



INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO PIAUÍ

PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E INOVAÇÃO

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**ANÁLISE DOS EFEITOS DA SOLDAGEM TIG AUTÓGENA NO AÇO DP 1200
GALVANIZADO**

CARLA RAÍLLA SANTOS DE OLIVEIRA

Orientador: Prof. Dr. AYRTON DE SÁ BRANDIM

TERESINA – PI

2021

CARLA RAÍLLA SANTOS DE OLIVEIRA

**ANÁLISE DOS EFEITOS DA SOLDAGEM TIG AUTÓGENA NO AÇO DP 1200
GALVANIZADO**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais do Instituto Federal do Piauí, como parte integrante dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Materiais.

Área de concentração: Processamento e Caracterização de Materiais

Orientador: Prof. Dr. Ayrton de Sá Brandim

TERESINA – PI

2021

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD

Oliveira, Carla Raílla Santos de
O48a Análise dos efeitos da soldagem TIG autógena no aço DP 1200 galvanizado
/ Carla Raílla Santos de Oliveira. - 2021.
72 f.: il. color.

Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) - Instituto Federal do
Piauí, Campus Teresina Central, 2021.
Orientador : Prof. Dr. Ayrton de Sá Brandim.

1. Soldagem TIG. 2. Aço DP1200. 3. Aços Avançados de Alta Resistência
(AHSS). I. Título.

CDD - 620.1

Elaborado por Sindya Santos Melo CRB 3/1085

ANÁLISE DOS EFEITOS DA SOLDAGEM TIG AUTÓGENA NO AÇO DP 1200 GALVANIZADO

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais do Instituto Federal do Piauí, como parte integrante dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Materiais.

Aprovada em: 08/07/2021.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Ayrton de Sá Brandim (Orientador)
Instituto Federal do Piauí (IFPI)

Prof. Prof. Dr. José Francisco dos Reis Sobrinho
Instituto Federal do Piauí (IFPI)

Prof. Prof. Dr. Edilson Marinho da Silva Júnior
Instituto Federal do Maranhão (IFMA)

“Toda glória pertence, assim, Àquele que nelas
tudo realizou.”
(Escritos Shalom)

AGRADECIMENTOS

A Deus pela condução, providência e generosidade durante esse caminho de descoberta profissional.

Ao Professor Doutor Ayrton de Sá Brandim, meu orientador, que foi exemplo de profissional. Agradeço pelo conhecimento compartilhado e por todo empenho em fazer um bom trabalho.

Aos membros da banca examinadora, pela disponibilidade e solicitude para participar e colaborar com a defesa.

A USIMINAS pela colaboração e envio do material necessário para realização da pesquisa.

A CAPES, pelo financiamento da pesquisa.

Ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Materiais do Instituto Federal do Piauí, em especial ao coordenador Prof. Dr. Gilvan Paz, por todo auxílio durante esse processo.

A minha turma de mestrado, em especial a Aline Arcanjo e Joanne Bruna, pela amizade, cuidado e companheirismo compartilhado durante esse tempo.

Aos meus pais, Carlos Augusto e Maria do Socorro, pelo apoio e suporte, me deixando livre para fazer minhas escolhas e investido no meu futuro profissional.

A todos os meus amigos e familiares que sempre me incentivaram durante essa etapa.

A todos os meus irmãos e amigos da Comunidade Católica Shalom, especialmente Gessika Gomes, Bruna Ribeiro, Luís Henrique e Luna Veneza, pelo companheirismo, intercessão e ombro amigo nos dias difíceis.

RESUMO

A utilização dos AHSS (Aços Avançados de Alta Resistência) vem sendo cada vez mais difundida na indústria automobilística. No entanto, alguns aços dessa classificação, como os aços DP, necessitam ser estudados mais profundamente para uma possível aplicação no setor, devido as propriedades do material após o processo de soldagem. Um dos processos menos utilizados para a união dos aços DP é o processo de soldagem TIG. Com isso, o presente estudo tem como objetivo analisar os efeitos da soldagem do tipo TIG autógena, no Aço DP 1200 galvanizado. Analisando o material após soldagem para a verificação do ciclo térmico e a influência do mesmo nas propriedades mecânicas do material. Foi observado um aumento na energia de soldagem e aporte térmico, quando comparados com o material com metal de adição. Tal fato, afetou as propriedades mecânicas do material pois a grande quantidade de calor na chapa favoreceu a transformações de fases, o surgimento da fase austenita retida foi de fundamental importância para as respostas mecânicas do material, como microdureza, tenacidade e tração. O material apresentou menores valores de limite de resistência a tração quando comparado ao material como recebido. Com base nos resultados obtidos é possível concluir que processo de soldagem TIG autógeno para o aço DP 1200 apresentou alterações no ciclo térmico de soldagem, microestrutura e propriedades mecânicas, quando comparado com o mesmo processo utilizando metal de adição.

Palavras-chave: Soldagem TIG. Aço DP1200. AHSS.

ABSTRACT

The use of AHSS (Advanced High Strength Steels) has been increasingly widespread in the automobile industry. However, some steels of this classification, such as DP steels, need to be studied more deeply for a possible application in the sector, due to the material properties after the welding process. One of the least used processes for joining DP steels is the TIG welding process. Thus, this study aims to analyze the effects of autogenous TIG welding on galvanized DP 1200 Steel. Analyzing the material after welding to verify the thermal cycle and its influence on the material's mechanical properties. An increase in welding energy and heat input was observed when compared to the filler metal material. This fact affected the mechanical properties of the material because the large amount of heat in the plate favored phase transformations, the appearance of the retained austenite phase was of fundamental importance for the mechanical responses of the material, such as microhardness, toughness and traction. The material had lower tensile strength limit values when compared to the material as received. Based on the results obtained, it is possible to conclude that the autogenous TIG welding process for DP 1200 steel presented changes in the welding thermal cycle, microstructure and mechanical properties, when compared to the same process using filler metal.

Keywords: Welding GTAW. Steel DP1200. AHSS.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Classificação e geração dos AHSS.....	19
Figura 2. Microestrutura do Aço DP1200.	21
Figura 3. Tratamento térmico – Aços DP.	22
Figura 4. Chapas do Aço DP 1200 após o corte.	39
Figura 5. Chapas com ponto de solda.....	40
Figura 6. Microdurômetro.	41
Figura 7. Microscópio Óptico Olympus CX-31.....	42
Figura 8. Difrátômetro para amostras policristalinas.	43
Figura 9. Máquina de Teste de Impacto modelo JBW-300Z.	44
Figura 10. Máquina universal de ensaios AGS-X – Shimadzu.	45
Figura 11. Microestrutura MB aço DP1200 após a soldagem.	51
Figura 12. Microestrutura aço DP1200 como recebido.	51
Figura 13. Microestrutura - ZTA e MB.	52
Figura 14. Microestrutura ZF e ZTA.	53
Figura 15. Difratograma - Aço DP1200 após a soldagem.	54
Figura 16. Difratograma - Aço Dp1200 como recebido.	55
Figura 17. Gráfico - Perfil de microdureza – Aço DP1200.....	57
Figura 18. Corpos de prova após o ensaio.	59
Figura 19. Curva tensão x deformação.	61
Figura 20. Curva tensão deformação - Aço DP1200 s/ solda.....	62
Figura 21. Fratura corpo de prova.....	62

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Composição química - %peso.....	46
Tabela 2. Composição química – ppm.....	46
Tabela 3. Parâmetros de soldagem – Aço DP1200.	48
Tabela 4. Parâmetros de soldagem – Aço DP1200 com metal de adição.	49
Tabela 5. Resultados da análise de microdureza.....	56
Tabela 6. Dados Tenacidade - Aço DP1200.	58
Tabela 7. Dados - Ensaio de Tração.....	60
Tabela 8. Dados - ensaio de tração aço DP1200 s/ solda.	61

LISTA DE QUADROS

Quadro 1. Descrição dos trabalhos – Soldagem por Fricção.	24
Quadro 2. Descrição dos trabalhos – MIG/MAG.	26
Quadro 3. Descrição dos trabalhos – Soldagem à laser.	27
Quadro 4. Trabalhos encontrados – Soldagem por resistência a ponto.....	32
Quadro 5. Trabalhos encontrados - TIG.....	38
Quadro 6. Relação entre Ceq e pré-aquecimento.....	48

LISTA DE ABREVIACÕES

AHSS - *Advanced High Strength Steels*

CAL – *Continuous Annealing Line*

CBN – Nitreto De Boro Cúbico

CP – *Complex Phase*

CTS - Cross-Tension Strength

DIC - Correlação de Imagem Digital

DP – *Dual phase*

DRX - Técnica de Difração de Raios X

EBSD - *Electron Back Scatter Diffraction*

EDS - Espectroscopia de Energia Dispersiva

FBJ - *Friction Bit Joining*

FE-SEM - Microscópio Eletrônico de Varredura De Emissão de Campo

FLW - *Fiber Laser Welded*

FSSW - *Friction Stir Spot Welding*

FSW - *Friction stir welding*

GA – Liga Zn-Fe

GI – Imersão A Quente Com Zinco Puro

HF – *Hot-Formed*

LBW - *Laser Beam Welding*

LME - *Liquid Metal Embrittlement*

MEV - Microscopia Eletrônica de Varredura

MIG/MAG – *Metal Inert Gas*

MO - Microscopia óptica

Mpa – Megapascal

MS – Aço Martensítico

MB – Metal de Base

OIM - Microscopia de Imagem de Orientação

PCBN – Nitreto De Boro Cúbico Policristalino

QGA - Algoritmo Genético Quântico

RSM - Método de Superfície de Resposta

RSW - Soldagem por Resistência a Ponto

TIG – *Tungsten Inert Gas*

TRIP – *Transformation Induced Plasticity*

TSS - *Tension-Shear Strength*

TWB - *Tailor Welded Blanks*

TWIP – Plasticidade Induzida Por Maclação

WDS - Espectroscopia Dispersiva de Comprimento de Onda

ZTA – Zona Termicamente Afetada

ZF – Zona Fundida

LRT – Limite de Resistência à Tração

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
2	OBJETIVOS	16
2.1	GERAL	16
2.2	ESPECÍFICOS	16
3	JUSTIFICATIVA	17
4	REFERENCIAL TEÓRICO	18
1.1	AHSS	18
4.1.1.	Aços Dual-phase	20
4.1.1.1.	Microestrutura	20
4.1.1.2	Obtenção	22
4.2	PROCESSOS DE SOLDAGEM APLICADOS NOS AÇOS DUAL PHASE	23
4.2.1	Soldagem por Fricção	23
4.2.2	Soldagem MIG/MAG	26
4.2.3	Soldagem à Laser	27
4.2.4	Soldagem por resistência a ponto	31
4.2.5	Soldagem TIG	37
5	METODOLOGIA	39
5.1	CARACTERÍSTICAS DO AÇO DP 1200	39
5.1.1	Composição Química	40
5.2	SOLDAGEM DO MATERIAL	40
5.3	MICRODUREZA	41
5.4	METALOGRAFIA	41
5.5	DRx	42
5.6	ENSAIO DE IMPACTO	43
5.7	ENSAIO DE TRAÇÃO	44
6	RESULTADOS E DISCUSSÃO	46
6.1	SOLDABILIDADE DO AÇO DP 1200	46
6.1.1	Temperatura de Fusão e Carbono Equivalente (Ceq)	46
6.1.2	Análise Térmica	48
6.2	ANÁLISE MICROESTRUTURAL	50
6.3	ANÁLISE CRISTALOGRÁFICA	54
6.4	PROPRIEDADES MECÂNICAS	56

6.4.1 Microdureza	56
6.4.2 Tenacidade.....	58
6.1.3 Ensaio de Tração.....	60
7 CONCLUSÃO.....	64
REFERENCIAS	66

1 INTRODUÇÃO

Durante a Primeira Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente e Desenvolvimento, realizada na Suécia na década de 70, o termo desenvolvimento sustentável foi aplicado e difundido nas mais diversas áreas industriais e de serviços. Para a indústria automobilística a união de crescimento econômico sem comprometer os recursos ambientais, é um desafio atual. Desde então busca-se alternativas para a produção de veículos mais leves, que ocasionará um menor consumo de combustível e emissão de gases poluentes.

Os AHSS apresentaram resultados promissores em comparação aos aços convencionais utilizados nesse setor, principalmente em termos de resistência com uma menor espessura de chapa. No entanto, era necessário aliar os parâmetros de resistência com bons parâmetros de deformação, para favorecer o desempenho e processos de fabricação das estruturas automobilísticas.

Tais aços podem ser classificados, como: aços de fase dupla (DP – Dual Phase), aços de fase complexa (CP – Complex Phase), aços de plasticidade induzida por transformação (TRIP – Transformation Induced Plasticity) e aços martensíticos (MS – Martensitic).

Os aços classificados como de fase dupla (DP) são assim denominados, pois são compostos de fase martensita dispersa na fase ferrita. Essa composição bifásica proporciona elevada resistência ao material, mediante a presença da fase martensita e a boa ductilidade se dá pela fase ferrita. Os aços do tipo DP são classificados de acordo com a sua resistência à tração que pode variar de 500 a 1200 Mpa.

Mediante a realização de um processo chamado, CAL – *Continuous Annealing Line*, ou seja, recozimento contínuo é possível obter a peça galvanizada. A galvanização é realizada para proteger o material de agentes corrosivos. Para efetuar o recozimento são necessárias seis etapas, cada uma delas produz uma microestrutura distinta e ao final do processo obtêm-se o aço de duas fases, martensita e ferrita.

As etapas do processo de recozimento contínuo e a formação das respectivas fases para os aços DP galvanizados, são:

- Aquecimento: formação da austenita;
- Estágio a alta temperatura: formação da austenita;

- Arrefecimento lento: formação da fase ferrita;
- Têmpera: formação da fase martensita;
- Envelhecimento: formação da fase martensita;
- Recozimento galvânico através de arrefecimento a ar: fase martensita e ferrita.

Mesmo possuindo essas características ótimas, a utilização dos AHSS, mais especificamente os aços *dual phase*, ainda é baixa. Para aumentar essa utilização e proporcionar os avanços desejados pelo setor automobilístico é necessário realizar estudos sobre o comportamento desse material ao serem submetidos as técnicas realizadas no setor.

Esse avanço na utilização de aços de alta resistência deve ser acompanhado pela aplicação de técnicas de união eficazes para o desempenho pretendido. A soldagem do tipo TIG consiste na união de peças metálicas pelo aquecimento e fusão destas através de um arco elétrico estabelecido entre um eletrodo de tungstênio não consumível e as peças a se unir, utilizando um gás de proteção contra a contaminação externa. Portanto, o presente trabalho visa estudar a aplicação do processo de soldagem TIG autógeno no aço DP1200.

2 OBJETIVOS

2.1 GERAL

Este trabalho tem como objetivo geral analisar os efeitos da soldagem no Aço DP1200 galvanizado, pelo processo de soldagem do tipo TIG autógena.

2.2 ESPECIFICOS

- Caracterizar a microestrutura do aço DP1200 após a soldagem;
- Identificar as fases presentes no aço DP1200 após a soldagem utilizando DRx;
- Determinar o comportamento mecânico do aço DP1200 após a soldagem.

3 JUSTIFICATIVA

O processo de soldagem, em muitos casos, pode comprometer o comportamento mecânico do material, alterando propriedades significativas por meio dos ciclos térmicos. Portanto, afim de conhecer a resposta e os estudos referentes a soldabilidade dos aços DP, foi realizado uma pesquisa bibliográfica contendo trabalhos nos últimos cinco anos.

Ao realizar a pesquisa bibliográfica foram encontrados uma quantidade de artigos ainda pequena sobre o assunto, tendo em vista sua complexidade de definição de parâmetros para esses aços. Diante do que foi apresentado é possível concluir que essa área necessita de mais estudos e investigações para padronizar os processos e obter respostas mais satisfatórias a nível industrial. Portanto, o presente estudo busca analisar os efeitos da solda no aço DP1200 pelo processo TIG autógeno, para colaborar com o conhecimento a cerca dos AHSS.

4 REFERENCIAL TEÓRICO

1.1 AHSS

Os *Advanced High Strength Steels* – AHSS, são definidos como uma classe de aços que combinam bons parâmetros de propriedade mecânica e são promissores no setor automobilístico. Essa definição se dá pela complexidade e particularidades da sua composição química e microestrutural, provenientes de tratamento térmico controlado, para melhor combinação desses parâmetros.

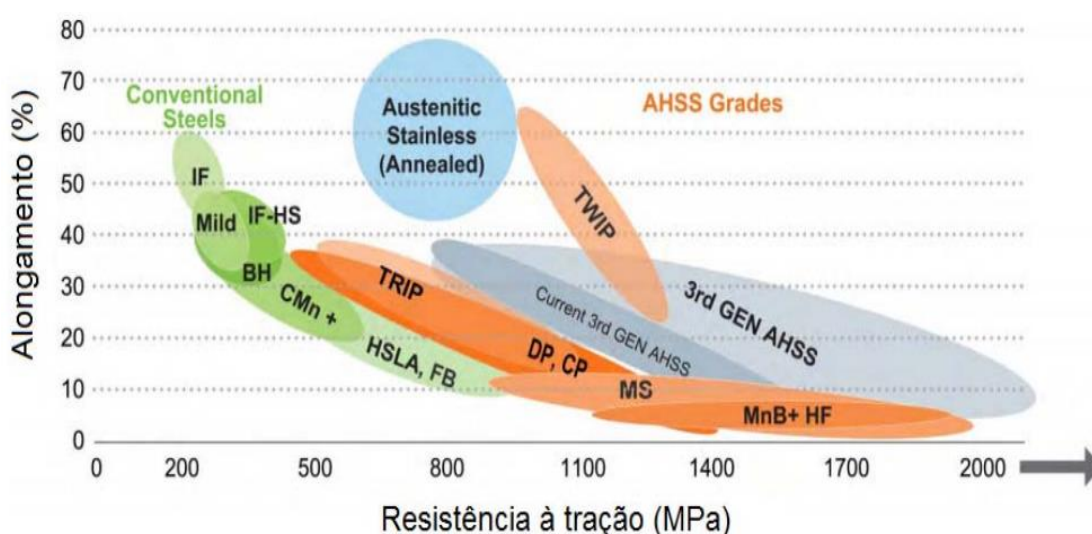
São assim denominados pois são materiais bifásicos ou multifásicos, gerando assim uma combinação de propriedades superiores a maioria dos aços. Com isso, há um aumento e melhoria nas propriedades como: resistência, ductilidade, tenacidade e fadiga. Outra particularidade dos AHSS é que por meio de seu processo de fabricação, pode-se obter um material leve. Tal fato, é de suma importância para atender as necessidades industriais para o desenvolvimento sustentável, como a economia de combustível atendendo aos níveis de segurança exigidos para um automóvel.

Os AHSS podem ser classificados, como:

- *Dual-Phase* (DP);
- *Complex-Phase* (CP);
- Ferrítico-Bainítico (FB);
- Martensítico (MART);
- Aços TRIP (plasticidade induzida por transformação);
- *Hot-Formed* (HF);
- Aços TWIP (plasticidade induzida por maclação);
- Leves com plasticidade induzida (*lightweight with induced plasticity* - LIP);
- Inoxidável austeníticos (*austenitic stainless steel* - AUST SS);
- Plasticidade induzida pela formação de bandas de cisalhamento (*shear band formation-induced plasticity* - SIP).

Com o crescente avanço de pesquisas nesse setor, essa classificação pode ser separada através das gerações do AHSS, conforme mostra a Figura 1. São considerados da primeira geração os aços CP, DP, TRIP, FB, MART e HF. A segunda geração é composta pelos aços TWIP, LIP, SIP e AUST SS. (KHEDKAR *et al.*, 2016). A terceira geração dos AHSS está em desenvolvimento, visando a combinação das propriedades presentes na primeira e segunda gerações com bons parâmetros e desempenho para o processo de soldagem (KEELER *et al.*, 2017).

Figura 1. Classificação e geração dos AHSS.



Fonte: WORLDAUTOSTEEL (2017).

No entanto, mesmo com a variedade de aços e boas propriedades o uso industrial é limitado, devido altos custos de produção e baixa produtividade em processos de metalurgia (NANDA *et al.*, 2016). A utilização dos AHSS na indústria automobilística teve início nos anos 90, quando foi criado o *Ultralight Steel Auto Body* (ULSAB), proveniente de um consórcio siderúrgico composto por mais de 15 países. O ULSAB, propôs a utilização de aços avançados de alta resistência com o objetivo de reduzir o peso dos automóveis e aliar as suas propriedades com o padrão de segurança estabelecido nesse setor (GALÁN *et al.*, 2012).

O veículo produzido possuía 90% de sua estrutura composta por AHSS, os resultados obtidos foram promissores com a significativa diminuição do peso,

aproximadamente 25%, em comparação com outros materiais. Além do aumento de propriedades como resistência e rigidez (GALÁN et al., 2012).

Como resultado desse estudo, outros programas foram elaborados e conduzidos pelo consórcio, como o *Ultralight Steel Auto Body - Advanced Vehicle Concepts* (ULSAB-AVC) visando aplicar o conceito de sustentabilidade na elaboração e desempenho do automóvel. Os resultados promoveram um maior interesse no estudo e aplicação dos AHSS na indústria automobilística.

Entre os materiais classificados como primeira e segunda geração, os aços DP e TRIP, possuem as propriedades requeridas para a utilização e desenvolvimento de automóveis, obtendo um bom desempenho mecânico no tocante a absorção de energia, sendo utilizado nas zonas principais de colisão.

4.1.1. Aços Dual-phase

Os aços DP foram assim denominados por possuírem uma microestrutura bifásica, composta por martensita dispersa em uma matriz ferrítica. No entanto, o conceito de microestrutura bifásica, no caso dos aços DP, se refere as microestruturas predominantes no material, pois podem conter a presença de austenita retida e bainita (RASHID, 1981).

Mesmo com o início do desenvolvimento nos anos 1950 a aplicação dos aços DP começou por volta dos anos 60. Pesquisadores consideraram a utilização das propriedades das microestruturas presentes nos aços DP como inovadoras para aplicação automobilística e obtiveram resultado satisfatório na aplicação. O material aplicado obteve boas respostas em relação a resistência e ductilidade.

4.1.1.1. Microestrutura

A microestrutura bifásica dos aços DP é obtida mediante processo de recozimento contínuo, que consiste no aquecimento do material em temperaturas superiores a A_{c1} , em um processo chamado de austenitização. Com o aquecimento,

a ferrita e perlita presente no material é transformada em ferrita e austenita. Com o resfriamento, a microestrutura resultante será ferrita e martensita.

Sabe-se que a fase ferrita é predominante nos aços de baixa liga. No entanto, com alterações nos parâmetros de composição e resfriamento, são formadas outras fases, são elas:

- Perlita: presente em aços carbono-manganês utilizados na construção civil;
- Bainita: presente nos AHSS;
- Martensita: presente nos aços DP e martensíticos;
- Austenita retida: presente em aços TRIP.

As alterações controladas da composição química e do tratamento termomecânico na obtenção do aço determinará a proporção das fases no material. Para os aços DP a microestrutura é formada por uma matriz ferrítica e ilhas de martensita. Conforme mostra a Figura 2, onde a fase ferrita se apresenta na cor branca e a fase martensita se apresenta na coloração cinza. Contudo, o material pode apresentar outras fases, como: perlita, bainita e austenita retida.

Figura 2. Microestrutura do Aço DP1200.

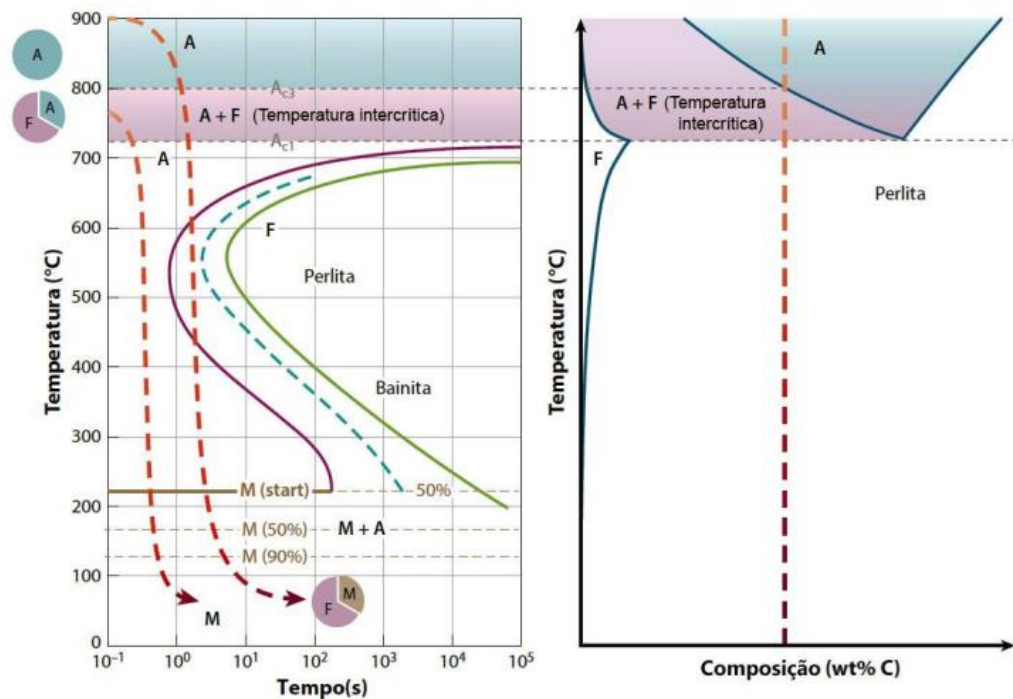


Fonte: Silva (2017)

4.1.1.2 Obtenção

A microestrutura bifásica dos aços DP é obtida através de recozimento intercrítico. Esse processo consiste no aquecimento do aço que possui microestrutura composta de ferrita e perlita, na região entre A_{c1} e A_{c3} , conforme mostra a figura 3, para que ocorra a austenitização, gerando assim as fases ferrita e austenita. Após esse processo o aço é submetido a uma têmpera para que ocorra a transformação de austenita em martensita, produzindo a microestrutura composta por ferrita e martensita.

Figura 3. Tratamento térmico – Aços DP.



Fonte: Tasan (2014).

A relação da quantidade de martensita presente nos aços DP é importante para determinar as propriedades do material que são relacionados diretamente com a presença dessa fase, como no caso do limite de escoamento. O recozimento contínuo realizado no aço promove uma melhor dispersão da fase martensita na fase ferrita. Durante o recozimento contínuo pode ser realizada a galvanização do material, por imersão a quente.

Ao relacionar a obtenção dos aços DP um fator importante consiste na composição química, ou seja, nos componentes de liga. O principal elemento de liga

dos aços DP é o carbono, afetando diretamente as suas propriedades microestruturais e mecânicas. Além de promover um melhor desenvolvimento da martensita com a estabilização da austenita durante o processo de resfriamento do material.

Porém, sabe-se que um alto teor de carbono pode comprometer a soldabilidade do material. Portanto, ao controle do teor de carbono e a adição de outros elementos de liga são de suma importância para a aplicação e desenvolvimento dos aços DP.

4.2 PROCESSOS DE SOLDAGEM APLICADOS NOS AÇOS DUAL PHASE

O processo de soldagem, em muitos casos, pode comprometer o comportamento mecânico do material, alterando propriedades significativas por meio da aplicação dos ciclos térmicos. Portanto, afim de conhecer a resposta e os estudos referentes a soldabilidade dos aços DP, foi realizada uma pesquisa bibliográfica contendo trabalhos nos últimos cinco anos.

Os processos de soldagem aplicados e os objetivos de cada trabalho são listados a seguir. Os estudos selecionados para cada tipo foram agrupados em forma de quadro, permitindo uma melhor visualização e quantificação dos trabalhos encontrados.

4.2.1 Soldagem por Fricção

O método de soldagem por fricção é uma alternativa para a união de materiais com baixo consumo de calor. As vantagens de trabalho com soldagem por fricção consistem, em: utilizar o material no estado sólido e durante o processo a região soldada do material não atinge o ponto de fusão. Essas vantagens ajudam a eliminar alguns defeitos de soldagem, como trincamento e tensões residuais, além de reduzir a região de amolecimento ZTA.

O trabalho de Hartman et al. (2015) analisou o desempenho da ferramenta utilizada para esse tipo de soldagem, nitreto de boro cúbico policristalino (PCBN), tanto na realização do processo quanto ao desempenho da junta soldada. O trabalho dividiu os CBN em classes que variam de acordo com o tamanho dos grãos. A classe

que obteve o melhor desempenho nessas duas variáveis foi a classe A, composta por grãos menores.

Quadro 1. Descrição dos trabalhos – Soldagem por Fricção (continua)

AUTOR	OBJETIVO	MÉTODOS
<i>Mahmoudiniya et al. (2020)</i>	“Avaliar sistematicamente a microestrutura, propriedades mecânicas e comportamento de fratura de uma junta de aço DP700”	• Análise microestrutural; • Ensaios mecânicos; • Comportamento de fratura.
<i>Nguyen et al. (2018)</i>	“Descrever o estudo da viabilidade de ligas avançadas de aço de alta resistência (DP) 800 e ligas AA6351 de alta resistência”	• Técnica de difração de raios X (DRX); • Microscopia eletrônica de varredura (MEV) com espectroscopia de energia dispersiva (EDS); • Ensaio de Tração.
<i>Anaman et al. (2019)</i>	“Investigar de forma abrangente as juntas FSW de ligas de alumínio (5052-H32) e aço (DP 1200)”	• Microscopia óptica (MO); • Difração retrodispersão de elétrons (EBSD) equipada com microscópio eletrônico de varredura de emissão de campo (FE-SEM); • Testes de microdureza; • Comportamento da corrosão.
<i>Lim et al. (2018)</i>	“Aplicar o processo FBJ para soldar por pontos compósitos de fibra de carbono ao DP980”	• Tensão por cisalhamento; • Teste de tensão cruzada; • Microdureza.

Quadro 2. Descrição dos trabalhos – Soldagem por Fricção (conclusão)

Hartman et al. (2015)	“Quantificar o impacto específico do tamanho do grão CBN na vida útil da ferramenta e na resistência da junta para a soldagem a ponto do DP 980”	• Análise microestrutural; • Tensão de cisalhamento.
------------------------------	--	---

Fonte: Dados do Autor (2021)

No estudo de Mahmoudiniya et al. (2020), uma chapa aço DP700 foi soldada pelo processo de fricção por agitação utilizando três velocidades. Ao analisar as propriedades mecânicas resultantes dessa variação foi possível perceber que o aumento da velocidade transversal da ferramenta melhora a resistência da junta.

Conforme o Quadro 1 acima, é possível perceber que os trabalhos de Nguyen et al. (2018) e Anaman et al. (2019) buscam analisar a soldagem de metais diferentes. De acordo com os resultados dos dois trabalhos a soldagem se mostrou eficaz para os dois tipos de aço. Ao analisar o trabalho de Nguyen et al. (2018), nota-se que a influência da velocidade de soldagem foi determinante na formação e espessura dos compostos intermetálicos (IMC) assim como a influência negativa desses compostos nas propriedades do material. A junta do aço soldado, chamada zona de agitação, falhou durante o ensaio de tração em todos os parâmetros utilizados.

Anaman et al. (2019) não se deteve nos aspectos referentes a velocidade de soldagem, mas intensificou o seu estudo na análise da zona de agitação e na formação dos compostos intermetálicos. A zona agitação foi observada de forma separada, como camada superior, intermediária e inferior. Essa divisão pode ser vista como as diferentes formas de difusão dos materiais.

Na camada superior o alumínio representa a matriz e o aço a fase dispersa, desse modo essa camada apresentou maior valor de dureza e em detrimento da dispersão do aço a camada ficou mais suscetível à corrosão. A camada intermediária foi definida como uma solução sólida de Ferro e Alumínio, contendo a presença de IMC. Essa camada apresentou maiores valores de dureza do que as demais. Na camada inferior o aço DP encontra-se deformado, o aumento da fase martensita foi responsável pelo aumento da dureza dessa fase em relação ao aço como metal de base.

Assim como o trabalho de Nguyen et al. (2018) o estudo de Anaman et al. (2019) identificou os principais IMC's presentes. No entanto, o diferencial do estudo foi a análise da corrosão. Sabe-se que o aço DP é galvanizado, portanto possui proteção contra corrosão em relação com o alumínio. No entanto, o aço se mostrou mais suscetível a corrosão galvânica enquanto a taxa de corrosão do alumínio foi menor.

Diferentemente dos trabalhos acima, Lim et al. (2018), utilizou o processo de soldagem por fricção para obtenção de um compósito polímero-aço. Foi realizada a comparação do FBJ com os processos de união adesiva e soldagem. Os resultados indicaram que as amostras unidas por FBJ apresentaram um menor valor de falha de cisalhamento e tensão cruzada, o que indica que a utilização desse processo ainda não obteve resultados satisfatórios para esse tipo de união.

4.2.2 Soldagem MIG/MAG

O processo MIG/MAG utilizando um arco elétrico protegido por um gás inerte ou ativo. Nesse processo o calor gerado na peça é elevado e a taxa de resfriamento é considerada baixa. Para os aços DP a utilização desse tipo de soldagem resulta no amolecimento da ZTA. Por esse motivo, o trabalho de Khraisat et al. (2018) foi o único encontrado na pesquisa, conforme ilustra o Quadro 2. O trabalho desenvolvido foi relativamente simples quando comparado a outros estudos do aço DP. No entanto, considerando o fator crítico da utilização desse tipo de processo nos AHSS o trabalho é de suma importância para trabalhos futuros.

Quadro 3. Descrição dos trabalhos – MIG/MAG.

AUTOR	OBJETIVO	MÉTODOS
Khraisat et al. (2018)	“Desenvolver um entendimento fundamental da evolução microestrutural do aço DP 1000 durante a soldagem e investigar se a direção do rolamento afeta o amolecimento do HAZ.”	• Teste de Dureza; • Ensaio de Tração.

Fonte: Dados do Autor (2021).

O trabalho foi desenvolvido utilizando dois sentidos de aplicação da carga de tração, um transversal e o outro perpendicular a soldagem. Como a entrada de calor

na peça é um fator chave para as propriedades do processo a utilização desses dois sentidos permitiu avaliar a qualidade de cada um dos processos.

Desse modo, foram observadas as alterações microestruturais e na ZTA. Obtendo uma ZTA mais larga no sentido transversal a aplicação da carga, sabe-se que a ZTA influencia nas propriedades finais da peça. Com base no estudo, nota-se também que a região mais externa da ZTA possui mais ductilidade, devido a maior presença da fase ferrita.

4.2.3 Soldagem à Laser

Em comparação com os processos de soldagem anteriores o processo de soldagem à laser é mais conhecido e utilizado, porem muitas lacunas a cerca desse processo ainda precisam ser estudadas para a obtenção de bons parâmetros. Desse modo, a utilização baseia-se no uso dos parâmetros adequados: velocidade de soldagem, distancia, fluxo de gás e potência do laser.

Quadro 4. Descrição dos trabalhos – Soldagem à laser (continua).

AUTOR	OBJETIVO	METODOLOGIA
<i>Fernandes et al. (2017)</i>	“Avaliar a soldabilidade do aço bifásico DP600 determinando os parâmetros ideais para soldá-lo com um laser pulsado”	• Teste de tração; • Microdureza; • Tratamento térmico.
<i>Correard et al. (2016)</i>	“Produzir resultados semelhantes e juntas de solda diferentes de aços avançados de alta resistência usando um laser de fibra de itérbio”	• Testes de tração; • Fadiga.
<i>Agarwal et al. (2019)</i>	“Estudar os fenômenos de craqueamento da solidificação em dois AHSS comerciais, TRIP e DP”.	• Espectroscopia Dispersiva de Energia (EDS), em conjunto com o MEV; • Espectroscopia dispersiva de comprimento de onda (WDS).

Quadro 5. Descrição dos trabalhos – Soldagem à laser (continuação).

<i>Evin et al. (2016)</i>	“Analisar o impacto da soldadura a laser em propriedades de deformação de aços quando usados para peças para carro”	• Teste de flexão de três pontos
<i>Cui et al. (2016)</i>	“Comparar os tipos de revestimento GI e GA no desempenho no FLW da chapa de aço DP980”	• Microestrutura; • Microdureza; • Teste de Tração; • Teste de Fadiga.
<i>Gong et al. (2016)</i>	“Investigar a resposta à tração do TWB de materiais diferentes, dois aços de duas fases (DP 780 e DP 1180) de interesse para a indústria automotiva”	• Teste de Tração; • Análise microestrutural; • Microdureza.
<i>Evin et al. (2017)</i>	“Avaliar o impacto da soldagem a laser nas propriedades mecânicas de materiais AHSS utilizados na indústria automotiva”	• Teste de Tração; • Análise microestrutural; • Microdureza.
<i>Rossini et al. (2015)</i>	“Promover o uso de AHSS no projeto e fabricação da carroceria”.	• Microscopia óptica; • Microdureza de Vickers; • Teste de tração; • Correlação de imagem digital (DIC) pela técnica de mancha branca de luz.
<i>R. et al. (2018)</i>	“Desenvolver um modelo transiente bidimensional (2D) de soldagem a laser utilizando o software COMSOL Multiphysics”	• Análise microestrutural; • Microscopia eletrônica de varredura (MEV); • Espectroscopia de energia dispersiva (EDS); • Microdureza Vickers.

Quadro 6. Descrição dos trabalhos – Soldagem à laser (continuação).

Quadro 7. Descrição dos trabalhos – Soldagem à laser (conclusão).

Gao et al. (2017)	“Estudar a suscetibilidade ao craqueamento a quente da plasticidade induzida por transformação (TRIP) e aços de fase dupla (DP) com base em uma abordagem de modelagem multi-escala.”	• Análise microestrutural; • Análises de temperatura.
ViñÁŁ et al. (2019)	“Analisar a qualidade das chapas de aço para carrocerias soldadas a laser”	• Testes de tração; • Testes de fratura; • Microdureza Vickers.

Fonte: Dados do Autor (2021)

De acordo com as informações acima, Quadro 3, é possível perceber que os diferentes estudos consistem, em sua maioria, na identificação de parâmetros básicos de propriedade, microestrutura e soldagem. Vale ressaltar que estudos com um ou mais anos de diferença tratam de aspectos similares de investigação, seja a determinação da resposta do material aos ensaios mecânicos ou a determinação dos parâmetros de soldagem.

No tocante aos parâmetros de soldagem, eles possibilitam uma melhor padronização do processo para o material utilizado. No entanto, observa-se que apenas um trabalho analisou esses parâmetros. Outro ponto relevante a ser discutido é o ano de publicação do mesmo, pois o estudo de Fernandes et al. (2017) foi publicado após a publicação de outros estudos relevantes sobre as propriedades dos aços DP. Tal fato confirma que os aspectos de soldabilidade do material ainda precisam ser amplamente investigados e estudados.

Como os aços DP são de bastante interesse para a indústria automobilística, estudos que analisam as propriedades requeridas por esse setor tem uma grande relevância. Os pesquisadores: Evin et al. (2016), Gong et al. (2016), Evin et al. (2017), Rossini et al. (2015) e ViñÁŁ et al. (2019), analisaram diferentes tipos de aço DP aplicados a elementos do setor automobilístico.

Os resultados obtidos se diferenciaram em relação as características próprias de cada estudo e dos aços DP utilizados. O estudo de ViñÁŁ et al. (2019), apresentou os resultados de maneira mais simples, consistindo na análise mais generalizada do processo, o considerando satisfatório. No trabalho de Evin et al. (2016), ao comparar

as propriedades de deformação do aço DP600 com duas outras classes de aços (austenítico e baixa liga), o mesmo apresentou uma boa capacidade de deformação e absorção de energia, juntamente com o aço austenítico.

Outro estudo de Evin *et al.* (2017) com ênfase nas propriedades mecânicas confirmou que no tocante a deformação o material não apresenta propriedades ótimas. Um dos principais fatores, evidenciados no estudo, que influenciam são as alterações microestruturais da zona de fusão. O autor sugere que sejam realizados tratamentos térmicos no material, ou que seja realizada outra metodologia para a união dos mesmos.

Os trabalhos citados anteriormente são relevantes pois, na indústria automobilística é necessário a boa união de materiais de classes diferentes. E, em sua maioria, esses materiais apresentam diferenças de espessura, revestimento e outros. Colaborando com as conclusões anteriores e com o fato de que não existe uma padronização dos processos utilizados.

Um estudo anterior aos descritos anteriormente, elaborado por Rossini *et al.* (2015), elencou as dificuldades de trabalho com aços diferentes. Onde o aço DP apresentou bons padrões de união, porém com uma menor resistência a fratura quando combinado com outros aços. Gong *et al.* (2016), também relatou a baixa resistência a fratura do cordão de solda dos aços DP analisados, com valores menores ao do metal de base.

Outras características do aço DP foram analisadas pelos demais autores. Diante dos efeitos da soldagem no material é importante avaliar a influência do revestimento anticorrosivo, do resfriamento após a soldagem e da união com materiais diferentes, simulações computacionais também são de grande importância para estudos futuros.

O estudo de Correard *et al.* (2016) teve resultados satisfatórios na união de aços diferentes, com boas propriedades mecânicas após o processo de soldagem. A ausência do revestimento anticorrosivo no aço DP influenciou negativamente alguns resultados de tração, devido a fragilização do material por estar oxidado. Cui *et al.* (2016) analisou a influência do revestimento no desempenho da soldagem. Os principais revestimentos utilizados nos AHSS são: GI e GA. Os dois processos são obtidos por imersão a quente, a diferença se dá no processo de recozimento que

acontece após a imersão, para o revestimento GA, levando a uma maior fração de ferro.

Os resultados obtidos por Cui *et al.* (2016), relataram que o revestimento utilizado não interfere na microestrutura do material após a soldagem. A diferenciação dos resultados ocorreu em relação as propriedades mecânicas, a dureza do aço com o revestimento GA se mostrou inferior, já os melhores resultados de resistência a fadiga foi atribuído ao revestimento GA. O autor atribuiu os resultados a composição química do material e a espessura do revestimento, respectivamente.

Outro aspecto importante dos aços DP é o estudo do processo de solidificação. Agarwal *et al.* (2019) analisou as fissuras ocasionadas após esse processo nos aços DP. Para os parâmetros utilizados no seu estudo não houve o surgimento de trincas, ou seja, o material não sofreu deformação suficiente para gerar fissuras após a solidificação. O estudo pode servir como base para trabalhos futuros e verificação de parâmetros.

No tocante a análise computacional, esses modelos são importantes pois, a nível industrial, os projetos devem prever da melhor maneira as respostas do material a diversas solicitações e processos. O estudo de Gao *et al.* (2017) aliou as investigações referentes à solidificação ao processo de modelagem em múltiplas escalas, os resultados demonstram que os aços DP são menos sensíveis aos efeitos do calor.

Os pesquisadores R. *et al.* (2018) desenvolveram um modelo computacional bidimensional para os aços DP, onde pôde prever: o perfil de temperatura, o aquecimento e o tempo de resfriamento. Informações importantes no processo de soldagem e que quando comparados ao procedimento experimental, obtiveram uma proximidade satisfatória.

4.2.4 Soldagem por resistência a ponto

A soldagem por resistência a ponto (RSW) é o processo de soldagem mais utilizado na indústria automotiva. Esse processo consiste na formação de pepitas (nugget) através da combinação de força e corrente, resultando na união dos materiais.

Quadro 8. Trabalhos encontrados – Soldagem por resistência a ponto (continua).

AUTOR	OBJETIVO	METODOLOGIA
Lu et al. (2019)	“Desenvolver uma melhor compreensão do material e da microestrutura do revestimento na interface Al / aço diferente”	• Análise Microestrutural; • Ensaios mecânicos.
Zhao et al. (2017)	“Analisar a microestrutura e propriedades mecânicas das juntas de solda para aço DP600”	• Análise microestrutural; • Ensaios mecânicos.
Huin et al. (2016)	“Estudar a influência da espessura da chapa na soldagem heterogênea do Usibor®1500 com aços DP600”	• Tensão cruzada; • Cisalhamento de tração; • Análise microestrutural.
Rezayat et al. (2020)	“Entender a relação de deformação e falha local-global em soldas por ponto de resistência feitas com DP e MS AHSS”	• Análise microestrutural; • Tensão de cisalhamento; • Tensão cruzada.
Hsu et al. (2018)	“Comparar as características microestruturais das soldas produzidas usando RSW e FSSW”	• Dureza; • Tensão de cisalhamento.
Pouranvari et al. (2015)	“Examinar se os critérios de tamanho de solda existentes podem fornecer o modo de falha de extração das soldas a ponto DP780”	• Análise Microestrutural; • Modo de falha.
Zhao et al. (2019)	“Desenvolver um modelo bidimensional de elementos finitos termo-elétricos axissimétricos para simular o processo de soldagem de chapas de aço DP600”	• Análise Microestrutural; • Análise de campo de temperatura.
Chabok et al. (2018)	“Analisar os efeitos da soldagem por pulso único e duplo, no desempenho mecânico da solda por ponto de resistência foi investigado”	• Moagem por micro-fenda; • Microscopia de imagem de orientação (OIM).

Quadro 9. Trabalhos encontrados – Soldagem por resistência a ponto (continuação).

<i>Pakkanen et al. (2016)</i>	“Estudar a aplicação da soldagem a ponto por resistência no aço DP980, utilizando análise experimental e simulação numérica”	• A simulação FEM; • Teste de tração a quente; • Análise microestrutural; • Método do furo.
<i>Digiovanni et al. (2018)</i>	“Comparar as juntas de aço de alta resistência avançadas revestidas com zinco e não revestidas”	• Teste de cisalhamento; • Fractografia.
<i>Qi et al. (2020)</i>	“Comparar o processo RSW tradicional, o processo CMA-RSW e o processo BMA-RSW, na formação de pepitas para aço DP590”	• Análise microestrutural; • Ensaio mecânico;
<i>Frei et al. (2019)</i>	“Elaborar um modelo de simulação eletrotermomecânica para investigações sobre LME de aços de fase dupla durante RSW”	• Teste de simulação.
<i>Javaheri et al. (2019)</i>	“Apresentar um método para determinar as propriedades mecânicas para a soldagem de RSW e LBW para aços bifásicos (DP600 e DP1000)”	• Análise microestrutural; • Ensaio de tração; • Ensaio de indentação.
<i>Zhao et al. (2016)</i>	“Realizar a modelagem e análise de processo de juntas DP600 soldadas por pontos de resistência com base na análise de regressão”	• Cisalhamento de tração; • Análise microestrutural; • Microdureza.
<i>Vijayan et al. (2019)</i>	“Desenvolver um mecanismo para quantificar a cavidade no nugget e estudar seu efeito na resistência da solda e modos de falha”	• Testes de tração; • Testes de fratura; • Microdureza Vickers; • Análises macro e microestruturais.
<i>Pouranvari et al. (2018)</i>	“Compreender os fatores subjacentes da resistência à tração-cisalhamento de soldas por pontos de resistência a aços automotivos durante a falha interfacial”	• Mecanismo de fratura; • Dureza.

Quadro 10. Trabalhos encontrados – Soldagem por resistência a ponto (conclusão).

<i>Wei et al. (2014)</i>	“Obter soldas por pontos de resistência de três camadas semelhantes e diferentes de aço DP1000 galvanizado, aço TRIP980 nu e aço TWIP980 nu”	• Macrografia; • Cisalhamento de tração; • Modo de falha.
<i>Ghassemi et al. (2017)</i>	“Avaliar TSS e CTS para diferentes modos de fratura”	• Cisalhamento a tração; • Tensão cruzada; • Dureza.

Fonte: Dados do Autor (2021)

Com base no volume de trabalhos, percebe-se que a soldagem por ponto é a mais estudada e aplicada nos AHSS. Enquanto para os outros processos analisados anteriormente foram realizados estudos para determinação de parâmetros e a investigação de problemas mais básicos, para a soldagem por ponto são investigados, principalmente, as propriedades mecânicas do material e seu modo de falha.

Para bem entender a resposta do material no tocante a propriedades mecânicas é necessário compreender a sua microestrutura. Os estudos de Lu et al. (2019), Zhao et al. (2017) e Hsu et al. (2018), tiveram como objetivo analisar a microestrutura do aço DP após o processo de soldagem por ponto.

O trabalho de Zhao et al. (2017), deixou a desejar na discussão dos resultados da análise microestrutural, pois o estudo tinha como objetivo analisar a microestrutura e propriedades mecânicas. No entanto, não houve um detalhamento mais aprofundado das características da microestrutura obtida, com uma maior ênfase nos resultados referentes a propriedades mecânicas e das características da solda.

Para Hsu et al. (2018), ao comparar as soldas obtidas pelos processos RSW e FSSW, percebeu que as microestruturas resultantes de cada processo obtiveram uma discrepância. Porém, ao comparar os resultados referentes as propriedades mecânicas é possível concluir que essas alterações, influenciaram de forma quantitativa algumas propriedades como o modo de falha. Contudo, tais números não são suficientes para sugerir ou não um tipo em detrimento de outro, mas analisar as solicitações requeridas ao realizar o processo de soldagem.

Ao unir o aço DP ao alumínio Lu et al. (2019), notou a presença de compostos intermetálicos, os resultados não chegaram em resultados ótimos de desempenho mas favoreceram, de forma satisfatória, o estudo desse tipo de união. O estudo de Huin et al. (2016) analisou a união de dois aços AHSS diferentes, os resultados apresentados demonstraram que os corpos de prova com espessuras diferentes obtiveram um desvio positivo de tensão cruzada enquanto tal fator não foi observado para os testes de tração ao cisalhamento.

No trabalho de Chabok et al. (2018) além de analisar o processo de soldagem utilizando pulso duplo, foi realizada uma pré-trinca. Os resultados evidenciaram que a utilização do pulso duplo acarretou na diminuição da resistência do material, tal efeito é explicado pela obtenção de uma menor tensão residual perpendicular ao plano da pré-trinca.

O aço utilizado no estudo era galvanizado (GI), outros trabalhos como o de Digiovanni et al. (2018) e Wei et al. (2014) analisaram os efeitos do revestimento no desempenho da soldagem. De acordo com Digiovanni et al. (2018), a importância de analisar esse efeito está associada ao sistema aço / zinco, pois gera um efeito chamado LME (fragilização por metal líquido).

Segundo os resultados do mesmo, nos aços DP não foi identificada uma perda significativa da resistência ao comparar as espécies com e sem revestimento. Já Wei et al. (2014) analisou esses efeitos na soldagem de materiais diferentes e percebeu que o revestimento de zinco provoca uma menor resistência elétrica produzindo a diminuição da corrente de respingo.

Além da união de materiais diferentes um ponto de importante discussão é a comparação dos processos de soldagem, pois fornece uma literatura mais ampla para a escolha do processo mais adequado ou para adaptações do processo já utilizado. Qi et al. (2020) desenvolveu dois modelos que associam um campo magnético, bilateral ou circular, ao processo de soldagem por ponto. Os resultados evidenciaram que a utilização dos modelos melhorou a qualidade da solda e microestrutura, além de um melhor desempenho mecânico.

Os pesquisadores Javaheri et al. (2019), elaboraram um método utilizando ensaio de tração uniaxial que permite identificar as propriedades mecânica do material soldado, esse método foi aplicado tanto na RSW (soldagem por ponto de resistência)

como na LBW (soldagem à laser), pois são os processos mais comuns nos AHSS. Os resultados foram satisfatórios, visto que a determinação das propriedades foi condizente com resultados presentes na literatura.

Além disso, para a soldagem por ponto, as análises mecânicas devem investigar o comportamento associado à fratura do material. Em seus trabalhos os estudiosos Rezayat et al. (2020), Vijayan et al. (2019), Pouranvari et al. (2018) e Ghassemi et al. (2017), tiveram como objetivo essa associação seja a um determinado procedimento ou a condições do material.

Uma das observações mais importantes do estudo de Rezayat et al. (2020) ao observar o comportamento dos aços de baixa resistência e dos AHSS, foi que o primeiro apresenta uma mudança no local de falha para as regiões mais amolecidas da ZTA e o segundo apresenta uma região amolecida mais sensível, devido ao maior tamanho da pepita. Os autores concluem que esse fato atesta que não existe uma relação linear entre o aumento da resistência do material e o aumento da resistência da junta.

Tal conclusão é válida, porem os estudos desses efeitos e comparações ajudam a elucidar dúvidas e padronizar o processo de soldagem. O trabalho de Vijayan et al. (2019) buscou analisar o defeito de cavidade de retração, identificou que a cavidade aumenta na medida que a espessura do material e o diâmetro da pepita aumentam.

As pesquisas de Pouranvari et al. (2018) e Ghassemi et al. (2017), investigaram as condições de resistência ao cisalhamento nos efeitos no modo de falha. Para Pouranvari et al. (2018) a relação entre tenacidade de fratura e dureza da zona de fusão modelam o mecanismo de fratura, pois cada um desses fatores influencia um efeito diferente desse mecanismo.

Em comparação, o estudo de Ghassemi et al. (2017) evidenciou que a espessura do material afeta o mecanismo de fratura em proporção maior que a microestrutura ou composição química. Para confirmar os resultados descritos por esses pesquisadores o trabalho de Pouranvari et al. (2015) afirmou que:

“A espessura da folha, a proporção de dureza da zona de fusão para a zona subcrítica afetada pelo calor, a quantidade de espaços vazios de contração na zona de fusão e a largura da ZTA são os principais fatores de controle

para a transição de a interface para o modo de falha pull-out no carregamento de tensão cruzada.”

Outro procedimento de bastante relevância para a aplicação de um processo de soldagem em larga escala é a realização de modelos e simulações computacionais, seja para favorecer uma etapa do processo ou a melhoria completa do mesmo. Zhao et al. (2019), Pakkanen et al. (2016), Frei et al. (2019) e Zhao et al. (2016), realizaram estudos aplicando esses procedimentos a soldagem por ponto.

Zhao et al. (2019) propôs uma simulação para controlar e prever o tamanho da pepita de solda, os resultados obtidos foram satisfatórios pois estavam em concordância com os resultados experimentais. Em um estudo anterior Zhao et al. (2016) simulou o tamanho da pepita de solda juntamente com a análise dos parâmetros de soldagem utilizando o modelo de regressão. Tal modelo se mostrou efetivo para a análise e associação desses elementos.

Já Pakkanen et al. (2016), analisou as propriedades termomecânicas do material associadas ao comportamento de fratura, em comparação com outros trabalhos já elaborados e novas análises experimentais. As conclusões não foram satisfatórias principalmente para a tensão residual. As variáveis experimentais ou simulacionais devem ser revistas para a realização de novos estudos.

No entanto, Frei et al. (2019), obteve resultados satisfatórios ao analisar essas mesmas propriedades associadas ao LME e observou que o modelo é serve como base para esse tipo de fragilização, além de obter uma melhor proximidade dos valores de tensão e deformação obtidos experimentalmente.

4.2.5 Soldagem TIG

A soldagem do tipo TIG consiste na união de peças metálicas pelo aquecimento e fusão destas através de um arco elétrico estabelecido entre um eletrodo de tungstênio não consumível e as peças a se unir, utilizando um gás de proteção contra a contaminação externa. Esse processo é pouco utilizado na indústria automobilística, devido sua baixa produtividade.

Quadro 11. Trabalhos encontrados - TIG.

AUTOR	OBJETIVO	METODOLOGIA
<i>Yan et al. (2019)</i>	“Elaborar um modelo utilizando RSM combinado com algoritmo genético quântico (QGA) para otimizar os parâmetros de soldagem”	• Simulação numérica.

Fonte: Dados do Autor (2021)

O trabalho de Yan et al. (2019) utiliza o método de superfície de resposta (RSM) e algoritmo genético quântico (QGA) para otimização dos parâmetros de soldagem TIG. Esse modelo é proposto como uma alternativa ideal para a análise eficaz desses parâmetros. Os resultados obtidos mostraram-se satisfatórios quando colocados em contraste com os dados experimentais, sendo identificadas informações sobre campo de temperatura e propriedades mecânicas, com erro de apenas 1,37%.

5 METODOLOGIA

O material utilizado no trabalho foi o aço DP 1200, fabricado pela empresa Usiminas, localizada no Estado de Minas Gerais. A empresa é referência na fabricação de aços para os diversos tipos de mercado, como: automobilístico e construção civil. As chapas de aço cedidas pela empresa foram analisadas seguindo os principais métodos de caracterização de materiais metálicos e de acordo com os objetivos do trabalho.

5.1 CARACTERÍSTICAS DO AÇO DP 1200

O aço utilizado no trabalho estava na forma de chapas finas, com 1,20mm de espessura e foi realizado o corte e a divisão em 16 chapas com o comprimento médio de 12,5cm, Figura 4.

Figura 4. Chapas do Aço DP 1200 após o corte.



Fonte: Dados do Autor (2021)

5.1.1 Composição Química

A análise foi realizada no Laboratório de Tecnologia em Atrito e Desgaste – LTAD, da Universidade Federal de Uberlândia pela empresa USIMINAS. Utilizando o equipamento Glaw Discharge Atomic Emission Spectrometer da marca LECO, modelo GDS 500A.

5.2 SOLDAGEM DO MATERIAL

Foram utilizados 16 corpos de prova do aço DP 1200, estes corpos de prova foram separados em pares para que posteriormente fosse realizada a união das duas chapas. Inicialmente, as chapas separadas foram unidas por dois pontos de solda em cada uma das extremidades, esses pontos foram obtidos para facilitar o processo de união das chapas, favorecendo o manuseio. Conforme mostra a Figura 5.

Figura 5. Chapas com ponto de solda.



Fonte: Dados do Autor (2021)

O processo de soldagem foi realizado utilizando a máquina de solda com amperagem de 30A ligada ao cilindro de gás argônio comprimido com saída de 10L/min, com corrente contínua inversa CC+ e eletrodo de tungstênio com 2% de tório, AWS EWTH-2.

5.3 MICRODUREZA

O ensaio de microdureza foi realizado no Laboratório de Microscopia Óptica do Instituto Federal do Piauí, utilizando o equipamento de modelo HMV da marca Shimadzu, Figura 6. A escala utilizada no trabalho foi microdureza Vickers (HV) com carga de 490,03mN e foram obtidas 24 marcações nas diferentes regiões do metal de base, ZTA e ZF, cada marcação foi realizada com o espaçamento de 0,5 mm.

Figura 6. Microdurômetro.



Fonte: Dados do Autor (2021)

5.4 METALOGRAFIA

A análise metalográfica do material após o processo de soldagem foi realizada no Laboratório de Metalografia do Instituto Federal do Piauí. Para dar seguimento nas etapas da metalografia o aço foi cortado transversalmente em relação a solda, abrangendo o metal de base, ZTA e ZF, com dimensões de 31 mm de comprimento, 10 mm de largura e 1,20 mm de espessura.

Posteriormente, as amostras foram lixadas seguindo a sequência de lixas 220, 400, 600, 1000, 1200 e 1500, com alteração de orientação em 90° para a mudança

de lixamento. O polimento foi realizado utilizando disco de feltro com alumina a 0,3 μm . E a limpeza das peças foi realizada utilizando álcool. O tempo de ataque para amostra foi de 15s em solução de Nital a 2%.

A visualização da microestrutura foi realizada utilizando o microscópio óptico Olympus CX-31 conectado a um computador, Figura 7, com o auxílio do Software Motic 2.0 para captura e análise das microestruturas.

Figura 7. Microscópio Óptico Olympus CX-31.



Fonte: Dados do Autor (2021).

5.5 DRX

O ensaio de difração por raios-X foi realizado no Laboratório de Raios-X, da Universidade Federal do Ceará – UFC, preparando a amostra com parâmetros de análise padrão de geometria de Bragg de $\varnothing - 2\varnothing$; varredura de 5-75°, voltagem de 40 KV; corrente 30 mA e passo de 2°/min. Utilizando o Difratômetro para amostras policristalinas modelo XPert Pro MPD – Panalytical, Figura 8.

Figura 8. Difratorômetro para amostras policristalinas.



Fonte: Dados do Autor (2021).

5.6 ENSAIO DE IMPACTO

O ensaio de impacto foi realizado no Laboratório de Ensaios Mecânicos do Instituto Federal do Piauí. A análise foi realizada à temperatura ambiente, utilizando a Máquina de Teste de Impacto modelo JBW-300Z da marca HST (Figura 9), com velocidade de impacto 5,24m/s, ângulo inicial de 150°, com tamanho do braço do pêndulo de 750mm e martelo com energia potencial inicial de 300J. Foram utilizados oito corpos de prova, preparados de acordo com a norma ASTM E 1236.

Figura 9. Máquina de Teste de Impacto modelo JBW-300Z.



Fonte: Dados do Autor (2021).

5.7 ENSAIO DE TRAÇÃO

O ensaio de tração foi realizado no Laboratório de Qualidade da Empresa Ferronorte, localizada em Teresina – PI, utilizando a máquina universal de ensaios AGS-X, da marca Shimadzu, Figura 10. Os corpos de prova foram preparados seguindo a proporção dos corpos de prova presentes na norma ASTM E8M, com 100 mm de comprimento, 40 mm largura, 1,20 mm de espessura, sendo analisado um total de dez corpos de prova. O material foi submetido método de tração com célula de carga de 300kN sem extensão de campo superior com uma velocidade média de 2 mm/min.

Figura 10. Máquina universal de ensaios AGS-X – Shimadzu.



Fonte: Dados do Autor (2021).

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 SOLDABILIDADE DO AÇO DP 1200

6.1.1 Temperatura de Fusão e Carbono Equivalente (Ceq)

Os resultados obtidos pela análise da composição química do material estão presentes na Tabela 1 e Tabela 2, os dados foram divididos na porcentagem de peso e partes por milhão (ppm).

Tabela 1. Composição química - %peso.

COMPOSIÇÃO QUÍMICA (% peso)								
C	Mn	Si	P	Cr	Ni	Al	Cu	Ti
0,22	2,31	0,55	0,02	0,03	0,03	0,03	0,01	0,02

Fonte: Dados do autor (2021)

Tabela 2. Composição química – ppm.

COMPOSIÇÃO QUÍMICA (ppm)					
S	Mo	W	V	Nb	B
0,000123	0,00018	0,0033	0,0025	0,0072	0,0046

Fonte: Dados do Autor (2021)

Os parâmetros de soldagem e os seus efeitos são influenciados por fatores, como: espessura do material, método de fabricação, composição química e outros. A análise desses fatores se torna pertinente na avaliação da soldabilidade do aço, pois influenciam de forma direta nas propriedades finais do mesmo.

A utilização dos valores de componentes de liga para determinar a temperatura de fusão do material é bastante satisfatória, pois permite prever os parâmetros de fusão e solidificação tomando como base a composição do material. A equação 1 de Roeser e Wensel é aplicada para aços ligados, incluindo o Aço DP 1200.

$$Tf = 1539 - fxC + 8xSi + 5xMn + 30xP + 5xCu + 25xS + 1,5xCr + 4xNi + 2xMo + 2xV + W + 2,5xAl + 14xAs + 10xSn + 1300xH + 80xO \quad (\text{Eq. 1})$$

Valor de $f = 65$, se $\%C < 1\%$ ou $f = 70$, se $\%C > 1\%$

Ao aplicar os dados referentes a composição química na Eq. 1, tem-se:

$$Tf = 1539 - 65xC + 8x0,55 + 5x2,31 + 30x0,02 + 5x0,01 + 25x0,00012 + 1,5x0,03 + 4x0,03 + 2x0,00018 + 2x0,0025 + 0,0033 + 2,5x0,03 + 14x0 + 10x0 + 1300x0 + 80x0$$

$$Tf = 1507,87^{\circ}\text{C}$$

De acordo com o trabalho de Carvalho (2020), que analisou essa determinação para o mesmo material, a temperatura *liquidus* dos aços de baixo teor de carbono, está entre 1490°C a 1530°C , desse modo a temperatura encontrada está em concordância com a literatura.

Uma maneira de analisar a soldabilidade do aço é mediante o cálculo do carbono equivalente, pois indica a suscetibilidade a trincas e, caso necessário, a faixa de temperatura de pré-aquecimento. Esse cálculo é feito aplicando os dados de composição química na equação 2, essa equação é utilizada devido a porcentagem de carbono no material, superior a 0,12%.

$$CE = \%C + \frac{\%Mn}{6} + \frac{\%Mo}{4} + \frac{\%Cr}{5} + \frac{\%Ni}{15} + \frac{\%Cu}{15} + \frac{\%P}{3} \quad (\text{Eq.2})$$

Ao aplicar os dados referentes a composição química na Eq.2, tem-se:

$$CE = \%0,22 + \frac{2,31}{6} + \frac{0,00018}{4} + \frac{0,03}{5} + \frac{0,03}{15} + \frac{0,01}{15} + \frac{0,02}{3}$$

$$CE = 0,613$$

Quanto maior o valor de carbono equivalente maior será a suscetibilidade a trincas do material. Conforme explana o quadro 6, valores de carbono equivalente maior de 0,60 necessitam de pré-aquecimento antes do processo de soldagem.

Quadro 12. Relação entre C_{eq} e pré-aquecimento.

Carbono Equivalente C_{eq} (%)	Temperatura de pré-aquecimento recomendada
< 0,30	Opcional
0,31 – 0,45	100°C – 200°C
0,45 – 0,60	200°C – 250°C
> 0,60	250°C – 300°C

Fonte: ESAB (2005)

Ao comparar o resultado obtido com as informações de Carvalho (2020), é possível perceber que esses valores estão em concordância visto que o valor obtido pelo mesmo foi de $CE = 0,622$.

6.1.2 Análise Térmica

Os dados da avaliação térmica consistem nos parâmetros de soldagem do material, como os valores de amperagem e tensão foram aproximadamente os mesmos para cada amostra, 30A e 40V respectivamente, eles não foram incluídos na tabela 3. Os valores obtidos para a velocidade de soldagem, energia de soldagem e aporte térmico, foram calculados utilizando as equações 1 e 2 do estudo de Marques e Modenesi (2014).

Tabela 3. Parâmetros de soldagem – Aço DP1200 (continua).

Amostra	Tempo (s)	Velocidade de soldagem (mm/s)	Energia de Soldagem (J/mm)	Aporte térmico (J/mm)
1	56,20	2,23	535,71	375,00
2	56,00	2,23	538,12	376,68
3	55,90	2,24	542,99	380,09
4	53,40	2,34	563,38	394,37

Tabela 4. Parâmetros de soldagem – Aço DP1200 (conclusão).

5	54,80	2,28	540,54	378,38
6	55,00	2,27	542,99	380,09
7	55,54	2,25	542,99	380,09
8	53,90	2,31	545,45	381,82
Média	55,09	2,27	544,02	380,81
Desvio Padrão	0,95	0,03	7,87	5,51

Fonte: Dados do Autor (2021)

Ao comparar os resultados obtidos no processo de soldagem TIG autógeno com os resultados de Carvalho (2020), presentes na Tabela 4, para o mesmo material e condições de processo semelhantes, porém utilizando metal de adição, é possível perceber que a realização da soldagem sem metal de adição alterou significativamente os parâmetros observados.

Tabela 5. Parâmetros de soldagem – Aço DP1200 com metal de adição.

Metal de adição	Tempo (s)	Velocidade de soldagem (mm/s)	Energia de Soldagem (J/mm)	Aporte térmico (J/mm)
1-70S3	141,36	0,88	474,97	166,24
2-70S3	146,27	0,85	409,56	143,34
3-70S3	134,38	0,93	516,02	180,61
1-308L	213,03	0,59	596,48	208,77
2-308L	182,97	0,68	614,78	215,17
4-308L	161,58	0,77	620,47	217,16
Média	141,30	0,88	497,36	174,08
Desvio Padrão	4,39	0,03	63,16	22,10

Fonte: Adaptado de Carvalho (2020).

Por se tratar de uma chapa de espessura fina o tempo de soldagem para o processo autógeno foi menor do que para o mesmo processo utilizando metal de adição, consequentemente aumentando a velocidade de soldagem. No entanto, os

valores de energia de soldagem variam quando comparados com os diferentes tipos de consumíveis que foram utilizados.

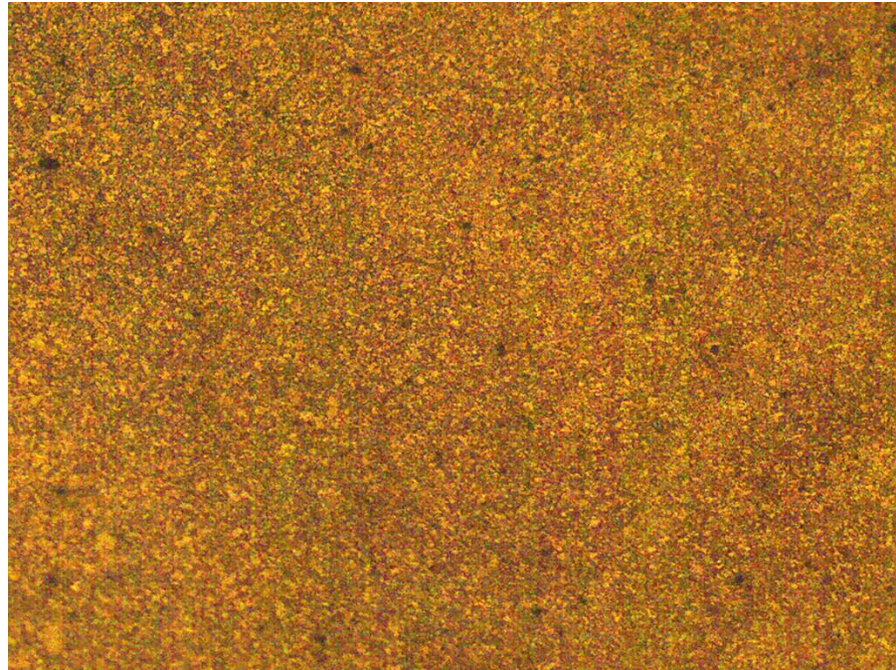
Sabe-se que a energia de soldagem é a energia que foi liberada durante o processo e influencia diretamente nos efeitos da solda. Em comparação com o primeiro tipo de consumível os valores de energia encontrados foram maiores, enquanto no segundo tipo os valores de energia foram menores, o que significa que para o primeiro tipo houve uma menor liberação de calor em relação a soldagem autógena e para o segundo tipo houve uma maior liberação quando comparado com o mesmo processo.

Para os valores de aporte térmico, nota-se que o processo autógeno obteve valores mais altos, a influência da espessura do material é um dos principais fatores para obtenção desse resultado, pois proporciona uma maior distribuição de energia em toda peça, afetando assim sua microestrutura e propriedades mecânicas.

6.2 ANÁLISE MICROESTRUTURAL

A análise microestrutural das amostras, utilizando uma lente de 100x permitiu a visualização da microestrutura para as diferentes regiões do material. Uma imagem da microestrutura do metal de base após o processo de soldagem é ilustrada na figura 11, também foi extraída do estudo de Carvalho (2020) a micrografia do metal de base como recebido, para a melhor visualização das transformações microestruturais, figura 12.

Figura 11. Microestrutura MB aço DP1200 após a soldagem.



Fonte: Dados do Autor (2021)

Figura 12. Microestrutura aço DP1200 como recebido.



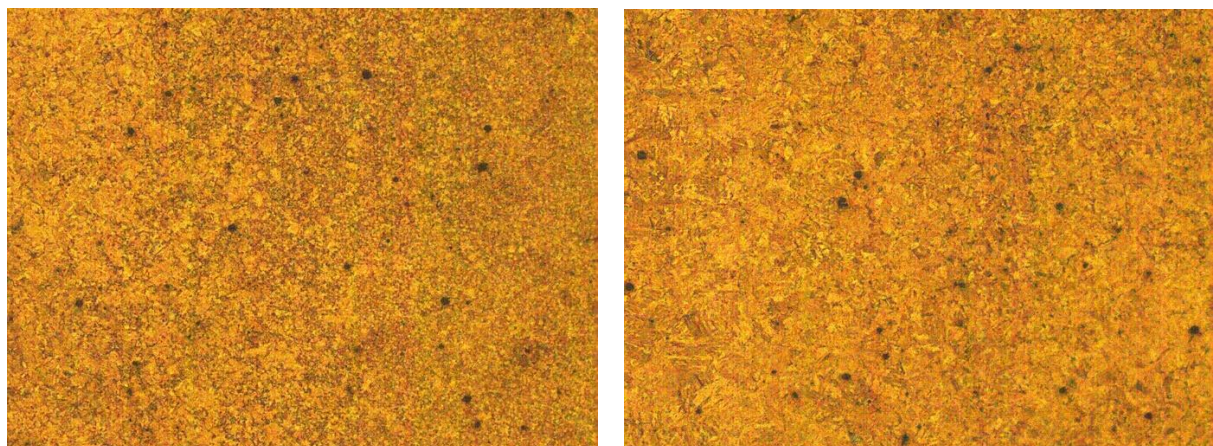
Fonte: Carvalho (2020)

Para a comparação das imagens do metal de base, nota-se que a microestrutura é semelhante onde os pontos mais claros são as regiões de ferrita e a

região mais escura corresponde a martensita. É possível perceber ainda a presença de alguns pontos, nas duas microestruturas, esses pontos podem ser porosidade já existente no material e mais afetado durante o aquecimento proveniente da soldagem ou uma corrosão por pites provocado pelo ataque químico no processo de metalografia. Em imagens com maior ampliação da lente, pode-se observar melhor as características de cada fase, como por exemplo ferrita poligonal e martensita, presentes no aço DP1200.

Como foi relatado nos dados do ciclo térmico de soldagem os valores de aporte térmico foram consideravelmente altos, resultando em alterações significativas na microestrutura, essas alterações são confirmadas com a comparação das regiões da zona termicamente afetada e metal de base, na figura 13. É possível perceber o aumento dos grãos e a predominância da fase martensita desde a formação da zona fundida até a ZTA, como aponta a figura 14.

Figura 13. Microestrutura - ZTA e MB.

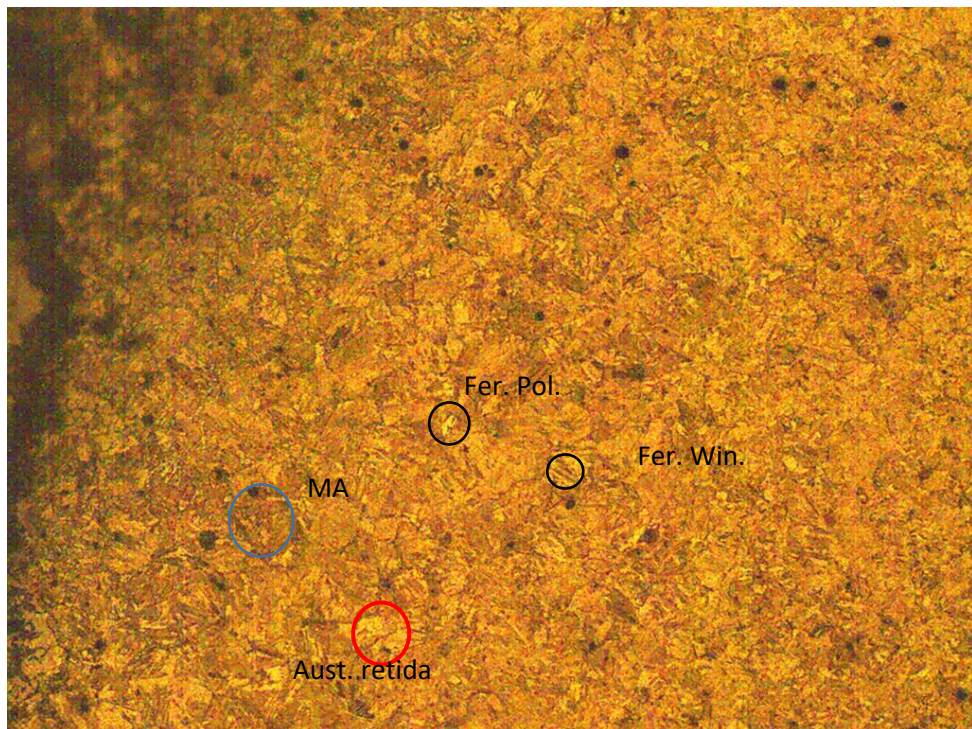


a) ZTA e MB.

b) ZTA.

Fonte: Dados do Autor (2021)

Figura 14. Microestrutura ZF e ZTA.



Fonte: Dados do Autor (2021)

Na figura estão indicados os contornos de grão de austenita que foram nucleados em novas fases após o aquecimento durante o processo de soldagem na fase martensita (MA). Durante o aquecimento o material sofre uma austenitização, sendo então o processo de resfriamento um determinante nas características microestruturais das fases. O material foi resfriado lentamente a temperatura ambiente, resultando assim nessa região de grãos maiores.

Na região da ZTA observa-se a predominância de grãos martensíticos e a presença de ferrita de Widmanstätten, essas ripas de ferrita crescem lateralmente ao metal de base e zona fundida. Outra fase componente observada é a ferrita proeutetóide, indicada na figura, que é o constituinte proveniente da formação da martensita após a estabilização da austenita retida. Uma fração de austenita retida também é identificada nessas regiões mais claras, conforme mostra a figura.

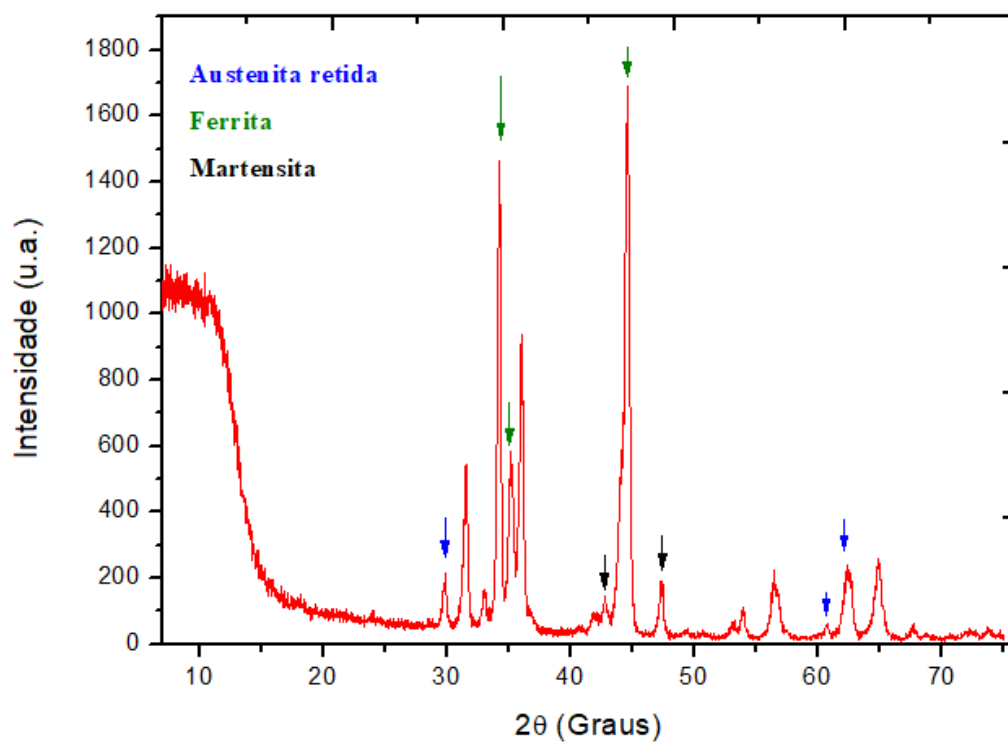
Na zona fundida, identifica-se uma microestrutura mais refinada dos grãos em comparação a ZTA, essa microestrutura é composta pelas fases ferrita e martensita.

Há ainda a formação de uma fase com morfologia semelhante a ferrita de Widmanstätten, caracterizada como bainita superior.

6.3 ANÁLISE CRISTALOGRÁFICA

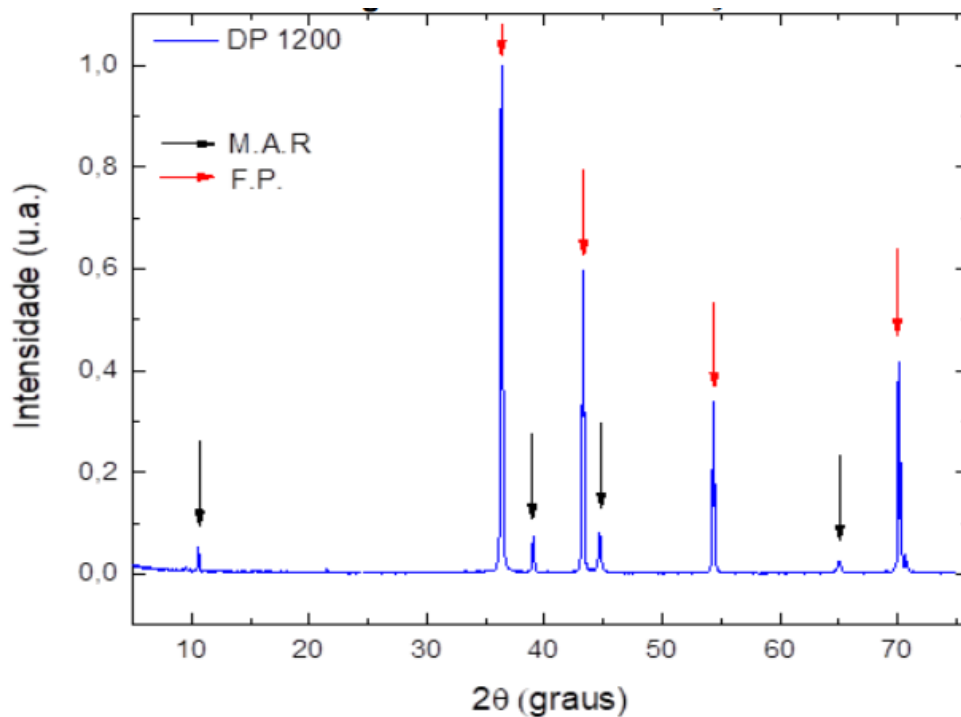
As modificações estruturais observadas na análise microestrutural são observadas através da obtenção do difratograma para amostra após a soldagem (Figura 15) e a comparação com o difratograma do material como recebido (Figura 16). Para o material como recebido nota-se a existência dos picos para ferrita poligonal e martensita, retirado do estudo de Carvalho (2020).

Figura 15. Difratograma - Aço DP1200 após a soldagem.



Fonte: Dados do Autor (2021).

Figura 16. Difratoograma - Aço Dp1200 como recebido.



Fonte: Carvalho (2020)

As cartas cristalográficas utilizadas no estudo de Carvalho (2020) foram COD 2300091 e ICSD 009051, referentes a cementita e silicato de magnésio, respectivamente. Ao comparar essas cartas com o difratograma do material após o processo de soldagem observou-se que para a carta COD 2300091 a relação entre os picos é muito pouca, sendo observados apenas os planos (200), (220), (212), (132) e (321). Enquanto a utilização de outra carta cristalográfica COD 9016584, observou-se uma maior conformidade com os picos existentes.

Com base nisso os picos encontrados, apontados pelas setas na figura, mostram que a difração ocorreu nos planos (111), (200), (211), (220), (022), (202), (212), (311), (222), (321). De acordo com o estudo de Emadoddin *et al.* (2006), o padrão de difração da ferrita ocorre nos planos (200) e (220), podendo assim atribuir esses picos a ferrita. De acordo com o estudo de Ferreira (2015), os picos referentes a austenita são (111), (200), (220), (311) e (222), em comparação com o difratograma, os picos (111), (311) e (222), foram atribuídos a austenita retida após o processo de soldagem.

Para a fase martensita, os picos de difração atribuídos foram, (211) e (022), que estão em conformidade com o trabalho de Viana (2018), onde apresenta que os picos referentes a fase martensita são: (110), (011), (200), (002), (211), (112), (220) e (022). Com base nos resultados do difratograma verifica-se a presença de austenita retida no material após a soldagem. A presença de austenita retida provoca efeitos nas propriedades mecânicas do material como tenacidade e dureza.

6.4 PROPRIEDADES MECÂNICAS

6.4.1 Microdureza

As medidas obtidas pela análise de microdureza nas diferentes regiões da amostra constam na Tabela 5.

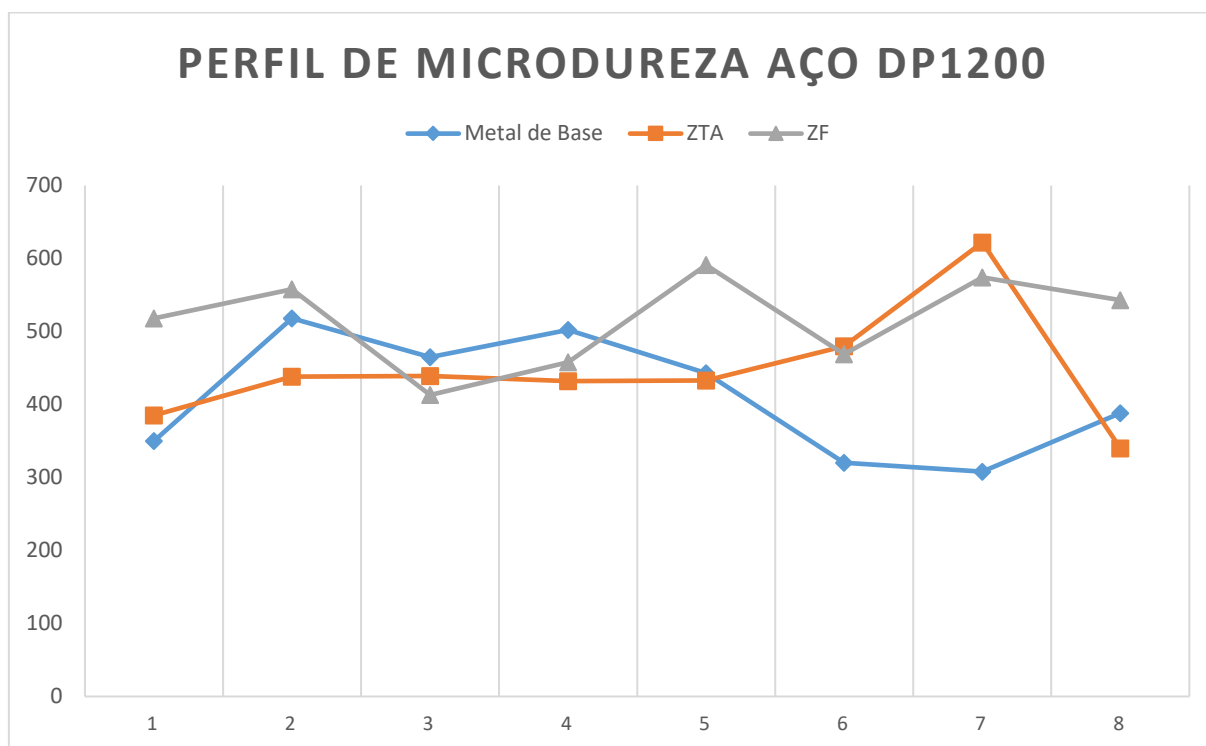
Tabela 6. Resultados da análise de microdureza.

<i>Dureza (HV)</i>					
<i>Metal de Base</i>		<i>ZTA</i>		<i>Zona Fundida</i>	
LE	LD	LE	LD	LE	LD
350	443	385	433	518	591
518	320	438	480	558	469
465	308	439	622	413	574
502	388	432	340	458	543

Fonte: Dados do Autor (2021)

Com base na tabela foi construído o gráfico para a melhor visualização dos dados coletados. A Figura 17, ilustra o aumento da dureza conforme a respectiva mudança da área analisada.

Figura 17. Gráfico - Perfil de microdureza – Aço DP1200.



Fonte: Dados do Autor (2021)

O perfil de microdureza permite observar como as transformações microestruturais no provocadas pelo ciclo térmico de soldagem afetaram no amolecimento ou endurecimento do material. De acordo com Farabi et al. (2008), os aços DP apresentam amolecimento na ZTA, esse amolecimento é ocasionado pelo revenimento da martensita.

De acordo com o gráfico, a ZTA apresentou valores de dureza menores que algumas regiões do metal de base, esse fator é justificado pela presença da austenita retida nessa região, além do revenimento da martensita, ocasionando essa diminuição da dureza.

A zona fundida apresenta em dois pontos um valor de dureza semelhante ao da ZTA, isso pode ser justificado pelo processo de decarbonetação que pode acarretar essa diminuição quando associado aos elementos de liga presentes no material. Em alguns pontos foram obtidos valores mais altos de dureza, isso pode ser justificado pela proximidade das marcações.

6.4.2 Tenacidade

Os dados obtidos no ensaio de impacto são mostrados na tabela 6. Os dados demonstram que o material possui um bom padrão de tenacidade, obtendo valores altos de absorção de energia até a ruptura. Esse parâmetro é associado a presença de austenita retida, martensita e bainita superior na região da ZTA do material e ZF.

Tabela 7. Dados Tenacidade - Aço DP1200 após a soldagem.

<i>Corpo de prova</i>	<i>Energia absorvida (J/mm)</i>
1	295
2	295
3	283
4	290
5	288
6	295
7	295
8	285
9	285
10	290

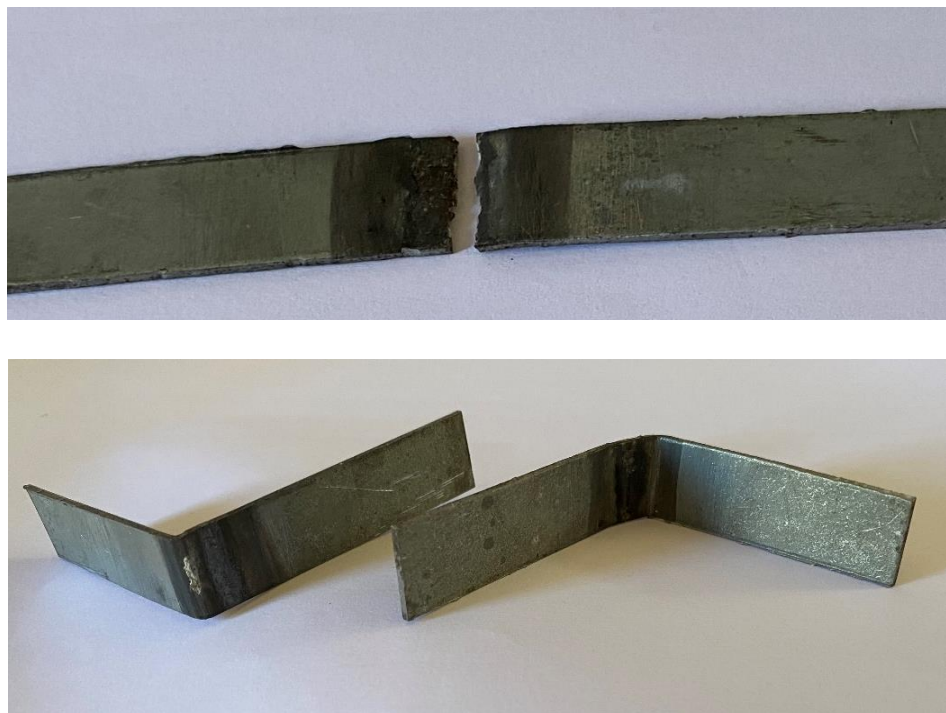
Fonte: Dados do Autor (2021).

De acordo com trabalhos encontrados na literatura, a presença de austenita retida no material influencia no aumento da tenacidade (VILELA *et al*, 2020). No entanto, como não foram encontrados trabalhos comparativos com o ensaio realizado, pode-se levar em consideração as próprias propriedades dos aços DP, pois possuem essa característica pela configuração bifásica. Como o material soldado apresentou algumas transformações microestruturais seria necessário uma melhor investigação dessas transformações e a influência das mesmas na transição-dúctil frágil do material.

Porém, conforme os resultados obtidos, o parâmetro de energia absorvida continua desejável para aplicação do aço na indústria automobilística, principalmente nas regiões do automóvel que são mais prováveis de sofrer impacto.

Outro ponto relevante a ser discutido sobre o ensaio foi a conformação das chapas após o ensaio. Das dez amostras analisadas apenas 3 fraturaram, a figura apresenta as imagens das chapas após a fratura. Os outros corpos de prova sofreram apenas deformação permanente sem fraturar.

Figura 18. Corpos de prova após o ensaio.



Fonte: Dados do Autor (2021)

Tal fato pode ser atribuído às microestruturas encontradas no material após a soldagem, já que a concentração de austenita retida atua como barreira na propagação de trincas, justificando a ausência de fratura. Outro fator a ser considerado é a menor espessura da amostra que não restringe a deformação. Segundo Dowling (2013), a possibilidade do material sofrer fratura é proporcional ao aumento da espessura do mesmo.

6.1.3 Ensaio de Tração

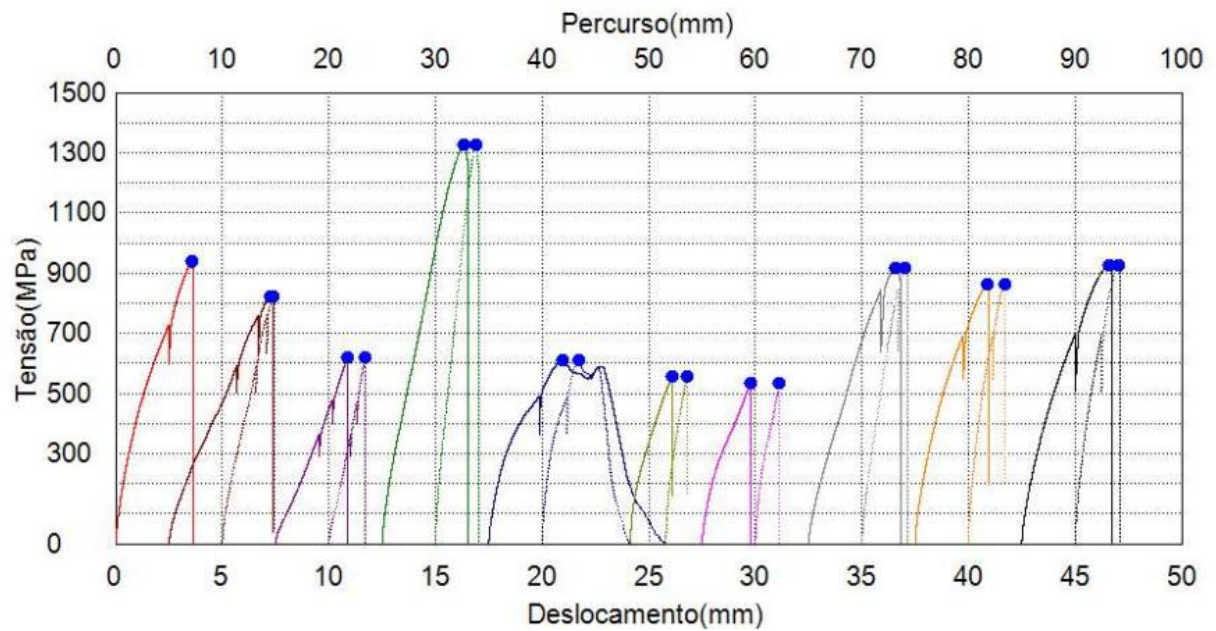
Os dados obtidos no ensaio de tração para as amostras analisadas podem ser visualizados na curva tensão x deformação (Figura 19) e na Tabela 7.

Tabela 8. Dados Tração – Aço DP após a soldagem.

<i>Corpo de Prova</i>	<i>Força Máx. (kN)</i>	<i>Limite de resistência à tração (MPa)</i>	<i>Tensão de Escoamento (0,2%) (MPa)</i>	<i>Alongamento (%)</i>
1	16,90	938,28	423,04	10,22
2	14,81	822,75	408,68	11,98
3	11,16	619,92	338,76	13,32
4	23,89	1327,29	471,72	12,22
5	11,00	611,12	343,87	14,22
6	10,01	556,05	377,36	13,32
7	9,61	534,11	340,67	19,76
8	16,53	918,43	473,20	20,66
9	15,52	862,35	428,53	14,88
10	16,70	927,79	428,43	21,54
Média	14,61	811,81	403,43	15,21
Desvio Padrão	4,36	242,40	51,15	3,98

Fonte: Dados do Autor (2021)

Figura 19. Curva tensão x deformação.



Fonte: Dados do Autor (2021).

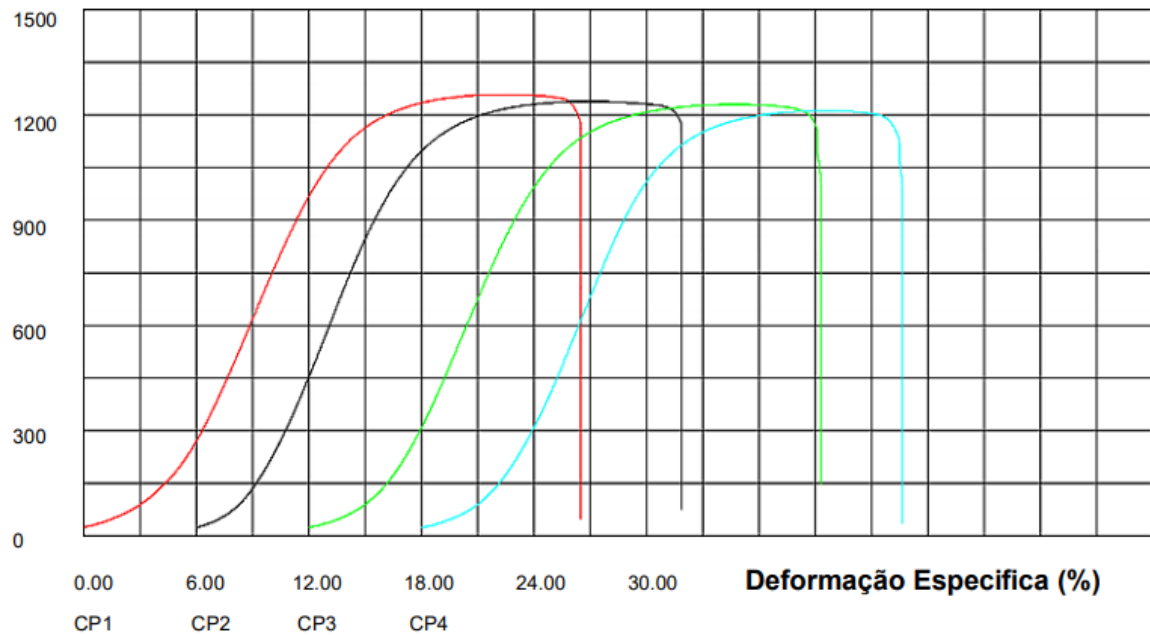
Os dados foram comparados com o trabalho de Carvalho (2020), onde analisou as propriedades mecânicas para o aço DP 1200 sem a realização da soldagem, conforme mostram os dados da tabela 8 e da figura 20.

Tabela 9. Dados - ensaio de tração aço DP1200 s/ solda.

<i>Corpo de prova</i>	<i>Força Máx. (kN)</i>	<i>Limite de resistência à tração (MPa)</i>	<i>Tensão de Escoamento (MPa)</i>	<i>Alongamento (%)</i>
1	76,9	-	954,65	26,5
2	75,7	-	907,93	25,8
3	66,3	-	910,60	27,3
4	65,3	-	940,97	25,6
Média	71,07	1210	928,5	26,32
Desvio Padrão	6,10	-	22,97	0,77

Fonte: Adaptado de Carvalho (2020).

Figura 20. Curva tensão deformação - Aço DP1200 s/ solda.



Fonte: Carvalho (2020)

Com base na Figura 21, onde mostra a região de fratura do corpo de prova, é possível perceber que a falha ocorreu no centro da junta soldada.

Figura 21. Fratura corpo de prova.



Fonte: Dados do Autor (2021).

Ao comparar as propriedades mecânicas do aço DP 1200 sem soldagem com os resultados obtidos para o aço após o processo, nota-se as perdas representativas em todas os parâmetros. O limite de resistência à tração do aço DP, está na faixa de 1200 – 1230 MPa, no entanto a média para o aço após o processo de soldagem é de

811,81 MPa. O limite de resistência à tração é influenciado pela corrente de soldagem, diminuindo na medida que a corrente aumenta (HOLZ, 2017).

De acordo com a análise microestrutural do aço após o processo de soldagem, verificou-se a influência do aporte térmico no crescimento dos grãos austeníticos e no revenimento da martensita. Esses fatores influenciam tanto o LRT quando o alongamento do material, ocasionando uma diminuição desses parâmetros devido as propriedades das fases presentes.

7 CONCLUSÃO

Diante do que foi exposto é possível concluir que o processo de soldagem TIG autógeno para o aço DP 1200 apresentou alterações no ciclo térmico de soldagem, microestrutura e propriedades mecânicas, quando comparado com o mesmo processo utilizando metal de adição.

Para o ciclo térmico a diminuição do tempo de soldagem provocou um aumento na velocidade de soldagem e consequentemente na energia de soldagem e aporte térmico. Os valores de energia de soldagem e aporte térmico aumentaram 9,38% e 164,30%, respectivamente, em relação ao aço soldado com metal de adição.

Tais fatores influenciaram na microestrutura do material, principalmente na ZTA e ZF. Mediante a análise metalográfica do material, foi percebida a presença de grãos claros de austenita retida nessas regiões e um maior tamanho de grão em relação ao metal de base. Esses dados foram confirmados através da análise do difratograma, obtido pela técnica de difração de Raios – X, onde utilizando as cartas cristalográficas foi possível identificar os picos referentes a fase austenita, ferrita e martensita.

Ao analisar o comportamento mecânico do material, verificou-se a influência das transformações microestruturais nas propriedades de dureza, tenacidade e resistência a tração do material. A ZTA material apresentou uma diminuição nas propriedades de dureza quando comparado ao metal de base, esse fato foi atribuído a presença de austenita retida e o revenimento da martensita ocasionada pelo calor gerado no processo de soldagem. A ZF também apresentou, em alguns pontos, um valor menor de dureza em relação ao MB que foi justificado pelo processo de decarbonetação dos aços.

No tocante a tenacidade, o material apresentou valores de energia absorvida bem próximos a energia inicial, 290,01J/mm e 300J, respectivamente. Esse elevado valor de tenacidade foi atribuído a presença de austenita retida no material. Ao analisar o comportamento do material à tração, foi identificado uma diminuição significativa em todos os parâmetros. O aço DP 1200, possui o limite de resistência à tração em aproximadamente 1200Mpa, no entanto, a média do limite de resistência à tração para os corpos de prova analisados foi de 811,81MPa. Os corpos de prova analisados por tração apresentaram fratura na região do cordão de solda, tal

condições seria aceita se não houvesse a perda de propriedades mecânicas do material.

Desse modo, verifica-se que os fatores do processo de soldagem influenciaram na microestrutura e consequentemente no comportamento mecânico do material. Portanto, são sugeridas mudanças no processo de soldagem com a diminuição da corrente e controle do resfriamento do material.

REFERENCIAS

AGARWAL, G. et al. Evaluation of solidification cracking susceptibility during laser welding in advanced high strength automotive steels. **Materials & Design**, [s.l.], v. 183, p. 104-108, dez. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2019.108104>.

ANAMAN, Sam Yaw et al. Microstructure and mechanical/electrochemical properties of friction stir butt welded joint of dissimilar aluminum and steel alloys. **Materials Characterization**, [s.l.], v. 154, p. 67-79, ago. 2019. Elsevier BV.

CARVALHO, Igor Antonio de Oliveira. **CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL E MECÂNICA DO AÇO GALVANIZADO DP1200, SOLDADO PELO PROCESSO TIG COM METAL DE ADIÇÃO**. 2020. 114 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí, Teresina, 2020.

CHABOK, Ali et al. Effect of pulse scheme on the microstructural evolution, residual stress state and mechanical performance of resistance spot welded DP1000-GI steel. **Science And Technology Of Welding And Joining**, [S.L.], v. 23, n. 8, p. 649-658, 22 mar. 2018. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/13621718.2018.1452875>.

CORREARD, G. C. C. et al. Development of laser beam welding of advanced high-strength steels. **Int J Adv Manuf Technol**, [s. l.], v. 83, p. 1967–1977, 2016.

CUI, Q.I. et al. Effect of coating on fiber laser welded joints of DP980 steels. **Materials & Design**, [s.l.], v. 90, p. 516-523, jan. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2015.10.098>.

DIGIOVANNI, Christopher et al. Impact of liquid metal embrittlement cracks on resistance spot weld static strength. **Science And Technology Of Welding And Joining**, [S.L.], v. 24, n. 3, p. 218-224, 7 set. 2018. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/13621718.2018.1518363>.

EMADODDIN, E. et al. Effect of intercritical annealing on retained austenite characterization in textured TRIP-assisted steel sheet. **Materials Characterization**, [S.L.], v. 57, n. 4-5, p. 408-413, dez. 2006. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matchar.2006.04.006>.

EVIN, Emil et al. LASER WELDING IMPACT ON DEFORMATION PROPERTIES OF STEELS WHEN USED FOR CAR BODY PARTS. **Mm Science Journal**, [s.l.], v. 2016, n. 05, p. 1317-1321, 16 nov. 2016. MM Publishing, s.r.o.. http://dx.doi.org/10.17973/mmsj.2016_11_2016112.

EVIN, Emil et al. The Influence of Laser Welding on the Mechanical Properties of Dual Phase and Trip Steels. **Metals**, [s.l.], v. 7, n. 7, p. 239, 29 jun. 2017. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/met7070239>.

FARABI, N. et al. Fatigue properties of laser welded dual-phase steel joints. **Procedia Engineering**, v. 2, p. 835–843, 2010.

FARIA NETO, Antonio dos Reis de. **AÇOS AVANÇADOS DE ALTA RESISTÊNCIA: AVALIAÇÃO DA MICROESTRUTURA E PROPRIEDADES DOS AÇOS DP 600 E DP 780**. 2015. 69 f. Monografia - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2015

FERNANDES, F. A. O. et al. Optimal parameters for laser welding of advanced high-strength steels used in the automotive industry. **Procedia Manufacturing**, [s. l.], v. 13, p. 219-226, 2017.

FERREIRA, Helder Carvalho. **EFEITO DO BANDEAMENTO E TAXA DE RESFRIAMENTO NA OCORRÊNCIA DE AUSTENITA RETIDA EM AÇO BAIXO CARBONO COM ADIÇÕES DE MANGANÊS E SILÍCIO**. 2015. 179 f. Tese (Doutorado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2015.

FREI, Julian et al. Investigation of liquid metal embrittlement of dual phase steel joints by electro-thermomechanical spot-welding simulation. **Science And Technology Of Welding And Joining**, [S.L.], v. 24, n. 7, p. 624-633, 22 fev. 2019. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/13621718.2019.1582203>

GALÁN, J. et al. Advanced high strength steels for automotive industry. **Revista de Metalurgia**, v. 48, p. 118–131, 2012.

GAO, H. et al. Hot cracking investigation during laser welding of high-strength steels with multi-scale modelling approach. **Science And Technology Of Welding And Joining**, [S.L.], v. 23, n. 4, p. 287-294, 4 out. 2017. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/13621718.2017.1384884>.

GHASSEMI-ARMAK, H. *et al.* QuasiStatic Spot Weld Strength of Advanced High-Strength Sheet Steels. **Welding Journal**, [S. L.], v. 96, n. 1, p. 104-112, mar. 2017.

GOLDSPIEGEL, Fabien *et al.* Numerical modelling of high-speed nailing process to join dissimilar materials: Metal sheet formulation to simulate nail insertion stage. **Journal of Materials Processing Tech.**, [S. l.], p. 414-433, 28 out. 2018.

GONG, Hongying *et al.* Experimental investigation of the mechanical response of laser-welded dissimilar blanks from advanced- and ultra-high-strength steels. **Materials & Design**, [s.l.], v. 90, p. 1115-1123, jan. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2015.11.057>.

HARTMAN, T. *et al.* Effect of PCBN tool grade on joint strength and tool life in friction stir spot welded DP 980 steel. **Wear**, [S.L.], v. 328-329, p. 531-536, abr. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wear.2015.03.001>.

HOLZ, Guilherme Krug. **ESTUDO DA SOLDABILIDADE DO AÇO DUAL PHASE 980 APLICÁVEL NA FABRICAÇÃO DE CHASSI DE VEÍCULO DE COMPETIÇÃO FÓRMULA SAE**. 2017. 70 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Automotiva, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2017.

HSU, Tai-I *et al.* Resistance and friction stir spot welding of dual-phase (DP 780)—a comparative study. **The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology**, [S.L.], v. 97, n. 5-8, p. 2293-2299, 10 maio 2018. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-018-2056-0>.

HUIN, Thibaut *et al.* Investigation of the Failure of Advanced High Strength Steels Heterogeneous Spot Welds. **Metals**, [S.L.], v. 6, n. 5, p. 111, 13 maio 2016. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/met6050111>.

JAVAHERI, Ehsan *et al.* Mechanical Properties Characterization of Welded Automotive Steels. **Metals**, [S.L.], v. 10, n. 1, p. 1, 18 dez. 2019. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/met10010001>.

KEELER, S.; KIMCHI, M.; J MOONEY, P. Advanced high-strength steels application guidelines version 6.0. Middletown: **World Auto Steel**, 2017.

KHEDKAR, P. *et al.* A review on advanced high strength steels. **International Journal of Current Engineering and Technology**, v. 6, p. 240–243, 2016.

KHRAISAT, Walid et al. The effect of rolling direction on the weld structure and mechanical properties of DP 1000 steel. **Cogent Engineering**, [s.l.], v. 5, n. 1, p. 1-11, 2 jul. 2018. Informa UK Limited.

LIM, Yong et al. Dissimilar Materials Joining of Carbon Fiber Polymer to Dual Phase 980 by Friction Bit Joining, Adhesive Bonding, and Weldbonding. **Metals**, [S.L.], v. 8, n. 11, p. 865, 24 out. 2018. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/met8110865>.

LU, Ying et al. Dissimilar metal joining of aluminium to zinc-coated steel by ultrasonic plus resistance spot welding – microstructure and mechanical properties. **Science And Technology Of Welding And Joining**, [S.L.], v. 25, n. 3, p. 218-227, 18 set. 2019. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/13621718.2019.1667051>.

MAHMOUDINIYA, Mahdi et al. Friction stir welding of advanced high strength dual phase steel: microstructure, mechanical properties and fracture behavior. **Materials Science And Engineering: A**, [s.l.], v. 769, p. 138490, jan. 2020.

MARQUES, Paulo Villani; MODENESI, Paulo José. Algumas Equações Úteis em Soldagem. **Revista Soldagem & Inspeção**, São Paulo, v. 19, n. 01, p. 91-102, fev. 2014.

N. Dowling, **Mechanical Behavior of Materials – Engineering Methods for deformation, fracture and fatigue**, 4^a ed. Pearson Education Limited, 2013

NANDA, T. et al. Third generation of advanced high-strength steels: processing routes and properties. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L. **Journal of Materials: Design and Applications**, v. 0, p. 1–30, 2016.

NGUYEN, van Nhat et al. Investigation on lap-joint friction stir welding between AA6351 alloys and DP800 steel sheets. *Sādhanā*, [s.l.], v. 43, n. 10, p. 1-7, 20 ago. 2018. **Springer Science and Business Media LLC**.

PAKKANEN, Jukka et al. Experimental investigation and numerical simulation of resistance spot welding for residual stress evaluation of DP1000 steel. **Welding In The World**, [S.L.], v. 60, n. 3, p. 393-402, 5 fev. 2016. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s40194-016-0301-4>.

POURANVARI, Majid et al. DP780 dual-phase-steel spot welds: critical fusion-zone size ensuring the pull-out failure mode. **Materiali In Tehnologije**, [S.L.], v. 49, n. 4, p.

579-585, 25 jul. 2015. Institute of Metals and Technology. <http://dx.doi.org/10.17222/mit.2014.184>.

POURANVARI, Majid et al. Understanding the factors controlling the interfacial failure strength of advanced high-strength steel resistance spot welds: hardness vs. fracture toughness. **Science And Technology Of Welding And Joining**, [S.L.], v. 23, n. 6, p. 520-526, 5 jan. 2018. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/13621718.2017.1421303>.

QI, Lin et al. Improve resistance spot weld quality of advanced high strength steels using bilateral external magnetic field. **Journal Of Manufacturing Processes**, [S.L.], v. 52, p. 270-280, abr. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.02.030>.

R., Indhu et al. Yb: yag laser welding of dual phase steel to aluminium alloy. **Journal Of Materials Processing Technology**, [s.l.], v. 262, p. 411-421, dez. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2018.05.022>.

RASHID, M. S. Dual phase steels. **Annual Review of Materials Science**, v. 11, p. 245– 266, 1981.

REZAYAT, H. et al. Correlation of Local Constitutive Properties to Global Mechanical Performance of Advanced High-Strength Steel Spot Welds. **Metallurgical And Materials Transactions A**, [S.L.], v. 51, n. 5, p. 2209-2221, 10 mar. 2020. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s11661-020-05714-3>.

ROSSINI, M. et al. Investigation on dissimilar laser welding of advanced high strength steel sheets for the automotive industry. **Materials Science And Engineering: A**, [s.l.], v. 628, p. 288-296, mar. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.msea.2015.01.037>.

SILVA, Letícia Alves da. **Caracterização mecânica e microestrutural de aços bifásicos DP1000 e DP1200 aplicados na indústria automobilística**. 2017. 62 f. Monografia - Curso de Engenharia de Materiais, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2017.

T. L. Anderson, **Fracture Mechanics – Fundamentals and Applications**, 3ª ed. CRC Press, 2005.

TASAN, C. C. et al. An Overview of Dual-Phase Steels: Advances in Microstructure Oriented Processing and Micromechanically Guided Design. **Annual Review of Materials Research**, v. 45, n. 1, p. 150504161757009, 2014.

VIANA, Marina Ferraz. **Difração de raios-X aplicada ao estudo de transformações de fase durante o tratamento térmico de aços**. 2018. 12 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2018.

VIJAYAN, Vijeesh et al. Shrinkage Void Formation in Resistance Spot Welds: its effect on advanced high-strength-steel weld strength and failure modes. **Journal Of Materials Engineering And Performance**, [S.L.], v. 28, n. 12, p. 7514-7526, 21 nov. 2019. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s11665-019-04465-6>.

VILELA, KC. et al. Influência da temperatura e tempo do tratamento térmico de revenimento de duplo estágio sobre a microestrutura e propriedades do metal de solda 13% Cr, 4% Ni e 0,4% Mo. **Soldagem & Inspeção**. 2020;25:e2520. <https://doi.org/10.1590/0104-9224/SI25.20>

VIŇÁŁ, J. et al. Structural and Mechanical Features of Laser-Welded Joints of Zinc-Coated Advanced Steel Sheets. **Materials Science**, [S.L.], v. 55, n. 1, p. 46-51, jul. 2019. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s11003-019-00250-x>.

WEI, S. T. et al. Weldability and mechanical properties of similar and dissimilar resistance spot welds of three-layer advanced high strength steels. **Science And Technology Of Welding And Joining**, [S.L.], v. 20, n. 1, p. 20-26, 23 set. 2014. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1179/1362171814y.00000000250>.

YAN, Tian et al. Numerical simulation and welding parameters optimization for minimum deformation of AHSS based on RSM & QGA. **Mater. Res. Express**, [S. l.], p. 1-15, 1 nov. 2019.

ZHAO, Dawei et al. An investigation into weld defects of spot-welded dual-phase steel. **The Internatio-nal Journal Of Advanced Manufacturing Technology**, [S.L.], v. 92, n. 5-8, p. 3043-3050, 17 abr. 2017. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-017-0398-7>.

ZHAO, Dawei et al. Modeling and Experimental Research on Resistance Spot Welded Joints for Dual-Phase Steel. **Materials**, [S.L.], v. 12, n. 7, p. 1108, 3 abr. 2019. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/ma12071108>.

ZHAO, Dawei et al. Modeling and process analysis of resistance spot welded DP600 joints based on regression analysis. **Materials & Design**, [S.L.], v. 110, p. 676-684, nov. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2016.08.038>.