério de ferro ao ferro gusa, uma liga ferro-carbono com alto teor de carbono. Essa liga é encaminhada para aciaria onde é transformada em aço, através de fornos adequados. Após este processo o aço é vazado na forma de lingotes, e através de laminadores transformados em blocos, tarugos e placas (CHIAVERINI, 1986; SŁOWIK et al., 2021).

O ferro gusa é uma liga ferro-carbono em que o carbono e as impurezas normais (Si, Mn, P e S) encontram-se em teores elevados, a sua transformação em aço, que é uma liga de baixos teores de C, Si, Mn, P e S, corresponde a um processo de oxidação, no qual a porcentagem dos elementos é reduzida até aos valores desejados. As ligas ferrosas são, em princípio, divididas em dois grupos: aços, com teores de carbono até 2,0 % e ferros fundidos, com teores de carbono acima de 2,0 % e raramente superior a 4,0 %. O aço-carbono geralmente é utilizado com carbono entre 0,008 % e 2,11 % (CHIAVERINI, 1986; SŁOWIK et al., 2021).

3.1.1 Aço Intersticial Free

Os aços livres de interstícios, *Interstitial Free* (IF), constituem um dos principais grupos de aços usados na fabricação de peças automotivas tais como painéis exteriores da carroceria, pavimento, coberturas e armação de portas, em virtude da sua excelente conformabilidade, capacidade de estampagem profunda, resistência à fadiga, resistência à tração e rigidez (JAMES, 2010; KIM et al., 2022b; JANARDHAN; MUKHOPADHYAY; DUTTA, 2022).

Nos aços IF, o teor de carbono é extremamente baixo e, assim, nenhum átomo de soluto intersticial está presente na rede cristalina tornando-os muito dúcteis. Estes aços são obtidos pelo processo de desgaseificação a vácuo para remoção de CO, H₂, N₂ e outros gases. Os elementos Ti e Nb, são adicionados após o processo de desgaseificação a vácuo para formar precipitados de carbonetos e nitretos e, conseqüentemente, tornando a matriz ferrítica mais pura. O limite de escoamento dos aços IF é normalmente baixo com alta conformabilidade (RAO et al., 2017; MUKHERJEE et al., 2020).

Na Tabela 01 são mostradas as propriedades mecânicas de um aço IF, classificado com DC04 conforme a norma DIN EN 10130:2007 (DIN 10130, 2007):

Tabela 01: Propriedades mecânicas do aço DC04.

Material	Resistência à Tração (MPa)	Limite de Escoamento (MPa)	Alongamento, mín. (%)	r, mín.	n, mín.
DC04	270,00 a 350,00	140,00 a 210,00	38,00	1,60	0,18

Fonte: Adaptado de (DIN 10130, 2007).

3.1.2 Aços Avançados de Alta Resistência

Os aços avançados de alta resistência, *Advanced High Strength Steels* (AHSS), podem ser classificados como uma classe de aços com resistência à tração acima de 440 MPa, e atendem a vários requisitos da indústria automotiva devido sua combinação de resistência e ductilidade. Os aços AHSS concederam aos projetistas novas opções de aços em relação à razão resistência e peso, conseguindo assim uma efetiva redução de peso do veículo (EL-SHERBINY et al., 2020).

Os aços avançados de alta resistência de primeira geração, consistem principalmente de microestrutura ferrítica, incluindo o aço de duas fases, *Dual Phase* (DP), aço com plasticidade induzida por transformação, *Transformation Induced Plasticity* (TRIP), aço de fase complexa, *Complex Phase* (CP) e o aço martensítico, *Martensitic Steel* (MART). Os aços de segunda geração, apresentam maior resistência e alongamento do que os aços de primeira geração, como os aços de plasticidade induzida por maclação mecânica, *Twinning Induced Plasticity* (TWIP). Apresentam maiores propriedades mecânicas devido à adição de elementos de liga tais como manganês, alumínio e silício. Os aços de terceira geração têm menor resistência e alongamento do que os aços de segunda geração, são aços com liga especial e processamento termomecânico, adição elementos de liga e refinamento de grãos para permitir a sua comercialização. Os aços de terceira geração incluem o aço com tratamento térmico de têmpera em partição, *Quenching and Partitioning* (Q&P) (CHO et al., 2019; SRIVASTAVA; PATRA; JHA, 2022).

Os aços AHSS, são adequados para o uso em carroceria, chassi e suspensão, visando a segurança e resistência ao impacto. Porém, conforme a resistência do material aumenta, o alongamento diminui devido à diminuição da plasticidade. Os aços AHSS estão em processo contínuo de desenvolvimento buscando o aumento da ductilidade conciliado com a alta resistência (CHO et al., 2019).

A solda a ponto no AHSS é geralmente mais sensível às falhas interfaciais do que os aços convencionais. Essas falhas de solda por pontos são caracterizadas por caminhos de trinca a partir da ponta do entalhe na lentilha de solda, que podem se propagar na superfície de contato. Como consequência, a compreensão da diversidade de situações de falha é necessária na tentativa de modelar o comportamento da solda a ponto e sua capacidade de suporte de cargas (DANCETTE et al., 2011).

3.1.3 Aço Dual Phase

Os aços DP, são um dos tipos multifásicos populares amplamente empregados na indústria. Recentemente, os aços AHSS com boa combinação de propriedades mecânicas estão sendo usados na fabricação de 25 % a 30 % dos componentes de uma carroceria de veículo. Os aços DP são os mais usados entre os aços AHSS em peças automotivas devido à sua alta resistência e boa conformabilidade. Essas propriedades dos aços DP levaram à sua crescente aplicação em componentes automotivos, como travessas, trilhos, rodas, reforço interno de para-choques e

longarinas. A microestrutura dos aços bifásicos consiste em ilhas duras de martensita em matriz de ferrita. Esta microestrutura composta de fase dupla leva a uma combinação de alta resistência conferida pela fase de martensita e ductilidade pela fase de ferrita, esta combinação única permite o uso de chapas mais finas, reduzindo assim o peso do veículo, melhorando a eficiência do combustível e a redução de custos (FARIVAR et al., 2018; DAS et al., 2019).

O processamento térmico para fabricação de aços DP é caracterizado por duas etapas: 1) aquecimento e imersão em temperaturas intercríticas para formar austenita intercrítica e 2) resfriamento rápido para transformar austenita intercrítica em martensita (LONG; HU; JIN, 2018; COSTA et al., 2022).

Na Tabela 02 são mostradas as propriedades mecânicas do aço DP 780, conforme a norma BS EN 10346: 2009 (BS 10346, 2009):

Tabela 02: Propriedades mecânicas do aço DP 780.

Material	Resistência à Tração, mín. (MPa)	Limite de Escoamento (MPa)	Alongamento, mín. (%)	BH ₂ , mín. (MPa)
DP 780	780,00	450,00 a 560,00	14,00	30,00

Fonte: Adaptado de (BS 10346, 2009).

3.1.4 Aço de Transformação Induzida por Plasticidade

Foi relatado pela primeira vez o efeito da transformação induzida por plasticidade em 1967 durante a investigação de aços inoxidáveis austeníticos. Os autores descobriram valores de alongamento uniforme excepcionalmente altos, que atribuíram à transformação induzida por deformação da austenita em martensita, dando origem à dilatação e à deformação plástica interna. Aços TRIP de baixa liga foram desenvolvidos pela indústria do aço no início dos anos 1990 e continuam a ganhar muita atenção dentro da pesquisa acadêmica devido às combinações impressionantes de resistência e ductilidade (TAYLOR et al., 2021).

Nas últimas duas décadas, uma ampla variedade de aços AHSS foram desenvolvidos, incluindo o aço TRIP. Dependendo de sua composição química e processamento termomecânico, a microestrutura desses aços podem consistir em ferrita, bainita, martensita e austenita. Permitindo a fabricação de componentes com propriedades de absorção de energia

consideráveis durante impacto, que se deve ao efeito do endurecimento por deformação da plasticidade induzida por transformação de uma alta fração de austenita retida ultrafina em martensita (PARK et al., 2019; BURDA et al., 2022).

Em automóveis, os aços laminados avançados de alta resistência, como o aço TRIP, exibem propriedades que permitem o uso de chapas mais finas sem prejudicar o desempenho, reduzindo assim o peso da carroceria e aumentando a economia de combustível. E devido às excelentes propriedades de tração e fadiga, os aços TRIP são bons para peças sob a carroceria, que muitas vezes estão sujeitas a carregamento de fadiga, assim, o comportamento à fadiga dos aços TRIP são altamente relevantes (LY; FINDLEY, 2016).

Em comparação com os aços de duas fases (DP) caracterizados por microestruturas de ferrita e martensita, o aço TRIP fornece conformabilidade a frio superior e potencialmente, desempenho superior de aplicação, como desempenho em colisões de automóveis (TAYLOR et al., 2021).

Na Tabela 03 são mostradas as propriedades mecânicas do aço TRIP 780, conforme a norma BS EN 10346:2009 (BS 10346, 2009):

Tabela 03: Propriedades mecânicas do aço TRIP 780.

Material	Resistência à Tração, mín. (MPa)	Limite de escoamento (MPa)	Alongamento, mín. (%)	BH ₂ , mín. (MPa)	n, mín.
TRIP 780	780,00	470,00 a 600,00	21,00	40,00	≥ 0,16

Fonte: Adaptado de (BS 10246, 2009).

3.2. Soldagem

É uma técnica utilizada para unir peças metálicas geralmente por meio da aplicação de calor. Uma solda pode ser definida como uma coalescência de materiais produzida por aquecimento a uma temperatura adequada com ou sem a aplicação de pressão e material de adição (PROKHORENKO et al., 2022; AWS, 2001).

Na literatura podem ser encontradas outras definições para soldagem. Esta técnica assegura a junta soldada as propriedades físicas e químicas dos materiais. Na soldagem por resistência

elétrica, uma fonte de calor é gerada na junta a ser soldada através da corrente elétrica e aplicada pressão, onde ocorre a fusão na interface dos materiais. Existem diversos processos de soldagem por resistência, sendo, por pontos, projeção, costura topo a topo e de alta frequência (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2009).

3.2.1 Solda a Ponto

O processo de soldagem a ponto por resistência é o método mais utilizado para a união de chapas de aço, particularmente na indústria automotiva quase 90% da montagem das chapas metálicas é realizada por soldagem a ponto. Ela é crucial para a carroceria de um veículo e a maioria das falhas ocorrem em ou ao redor do ponto de solda. Este método foi inventado por Eliot Thomson em 1877 (LONG; HU; JIN, 2018; GHANBARI et al., 2022).

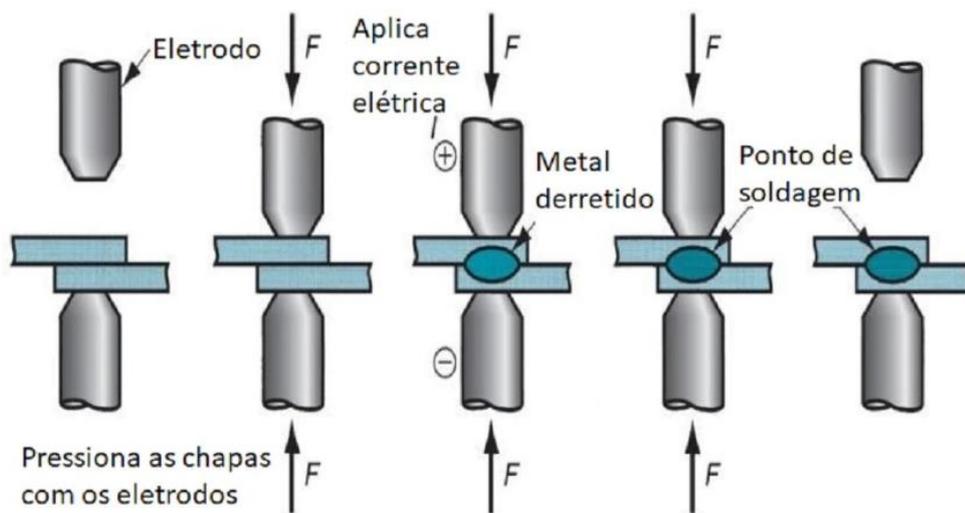
Soldagem a ponto por resistência, *Resistance Spot Welding* (RSW) apresenta excelentes benefícios técnico-econômicos como baixo custo, alta velocidade e adequação para automação (AKKAS et al., 2016).

As tecnologias de soldagem a ponto foram desenvolvidas e aplicadas na indústria automotiva para melhorar a soldabilidade dos aços, incluindo aços convencionais e de alta resistência. Este processo de soldagem utiliza a resistência de contato entre as chapas e a resistência do conjunto dos metais. Existem dois tipos de soldagem a ponto, dependendo da fonte de alimentação, que utiliza corrente alternada (CA) e o outro que usa corrente contínua (CC) (LEE; YU, 2017).

A soldagem por pontos é investigada de forma sistemática, como a função da dureza, temperatura, força do eletrodo e condição de superfície. No processo de soldagem as chapas são comprimidas por dois eletrodos de cobre resfriados a água, que exercem força para quebrar quaisquer óxidos ou películas na superfície para produzir o contato, então a corrente elétrica é aplicada nos eletrodos, o calor é gerado dentro da região de trabalho e nas interfaces devido à resistência elétrica. A fusão, portanto, inicia-se na superfície de contato, uma vez que a corrente elétrica é aplicada, a força eletromagnética induzida leva a formação da lentilha. A lentilha derretida cresce até o fluxo da corrente ser encerrado e solidifica-se devido ao resfriamento através dos eletrodos (WEI; WU, 2012).

O processo de soldagem a ponto é ilustrado conforme mostrado na Figura 01, seguindo as seguintes etapas, realizar o posicionamento dos eletrodos de soldagem sobre as chapas a serem soldadas é aplicada a pressão pelo eletrodo sobre as chapas para garantir o contato elétrico, então é aplicada a corrente elétrica para a formação do ponto de solda, concluída a solda, é desligada a corrente elétrica e mantida a pressão dos eletrodos para a solidificação do ponto de solda, concluída a solidificação os eletrodos são retirados (ENAMI; SOHRABIAN; FARAHANI, 2016).

Figura 01: Processo de soldagem a ponto:



Fonte: Adaptado de (ENAMI; SOHRABIAN; FARAHANI, 2016).

3.2.2 Parâmetros de Solda a Ponto

O tamanho da lentilha de solda é o parâmetro mais importante para determinar o comportamento mecânico da soldagem a ponto por resistência. A qualidade e a resistência das soldas são definidas pela forma e pelo tamanho das lentilhas. Além disso, a resistência ao cisalhamento e à tração da solda a ponto é um importante parâmetro para a qualidade da solda. Na maioria dos casos, uma boa prática de soldagem a ponto requer três parâmetros que devem ser controlados, corrente, tempo e força do eletrodo (AKKAS et al., 2016).

Entre os dois tipos de soldagem a ponto, o método que utiliza corrente contínua, CC, pode gerar vários tipos de formas de onda de corrente de forma eficaz e com maior constância de controle do que o método que utiliza corrente alternada, CA. Em geral, a corrente contínua não tem apenas uma faixa de soldagem mais ampla e melhor qualidade de soldagem do que corrente

alternada, mas também é capaz de controlar o processo de soldagem de diversas formas devido à sua fonte de energia, a CC na soldagem a ponto usa menos corrente e energia em relação a CA e produz menos respingos, diminui a abrasão de eletrodos e tem melhor aplicabilidade para os novos aços automotivos (LEE; YU, 2017).

Existem vários padrões para o dimensionamento de uma solda a ponto para uma determinada espessura de chapa de aço. Por exemplo, a *American Welding Society (AWS)*, a *Society of Automotive Engineering (SAE)* e o *American National Standards Institute (ANSI)*, em conjunto, recomendam um diâmetro de lentilha de solda para aços dado pela Equação 1 (ERTAS et al., 2009).

$$d \approx 4\sqrt{t} \quad (1)$$

Onde d é o diâmetro da lentilha e t é a espessura da chapa.

3.2.3 Fatores que Influenciam a Solda a Ponto

Investigações extensas foram realizadas em juntas de solda por pontos e os fatores metal base, tamanho de solda, espessura das chapas e as condições de carregamento afetam significativamente a resistência da fadiga em solda a ponto (LONG; HU; JIN, 2018).

Existem vários modos de falha para soldas por pontos. Em primeiro lugar, embora raramente observada, a falha interfacial pode ocorrer devido à uma fratura paralela às chapas. Este tipo de falha é denominado “modo de falha na interface de solda”. O escoamento através da lentilha pode ocorrer devido à soldagem ruim ou ao tamanho pequeno da lentilha. Na maioria dos casos, as soldas por pontos falham devido às fissuras na espessura da chapa causada por fadiga. Uma trinca de fadiga inicia em uma região altamente estressada perto da lentilha. Depois que uma trinca se desenvolve e a força for suficientemente pequena, a trinca então se propagará ao redor da lentilha antes de se propagar através da espessura. Este tipo de modo de falha é denominado modo de corte da chapa (ERTAS et al., 2009).

Os efeitos da resistência do contato elétrico, taxa de resfriamento, distribuição de soluto, e formato da lentilha após a solidificação são responsáveis pela resistência e microestrutura da zona de fusão (WEI; WU, 2012).

Vários fatores podem influenciar o comportamento mecânico das soldas por pontos. Eles podem ser classificados em três categorias: (I) fatores geométricos (tamanho da solda, espessura da chapa, largura da amostra, distância entre as garras da máquina, etc.), (II) modo de carregamento (dominado por cisalhamento, por carregamento normal ou combinado) e (III) fatores metalúrgicos relacionados à soldagem, ciclos térmicos (fragilidade nas microestruturas nas diferentes zonas termicamente afetadas (ZTA), presença de inclusões ou porosidades, tensões residuais) e a composição química do aço (DANCETTE et al., 2011).

3.3. Fadiga em Solda a Ponto

A soldagem a ponto por resistência é uma metodologia usualmente empregada para unir metais especialmente nos automóveis. Durante a vida útil de um carro, a falha das junções sob forças estáticas e de fadiga é uma preocupação. No setor automotivo, o método de junção de chapas influencia diretamente a vida útil, resistência ao choque, segurança e desempenho do veículo. As estradas irregulares, forças excessivas e vibrações impactam criticamente a integridade estrutural do veículo, portanto, a caracterização de falhas das juntas soldadas é uma preocupação com a durabilidade, bem como o design mais seguro de uma carroceria (JANARDHAN; MUKHOPADHYAY; DUTTA, 2022).

Uma vez que a solda a ponto fornece uma deformação ou entalhe natural ao longo da circunferência da lentilha da solda, a mecânica da fratura tem sido amplamente adotada para investigar o comportamento de fadiga em vários tipos de corpos de prova, com base nas soluções do fator de intensidade de tensão no local crítico dos pontos de solda (LONG; HU; JIN, 2018).

No entanto, devido ao calor gerado durante o processo soldagem a ponto por resistência RSW, mudanças microestruturais são induzidas, que afetam o comportamento mecânico das juntas soldadas. Alguns estudos foram realizados a esse respeito. Além disso, verificou-se que a falha de fadiga no RSW foi atribuída ao efeito de concentração de tensão produzido pela lentilha reduzindo a vida à fadiga das juntas soldadas. O processo RSW representa um desafio no uso de aços de alta resistência para a indústria automotiva, pois, a resistência à fadiga pode ser seriamente afetada (ORDOÑEZ et al., 2019).

O processo de falha de corpos de prova de fadiga por cisalhamento pode ser dividido em três estágios. O estágio I corresponde ao início e crescimento da fissura como fissuras dobradas decorrendo da fenda principal. Estágio II corresponde à propagação da trinca através da espessura da chapa. Estágio III corresponde à propagação de trinca ao longo da circunferência da lentilha e causa a falha. É importante notar que a vida de fadiga da solda por pontos é geralmente dominada pelos estágios I e II do processo de falha por fadiga (LONG; HU; JIN, 2018).

No artigo de Cho et al. (2019), foi estudado o diâmetro da lentilha e concluiu que o eletrodo com diâmetro de face maior, aumenta o tamanho da lentilha e a vida em fadiga. O aumento da lentilha, aumenta a capacidade de carga do ponto de solda.

No artigo de Rajarajan et al. (2020), foi estudado a força do eletrodo no processo de soldagem e concluiu que a força do eletrodo altera o diâmetro da lentilha, e o diâmetro da lentilha é o principal parâmetro de controle para as propriedades mecânicas das juntas soldadas.

No artigo de GOU et al. (2016), foi estudado a influência da tecnologia de soldagem, e concluiu que a tecnologia de soldagem por ponto pode melhorar significativamente o desempenho de fadiga no cisalhamento e tração, em relação à outras tecnologias de soldagem.

3.4 Curva S-N

A curva número de ciclos em função da tensão aplicada, *Stress versus the Number of Cycles* (S-N), tem sido amplamente empregada na previsão da vida em fadiga dentro do domínio da fadiga de alto ciclo. É um gráfico descritivo que ilustra a relação entre a tensão cíclica S e a vida de fadiga mediana N. A fim de descrever a dispersão da propriedade de fadiga, a curva S-N é estendida para as curvas P-S-N, ou seja, curvas de probabilidade constante P de fadiga em uma tensão S versus gráfico de vida de fadiga N (ciclos até a falha) (ZU et al., 2020).

A relação entre a vida à fadiga de materiais de engenharia e a tensão aplicada é uma propriedade importante para confiabilidade em processos e projetos. Para o projeto de vida segura, os dados do teste de fadiga são frequentemente apresentados na forma da curva S-N, por exemplo, um gráfico log-log. A vida à fadiga mesmo sob níveis de tensão e condições de experimento controlados exibe um grande intervalo de dispersão. Um método convencional para

quantitativamente descrever a curva S-N é fazer o ajuste de probabilidade usando aproximadamente 15 corpos de prova em cada uma das quatro ou cinco tensões constantes. Assim, o tamanho de amostra relativamente grande é necessário para obter experimentalmente a curva S-N. Além disso, quando a tensão se aproxima do limite de fadiga, o teste de fadiga consome muito tempo, tornando o método clássico na prática demorado e caro (CHEN et al., 2020).

Uma vez que Wöhler realizou pesquisas pioneiras na caracterização do comportamento à fadiga dos materiais de um eixo ferroviário usando a relação entre o tempo de vida à fadiga e a faixa de tensão cíclica, vários modelos foram sucessivamente propostos para representar as curvas de fadiga S-N. Entre eles, a equação de Basquin foi amplamente adotada em fadiga (LI et al., 2020a).

No artigo de Zu et al. (2020), foi estudado uma nova teoria matemática de incerteza de pequenas amostras para a curva S-N e verificou o desempenho estável em diferentes tamanhos de amostra, foi usado o modelo Basquin. Para os estudos no futuro podem se concentrar na exploração de outras formas de curvas S-N, para descrever as propriedades de fadiga dos materiais com mais detalhes e precisão.

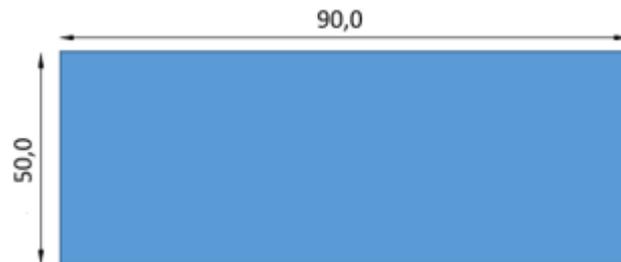
4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Materiais

Os materiais utilizados foram os aços comerciais laminados a frio e recozidos para o alívio de tensão DP 780 e TRIP 780, com espessura nominal de 1,20 mm, e o aço DC04, com as espessuras nominais de 0,70 mm e de 1,20 mm.

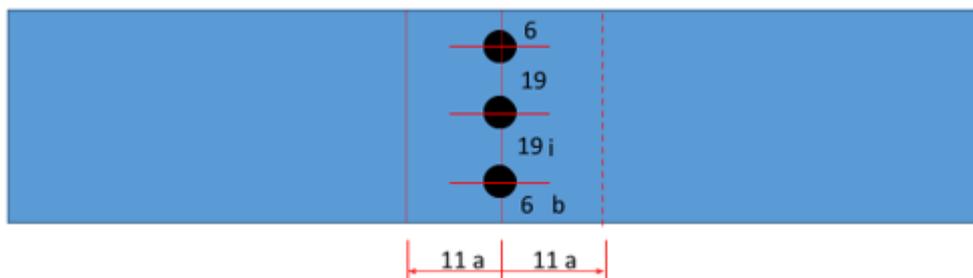
Foram confeccionados corpos de prova retangulares com o dimensional de 50,00 mm de largura por 90,00 mm de comprimento com a sobreposição de material de 22,00 mm para o processo de soldagem, conforme mostrados nos esquemas das Figuras 02 e 03. A largura de 50,00 mm foi utilizada com base na largura das garras de fixação da máquina de fadiga utilizada para a realização dos ensaios. Os cortes dos corpos de prova foram realizados na guilhotina Newton modelo GHN 2006 e não foi realizado acabamento nas bordas dos corpos de prova.

Figura 02: Dimensional das chapas:



Fonte: próprio autor

Figura 03: Localização dos pontos de solda:



Fonte: Próprio autor

Sendo:

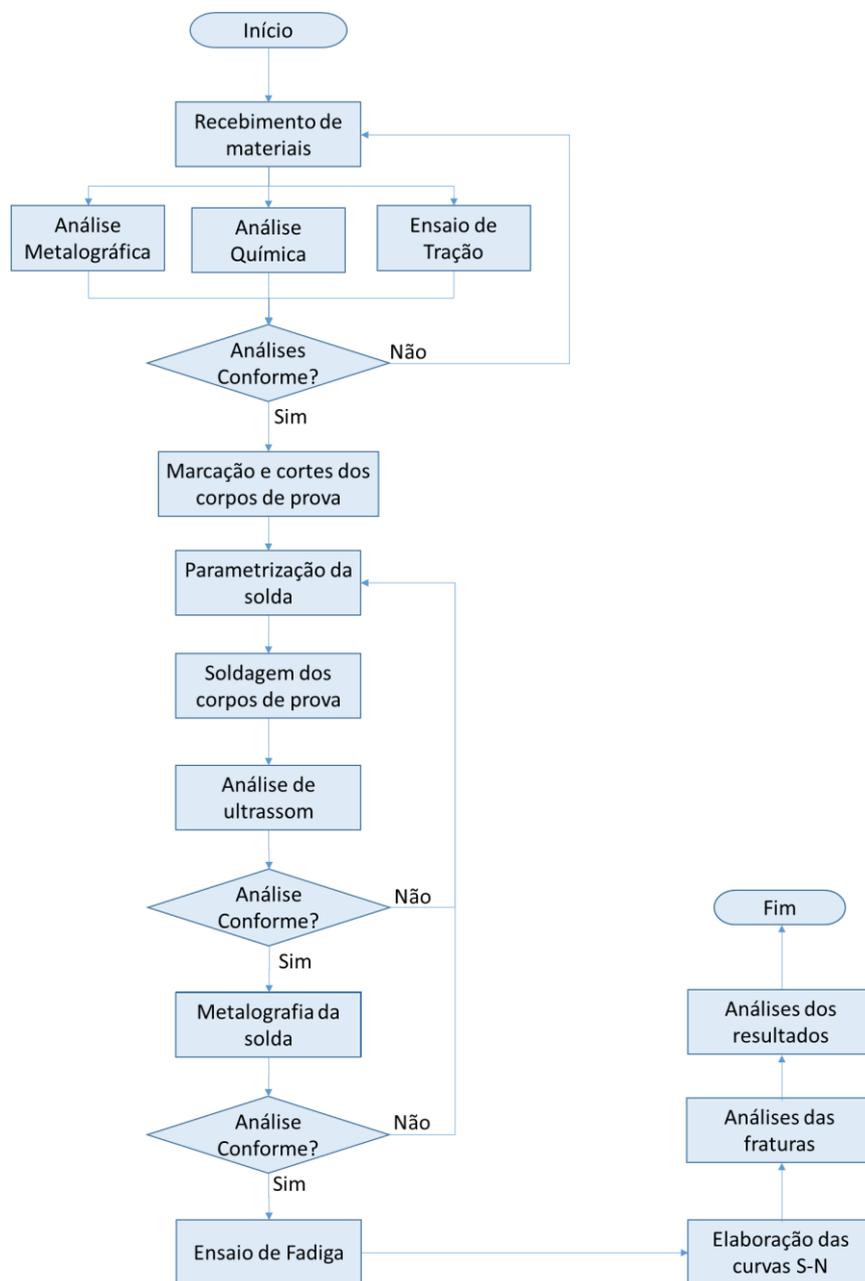
a – Sobreposição do material; b – Distância entre a borda da chapa e o ponto de solda; i – Distância entre os pontos de solda, medidas em milímetros.

4.2 Métodos

4.2.1 Fluxograma

Elaborado o fluxograma dos procedimentos realizados para execução deste trabalho, conforme demonstrado na Figura 04:

Figura 04: Fluxograma:



Fonte: Próprio autor.

4.2.2 Metalografia

As análises metalográficas foram realizadas seguindo as seguintes etapas de preparação:

Os cortes das amostras foram feitos utilizando a serra fita Ronemak modelo AC - 300, o embutimento a quente com resina fenólica, utilizando a embutidora Struers modelo CitoPress - 30. O lixamento da face analisada, foi realizado em lixadeira mecânica Struers modelo Tegramin-30, utilizando as lixas de 120 grãos por polegada a 2500 grãos por polegada, sob fluxo constante de água girando a amostra em 90°, retirando as marcas da lixa anterior. O polimento foi realizado utilizando a suspensão de diamante de 3 µm e 1 µm e lavada a amostra com álcool e secada com ar comprimido. As amostras foram submersas na solução de Nital 2 %, para avaliar a microestrutura, morfologia e distribuição dos constituintes da liga. O microscópio óptico Olympus modelo BX60 foi utilizado para obter as imagens das microestruturas.

4.2.3 Análise Química

As análises das composições químicas dos aços foram feitas por meio da espectrometria de emissão óptica com uso do equipamento SPECTRO modelo SpectromaXx-M, utilizando os padrões BAS SS 401 a 410 de acordo com a concentração do elemento de liga. A conformidade dos materiais considerou as normas dos respectivos materiais DIN EN 10130:2007 (DIN 10130, 2007) e BS EN 10346:2009 (BS 10346, 2009).

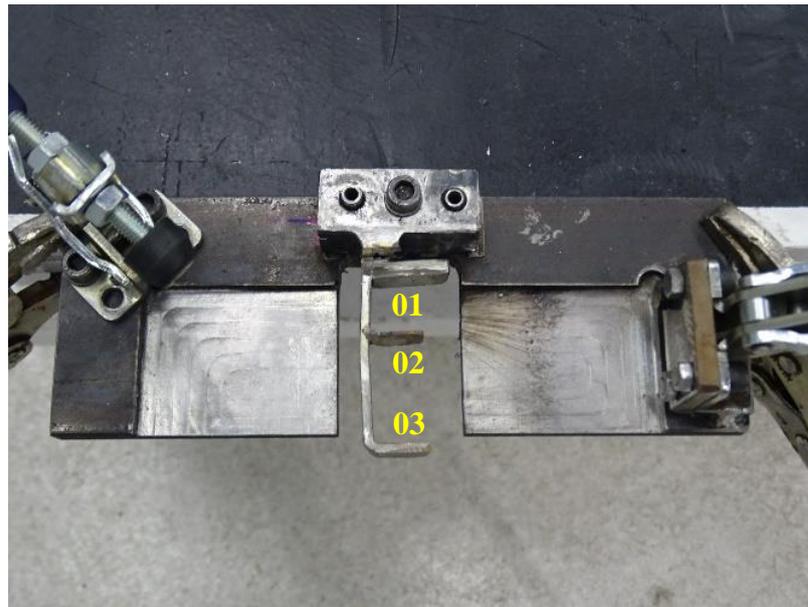
4.2.4 Ensaio de Tração

Os corpos de prova de prova foram cortados, usinados e retificados com a geometria conforme a norma ISO 6892-1: 2009 (ISO 6892-1, 2009). Os ensaios de tração foram realizados utilizando o equipamento INSTRON modelo 4467, célula de carga de 30 kN, extensômetro de vídeo e o software Bluehil. Os parâmetros utilizados nos ensaios foram a velocidade de 1,20 mm/min no regime elástico e alterado para 15,00 mm/min no regime plástico conforme a ISO 6892-1: 2009 (ISO 6892-1, 2009).

4.2.5 Solda a Ponto

Para soldagem dos corpos de prova foi confeccionado o dispositivo para o posicionamento das chapas e dos eletrodos do equipamento de soldagem, para realização dos três (03) pontos de solda conforme demonstrado na Figura 05:

Figura 05: Dispositivo de soldagem:



Fonte: Próprio autor

O uso de 03 pontos de solda ao em vez de 01 ponto de solda, foi utilizado para minimizar o efeito da dispersão dos resultados, além de ser a condição mais próxima da aplicada na carroceria do veículo.

Os parâmetros de solda foram analisados conforme a norma FCA PS.50004/01, para a verificação de conformidade dos parâmetros: “P₂” profundidade de indentação, “F” penetração e “D” diâmetro da lentilha, sendo os parâmetros “P₂” máximo 30 % da espessura mais fina, “F” mínimo 20 % da espessura mais fina e “D” 3,50 mm para espessura de 0,70 mm e 4,50 mm para espessura de 1,20 mm (FCA PS.50004/01, 2019). Os corpos de prova foram soldados seguindo os parâmetros, mostrado na Tabela 04:

Tabela 04: Parâmetros de soldagem dos corpos de prova:

Parâmetros	TRIP 780 / DP 780	DC04 - 0,70 e 1,20 mm
P ₁ (N)	3000	2500
C (kA)	8	10
T (s)	22	22
R (s)	5	5
I	1	1

P₁ - Pressão medida em Newtons (N); C – Corrente medida em Amperes (A); T – Tempo medido em segundos (s); R₁ – Resfriamento em segundos (S); I – Pulso.

Fonte: Adaptado (FCA PS.50004/01, 2019)

Para soldagem dos corpos de prova foi utilizado o equipamento de soldagem N° 6002910, modelo OMEGA 172 kVA, 440 VAC.

Os parâmetros de soldagem foram estabelecidos e ajustados conforme o resultado monitorado pelo ensaio de ultrassom até alcançar pontos de solda com resultados válidos.

Para validação do processo de soldagem dos corpos de prova, após a aprovação pelo ensaio de ultrassom, foram realizadas as preparações metalográficas das amostras para análise dos parâmetros das soldas, sendo analisados os três pontos de solda de dois corpos de prova de cada material, seguindo as seguintes etapas de preparação: A marcação e corte perpendicular no centro da lentilha utilizando a serra fita Ronemak modelo AC - 300, embutimento a quente com resina fenólica, utilizando a embutidora Struers modelo CitoPress - 30. O lixamento da face a ser analisada com o uso da lixadeira mecânica Struers modelo Tegramin-30, utilizando as lixas de 120 grãos por polegada a 2500 grãos por polegada, sob fluxo constante de água girando a amostra em 90°, retirando as marcas da lixa anterior. O polimento foi realizado utilizando a suspensão de diamante de 3 µm e 1 µm e lavada a amostra com álcool e secada com ar comprimido. As amostras foram submersas na solução de Nital 2 %, para evidenciar a solda em relação aos materiais das chapas. O microscópio óptico Olympus modelo BX60 foi utilizado para obter as imagens das soldas e a medição dos parâmetros das soldas conforme a norma FCA PS.50004/01 (FCA PS.50004/01, 2019).

4.2.6 Ensaio de Ultrassom

Os ensaios de ultrassom foram realizados durante o processo de soldagem dos corpos de prova, para o ajuste dos parâmetros de soldagem e no processo de soldagem final. Foram inspecionados os três primeiros corpos de prova e os três últimos corpos de prova de cada material para garantir a qualidade de todo o processo de soldagem. Neste caso, foi utilizado o equipamento portátil RSWA, analisador de solda a ponto por resistência, sendo pré-definido o diâmetro da lentilha e a indentação a ser analisada conforme a norma FCA PS.50004/01 (FCA PS.50004/01, 2019).

4.2.7 Ensaio de Fadiga

Os ensaios mecânicos dinâmicos de alto ciclo foram realizados para determinação dos valores de fadiga das soldas a ponto nos aços TRIP 780 e DP 780 com espessura 1,20 mm e DC04 com espessuras de 0,70 mm e 1,20 mm. Os ensaios de fadiga foram realizados utilizando a máquina servo-hidráulica INSTRON, modelo 8801, com as seguintes características: Carregamento uniaxial com célula de carga de +- 100 kN, curso do atuador de + - 75 mm, frequência até 100 Hz (curva de desempenho), cabeçote hidráulico curso máximo de 1100 mm, fluxo da unidade hidráulica de 48 l.min⁻¹, pressão máxima de trabalho de 207 bar; Garra hidráulica; face plana: 0 mm a 8,0 mm.

Os ensaios foram realizados seguindo os parâmetros; a frequência da prova foi limitada a 50 Hz, os carregamentos foram por tração-tração, curva senoidal, com razão de carregamento igual a $R = 0,1$ constante em todo o ensaio. As curvas S-N (neste trabalho foi utilizada a curva força máxima versus o número de ciclos até a falha) foi elaborada com 5 níveis de força com 3 amostras validas: total de 15 amostras e o fim de teste limitado a $5,0 \times 10^6$ ciclos ou à fratura do corpo de prova.

Os cálculos necessários para a parametrização do ensaio de fadiga são descritos nas Equações 2 a 6 (LEE; TAYLOR, 2005; ISO 1099, 2017):

$$\text{Força máxima} = F_{m\acute{a}x} = \sigma \cdot A_1 \quad (2)$$

$$\text{Força m\acute{i}nima} = F_{m\acute{i}n} = F_{m\acute{a}x} \cdot 0,1 \quad (3)$$

$$\text{Força média} = F_m = \frac{F_{\max} + F_{\min}}{2} \quad (4)$$

$$\text{Força alternada} = F_a = \frac{F_{\max} - F_{\min}}{2} \quad (5)$$

$$\text{Razão das forças: } R = \frac{F_{\min.}}{F_{\max.}} \quad (6)$$

Onde F_{\max} é a força máxima; σ é a tensão; A_1 é a área (não utilizada por se tratar de pontos de solda); F_{\min} é a força mínima; F_m é a força média; F_a é a força alternada; R = razão das forças.

4.2.8 Curva S-N

Para plotagem das curvas S-N, os parâmetros de fadiga foram obtidos utilizando a mediana e a abordagem de Owen R90C90 obtida a partir dos dados dos testes realizados, e os seguintes parâmetros foram calculados (LEE; TAYLOR, 2005; ISO 12107, 2012):

- Fator de inclinação da curva S-N (k).
- Coeficiente de resistência à fadiga (σ_f')
- Expoente da resistência à fadiga (b).

Para a realização dos ensaios foram assumidos os seguintes pontos:

- Comportamento elástico dominante;
- Relação linear entre log (força máxima) e log (vida de fadiga);
- Log (vida de fadiga) é variável dependente;
- A curva S-N representa apenas a faixa de vida de fadiga contendo os dados dos testes.

Para os cálculos de plotagem das curvas foi utilizada equação de Basquin, que define a curva S-N, conforme a Equação 7 (LEE; TAYLOR, 2005):

$$\sigma_a = \sigma_f'(2N_f)^b \quad (7)$$

Onde σ_a é a amplitude de força verdadeira; σ'_f é o coeficiente de resistência à fadiga; $2N_f$ é o número de reversões; b é o expoente da resistência a fadiga.

A equação 7 foi convertida para o formato linear, onde a vida em fadiga é a variável dependente como mostrado nas Equações 8 a 10 (ASTM E739, 2010; LEE; TAYLOR, 2005):

$$\hat{Y} = \hat{A} + \hat{B}X \quad (8)$$

$$\hat{A} = \frac{-1}{b} \log(\sigma'_f) \quad (9)$$

$$\hat{B} = \frac{1}{b} \quad (10)$$

Onde \hat{Y} é a estimativa da vida em fadiga; \hat{A} é a estimativa coeficiente de regressão; \hat{B} é a estimativa do coeficiente angular; X é a variável; b é o expoente da resistência a fadiga; σ'_f é o coeficiente de resistência à fadiga.

A regressão linear usada para resolver \hat{A} e \hat{B} , as propriedades de fadiga foram calculadas conforme as Equações 11 e 12 (LEE; TAYLOR, 2005):

$$\sigma'_f = 10^{\frac{-\hat{A}}{\hat{B}}} \quad (11)$$

$$b = \frac{1}{\hat{B}} \quad (12)$$

Os parâmetros, σ'_f e b representam a curva de fadiga S-N mediana. O desenho da curva representa a confiabilidade e confiança de 90%, é calculada usando a abordagem modificada de Owen (LEE; TAYLOR, 2005).

Quando a curva é gerada, a curva SN mediana é deslocada para a esquerda pelo produto de sK_{Owen} . O parâmetro “s” é o parâmetro da função de regressão linear é definido na Equação 13 (LEE; TAYLOR, 2005; ISO 12107, 2012):

$$s = \sqrt{\frac{1}{n_s-2} \sum_{i=1}^{n_s} [Y_i - (\hat{A} - \hat{B}X_i)]^2} \quad (13)$$

Onde s é o desvio padrão da amostra e o número n_s é o número de amostra usadas na regressão linear (LEE; TAYLOR, 2005).

4.2.9 Análise das Fraturas

Para entender o comportamento dos materiais no ensaio de fadiga, foram analisadas as fraturas dos corpos de prova com menor e maior número de ciclos dos aços DC04 com espessuras de 0,70 mm e 1,20 mm, DP 780 e TRIP 780 com espessura de 1,20 mm, buscando a relação do tipo de fratura e propagação da trinca, com o aumento de número de ciclos.

4.2.10 Microscopia Eletrônica de Varredura

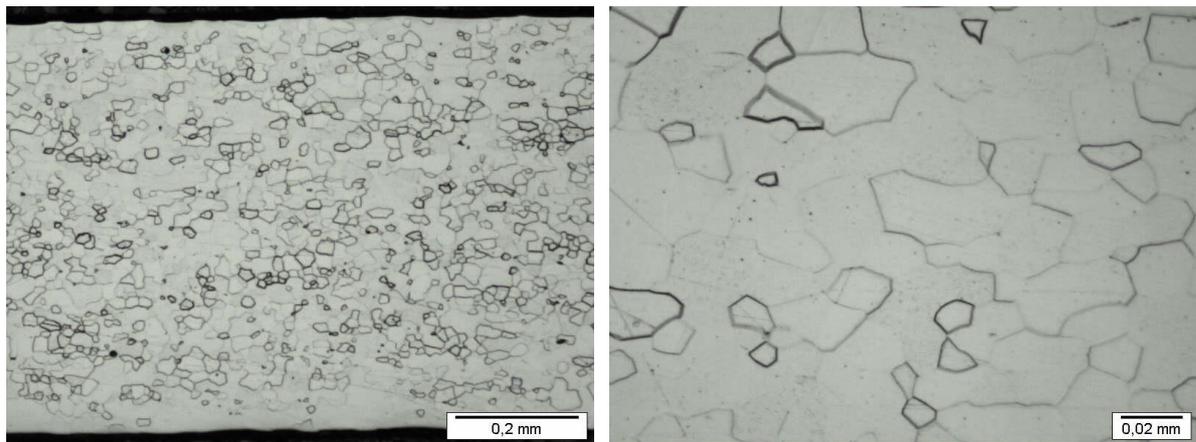
Foram analisadas as fraturas dos corpos de prova, com menor e maior número de ciclos dos aços DC04 com espessuras de 0,70 mm e 1,20 mm, DP 780 e TRIP 780 com espessura de 1,20 mm utilizando o Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV), equipamento modelo Versa 3D DualBeam. As fraturas dos corpos de prova selecionados, foram cortadas e analisadas as regiões do ponto de solda e as regiões entre os pontos de solda, para avaliar o tipo de morfologia em toda a extensão da fratura.

5. RESULTADOS

5.1 Metalografia

Os resultados das estruturas obtidas nas metalografias são mostrados nas Figuras 06, 07, 08 e 09 respectivamente.

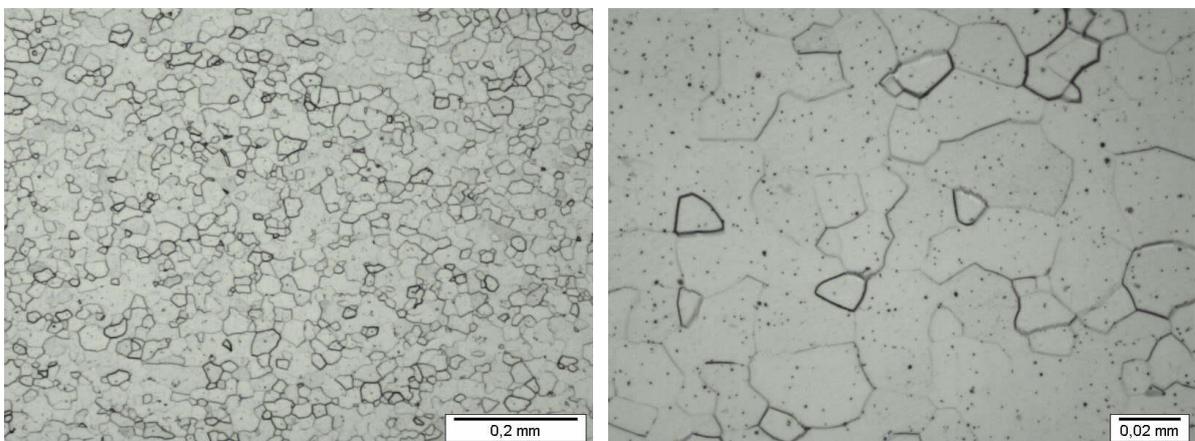
Figura 06 - Microestrutura do aço DC04, espessura 0,70 mm, com diferentes ampliações.



Fonte: Próprio Autor.

A microestrutura do aço DC04, espessura de 0,70 mm, conforme a Figura 06, apresentou o tamanho de grão entre 7 e 8 e a microestrutura ferrítica, resultado conforme a norma FCA MS.50002 (FCA MS.50002, 2020).

Figura 07 – Microestrutura do aço DC04, espessura 1,20 mm, com diferentes ampliações.

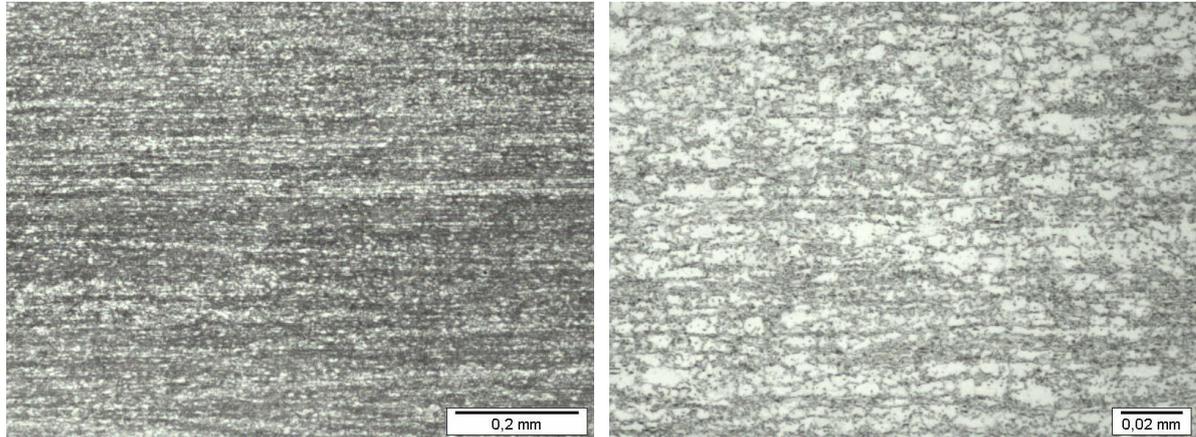


Fonte: Próprio Autor.

A microestrutura do aço DC04, espessura de 1,20 mm, conforme a Figura 07 apresentou o tamanho de grão entre 7 e 8 e a microestrutura ferrítica, resultado conforme a norma FCA

MS.50002 (FCA MS.50002, 2020). Li et al. (2020b) e Oliaei, et al. (2022), estudaram o aço IF e encontraram a microestrutura ferrítica sem quaisquer outras fases, com o tamanho de grão médio de $26,2 \mu\text{m}$, similar as Figuras 06 e 07.

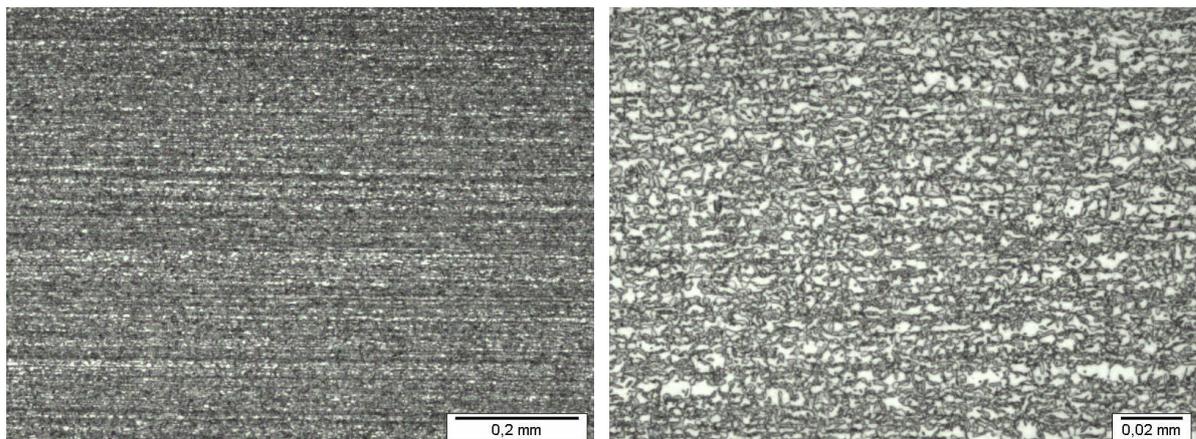
Figura 08 - Microestrutura do aço DP 780, espessura 1,20 mm, com diferentes ampliações.



Fonte: Próprio Autor.

A microestrutura do aço DP 780 espessura de 1,20 mm, conforme a Figura 08, apresentou a microestrutura constituída de ferrita e martensita, além de austenita residual, resultado conforme a norma FCA MS.50002 (FCA MS.50002, 2020). No artigo de Oztürk et al. (2023), foi estudado o aço DP 780 e encontrou a microestrutura de matriz de ferrita e ilhas de martensita, similar a Figura 08.

Figura 09 - Microestrutura do aço TRIP 780, espessura 1,20 mm, com diferentes ampliações.



Fonte: Próprio Autor.

A microestrutura do aço TRIP 780, espessura 1,20 mm, conforme a Figura 09, apresentou a microestrutura constituída de ferrita, martensita, bainita e austenita retida, resultado conforme

a norma FCA MS.50002 (FCA MS.50002, 2020). No artigo de Paranthaman et al. (2021), foi estudado o aço TRIP 780 e encontrado a microestrutura composta por multifases bainita, ferrita, austenita retida e martensita, similar a Figura 09.

5.2 Ensaio de Tração

Na Tabela 05, são mostrados os resultados obtidos das propriedades mecânicas dos aços DC04 espessuras de 0,70 mm e 1,20 mm e o especificado conforme a norma DIN EN 10130:2007 (DIN 10130, 2007):

Tabela 05: Resultados das propriedades mecânicas dos aços DC04.

DC04	Resistência à Tração (MPa)	Limite de Escoamento (MPa)	Alongamento, mín. (%)	r, mín.	n, mín.
Especificado	270,00 a 350,00	140,00 a 210,00	38,00	1,60	0,18
Enc. (Esp. 0,70 mm)	289,90	140,02	52,33	2,72	0,25
Enc. (Esp. 1,20 mm)	280,53	162,91	50,07	2,84	0,24

Fonte: Próprio autor

As propriedades mecânicas dos aços DC04 espessuras 0,70 mm e 1,20 mm, resistência à tração 289,90 MPa e 280,53 MPa, limite de escoamento 140,02 MPa e 162,91 MPa, alongamento 52,33 % e 50,07 %, r 2,72 e 2,84 e n 0,25 e 0,24 respectivamente, encontram-se de acordo com o especificado na norma DIN EN 10130:2007 (DIN 10130, 2007). Janardhan et al. (2022), estudou o aço IF e as características mecânicas no ensaio de tração, resistência a tração, limite de escoamento e alongamento são similares a Tabela 05.

Na Tabela 06, são mostrados os resultados obtidos das propriedades mecânicas do aço DP 780, espessura de 1,20 mm e o especificado conforme a norma BS EN 10346:2009 (BS 10346, 2009):

Tabela 06: Resultados das propriedades mecânicas do aço DP 780.

DP 780	Resistência à Tração, mín. (MPa)	Limite de Escoamento (MPa)	Alongamento, mín. (%)	BH ₂ , mín. (MPa)
Especificado	780,00	450,00 a 560,00	14,00	30,00
Encontrado	842,71	503,64	14,33	83,28

Fonte: Próprio autor

As propriedades mecânicas do aço DP 780, espessura de 1,20 mm, resistência à tração 842,71 MPa, limite de escoamento 503,64 MPa, alongamento 14,33 % e BH₂ 83,28 encontram-se de acordo com o especificado na norma BS EN 10346:2009 (BS 10346, 2009). Kumar et al. (2022), estudou aço DP 780 e as características mecânicas no ensaio de tração, resistência a tração, limite de escoamento e alongamento são similares a Tabela 06.

Na Tabela 07, são mostrados os resultados das propriedades mecânicas do aço TRIP 780 espessura de 1,20 mm e o especificado conforme a norma BS EN 10346:2009 (BS 10346, 2009):

Tabela 07: Resultados das propriedades mecânicas do aço TRIP 780.

TRIP 780	Resistência à Tração, mín. (MPa)	Limite de Escoamento (MPa)	Alongamento, mín. (%)	BH ₂ , mín. (MPa)	n, mín.
Especificado	780,00	470,00 a 600,00	21,00	40,00	≥ 0,16
Encontrado	887,40	494,21	21,43	85,52	0,22

Fonte: Próprio autor

As propriedades mecânicas do aço TRIP 780, espessura de 1,20 mm, resistência à tração 887,40 MPa, limite de escoamento 494,21 MPa, alongamento 21,43 %, BH₂ 85,52 e n 0,22, encontram-se de acordo com o especificado na norma BS EN 10346:2009 (BS 10346, 2009). No artigo de Pornputsiri et al. (2020), foi estudado o aço TRIP 780 e as características mecânicas no ensaio de tração, resistência a tração, limite de escoamento e alongamento são similares a Tabela 07.

5.3 Composição Química

Na Tabela 08, são mostrados os resultados obtidos dos elementos químicos dos aços DC04 espessuras de 0,70 e 1,20 mm e o especificado conforme a norma DIN EN 10130:2007 (DIN 10130, 2007):

Tabela 08: Resultados das composições químicas dos aços DC04.

Elementos	C	P	S	Mn	Nb	Ti	N
Especificado	≤ 0,080	≤ 0,030	≤ 0,030	≤ 0,400	-	-	-
Encontrado (0,70 mm)	0,002	0,017	0,010	0,112	0,011	0,049	0,015
Encontrado (1,20 mm)	0,006	0,019	0,014	0,099	0,014	0,079	0,019

Fonte: Próprio autor

A composição química dos aços DC04 espessuras 0,70 mm e 1,20 mm, C 0,002 % e 0,006 %, P 0,017 % e 0,019 %, S 0,010 % e 0,014 %, Mn 0,112 % e 0,099 % respectivamente, encontram-se de acordo com o especificado na norma DIN EN 10130:2007 (DIN 10130, 2007). E os elementos Nb 0,011 % e 0,014 %, Ti 0,049 % e 0,079 % e N 0,015 % e 0,019 % respectivamente evidenciam a composição química de materiais classe IF. Roodgari et al. (2021) e Janardhan et al. (2022), estudaram o aço IF e encontraram a composição química similar a Tabela 08.

Na Tabela 09, são mostrados os resultados obtidos dos elementos químicos do aço DP 780, espessura de 1,20 mm e o especificado conforme a norma BS EN 10346:2009 (BS 10346, 2009):

Tabela 09: Resultados da composição química do aço DP 780.

Elementos	C	Si	Mn	P	S	Al	Cr+Mo	Nb+Ti	V	B
Especificado	≤ 0,180	≤ 0,800	≤ 2,500	≤ 0,080	≤ 0,015	≤ 2,000	≤ 1,000	≤ 0,150	≤ 0,200	≤ 0,005
Encontrado	0,166	0,316	1,898	0,041	0,012	0,057	0,416	0,055	0,011	0,0006

Fonte: Próprio autor

A composição química do aço DP 780, espessura 1,20 mm, C 0,166 %, Si 0,316 %, Mn 1,898 %, P 0,041 %, S 0,012 %, Al 0,057 %, Cr + Mo 0,416 %, Nb + Ti 0,055 %, V 0,011 % e B 0,0006 %, encontram-se de acordo com o especificado na norma BS EN 10346:2009 (BS 10346, 2009).

Trishita Raya et al. (2020) e Oztürk et al. (2023), estudaram o aço DP 780 e encontraram a composição química similar a Tabela 09.

Na Tabela 10, são mostrados os resultados obtidos dos elementos químicos do aço TRIP 780, espessura de 1,20 mm e o especificado conforme a norma BS EN 10346:2009 (BS 10346, 2009):

Tabela 10: Resultados da composição química do aço TRIP 780.

Elementos	C	Si	Mn	P	S	Al	Cr+Mo	Nb+Ti	V	B
Especificado	≤ 0,320	≤ 2,200	≤ 2,500	≤ 0,120	≤ 0,015	≤ 2,000	≤ 0,600	≤ 0,200	≤ 0,200	≤ 0,005
Encontrado	0,242	0,258	1,858	0,038	0,008	1,993	0,195	0,036	0,007	0,0013

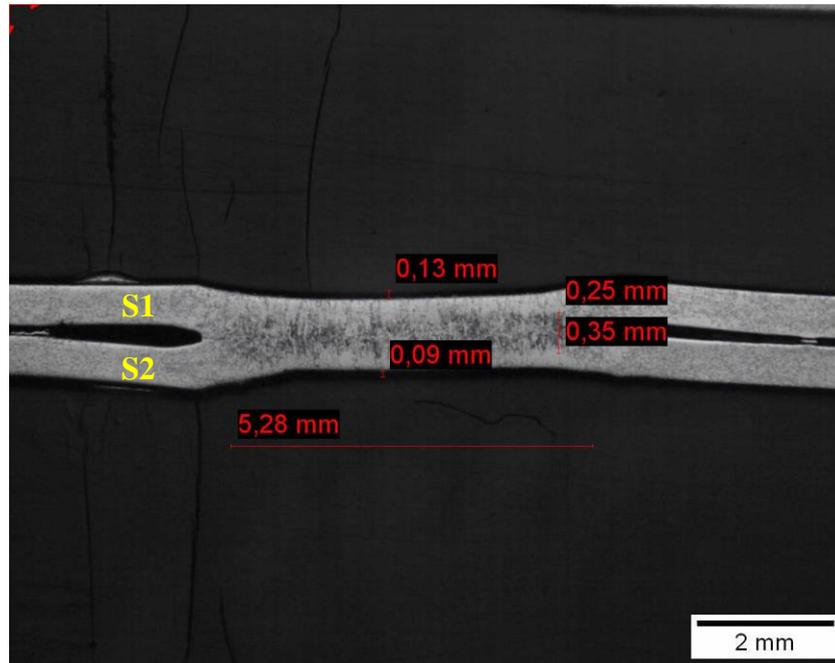
Fonte: Próprio autor

A composição química do aço TRIP 780, espessura 1,20 mm, C 0,242 %, Si 0,258 %, Mn 1,858 %, P 0,038 %, S 0,008 %, Al 1,993 %, Cr + Mo 0,195 %, Nb + Ti 0,036 %, V 0,007 % e B 0,0013 %, encontram-se de acordo com o especificado na norma BS EN 10346:2009 ((BS 10346, 2009). El-Sherbinya et al. (2020) e Wang et al. (2020), estudaram o aço TRIP 780 e encontraram a composição química similar a Tabela 10.

5.4 Parâmetros de Solda

Na Tabela 11, são mostrados os resultados obtidos dos parâmetros da solda no aço DC04, espessura de 0,70 mm, mostrado na Figura 10, conforme a norma PS.50004/01 (FCA PS.50004/01, 2019):

Figura 10: Seção transversal da solda a ponto no aço DC04, espessura 0,70 mm.



S1 chapa superior e S2 chapa inferior

Fonte: Próprio autor

Tabela 11: Parâmetros da solda a ponto no aço DC04, espessura 0,70 mm:

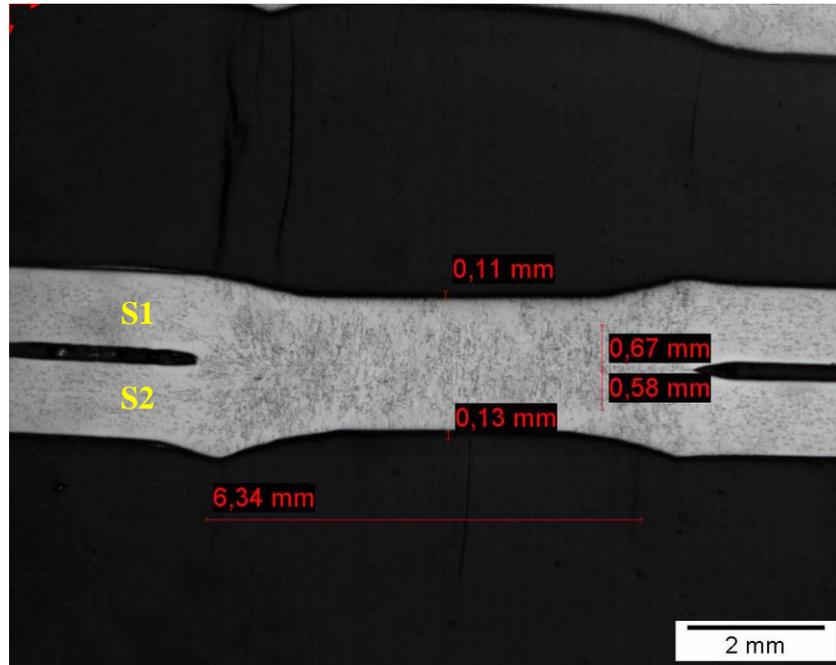
Parâmetros	Unidade	Especificado	Resultados
Espessuras	mm	0,70	0,70
P_2	mm	$\leq 0,21$	0,13 (S1) ; 0,09 (S2)
F	mm	$\geq 0,14$	0,25 (S1) ; 0,35 (S2)
D	mm	$\geq 3,50$	5,28

Fonte: Próprio autor

Os parâmetros da solda no aço DC04, espessura de 0,70 mm são P_2 0,13 mm (S1); 0,09 mm (S2), F 0,25 mm (S1); 0,35 mm (S2) e D 5,28 mm, e encontram-se de acordo com o especificado na norma PS.50004/01 (FCA PS.50004, 2019).

Na Tabela 12, são mostrados os resultados obtidos dos parâmetros da solda no aço DC04, espessura de 1,20 mm, mostrado na Figura 11, conforme a norma PS.50004/01 (FCA PS.50004, 2019):

Figura 11: Seção transversal da solda a ponto no aço DC04, espessura 1,20 mm.



S1 chapa superior e S2 chapa inferior

Fonte: Próprio autor

Tabela 12: Parâmetros da solda a ponto no aço DC04, espessura 1,20 mm:

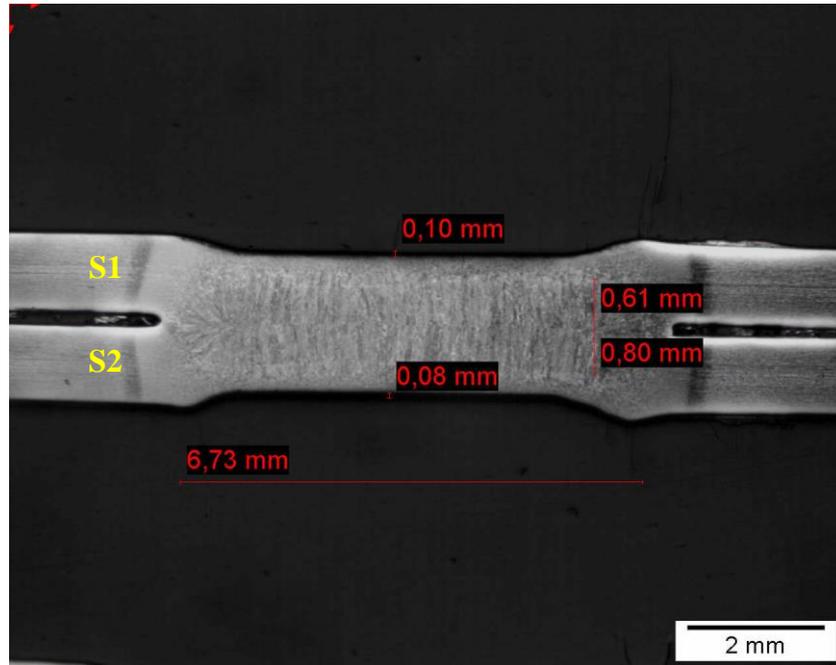
Parâmetros	Unidade	Especificado	Resultados
Espessuras	mm	1,20	1,20
P ₂	mm	≤ 0,36	0,11 (S1) ; 0,13 (S2)
F	mm	≥ 0,24	0,67 (S1) ; 0,58 (S2)
D	mm	≥ 4,50	6,34

Fonte: Próprio autor

Os parâmetros da solda no aço DC04, espessura de 1,20 mm são P₂ 0,11 mm (S1); 0,13 mm (S2), F 0,67 mm (S1); 0,58 mm (S2) e D 6,34 mm, e encontram-se de acordo com o especificado na norma PS.50004/01 (FCA PS.50004, 2019).

Na Tabela 13, são mostrados os resultados obtidos dos parâmetros da solda no aço DP 780, espessura de 1,20 mm, mostrado na Figura 12, conforme a norma PS.50004/01 (FCA PS.50004, 2019):

Figura 12: Seção transversal da solda a ponto no aço DP 780, espessura 1,20 mm.



S1 chapa superior e S2 chapa inferior

Fonte: Próprio autor

Tabela 13: Parâmetros da solda a ponto no aço DP 780, espessura 1,20 mm:

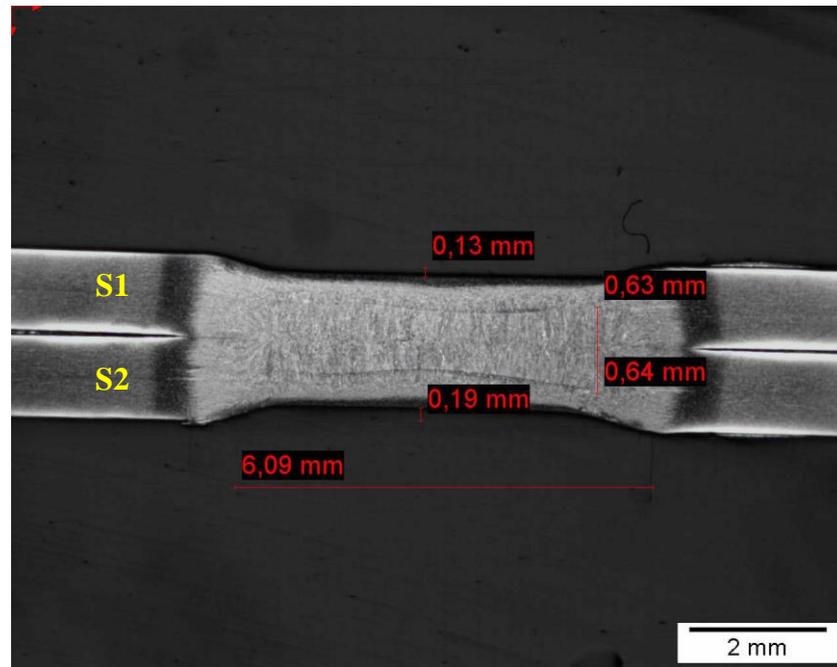
Parâmetros	Unidade	Especificado	Resultados
Espessuras	mm	1,20	1,20
P	mm	$\leq 0,36$	0,10 (S1) ; 0,08 (S2)
F	mm	$\geq 0,24$	0,61 (S1) ; 0,80 (S2)
D	mm	$\geq 4,50$	6,73

Fonte: Próprio autor

Os parâmetros da solda no aço DP 780, espessura de 1,20 mm são P₂ 0,10 mm (S1); 0,08 mm (S2), F 0,61 mm (S1); 0,80 mm (S2) e D 6,73 mm, e encontram-se de acordo com o especificado na norma PS.50004/01 (FCA PS.50004, 2019).

Na Tabela 14, são mostrados os resultados obtidos dos parâmetros da solda no aço TRIP 780, espessura de 1,20 mm, mostrado na Figura 13, conforme a norma PS.50004/01 (FCA PS.50004, 2019):

Figura 13: Seção transversal da solda a ponto no aço TRIP 780, espessura 1,20 mm.



S1 chapa superior e S2 chapa inferior
Fonte: Próprio autor

Tabela 14: Parâmetros da solda a ponto no aço TRIP 780, espessura 1,20 mm:

Parâmetros	Unidade	Especificado	Resultados
Espessuras	mm	1,20	1,20
P	mm	$\leq 0,36$	0,13 (S1) ; 0,19 (S2)
F	mm	$\geq 0,24$	0,63 (S1) ; 0,64 (S2)
D	mm	$\geq 4,50$	6,09

Fonte: Próprio autor

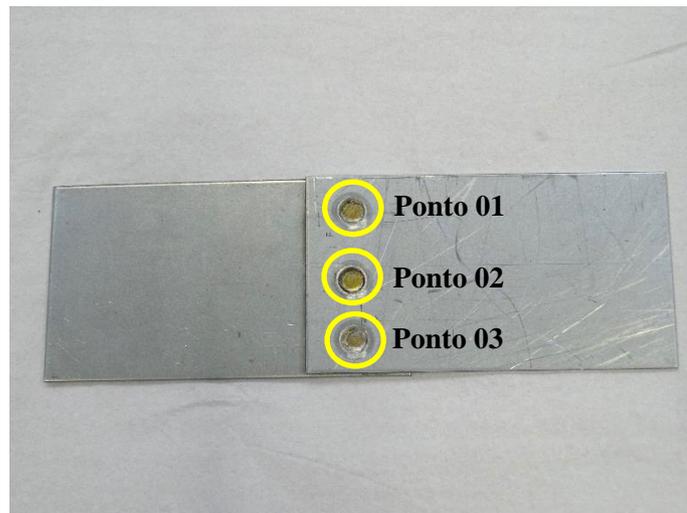
Os parâmetros da solda no aço TRIP 780, espessura de 1,20 mm são P₂ 0,13 mm (S1); 0,19 mm (S2), F 0,63 mm (S1); 0,64 mm (S2) e D 6,09 mm, e encontram-se de acordo com o especificado na norma PS.50004/01 (FCA PS.50004, 2019).

Janardhan et al. (2020), estudou solda a ponto e realizou as medidas dos parâmetros de solda similares as Figuras 10 a 13.

5.5 Ensaio de Ultrassom

Os ensaios de ultrassom foram feitos nos três pontos de solda nos três primeiros corpos de prova e os três últimos corpos de prova de cada material para garantir a qualidade de todo o processo de soldagem conforme mostrado na Figura 14, análise realizada conforme a norma PS.50004/01 (FCA PS.50004/01, 2019):

Figura 14: Corpo de prova soldado.



Fonte: Próprio autor

Nas figuras 15, 16, 17 e 18 são mostrados os resultados obtidos nos ensaios de ultrassom realizados nos aços DC04 espessuras 0,70 mm e 1,20 mm, DP 780 e TRIP 780 espessuras de 1,20 mm, conforme a norma PS.50004/01.

Na Figura 15, são mostrados os resultados obtidos nos ensaios de ultrassom realizados em um corpo de prova do aço DC04, espessura 0,70 mm, conforme a norma PS.50004/01, os demais corpos de prova analisados foram encontrados resultados similares (FCA PS.50004/01, 2019).

Figura 15 – Resultados dos ensaios de ultrassom no aço DC04, espessura 0,70 mm.

Resultado		Solda				Diâmetro			Indentação	
Resultado	Causa	ID	IM	Segurança	3T	Medido	Min.	Nom.	Medido	Especificado
Aprovado		1		Não	Não	4,9	3,5	3,5	0,09	0,04...0,39
Aprovado		2		Não	Não	4,5	3,5	3,5	0,04	0,04...0,39
Aprovado		3		Não	Não	5,1	3,5	3,5	0,15	0,04...0,39

ID (Identificação do ponto de solda); IM (Imagem do ponto de solda); (Formado por 03 chapas)
Fonte: Próprio Autor

Os resultados dos ensaios de ultrassom das soldas no aço DC04, espessura 0,70 mm conforme a Figura 15, a solda a ponto ID 01, a IM encontra-se homogênea, diâmetro de 4,9 mm e indentação 0,09 mm, a solda a ponto ID 02, a IM encontra-se homogênea, diâmetro de 4,5 mm, indentação 0,04 mm e a solda a ponto ID 03, a IM encontra-se homogênea, diâmetro 5,1 mm, indentação 0,15 mm, encontram-se de acordo com o especificado na norma PS.50004/01 (FCA PS.50004/01, 2019).

Na Figura 16, são mostrados os resultados obtidos nos ensaios de ultrassom realizados em um corpo de prova do aço DC04, espessura 1,20 mm, conforme a norma PS.50004/01, os demais corpos de prova analisados foram encontrados resultados similares (FCA PS.50004/01, 2019).

Figura 16 – Resultados do ensaio de ultrassom aço DC04, espessura 1,20 mm.

Resultado		Solda				Diâmetro			Indentação	
Resultado	Causa	ID	IM	Segurança	3T	Medido	Min.	Nom.	Medido	Especificado
Aprovado		1		Não	Não	4,5	4,5	4,5	0,14	0,07...0,72
Aprovado		2		Não	Não	4,7	4,5	4,5	0,13	0,07...0,72
Aprovado		3		Não	Não	4,7	4,5	4,5	0,1	0,07...0,72

ID (Identificação do ponto de solda); IM (Imagem do ponto de solda); (Formado por 03 chapas)
Fonte: Próprio Autor

Os resultados dos ensaios de ultrassom das soldas no aço DC04, espessura 1,20 mm conforme a Figura 16, a solda a ponto ID 01, a IM encontra-se homogênea, diâmetro 4,5 mm, indentação 0,14 mm, a solda a ponto ID 02, a IM encontra-se homogênea, diâmetro 4,7 mm, indentação 0,13 mm e a solda a ponto ID 03, a IM encontra-se homogênea, diâmetro 4,7 mm, indentação 0,10 mm, encontram-se de acordo com o especificado na norma PS.50004/01 (FCA PS.50004/01, 2019).

Na Figura 17, são mostrados os resultados obtidos nos ensaios de ultrassom realizados em um corpo de prova do DP 780, espessura 1,20 mm, conforme a norma PS.50004/01, os demais corpos de prova analisados foram encontrados resultados similares (FCA PS.50004/01, 2019).

Figura 17 – Resultados dos ensaios de ultrassom no aço DP 780, espessura 1,20 mm.

Resultado		Solda				Diâmetro			Indentação	
Resultado	Causa	ID	IM	Segurança	3T	Medido	Min.	Nom.	Medido	Especificado
Aprovado		1		Não	Não	5,1	4,5	4,5	0,23	0,07...0,72
Aprovado		2		Não	Não	4,9	4,5	4,5	0,24	0,07...0,72
Aprovado		3		Não	Não	5,3	4,5	4,5	0,25	0,07...0,72

ID (Identificação do ponto de solda); IM (Imagem do ponto de solda); (Formado por 03 chapas)

Fonte: Próprio Autor

Os resultados dos ensaios de ultrassom das soldas no aço DP 780, espessura 1,20 mm conforme a Figura 17, a solda a ponto ID 01, a IM encontra-se homogênea, diâmetro 5,1 mm, indentação 0,23 mm, a solda a ponto ID 02, a IM encontra-se homogênea, diâmetro 4,9 mm, indentação 0,24 mm e a solda a ponto ID 03, a IM encontra-se homogênea, diâmetro 5,3 mm, indentação 0,25 mm, encontram-se de acordo com o especificado na norma PS.50004/01 (FCA PS.50004/01, 2019).

Na Figura 18, são mostrados os resultados obtidos dos ensaios de ultrassom realizados em um corpo de prova do aço TRIP 780, espessura 1,20 mm, conforme a norma PS.50004/01, os demais corpos de prova analisados foram encontrados resultados similares (FCA PS.50004/01, 2019).

Figura 18 – Resultados dos ensaios de ultrassom no aço TRIP 780, espessura 1,20 mm.

Resultado		Solda				Diâmetro			Indentação	
Resultado	Causa	ID	IM	Segurança	3T	Medido	Min.	Nom.	Medido	Especificado
Aprovado		1		Não	Não	4,7	4,5	4,5	0,29	0,07...0,72
Aprovado		2		Não	Não	4,8	4,5	4,5	0,27	0,07...0,72
Aprovado		3		Não	Não	4,8	4,5	4,5	0,33	0,07...0,72

ID (Identificação do ponto de solda); IM (Imagem do ponto de solda); (Formado por 03 chapas)

Fonte: Próprio Autor

Os resultados dos ensaios de ultrassom das soldas no aço TRIP 780, espessura 1,20 mm conforme a Figura 18, a solda a ponto ID 01 a IM encontra-se homogênea, diâmetro 4,7 mm, indentação 0,29 mm, a solda a ponto ID 02, a IM encontra-se homogênea, diâmetro 4,8 mm, indentação 0,27 mm e a solda a ponto ID 03, a IM encontra-se homogênea, diâmetro 4,8 mm, indentação 0,33 mm, encontram-se de acordo com o especificado na norma PS.50004/01 (FCA PS.50004/01, 2019).

5.6 Ensaio e Cálculos de Fadiga

Os ensaios mecânicos dinâmicos de alto ciclo foram realizados para elaboração das curvas de fadiga S-N, seguindo as diretrizes do item 4.2.8, sendo 5 níveis de força com 3 amostras validas, no total de 15 amostras, os níveis de força foram definidos através de testes de forma que os ciclos fiquem na faixa da curva S-N 1.000 a 1.000.000 de ciclos aproximadamente, para os materiais DC04 com espessuras de 0,70 mm e 1,20 mm, DP 780 e TRIP 780 com espessura de 1,20 mm.

Na Tabela 15, são mostrados os resultados obtidos dos ensaios de fadiga, do aço DC04, espessura de 0,70 mm, foram realizados os ensaios nos níveis de força de 8.400, 6.900, 3.600, 2.400 e 1.800 N e os cálculos realizados conforme as fórmulas 2 a 6 do item 4.2.8:

Tabela 15: Resultados dos ensaios de fadiga do aço DC04, espessura 0,70 mm:

ID	F _{máx.} (N)	F _{mín.} (N)	F _{médio} (N)	F _{ampli} (N)	N ^o Ciclos
CP01	8.400	840	4.620	3.780	602
CP02	8.400	840	4.620	3.780	648
CP03	8.400	840	4.620	3.780	1059
CP04	6.900	690	3.795	3.105	12499
CP05	6.900	690	3.795	3.105	13485
CP06	6.900	690	3.795	3.105	11052
CP07	3.600	360	1.980	1.620	66547
CP08	3.600	360	1.980	1.620	95482
CP09	3.600	360	1.980	1.620	68974
CP10	2.400	240	1.320	1.080	339941
CP11	2.400	240	1.320	1.080	175178
CP12	2.400	240	1.320	1.080	269921
CP13	1.800	180	990	810	1101179
CP14	1.800	180	990	810	1006132
CP15	1.800	180	990	810	871359

Fonte: Próprio autor

Na Tabela 16, são mostrados os resultados dos cálculos realizados para elaboração da curva de fadiga S-N do aço DC04, espessura de 0,70 mm, os cálculos foram realizados conforme a fórmula 13 do item 4.2.8:

Tabela 16: Cálculos para a curva S-N do aço DC04, espessura 0,70 mm:

Log10(Sa)	Log10(2Nf)	Yi/ns	Xi/ns	$\Sigma[Yi-(A+BXi)]^2$	Xi-X	Yi-Y	(Xi-X) ²	(Xi-X)(Yi-Y)
3,92428	2,77960	0,18531	0,26162	0,25905	0,33330	-1,86832	0,11109	-0,62271
3,92428	2,81158	0,18744	0,26162	0,22752	0,33330	-1,83634	0,11109	-0,61205
3,92428	3,02490	0,20166	0,26162	0,06952	0,33330	-1,62302	0,11109	-0,54095
3,83885	4,09688	0,27313	0,25592	0,21149	0,24787	-0,55104	0,06144	-0,13659
3,83885	4,12985	0,27532	0,25592	0,24291	0,24787	-0,51807	0,06144	-0,12841
3,83885	4,04344	0,26956	0,25592	0,16520	0,24787	-0,60448	0,06144	-0,14983
3,55630	4,82313	0,32154	0,23709	0,00114	-0,03468	0,17521	0,00120	-0,00608
3,55630	4,97992	0,33199	0,23709	0,03631	-0,03468	0,33200	0,00120	-0,01151
3,55630	4,83869	0,32258	0,23709	0,00243	-0,03468	0,19077	0,00120	-0,00662
3,38021	5,53140	0,36876	0,22535	0,00057	-0,21077	0,88348	0,04442	-0,18621
3,38021	5,24348	0,34957	0,22535	0,06974	-0,21077	0,59556	0,04442	-0,12553
3,38021	5,43124	0,36208	0,22535	0,00582	-0,21077	0,78332	0,04442	-0,16510
3,25527	6,04186	0,40279	0,21702	0,00061	-0,33571	1,39394	0,11270	-0,46796
3,25527	6,00265	0,40018	0,21702	0,00021	-0,33571	1,35473	0,11270	-0,45480
3,25527	5,94020	0,39601	0,21702	0,00592	-0,33571	1,29228	0,11270	-0,43383

Fonte: Próprio autor

Na Tabela 17, são mostrados os resultados dos parâmetros calculados para elaboração da curva de fadiga S-N do aço DC04, espessura de 0,70 mm, os cálculos foram realizados conforme as fórmulas 08 a 13 do item 4.2.8 e utilizado os resultados da Tabela 16:

Tabela 17: Resultados dos cálculos para a curva S-N do aço DC04, espessura 0,70 mm:

Parâmetro	Valor
B	-4,0785
Â	19,2938
b	-0,2452
S'f	53776,76
CS'f	0,1180
s	0,3160

Fonte: Próprio autor

Na Tabela 18, são mostrados os resultados obtidos dos ensaios de fadiga, do aço DC04, espessura de 1,20 mm, foram realizados os ensaios nos níveis de força de 12.600, 9.600, 6.000, 3.600 e 3.000 N e os cálculos realizados conforme as fórmulas 2 a 6 do item 4.2.8:

Tabela 18: Resultados dos ensaios de fadiga do aço DC04, espessura 1,20 mm:

ID	F _{máx.} (N)	F _{mín.} (N)	F _{médio} (N)	F _{ampli} (N)	N° Ciclos
CP01	12.600	1.260	6.930	5.670	624
CP02	12.600	1.260	6.930	5.670	567
CP03	12.600	1.260	6.930	5.670	534
CP04	9.600	960	5.280	4.320	9.001
CP05	9.600	960	5.280	4.320	12.899
CP06	9.600	960	5.280	4.320	11.225
CP07	6.000	600	3.300	2.700	69.194
CP08	6.000	600	3.300	2.700	72.659
CP09	6.000	600	3.300	2.700	73.685
CP10	3.600	360	1.980	1.620	557.134
CP11	3.600	360	1.980	1.620	580.206
CP12	3.600	360	1.980	1.620	446.418
CP13	3.000	300	1.650	1.350	730.136
CP14	3.000	300	1.650	1.350	629.734
CP15	3.000	300	1.650	1.350	894.993

Fonte: Próprio autor

Na Tabela 19, são mostrados os resultados dos cálculos realizados para elaboração da curva de fadiga S-N do aço DC04, espessura de 1,20 mm, os cálculos foram realizados conforme a fórmula 13 do item 4.2.8:

Tabela 19: Cálculos para a curva S-N do aço DC04, espessura 1,20 mm:

Log10(Sa)	Log10(2Nf)	Yi/ns	Xi/ns	$\Sigma[Yi-(A+BXi)]^2$	Xi-X	Yi-Y	(Xi-X)²	(Xi-X)(Yi-Y)
4,10037	2,72754	0,18184	0,27336	0,16989	0,32153	-1,92137	0,10338	-0,61777
4,10037	2,75358	0,18357	0,27336	0,14910	0,32153	-1,89533	0,10338	-0,60940
4,10037	2,79518	0,18635	0,27336	0,11871	0,32153	-1,85373	0,10338	-0,59603
3,98227	3,95429	0,26362	0,26548	0,06772	0,20343	-0,69463	0,04138	-0,14131
3,98227	4,05019	0,27001	0,26548	0,12682	0,20343	-0,59873	0,04138	-0,12180
3,98227	4,11056	0,27404	0,26548	0,17347	0,20343	-0,53836	0,04138	-0,10952
3,77815	4,84007	0,32267	0,25188	0,03531	-0,00069	0,19115	0,00000	-0,00013
3,77815	4,86129	0,32409	0,25188	0,04373	-0,00069	0,21237	0,00000	-0,00015
3,77815	4,86738	0,32449	0,25188	0,04632	-0,00069	0,21846	0,00000	-0,00015
3,55630	5,64974	0,37665	0,23709	0,00191	-0,22254	1,00083	0,04952	-0,22272
3,55630	5,74596	0,38306	0,23709	0,00275	-0,22254	1,09704	0,04952	-0,24414
3,55630	5,76358	0,38424	0,23709	0,00491	-0,22254	1,11467	0,04952	-0,24806
3,47712	5,79916	0,38661	0,23181	0,07075	-0,30172	1,15024	0,09104	-0,34705
3,47712	5,86340	0,39089	0,23181	0,04070	-0,30172	1,21449	0,09104	-0,36644
3,47712	5,95182	0,39679	0,23181	0,01284	-0,30172	1,30290	0,09104	-0,39311

Fonte: Próprio autor

Na Tabela 20, são mostrados os resultados dos parâmetros calculados para elaboração da curva de fadiga S-N do aço DC04, espessura de 1,20 mm, os cálculos foram realizados conforme as fórmulas 8 a 13 do item 4.2.8 e utilizado os resultados da Tabela 19:

Tabela 20: Resultados dos cálculos para a curva S-N do aço DC04, espessura 1,20 mm:

Parâmetro	Valor
B	-4,6938
Â	22,3861
b	-0,2130
S'f	58786,27
CS'f	0,0927
s	0,2862

Fonte: Próprio autor

Na Tabela 21, são mostrados os resultados obtidos dos ensaios de fadiga, do aço DP 780, espessura de 1,20 mm, foram realizados os ensaios nos níveis de força de 12.600, 9.600, 6.000, 3.600 e 3.000 N e os cálculos realizados conforme as fórmulas 2 a 6 do item 4.2.8:

Tabela 21: Resultados dos ensaios de fadiga do aço DP 780, espessura 1,20 mm:

ID	F _{máx.} (N)	F _{mín.} (N)	F _{médio} (N)	F _{ampli} (N)	N ^o Ciclos
CP01	12.600	1.260	6.930	5.670	12.161
CP02	12.600	1.260	6.930	5.670	14.067
CP03	12.600	1.260	6.930	5.670	13.155
CP04	9.600	960	5.280	4.320	33.747
CP05	9.600	960	5.280	4.320	38.229
CP06	9.600	960	5.280	4.320	38.110
CP07	6.000	600	3.300	2.700	123.056
CP08	6.000	600	3.300	2.700	121.893
CP09	6.000	600	3.300	2.700	132.295
CP10	3.600	360	1.980	1.620	716.760
CP11	3.600	360	1.980	1.620	851.318
CP12	3.600	360	1.980	1.620	768.174
CP13	3.000	300	1.650	1.350	1.579.681
CP14	3.000	300	1.650	1.350	846.180
CP15	3.000	300	1.650	1.350	1.759.565

Fonte: Próprio autor

Na Tabela 22, são mostrados os resultados dos cálculos realizados para elaboração da curva de fadiga S-N do aço DP 780, espessura de 1,20 mm, os cálculos foram realizados conforme a fórmula 13 do item 4.2.8:

Tabela 22: Cálculos para a curva S-N do aço DP 780, espessura 1,20 mm:

Log10(Sa)	Log10(2Nf)	Yi/ns	Xi/ns	$\Sigma[Yi-(A+BXi)]^2$	Xi-X	Yi-Y	(Xi-X) ²	(Xi-X)(Yi-Y)
4,10037	4,08497	0,27233	0,27336	0,00238	0,32153	-1,07396	0,10338	-0,34531
4,10037	4,14820	0,27655	0,27336	0,00021	0,32153	-1,01073	0,10338	-0,32498
4,10037	4,11909	0,27461	0,27336	0,00021	0,32153	-1,03984	0,10338	-0,33434
3,98227	4,52824	0,30188	0,26548	0,00032	0,20343	-0,63069	0,04138	-0,12830
3,98227	4,58239	0,30549	0,26548	0,00520	0,20343	-0,57653	0,04138	-0,11728
3,98227	4,58104	0,30540	0,26548	0,00501	0,20343	-0,57789	0,04138	-0,11756
3,77815	5,09010	0,33934	0,25188	0,00505	-0,00069	-0,06882	0,00000	0,00005
3,77815	5,08598	0,33907	0,25188	0,00565	-0,00069	-0,07295	0,00000	0,00005
3,77815	5,12154	0,34144	0,25188	0,00157	-0,00069	-0,03738	0,00000	0,00003
3,55630	5,85537	0,39036	0,23709	0,00017	-0,22254	0,69645	0,04952	-0,15499
3,55630	5,93009	0,39534	0,23709	0,00379	-0,22254	0,77116	0,04952	-0,17162
3,55630	5,88546	0,39236	0,23709	0,00029	-0,22254	0,72653	0,04952	-0,16168
3,47712	6,19857	0,41324	0,23181	0,00602	-0,30172	1,03964	0,09104	-0,31368
3,47712	5,92746	0,39516	0,23181	0,03745	-0,30172	0,76854	0,09104	-0,23188
3,47712	6,24541	0,41636	0,23181	0,01548	-0,30172	1,08648	0,09104	-0,32781

Fonte: Próprio autor

Na Tabela 23, são mostrados os resultados dos parâmetros calculados para elaboração da curva de fadiga S-N do aço DP 780, espessura de 1,20 mm, os cálculos foram realizados conforme as fórmulas 08 a 13 do item 4.2.8 e utilizado os resultados da Tabela 22:

Tabela 23: Resultados dos cálculos para a curva S-N do aço DP 780, espessura 1,20 mm:

Parâmetro	Valor
B	-3,1885
Â	17,2079
b	-0,3136
S'f	249344,19
CS'f	0,0393
s	0,0826

Fonte: Próprio autor

Na Tabela 24, são mostrados os resultados obtidos dos ensaios de fadiga, do aço TRIP 780, espessura de 1,20 mm, foram realizados os ensaios nos níveis de força de 12.600, 9.600, 6.000, 4.800 e 3.600 N e os cálculos realizados conforme as fórmulas 2 a 6 do item 4.2.8:

Tabela 24: Resultados dos ensaios de fadiga do aço TRIP 780, espessura 1,20 mm:

ID	F_{máx.} (N)	F_{mín.} (N)	F_{médio} (N)	F_{ampli} (N)	N° Ciclos
CP01	12.600	1.260	6.930	5.670	8.668
CP02	12.600	1.260	6.930	5.670	9.330
CP03	12.600	1.260	6.930	5.670	8.439
CP04	9.600	960	5.280	4.320	24.869
CP05	9.600	960	5.280	4.320	23.045
CP06	9.600	960	5.280	4.320	24.466
CP07	6.000	600	3.300	2.700	183.112
CP08	6.000	600	3.300	2.700	143.427
CP09	6.000	600	3.300	2.700	151.771
CP10	4.800	480	2.640	2.160	320.520
CP11	4.800	480	2.640	2.160	430.709
CP12	4.800	480	2.640	2.160	273.261
CP13	3.600	360	1.980	1.620	865.176
CP14	3.600	360	1.980	1.620	1.140.414
CP15	3.600	360	1.980	1.620	1.514.758

Fonte: Próprio autor

Na Tabela 25, são mostrados os resultados dos cálculos realizados para elaboração da curva de fadiga S-N do aço TRIP 780, espessura de 1,20 mm, os cálculos foram realizados conforme a fórmula 13 do item 4.2.8:

Tabela 25: Cálculos para a curva S-N do aço TRIP 780, espessura 1,20 mm:

Log10(Sa)	Log10(2Nf)	Yi/ns	Xi/ns	$\Sigma[Yi-(A+BXi)]^2$	Xi-X	Yi-Y	(Xi-X)²	(Xi-X)(Yi-Y)
4,10037	3,93792	0,26253	0,27336	0,00000	0,28070	-1,08425	0,07879	-0,30435
4,10037	3,96988	0,26466	0,27336	0,00115	0,28070	-1,05229	0,07879	-0,29538
4,10037	3,92629	0,26175	0,27336	0,00009	0,28070	-1,09588	0,07879	-0,30762
3,98227	4,39566	0,29304	0,26548	0,00001	0,16260	-0,62651	0,02644	-0,10187
3,98227	4,36258	0,29084	0,26548	0,00092	0,16260	-0,65959	0,02644	-0,10725
3,98227	4,38856	0,29257	0,26548	0,00002	0,16260	-0,63361	0,02644	-0,10303
3,77815	5,26272	0,35085	0,25188	0,00638	-0,04152	0,24055	0,00172	-0,00999
3,77815	5,15663	0,34378	0,25188	0,00069	-0,04152	0,13446	0,00172	-0,00558
3,77815	5,18119	0,34541	0,25188	0,00000	-0,04152	0,15902	0,00172	-0,00660
3,68124	5,50586	0,36706	0,24542	0,00270	-0,13843	0,48368	0,01916	-0,06695
3,68124	5,63418	0,37561	0,24542	0,00583	-0,13843	0,61201	0,01916	-0,08472
3,68124	5,43658	0,36244	0,24542	0,01470	-0,13843	0,41441	0,01916	-0,05736
3,55630	5,93710	0,39581	0,23709	0,01085	-0,26336	0,91493	0,06936	-0,24096
3,55630	6,05706	0,40380	0,23709	0,00025	-0,26336	1,03489	0,06936	-0,27255
3,55630	6,18034	0,41202	0,23709	0,01934	-0,26336	1,15817	0,06936	-0,30502

Fonte: Próprio autor

Na Tabela 26, são mostrados os resultados dos parâmetros calculados para elaboração da curva de fadiga S-N do aço TRIP 780, espessura de 1,20 mm, os cálculos foram realizados conforme as fórmulas 08 a 13 do item 4.2.8 e utilizando os resultados da Tabela 25:

Tabela 26: Resultados dos cálculos para a curva S-N do aço TRIP 780, espessura 1,20 mm:

Parâmetro	Valor
B	-3,8695
Â	19,8024
b	-0,2584
S'f	131083,11
CS'f	0,0273
s	0,0696

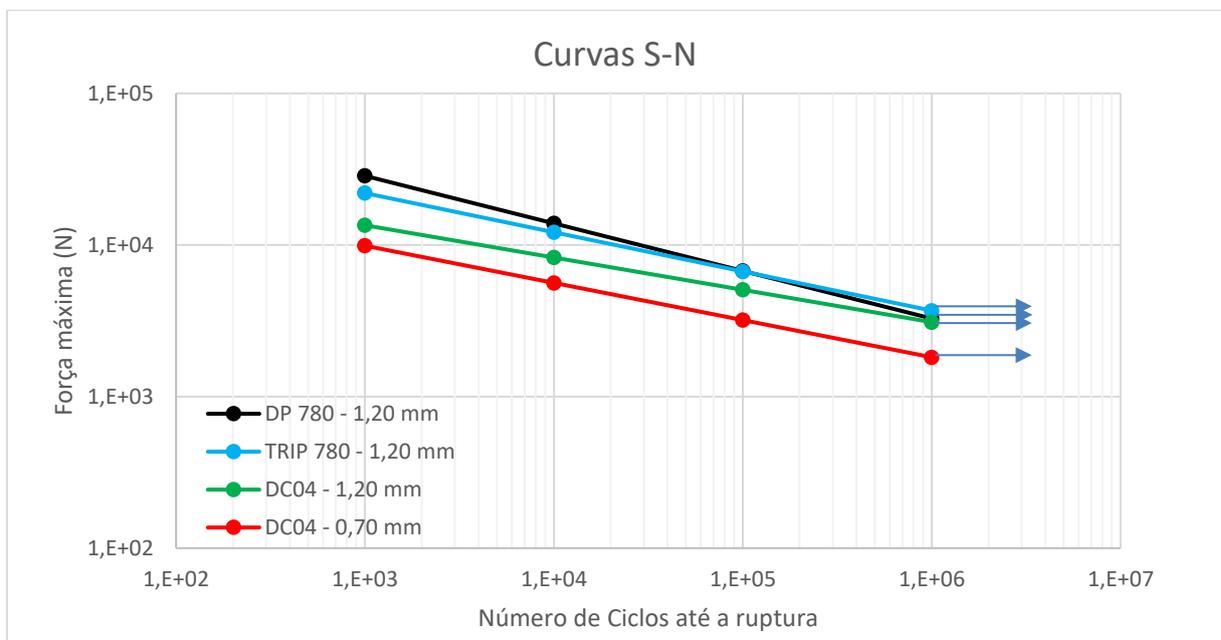
Fonte: Próprio autor

5.7 Curvas S-N

As curvas de fadiga foram plotadas utilizando a fórmula 7 do item 4.2.8, em 02 gráficos para facilitar a visualização sendo, as Curvas S-N com todos os aços e espessuras e as Curvas S-N com a abordagem de Owen com todos os aços e espessuras.

Na Figura 19, são mostrados os resultados das curvas S-N dos aços DC04 com espessuras de 0,70 mm e 1,20 mm, DP 780 e TRIP 780 com espessura de 1,20 mm.

Figura 19: Curvas S-N dos aços DC04 com espessuras de 0,70 mm e 1,20 mm, DP 780 e TRIP 780 com espessura de 1,20 mm.



Fonte: Próprio autor.

Para as curvas S-N na Figura 19, foi observado que a vida à fadiga de todas as amostras soldadas aumentou à medida que a força máxima reduziu. Este comportamento é esperado para materiais metálicos (MOHAMMED et al., 2020) evidenciando que os corpos soldados possuem característica em fadiga coerente com seus respectivos materiais. A vida infinita para os aços analisados foi considerada o valor de $1,0 \times 10^6$ ciclos e foram indicados com as setas horizontais. Além disto, em regiões de baixo ciclo, as soldas nos aços de maior resistência mecânica, TRIP 780 e DP 780, falharam com maiores valores de forças máximas que os aços DC04. Na região de $1,0 \times 10^3$ ciclos foi observada dispersão das curvas de até $1,8 \times 10^4$ N para os diferentes materiais e espessuras analisados, nesta região os corpos de prova dos aços DC04

0,7 mm e 1,2 mm apresentaram valores de força próximos de $1,0 \times 10^4$ N e $1,4 \times 10^4$ N, respectivamente, TRIP 780 apresentou valor de força de $2,2 \times 10^4$ N e o DP 780 de $2,8 \times 10^4$ N.

Com o aumento do número de ciclos foi observada a redução da dispersão das curvas para soldas realizadas nos aços com 1,20 mm de espessura, sendo que na faixa de $1,0 \times 10^6$ ciclos, os aços DC04, DP 780 e TRIP 780 apresentaram valores similares e próximos à $3,1 \times 10^3$ N, $3,3 \times 10^3$ N e $3,7 \times 10^3$ N respectivamente. Por outro lado, para a solda no material DC04 com 0,70 mm de espessura foi observado valor próximo de $1,8 \times 10^3$ N.

As curvas S-N dos aços na Figura 19, foram comparadas com os resultados de outros artigos, mas não foi encontrada na literatura o estudo semelhante para comparação direta dos resultados, os artigos encontrados os autores utilizaram corpos de prova com apenas um (01) ponto de solda. Entretanto, comparando com os valores encontrados nos aços analisados e plotados na Figura 19, pode observar que Kwon et al. (2021), estudou o aço TRIP1180 com espessura de 1,60 mm, e a Curva S-N encontra-se com valores médios de carregamento de 74,03 %, este valor é esperado por se tratar de material com maior valor de resistência mecânica e maior espessura. Cho et al. (2019), estudou o aço TRIP980 com espessura de 1,20 mm, e a Curva S-N encontra-se com valores médios de 39,85 %, o valor encontrado é próximo de 33% (um terço do corpo de prova com 03 pontos de solda), esperado um valor maior por se tratar de material com maior valor de resistência mecânica. Oikawa et al. (2007), estudou o aço TRIP780 com espessura de 1,20 mm e os resultados encontram-se com os pontos com valores médios de 50,63 %, os valores estão muito acima de 33% (um terço do corpo de prova com 03 pontos de solda) que são esperados por se tratar de material com a mesma resistência e espessura, observado que o autor não plotou a Curva S-N e superior ao artigo de Cho (2019), que estudou o aço TRIP980 com espessura de 1,20 mm.

Ghanbari et al. (2022), estudou o aço DP800 com espessura de 1,80 mm e os resultados encontra-se com pontos com valores médios de 33,41 %, os valores encontrados são próximos de 33% (um terço do corpo de prova com 03 pontos de solda), o valor é abaixo do esperado por se tratar de material com maior espessura, observado que o autor não plotou a Curva S-N. Ray et al. (2020), estudou o aço DP780 com solda a laser com espessura de 1,00 mm e os resultados dos pontos ensaiados encontra-se com valores médios de 48,39 % o valores encontrados estão acima de 33% (um terço do corpo de prova com 03 pontos de solda), mas foi utilizado o processo diferente de soldagem. Ren et al. (2022), estudou o aço DP980 com espessura de

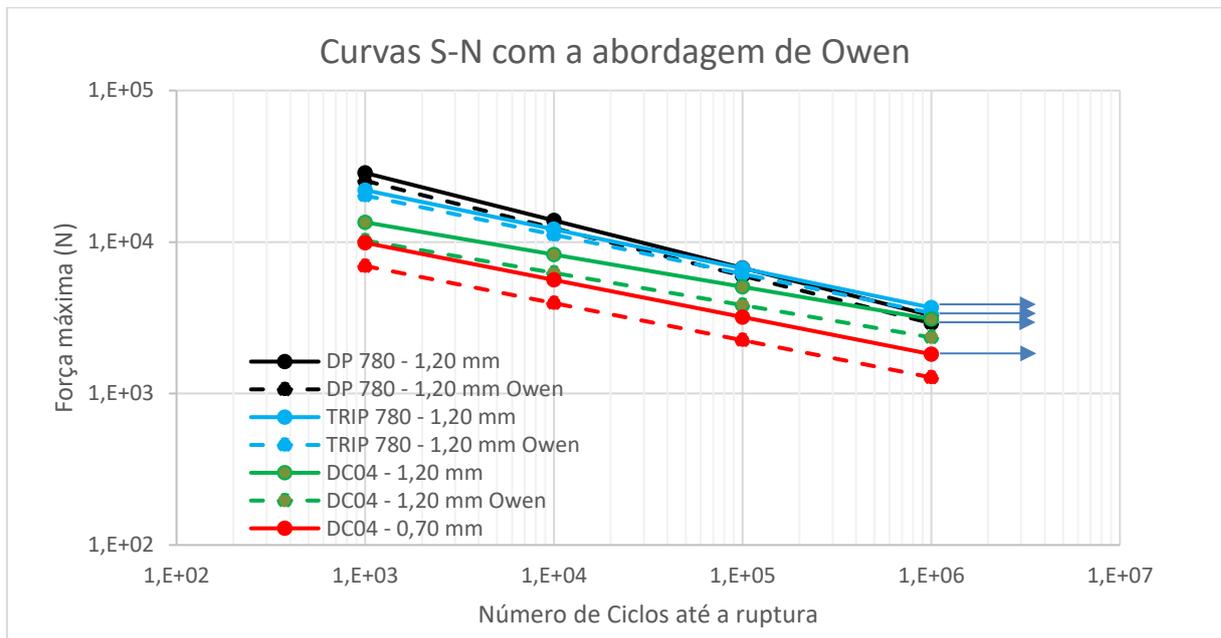
1,20 mm e a Curva S-N encontra-se com valores médios de 60,30 %, os valores encontrados estão muito acima de 33% (um terço do corpo de prova com 03 pontos de solda) por se tratar de material com a resistência uma classe maior do estudado e superior ao artigo de Ghanbari et al. (2022), que estudou o aço DP800 com espessura de 1,80 mm.

Kishore et al. (2021), estudou o aço IF com o aço DP600 com espessuras de 1,30 mm e os resultados encontra-se com pontos com valores médios de 55,76 %, os valores encontrados acima de 33% (um terço do corpo de prova com 03 pontos de solda) são esperados por tratar de material com maior espessura. Janardhan et al. (2021), estudou o aço IF com o aço HSNb com espessuras de 1,20 mm e a Curva S-N encontra-se com valores médios de 72,45 %, os valores encontrados estão muito acima de 33% (um terço do corpo de prova com 03 pontos de solda) por tratar de material de mesma espessura e superior ao artigo de Kishore et al. (2021), que estudou o aço IF com aço DP600 com espessuras de 1,30 mm. Oikawa et al. (2007), estudou o aço IF com espessura de 1,20 mm e os resultados encontram-se com pontos com valores médios de 43,46 %, os valores encontrados estão acima de 33% (um terço do corpo de prova com 03 pontos de solda) valor esperado por tratar de material de mesma espessura.

Observa-se na literatura que não há padronização do ensaio de fadiga e que alguns artigos pesquisados não fizeram a curva S-N apenas plotaram os resultados em gráficos, verifica-se a falta de linearidade dos resultados encontrados e resultados muito acima do esperado se comparado a outros artigos, evidenciando grande dispersão entre os resultados. Foi verificada a necessidade padronização do ensaio e a utilização de 03 pontos de solda para realização do ensaio de fadiga em solda a ponto, visto que utilizando a metodologia aqui descrita foi possível gerar as curvas S-N de 03 aços de classes diferentes e de espessuras diferentes com resultados coerentes comparados com os artigos estudados.

Na Figura 20, são mostrados os resultados das curvas S-N com a abordagem de Owen, dos aços DC04 com espessuras de 0,70 mm e 1,20 mm, DP 780 e TRIP 780 com espessura de 1,20 mm:

Figura 20: Curvas S-N com a abordagem de Owen dos aços DC04 com espessuras de 0,70 mm e 1,20 mm, DP 780 e TRIP 780 com espessura de 1,20 mm.



Fonte: Próprio autor.

Para as curvas S-N na Figura 20, foi observado com a abordagem Owen R90C90, as curvas dos aços DP 780 e TRIP 780, aproximaram na faixa de $1,0 \times 10^3$ ciclos e ocorreu a sobreposição das linhas com o aumento do número de ciclos. Na faixa de $3,0 \times 10^5$ ciclos houve a sobreposição da curva Owen do aço DP780 com a curva S-N do material DC04 espessura 1,20 mm. A curva Owen do aço DC04, espessura 1,20 mm sobrepôs a curva S-N do aço DC04, espessura 0,70 mm na faixa de $1,0 \times 10^3$ ciclos e ocorreu o distanciamento das curvas com o aumento dos ciclos, faixa de $1,0 \times 10^4$ ciclos. Foi observado a maior dispersão entre as curvas Owen R90C90 em relação as curvas S-N para os aços DC04, isso ocorreu devido aos níveis de forças selecionados na execução do ensaio, com números inferiores a $1,0 \times 10^3$ ciclos, logo alto valor de força. Esta diferença aumenta o valor do desvio padrão “s”, cálculo utilizado na plotagem das linhas da abordagem Owen R90C90 causando o deslocamento maior das curvas.

Para a faixa de vida finita em fadiga, faixa em que a força de amplitude mostra uma tendência decrescente em relação ao número de ciclos, esta abordagem de Owen permitiu modelar a incerteza associada à análise de regressão (TRIDELLO et al., 2022). O método de Owen garante que os dados usados na derivação dos parâmetros de fadiga são apropriados e indicativo do comportamento físico do material. O uso do método permite a derivação precisa dos parâmetros de fadiga e assim o uso de simulação de software de fadiga para encurtar o ciclo de

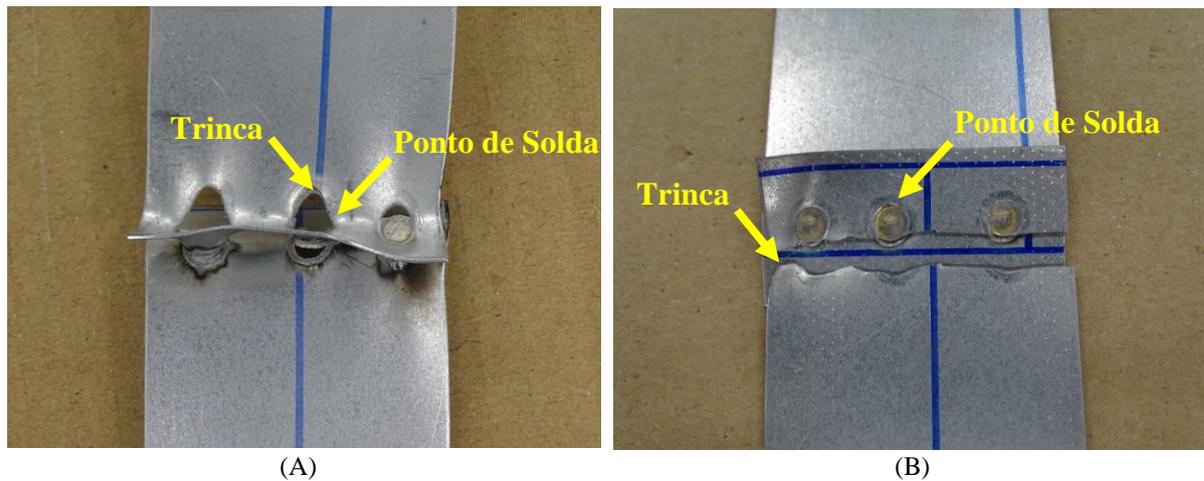
desenvolvimento do produto, reduzindo o número de iterações no projeto e ciclo de teste (WILLIAMS; LEE; RILLY, 2003).

5.8 Análise Visual das Fraturas dos Corpos de Prova

Foram realizadas as análises visuais nos corpos de prova com menor e maior número de ciclos dos aços DC04 com espessuras de 0,7 mm e 1,2 mm e DP780 e TRIP780 com espessura de 1,2 mm para compreender o comportamento da propagação das trincas, mostrados nas Figuras 21, 22, 23 e 24 respectivamente.

Na Figura 21, são mostradas as fraturas nos corpos de prova do aço DC04, espessura 0,70 mm, o corpo de prova número 04 com 12.499 ciclos e o corpo de prova número 14 com 1.006.132 ciclos, conforme a Tabela 15.

Figura 21: Fraturas nos corpos de prova no aço DC04, espessura 0,70 mm.



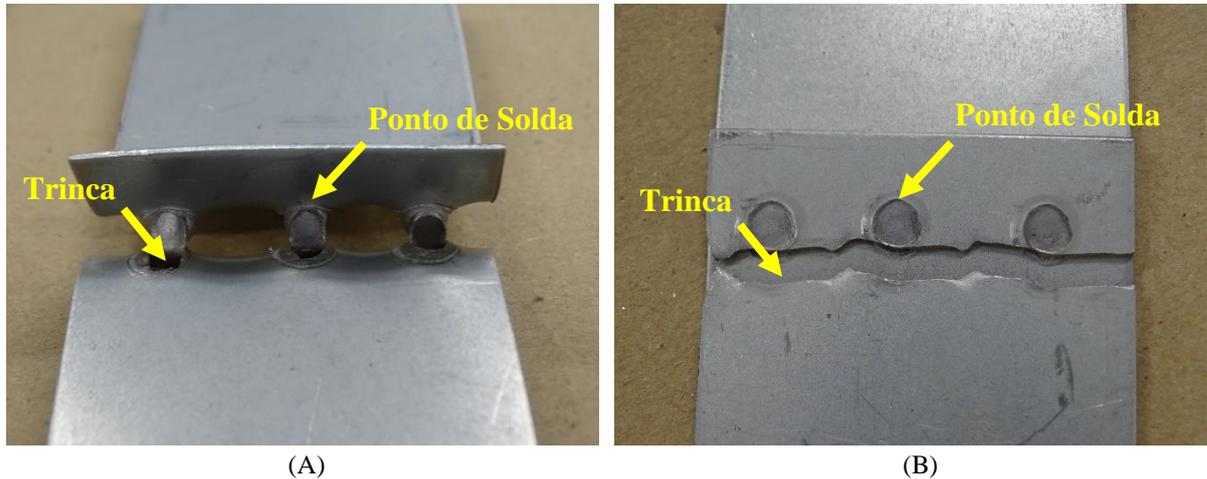
Fonte: Próprio autor

A Figura 21 (A), o corpo de prova 04 (12.499 ciclos) do aço DC04, espessura 0,70 mm, com maior força e menor número de ciclos, apresentou a propagação da trinca ao redor dos pontos de solda.

A Figura 21 (B), o corpo de prova 14 (1.006.132 ciclos) do aço DC04, espessura 0,70 mm, com menor força e maior número de ciclos, apresentou a propagação da trinca por toda a extensão da largura do corpo de prova e paralela aos pontos de solda.

Na Figura 22, são mostradas as fraturas nos corpos de prova do aço DC04, espessura 1,20 mm, o corpo de prova número 05 com 12.899 ciclos e o corpo de prova número 14 com 629.734 ciclos, conforme a Tabela 18.

Figura 22: Fraturas nos corpos de no aço DC04, espessura 1,20 mm.



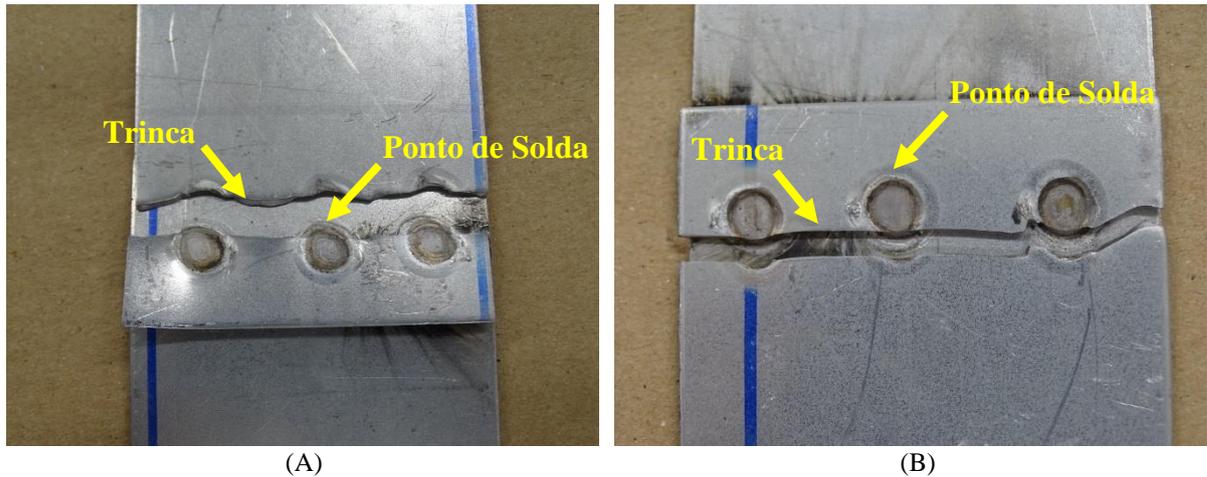
Fonte: Próprio autor

A Figura 22 (A), o corpo de prova 05 (12.899 ciclos) do aço DC04, espessura 1,20 mm, com maior força e menor número de ciclos, apresentou a propagação da trinca ao redor dos pontos de solda.

A Figura 22 (B), o corpo de prova 14 (629.734 ciclos) do aço DC04, espessura 1,20 mm com menor força e maior número de ciclos apresentou a propagação da trinca por toda a extensão da largura do corpo de prova e paralela aos pontos de solda.

Na Figura 23, são mostradas as fraturas nos corpos de prova do aço DP 780, espessura 1,20 mm, o corpo de prova número 01 com 12.161 ciclos e o corpo de prova número 13 com 1.579.681 ciclos, conforme a Tabela 21.

Figura 23: Fraturas nos corpos de prova no aço DP 780, espessura 1,20 mm.

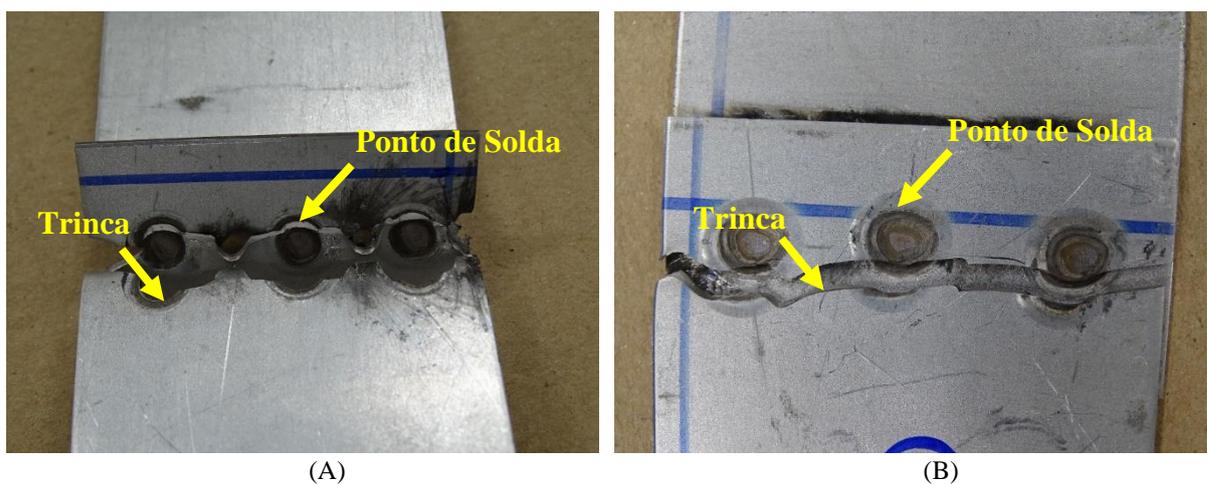


Fonte: Próprio autor

A Figura 23 (A), o corpo de prova 01 (12.161 ciclos) do aço DP 780, espessura 1,20 mm, com maior força e menor número de ciclos e a Figura 23 (B), o corpo de prova 13 (1.579.681 ciclos) com menor força e maior número de ciclos, apresentaram a propagação da trinca por toda a extensão da largura do corpo de prova e paralela aos pontos de solda.

Na Figura 24, são mostradas as fraturas nos corpos de prova do material TRIP 780, espessura 1,20 mm, o corpo de prova número 01 com 8.668 ciclos e o corpo de prova número 14 com 1.140.414 ciclos, conforme a Tabela 24.

Figura 24: Fraturas nos corpos de prova no aço TRIP 780, espessura 1,20 mm.



Fonte: Próprio autor

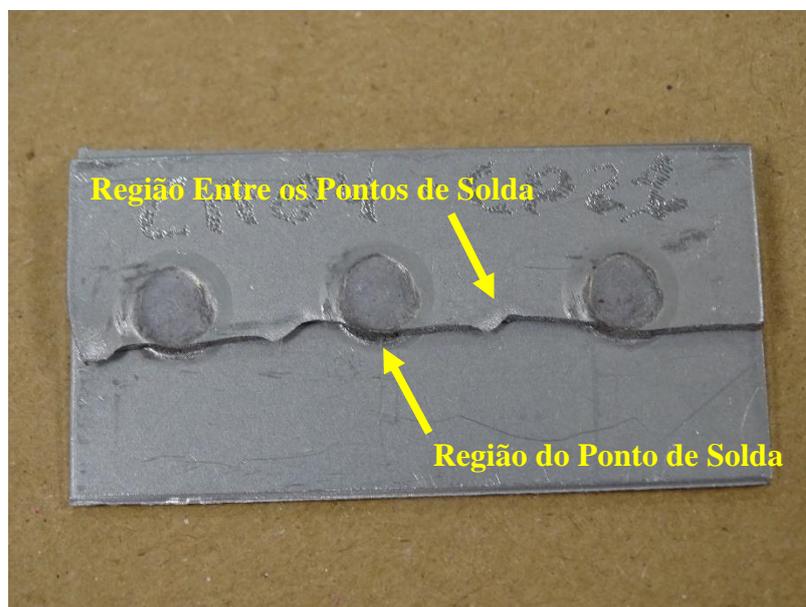
A Figura 24 (A), o corpo de prova 01 (8.668 ciclos) do aço TRIP 780, espessura 1,20 mm, com maior força e menor número de ciclos, apresentou a propagação da trinca ao redor dos pontos de solda.

A Figura 24 (B), o corpo de prova 14 (1.140.414 ciclos) do aço TRIP 780, espessura 1,20 mm com menor força e maior número de ciclos, apresentou a propagação da trinca por toda a extensão da largura do corpo de prova e paralela aos pontos de solda.

5.9 Análise das Fraturas no Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV)

Foram analisadas as fraturas dos corpos de prova com maior e menor número de ciclos dos materiais ensaiados (Figuras 21 a 24) na região do ponto de solda e na região entre os pontos de solda no Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) para melhor compreender os mecanismos de fratura, conforme mostrado na Figura 25.

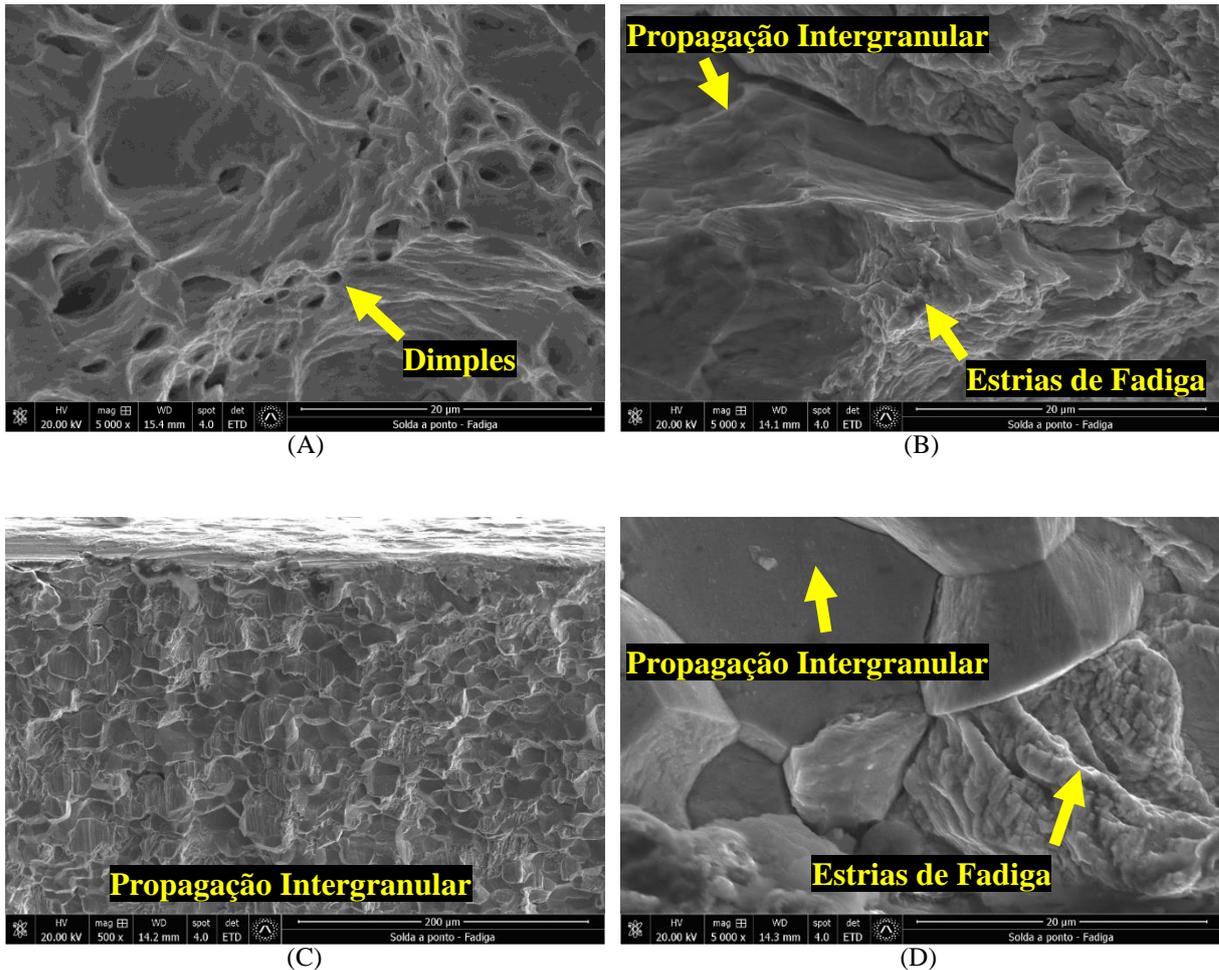
Figura 25: Identificação das regiões das fraturas analisadas no MEV.



Fonte: Próprio autor

Na Figura 26 são mostradas as fraturas do aço DC04, espessura 0,70 mm, o corpo de prova 04 com 12.499 ciclos na região do ponto de solda e o corpo de prova 14 com 1.006.132 ciclos na região do ponto de solda e na região entre os pontos de solda.

Figura 26: Análise no MEV dos corpos de prova 04 e 14, aço DC04, espessura de 0,70 mm.



Fonte: Próprio autor

Na Figura 26 (A), é apresentada a imagem da região do ponto de solda no corpo de prova 04 (12.499 ciclos) região dúctil com micromecanismos formados essencialmente por dimples, morfologia típica de fratura de deformação plástica.

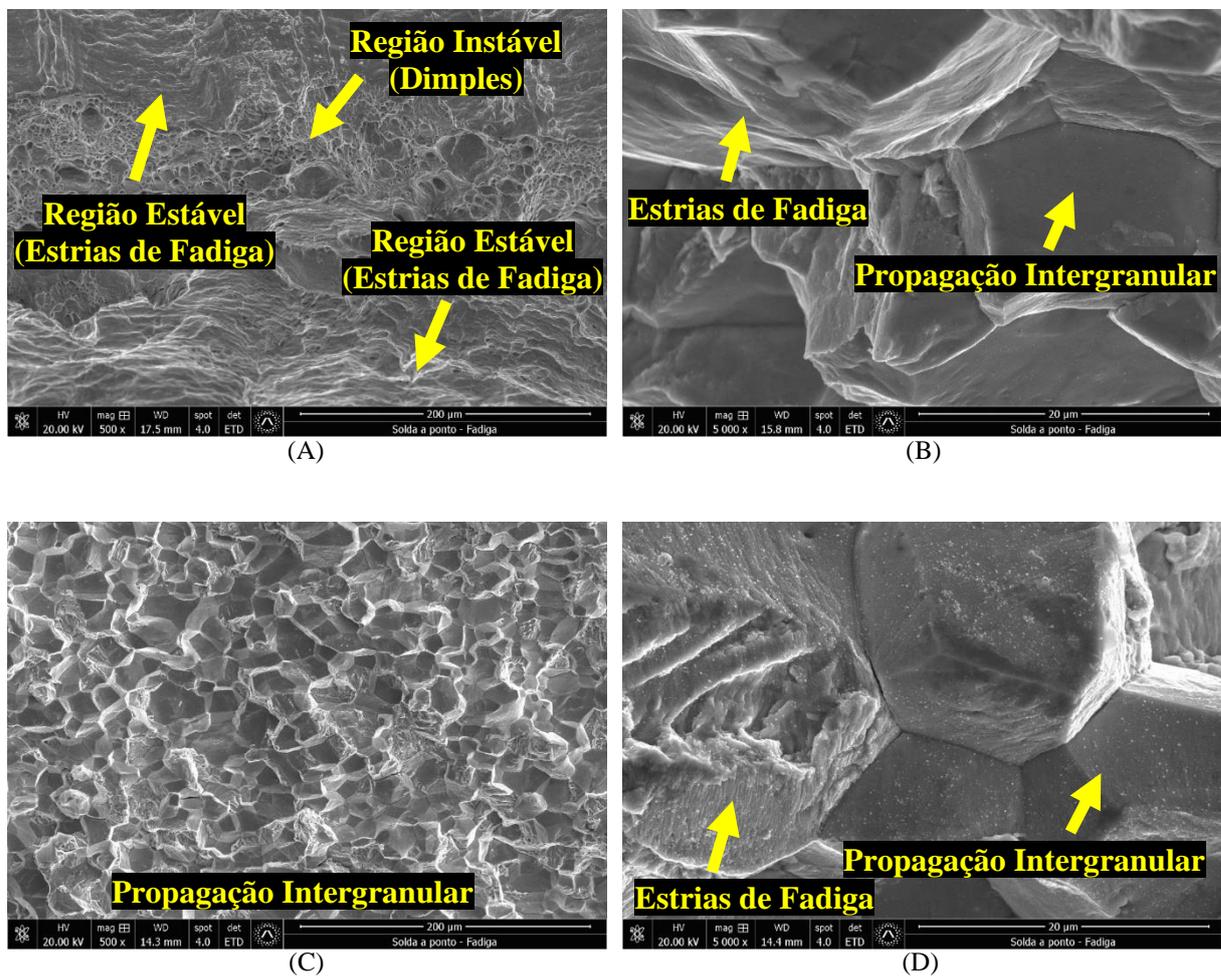
Na Figura 26 (B), é apresentada a imagem da região do ponto de solda no corpo de prova 14 (1.006.132 ciclos) estrias de fadiga com propagação de trincas intergranulares, morfologia típica de fratura por fadiga.

Na Figura 26 (C), é apresentada a imagem da região entre os pontos de solda no corpo de prova 14 (1.006.132 ciclos) propagação de trinca por fadiga intergranular, morfologia típica de fratura por fadiga.

Na Figura 26 D, é apresentada a imagem em maior ampliação da região entre os pontos de solda no corpo de prova 14 (1.006.132 ciclos) estrias de fadiga e propagação de trincas intergranulares, morfologia típica de fratura por fadiga.

Na Figura 27, são mostradas as fraturas do aço DC04, espessura 1,20 mm, o corpo de prova 05 com 12.899 ciclos na região do ponto de solda e o corpo de prova 14 com 629.734 ciclos na região do ponto de solda e na região entre os pontos de solda.

Figura 27: Análise no MEV dos corpos de prova 05 e 14, aço DC04, espessura de 1,20 mm.



Fonte: Próprio autor

Na Figura 27 (A), é apresentada a imagem da região do ponto de solda no corpo de prova 04 (12.899 ciclos) propagação mista da trinca, morfologia e estria de fadiga com propagação estável da trinca e micromecanismos formados por dimples referente a região de propagação instável da trinca. Morfologia de fratura por fadiga e deformação plástica (sobrecarga).

Na Figura 27 (B), é apresentada a imagem da região do ponto de solda no corpo de prova 14 (629.734 ciclos) região com estrias de fadiga no contorno de grão e propagação de trinca intergranular, morfologia típica de fratura por fadiga.

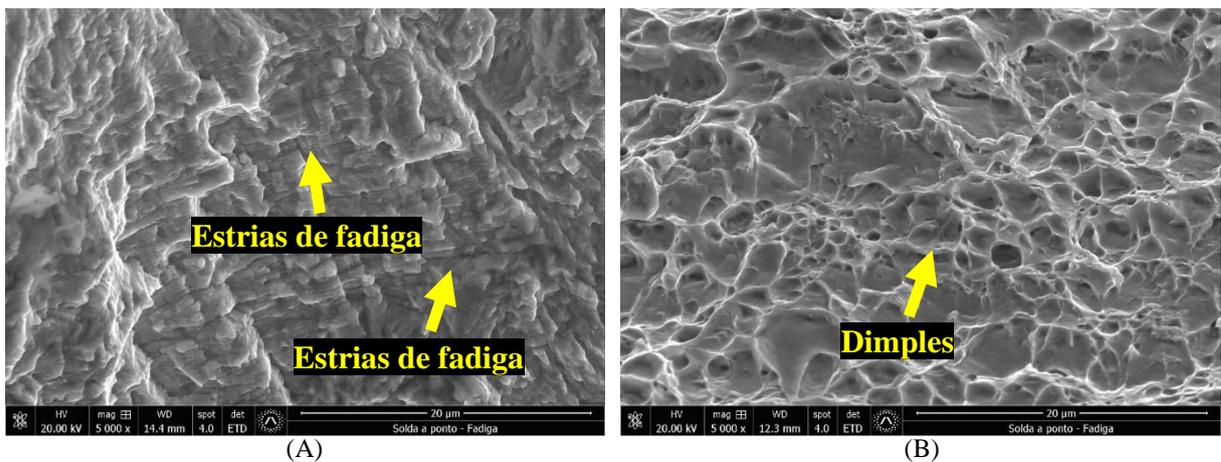
Na Figura 27 (C), é apresentada a imagem da região entre os pontos de solda no corpo de prova 14 (629.734 ciclos) região com propagação de trinca por fadiga intergranular, morfologia típica de fratura por fadiga.

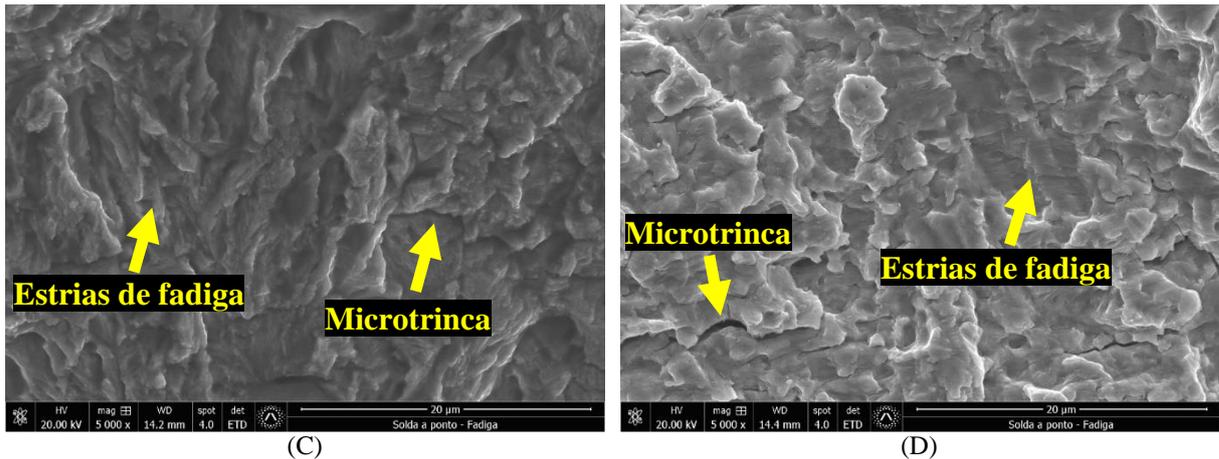
Na Figura 27 (D), é apresentada a imagem em maior ampliação da região entre os pontos de solda no corpo de prova 14 (629.734 ciclos) região com estrias de fadiga no contorno de grão e propagação de trinca intergranular, morfologia típica de fratura por fadiga.

James et al. (2010), Sajadifar et al.(2019) e Lin et al. (2019) estudaram os aços IF e verificaram que são conhecidos por apresentarem propagação de trinca intergranular durante a fadiga similares às morfologias encontradas nos aços IF analisados.

Na Figura 28 são mostradas as fraturas do aço DP 780, espessura 1,20 mm, o corpo de prova 01 com 12.161 ciclos e o corpo de prova 13 com 1.579.681 ciclos na região do ponto de solda e na região entre os pontos de solda.

Figura 28: Análise no MEV dos corpos de prova 01 e 13, aço DP 780, espessura de 1,20 mm.





Fonte: Próprio autor

Na Figura 28 (A), é apresentada a imagem da região do ponto de solda no corpo de prova 01 (12.161 ciclos) região com micromecanismos formados por estrias de fadiga, propagação transgranular da trinca, morfologia típica de fratura por fadiga.

Na Figura 28 (B), é apresentada a imagem da região entre os pontos de solda no corpo de prova 01 (12.161 ciclos) região com morfologia dúctil com micromecanismos formados essencialmente por dimples, estrutura típica de fratura com deformação plástica.

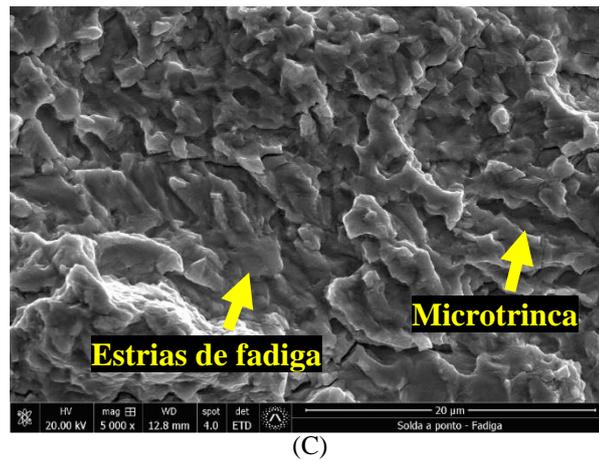
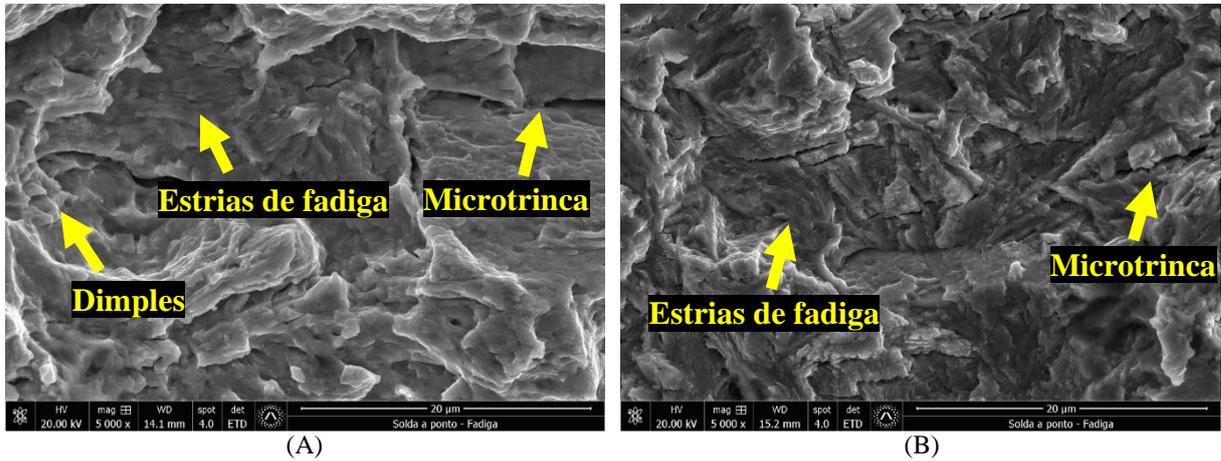
Na Figura 28 (C), é apresentada a imagem da região do ponto de solda no corpo de prova 13 (1.579.681 ciclos) região com micromecanismos formados por estrias de fadiga e presença de microtrincas, correspondente a propagação transgranular da trinca.

Na Figura 28 (D), é apresentada a imagem da região entre os pontos de solda no corpo de prova 13 (1.579.681 ciclos) região com micromecanismos formados por estrias de fadiga e presença de microtrincas, correspondente a propagação transgranular da trinca.

Das et al. (2019) e Ghanbari et al. (2022) estudaram o aço DP e analisaram a micrografia pela microscopia eletrônica de varredura a superfície da fratura do corpo de prova após o ensaio de fadiga e o resultado apresentou estrias de fadiga e propagação transgranular, morfologia similar ao encontrado no aço DP 780.

Na Figura 29 são mostradas as fraturas do aço TRIP 780, espessura 1,20 mm, o corpo de prova 01 com 8.668 ciclos na região do ponto de solda e o corpo de prova 14 com 1.140.414 ciclos na região do ponto de solda e na região entre os pontos de solda.

Figura 29: Análise no MEV dos corpos de prova 01 e 14, aço TRIP 780, espessura de 1,20 mm.



Fonte: Próprio autor

Na Figura 29 (A), é apresentada a imagem da região do ponto de solda no corpo de prova 01 (8.668 ciclos) região com micromecanismos formados por estrias de fadiga, dimples e presença de microtrincas, correspondente a propagação transgranular da trinca.

Na Figura 29 (B), é apresentada a imagem da região do ponto de solda no corpo de prova 14 (1.140.414 ciclos) região com micromecanismos formados por estrias de fadiga e presença de microtrincas, correspondente a propagação transgranular da trinca.

Na Figura 29 (C), é apresentada a imagem da região entre os pontos de solda no corpo de prova 14 (1.140.414 ciclos) região com micromecanismos formados por estrias de fadiga e presença de microtrincas, correspondente a propagação transgranular da trinca.

Zhang et al. (2021) e Rykavets et al. (2019) estudaram o aço TRIP e a micrografia analisada pela microscopia eletrônica de varredura após o ensaio de fadiga apresentaram trincas com propagação transgranular, estrutura lamelar e grande quantidade de ramificações de trincas, morfologia similar ao encontrado no aço TRIP 780.

6. CONCLUSÃO

Através dos resultados dos ensaios realizados pela metodologia desenvolvida, foi possível verificar o comportamento mecânico, quanto à fadiga de alto ciclo, em solda a ponto nos aços DP 780, TRIP 780 e DC04, utilizando as curvas S-N e a abordagem de Owen e os mecanismos de fratura envolvidos nas rupturas dos corpos de prova através da técnica de microscopia eletrônica de varredura.

Foi desenvolvida uma metodologia confiável para o ensaio de fadiga em solda a ponto através do uso do corpo de prova com 03 pontos de solda ao em vez de 01 ponto de solda, para minimizar o efeito da dispersão dos resultados. Utilizando 03 pontos de solda no corpo de prova, ocorreu a repetibilidade dos resultados e os valores obtidos nos ensaios levaram a uma menor dispersão nos resultados, além de ser a condição mais próxima da utilizada na carroceria do veículo.

Os gráficos das curvas S-N mostraram a influência da resistência do material de mesma espessura, na faixa próxima de $1,0 \times 10^3$ ciclos e a redução da influência da resistência do material na faixa $1,0 \times 10^6$ ciclos. Já o material com menor espessura, DC04 com 0,70 mm de espessura, manteve a distância constante da curva do material DC04, espessura de 1,20 mm.

Foi observado também a importância da seleção dos dados para elaboração da curva de Owen visto a maior dispersão entre as curvas Owen R90C90 em relação as curvas S-N para os aços DC04, isso ocorreu devido aos níveis de força selecionados na execução do ensaio, os valores influenciam o desvio padrão “s”, cálculo utilizado na plotagem das linhas da abordagem Owen R90C90 causando o deslocamento maior das curvas.

As análises das fraturas dos corpos de prova foram evidenciadas a influência da resistência do material, onde na região de maior força e menor número de ciclos as fraturas apresentaram deformação por sobrecarga (deformação plástica do material), na qual a resistência do material tem influência neste tipo de morfologia. E as análises nos corpos de prova com a menor força e maior número de ciclos apresentaram fraturas típicas de fadiga, onde foi verificado a redução da influência da resistência dos materiais neste tipo de fratura.

Com os resultados deste trabalho, vimos que o uso de curvas S-N para a solda a ponto de “Multimateriais”, podem subdimensionar alguns pontos e superdimensionar outros. Para a aplicação na indústria automobilística ou em outro segmento que necessite de eficácia, o melhor é utilizar a curva S-N de solda a ponto específica para cada material e espessura, pois pode impactar diretamente na performance do projeto.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICA

- AKKAS, N. et al. The effect of nugget sizes on mechanical properties in resistance spot welding of S235JR(Cu) steel sheets used in railway vehicles. **Acta Physica Polonica A**, v. 130, n. 1, p. 60–63, 2016.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E739 - 10 Standard Practice for Statistical Analysis of Linear or Linearized Stress-Life (S-N) and Strain-Life (ϵ -N) Fatigue Data**. 2004
- AMERICAN WELDING SOCIETY, **Welding Handbook**. v. 1, 2001
- BURDA, I. et al. Fatigue crack propagation behavior of a micro-bainitic TRIP steel. **Materials Science and Engineering A**, v. 840, 18 abr. 2022.
- CHEN, J. et al. Uncertainty quantification of fatigue S-N curves with sparse data using hierarchical Bayesian data augmentation. **International Journal of Fatigue**, v. 134, n. December 2019, p. 105511, 2020.
- CHIAVERINI, V. **Tecnologia Mecânica - Materiais de Construção Mecânica Vol. III**. 2 ed ed. São Paulo: McGraw-Hill Ltda., 1986.
- CHO, H. et al. Fatigue behaviors of resistance spot welds for 980 MPa grade TRIP steel. **Metals**, v. 9, n. 10, 2019.
- COSTA, P. et al. Dilatometric study of continuous cooling transformation of intercritical austenite in cold rolled AHSS-DP steels. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 19, p. 4360–4370, jul. 2022.
- DANCETTE, S. et al. Experimental and modeling investigation of the failure resistance of Advanced High Strength Steels spot welds. **Engineering Fracture Mechanics**, v. 78, n. 10, p. 2259–2272, 2011.
- DAS, B. et al. Influence of pre-straining path on high cycle fatigue performance of DP 600 steel. **International Journal of Fatigue**, v. 126, n. February, p. 369–380, 2019.
- EL-SHERBINY, A. et al. Replacement of silicon by aluminum with the aid of vanadium for galvanized TRIP steel. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 9, n. 3, p. 3578–3589, 2020.
- ENAMI, M.; SOHRABIAN, LM.; FARAHANI, M. Evaluation of mechanical properties of Resistance Spot Welding and Friction Stir Spot Welding on Aluminium Alloys. **International Conference on researches in Science and Engineering**. July 2016.
- ERTAS, A. H. et al. Measurement and assessment of fatigue life of spot-weld joints. **Journal of Engineering Materials and Technology, Transactions of the ASME**, v. 131, n. 1, p. 0110111–01101111, 2009.

FARIVAR, H. et al. Experimental quantification of carbon gradients in martensite and its multi-scale effects in a DP steel. **Materials Science and Engineering A**, v. 718, n. January, p. 250–259, 2018.

FARRAHI, G. H.; AHMADI, A.; REZA KASYZADEH, K. Simulation of vehicle body spot weld failures due to fatigue by considering road roughness and vehicle velocity. **Simulation Modelling Practice and Theory**, v. 105, n. August, p. 102168, 2020.

GHANBARI, H. R. et al. Effects of spot welded parameters on fatigue behavior of ferrite-martensite dual-phase steel and hybrid joints. **Engineering Failure Analysis**, v. 134, 1 abr. 2022.

GOU RUI-BIN; DAN WEN-JIAO; ZHANG WEI-GANG. Influence of Spot Welding on Welding Fatigue Properties of CR340 Steel Joints. **Journal of Iron and Steel Research**, p. 822–827, 2016.

INSTITUTION, B. S. **BS EN 10346:2009 Continuously hot-dip coated steel flat products - Technical delivery conditions**. [s.l: s.n.].

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 12107**. Metallic materials - Fatigue testing - Statistical planning and analysis of data. Test, v. 2012, n. Reapproved, 2012.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 1099**. Metallic materials — Fatigue testing — Axial force-controlled method. v. 2017, 2017.

JAMES, M. N. Intergranular crack paths during fatigue in interstitial-free steels. **Engineering Fracture Mechanics**, v. 77, n. 11, p. 1998–2007, jul. 2010.

JANARDHAN, G. et al. Tensile and fatigue behavior of resistance spot-welded HSLA steel sheets: Effect of pre-strain in association with dislocation density. **Materials Science and Engineering: A**, v. 793, p. 139796, ago. 2020.

JANARDHAN, G. et al. Fatigue Properties of Resistance Spot Welded Dissimilar Interstitial-Free and High Strength Micro-Alloyed Steel Sheets. **Metals and Materials International**, v. 27, n. 9, p. 3432–3448, 1 set. 2021.

JANARDHAN, G.; MUKHOPADHYAY, G.; DUTTA, K. Failure behaviour of Spot-welds on automotive steel sheets. **Materials Today: Proceedings**, v. 62, n. P10, p. 6120–6124, 1 jan. 2022.

JUGRAJ, S. **MS.50002 SHEET STEEL FOR AUTOMOTIVE APPLICATION**. FIAT CHRYSLER AUTOMOBILES, 2020.

KIM, J. et al. **Decarbonizing the iron and steel industry: A systematic review of sociotechnical systems, technological innovations, and policy options**. **Energy Research and Social Science** Elsevier Ltd, , 1 jul. 2022a.

KIM, M. S. et al. Evolution of the microstructure and mechanical properties of interstitial-free steel during multi-axial diagonal forging. **Materials Science and Engineering A**, v. 846, 27 jun. 2022b.

KISHORE, K.; KUMAR, P.; MUKHOPADHYAY, G. Microstructure, Tensile and Fatigue Behaviour of Resistance Spot Welded Zinc Coated Dual Phase and Interstitial Free Steel. **Metals and Materials International**, 2021.

KUMAR, A.; PAUL, S. K. Restoration of ductility in hydrogen embrittled dual-phase (DP 780) steel by the electric pulse treatment. **Materials Science and Engineering A**, v. 847, 7 jul. 2022.

KWON, K. et al. Effect of type-C liquid metal embrittlement on mechanical properties of spot-welded TRIP steel. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 13, p. 2482–2490, 1 jul. 2021.

LEE, H.; YU, J. Development of fuzzy controller for inverter DC resistance spot welding using system identification. **Journal of Mechanical Science and Technology**, v. 31, n. 8, p. 3961–3968, 2017.

LEE, Y. L.; TAYLOR, D. Stress-Based Fatigue Analysis and Design. Em: LEE, Y.-L. et al. (Eds.). **Fatigue Testing and Analysis**. Burlington: Elsevier Butterworth-Heinemann, 2005. p. 103–180.

LI, C. et al. Determination of the fatigue P-S-N curves – A critical review and improved backward statistical inference method. **International Journal of Fatigue**, v. 139, n. March, p. 105789, 2020a.

LI, W. et al. The combined influence of grain size distribution and dislocation density on hardness of interstitial free steel. **Journal of Materials Science and Technology**, v. 45, p. 35–43, 15 maio 2020b.

LIN, X. et al. Resistance to mechanically small fatigue crack growth in ultrafine grained interstitial-free steel fabricated by accumulative roll-bonding. **International Journal of Fatigue**, v. 118, p. 117–125, 1 jan. 2019.

LONG, H.; HU, Y.; JIN, X. Stress intensity factor solutions and fatigue estimation for dual phase and low-carbon steel spot weld. **Theoretical and Applied Fracture Mechanics**, v. 96, n. June, p. 408–417, 2018.

LY, A. L.; FINDLEY, K. O. The effects of pre-straining conditions on fatigue behavior of a multiphase TRIP steel. **International Journal of Fatigue**, v. 87, p. 225–234, 2016.

MARQUES, P. V.; MODENESI, P. J.; BRACARENSE, A. Q. **Soldagem Fundamentos e Tecnologia**. 3° ed. Belo Horizonte: UFMG, 2009.

MOHAMMED, S. M. A. K. et al. Ultrasonic spot welding of a clad 7075 aluminum alloy: Strength and fatigue life. **International Journal of Fatigue**, v. 141, 1 dez. 2020.

MUKHERJEE, S. et al. Insitu investigation of tensile deformation behaviour of cold-rolled interstitial-free high-strength steel in scanning electron microscope. **Materials Science and Engineering A**, v. 776, 3 mar. 2020.

NORMUNG, D. I. FUR. **EN 10130:2007-02 - Cold rolled low carbon steel flat products for cold forming - Technical delivery conditions**. Berlin: [s.n.].

OIKAWA, H. et al. **RESISTANCE SPOT WELDABILITY OF HIGH STRENGTH STEEL SHEETS FOR AUTOMOBILES AND THE QUALITY ASSURANCE OF JOINTS** Steel Corporation (Japan) 2 Forming Technologies R&D Center, Steel Research laboratories, Nippon Steel Corporation (Japan) 3 Smart Welding Technologies (United States) World, v 51, n° 3/4 , 2007.

OLIAEI, M.; JAMAATI, R. Improvement of the strength-ductility-toughness balance in interstitial-free steel by gradient microstructure. **Materials Science and Engineering A**, v. 845, 15 jun. 2022.

ORDOÑEZ, J. H. et al. Overloading effect on the fatigue strength in resistance spot welding joints of a DP980 steel. **International Journal of Fatigue**, v. 121, n. December 2018, p. 163–171, 2019.

ÖZTÜRK, E.; ARIKAN, H. Investigation of mechanical properties of laser welded dual-phase steels at macro and micro levels. **Optics & Laser Technology**, v. 157, p. 108713, jan. 2023.

PARANTHAMAN, V.; SUNDARAM, & K. S.; NATRAYAN, & L. Effect of Silica Content on Mechanical and Microstructure Behaviour of Resistance Spot Welded Advanced Automotive TRIP Steels. [s.d.], 2021.

PARK, G. et al. A comparison of cross-tension properties and fracture behavior between similar and dissimilar resistance spot-weldments in medium-Mn TRIP steel. **Materials Science and Engineering A**, v. 752, n. January, p. 206–216, 2019.

PORNPUTSIRI, N.; KANLAYASIRI, K. Effect of bending temperatures on the microstructure and springback of a TRIP steel sheet. **Defence Technology**, v. 16, n. 5, p. 980–987, 1 out. 2020.

PROKHORENKO, O. et al. **Numerical simulation of the kinetics of temperature and phase composition in a butt joint made from steel DC04 during a single-pass submerged arc welding**. Procedia Structural Integrity. **Anais...Elsevier B.V.**, 2022.

RAJARAJAN, C. et al. **Influence of electrode force on metallurgical studies and mechanical properties of resistance spot welded dual phase (DP800) steel joints**. Materials Today: Proceedings. **Anais...Elsevier Ltd**, 2020.

RAO, S. S. et al. Resistance spot welding of galvanized high strength interstitial free steel. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 246, p. 252–261, 2017.

RAY, T. et al. Fatigue behaviour of laser spot welds in dual phase 780 steel. **International Journal of Fatigue**, v. 132, 1 mar. 2020.

REN, S. et al. Post-weld cold working for fatigue strength improvement of resistance spot welded joint of advanced high-strength steel. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 299, 1 jan. 2022.

ROODGARI, M. R.; JAMAATI, R.; JAMSHIDI AVAL, H. A new method to produce dual-phase steel. **Materials Science and Engineering A**, v. 803, 28 jan. 2021.

RYKAVETS, Z. M. et al. Investigation of the microstructure and properties of trip 800 steel subjected to low-cycle fatigue. **Progress in Physics of Metals**, v. 20, n. 4, p. 620–633, 2019.

SAJADIFAR, S. V. et al. Effect of grain size on the very high cycle fatigue behavior and notch sensitivity of titanium. **Theoretical and Applied Fracture Mechanics**, v. 104, 1 dez. 2019.

SŁOWIK, M. et al. Steel packaging production process and a review of new trends. **Archives of Metallurgy and Materials**, v. 66, n. 1, p. 135–143, 2021.

SRIVASTAVA, A. K.; PATRA, P. K.; JHA, R. AHSS applications in Industry 4.0: Determination of optimum processing parameters during coiling process through unsupervised machine learning approach. **Materials Today Communications**, v. 31, 1 jun. 2022.

STANDARD, I. ISO 6892-1 Metallic materials — Tensile testing — Part 1: Method of test at room temperature 1. **Metallic Materials**, v. 2009, p. 64, 2009.

TAYLOR, T. et al. TRIP assisted press hardened steel by the anisothermal bainitic ferrite transformation. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 289, n. May 2020, p. 116950, 2021.

TRIDELLO, A. et al. Design against fatigue failures: Lower bound P-S-N curves estimation and influence of runout data. **International Journal of Fatigue**, v. 162, 1 set. 2022.

WANG, W. et al. Microstructure and mechanical properties of friction stir welded joint of TRIP steel. **Journal of Manufacturing Processes**, v. 56, p. 623–634, 1 ago. 2020.

WEI, P. S.; WU, T. H. Electrical contact resistance effect on resistance spot welding. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 55, n. 11–12, p. 3316–3324, 2012.

WILLIAM, T. **PS.50004/01 Welding - Resistance Spot**. FIAT CHRYSLER AUTOMOBILES, 2019.

WILLIAMS, C. R.; LEE, Y. L.; RILLY, J. T. A practical method for statistical analysis of strain-life fatigue data. **International Journal of Fatigue**, v. 25, n. 5, p. 427–436, 2003.

XU, P. Determination of Fatigue Crack Initiation and Crack Propagation at Spot Welded Joints with High-Precision Thermometry. **Welding in the World**, v. 48, n. 11–12, p. 14–17, 2004.

ZHANG, Z. et al. Three-dimensional characterization of low-cycle fatigue crack morphology in TRIP-maraging steel: Crack closure, geometrical uncertainty and wear. **International Journal of Fatigue**, v. 143, 1 fev. 2021.

ZU, T. et al. α -S-N curve: A novel S-N curve modeling method under small-sample test data using uncertainty theory. **International Journal of Fatigue**, v. 139, n. May, p. 105725, 2020.