

PEDRO BARBOSA FERNANDES

**Avaliação das propriedades mecânicas de juntas sobrepostas dos aços
DP980 e TRIP780 soldadas pelo processo a laser**

Pedro Barbosa Fernandes

**Avaliação das propriedades mecânicas de juntas sobrepostas dos aços
DP980 e TRIP780 soldadas pelo processo a laser**

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia de Materiais da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia de Materiais.

Orientador: Francisco Henrique Cappi de Freitas

F363a	<p>Fernandes, Pedro Barbosa</p> <p>Avaliação das propriedades mecânicas de juntas sobrepostas dos aços DP 980 e TRIP 780 soldadas pelo processo a laser / Pedro Barbosa Fernandes – Guaratinguetá, 2021.</p> <p>48 f. : il.</p> <p>Bibliografia: f. 47-48</p> <p>Trabalho de Graduação em Engenharia de Materiais – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2021.</p> <p>Orientador: Me. Francisco Henrique Cappi de Freitas</p> <p>1. Aço de alta resistência. 2. Soldagem. 3. Indústria automobilística.</p> <p>I. Título.</p> <p style="text-align: right;">CDU 621.791</p>
-------	--

Luciana Máximo

Bibliotecária CRB-8/3595

PEDRO BARBOSA FERNANDES

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO
PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
“GRADUADO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS”

APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS



Prof. Dr. José Vitor Candido de Souza
Coordenador

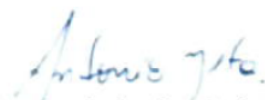
BANCA EXAMINADORA:



Prof. Msc Francisco Henrique Cappi de Freitas
Orientador/UNESP-FEG



Prof. Dr. Marcelo dos Santos Pereira
UNESP-FEG



Prof. Msc Antônio dos Reis Faria Neto
UNESP-FEG

Fevereiro de 2021

DADOS CURRICULARES

PEDRO BARBOSA FERNANDES

NASCIMENTO 31.07.1998 – SÃO PAULO /SP

FILIAÇÃO Marcos Vinícius Fernandes
Mariângela Lima Barbosa Fernandes

2016/2021 Curso de graduação
Engenharia de Materiais- Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá-
FEG-UNESP

dedico este trabalho
de modo especial, à minha família

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus, que ao criar o universo, iluminou a inteligência do homem para explorá-lo. Agradeço pela minha vida, agradeço também a criação e ajuda dada a mim por meus pais Marcos Vinícius Fernandes e Mariângela Lima Barbosa Fernandes, bem como pelo meu padrasto Rogério Costa Fernandes.

Aos meus irmãos e ao resto de minha família e amigos que sempre me apoiaram e me incentivaram em todo o meu período de graduação.

Ao meu orientador, *Prof. Msc Francisco Henrique Cappi de Freitas* que sempre me apoiou em meus projetos e sempre mostrou muita disposição para me auxiliar e orientar. Sem sua orientação a realização deste estudo seria quase impossível.

Ao *Prof. Dr. Marcelo dos Santos Pereira* que durante toda a minha graduação me auxiliou e orientou nas disciplinas de pesquisa, sempre mostrando-se presente e disponível para me auxiliar.

Ao meu grande amigo Carlos Eduardo Moraes que sempre me ajudou em todas as disciplinas da graduação e que, com sua amizade, colaborou e muito para que eu chegasse até aqui.

Às funcionárias da Biblioteca do Campus de Guaratinguetá pela dedicação, presteza e principalmente pela vontade de ajudar;

Aos funcionários da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá pela dedicação e alegria no atendimento.

“Fé é crer no que não vemos. O prêmio da fé é ver o que cremos.”

Santo Agostinho de Hipona

RESUMO

Os aços avançados de alta resistência são uma classe de metais amplamente explorada pela indústria automotiva, uma vez que sua utilização proporciona veículos mais leves e eficientes, com os mesmos fatores de segurança. Nesse sentido, os aços TRIP e DP destacam-se, uma vez que empregam 40% de todo material utilizado em um veículo automotivo. Por conta disso, torna-se imprescindível o estudo dos parâmetros necessários para se realizar uma boa soldagem a laser em uma junta com tais aços. O presente trabalho visa selecionar a melhor combinação de parâmetros de soldagem para tais juntas, sendo os principais a potência do feixe, a velocidade de soldagem e o material da face. A escolha será baseada na análise mecânica e macroscópica de cada junta. Para tanto, uma etapa prévia indicará quais os valores desses parâmetros serão escolhidos e, a partir dessa indicação, se realizará uma etapa principal, na qual oito cordões serão submetidos a um ensaio metalográfico e a ensaios de tração uniaxial e de dureza Vickers. Com os resultados provenientes desses ensaios, pode-se avaliar a integridade de cada cordão de solda, a região de instabilidade microestrutural, eficiência de cada soldagem (%) e o perfil de dureza de cada junta. Ao término do experimento, observou-se que das oito soldagens, três se destacaram por apresentar cordão íntegro e eficiência de soldagem entre 87 e 100%.

PALAVRAS-CHAVE: Aços avançados de alta resistência. Indústria automobilística. Parâmetros de soldagem a laser. Junta TRIP/DP. Ensaios mecânicos.

ABSTRACT

The Advanced High Strength Steels are a class of metal widely explored by the automotive industry, once their use provides lighter vehicles and more efficient, with the same safety factors. In this sense TRIP and DP steels stand out, once they represent 40% of all the used material in a automotive vehicle. Due to that, it becomes essential the study of the needed parameters to make a good laser welding in these steel's joints. The present work aims to select the best combination of these welding parameters, considering beam power, welding velocity and face material the main of those. The choice will be based on the mechanical and macrographic analysis of each joint. For that, one previous step will indicate which of these parameter's values will be the chosen and, after this indication, it will be one main step, in which eight weld bead will be submit to a macrographic, Vickers hardness and uniaxial tension tests. With the results of these tests, it will be possible to evaluate the integrity of each weld bead, the region of microstructural instability, the welding efficiency (%) and the hardness profile of each weld bead. In the end of this work, it could be seen that from the eight welding joints, three has stood out for presenting healthy weld bead and welding efficiency between 87% and 100%.

KEYWORDS: Advanced High Strength Steels. Automotive industry. Laser welding parameters. Joint TRIP/DP. Mechanical tests.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1- Diagrama ilustrativo das faixas de propriedades mecânicas dos aços AHSS.....	16
Figura 2- Esquema da microestrutura do aço DP	17
Figura 3- Esquema da microestrutura do aço TRIP	18
Figura 4- Esquema do processo de emissão estimulada.....	19
Figura 5- Esquema simplificado de uma cavidade laser	20
Figura 6- Processo de soldagem a partir de um laser tipo estado sólido.....	21
Figura 7- Comportamento da curva tensão deformação.....	24
Figura 8- Técnicas de ensaio de dureza Vickers.....	25
Figura 9- Chapas recebidas com as juntas sobreposta de DP980 e TRIP780, soldada pelas 12 diferentes combinações de Potência e Velocidade	28
Figura 10- Esboço do perfil de dureza Vickers por microindentação.....	30
Figura 11- Dimensões do corpo de prova de tração prismático na condição reduzida	31
Figura 12- Imagens dos cordões de solda referentes às corridas experimentais do planejamento principal (a) S1, (b) S2, (c) S3, (d) S4,(e) S5, (f) S6, (g) S7, (h) S8.....	38
Figura 13-: Perfis de dureza Vickers das amostras do planejamento principal (a) S1, (b) S2, (c) S3, (d) S4, (e) S5, (f) S6, (g) S7, (h) S8.....	39
Figura 14- Curvas tensão versus deformação referentes à análise do planejamento principal (a) S1, (b) S2, (c) S3, (d) S4, (e) S5, (f) S6, (g) S7, (h) S8, i) material base	41
Quadro 1 – Avaliação da soldabilidade das juntas sobrepostas em DP980/TRIP780.....	32

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição química do metal base e revestimento de galvanização dos aços DP980 e TRIP780, em percentual massa.	26
Tabela 2 - Prévia experimental: combinação de variáveis para a soldagem de juntas sobrepostas em DP980 e TRIP780	27
Tabela 3 - Experimento principal: combinação de variáveis para a soldagem de juntas sobrepostas em DP980 e TRIP780	29
Tabela 4 - Relação de medições da largura dos cordões da soldagem do planejamento principal.....	39
Tabela 5 - Valores dos limites de ruptura à tração(MPa) das juntas soldadas, material base e eficiência da solda.	43

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AHSS	Advanced High Strength Steels
CDP	Corpo de prova
CP	Complex-Phase
DP	Dual Phase
FB	Ferritic-Bainitic
FSV	FutureSteelVehicle
HF	Hot-Formed
MS/MART	Martensitic
TEM	Modo transversal eletromagnético
TRIP	Transformed-Induced Plasticity
TWIP	Twinning-Induced plasticity
ZTA	Zona termicamente afetada

LISTA DE SÍMBOLOS

ΔE	variação de energia
d_1	diagonal da impressão
p	carga aplicada

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	MOTIVAÇÃO	14
2	OBJETIVOS	15
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
3.1	AÇOS AVANÇADOS DE ALTA RESISTÊNCIA	16
3.1.1	Aço DP	16
3.1.2	Aço TRIP	18
3.2	PRINCÍPIO DO LASER	18
3.3	SOLDAGEM A LASER	20
3.3.1	Variáveis do processo	21
3.4	ENSAIO MACROGRÁFICO	22
3.5	ENSAIOS MECÂNICOS	23
3.5.1	Ensaio de tração uniaxial	23
3.5.2	Ensaio de dureza Vickers	24
4	MATERIAIS E MÉTODOS	26
4.1	MATERIAIS	26
4.2	METODOLOGIA	26
4.2.1	Prévia experimental	27
4.2.2	Experimento principal	28
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	32
5.1	AVALIAÇÃO DA ETAPA EXPERIMENTAL PRÉVIA	32
5.2	A AVALIAÇÃO DA ETAPA EXPERIMENTAL PRINCIPAL	38
5.2.1	Análise metalográfica	38
5.2.2	Dureza Vickers por microindentação	39
5.2.3	Ensaio de tração uniaxial	40
5.2.4	Discussão dos resultados apresentados	43
6	CONCLUSÃO	45
	REFERÊNCIAS	46

1 INTRODUÇÃO

A busca por veículos mais leves e eficientes, com a prioridade na segurança do usuário, levou a indústria automotiva ao programa chamado FSV(FutureSteelVehicle). Este visa à redução da massa dos veículos em até 29%, através de projetos estruturais de aço obtendo, assim, uma redução na emissão de gases, causadores do efeito estufa, de 70%. Nesse sentido, para obter-se essas reduções, e manter-se o nível de segurança do usuário do veículo, o programa utiliza mais de 20 tipos de aços avançados, dentre os quais, se encontram o aço Dual Phase (DP) e o Transformed-Induced Plasticity (TRIP). Estes dois aços, empregam 40% de todo o material utilizado na confecção de um veículo automotivo (WORLDAUTOSTEEL, 2011).

1.1 MOTIVAÇÃO

Dessa forma, alguns cuidados devem ser tomados ao se soldar esses dois tipos de aço, tendo em vista a grande variedade de parâmetros do processo de solda a laser, e as suas peculiaridades microestruturais.

Quanto ao processo de soldagem a laser, muitos parâmetros podem interferir nos resultados das soldagens, sendo esses: diferentes comprimentos de onda, a potência do laser, densidade de potência, qualidade do feixe, diâmetro do feixe, TEM (modo transversal eletromagnético), distância entre a peça e o ponto focal, a velocidade de soldagem, tensão superficial, gás de proteção, fluxo de gás e vácuo, e assim por diante (KATAYAMA,2010).

Essa grande variedade de parâmetros somada à característica dos aços, resulta na possibilidade de que durante a operação de soldagem, o calor imposto possa alterar a sua microestrutura localmente, e assim, afetar as propriedades mecânicas da junta (KELLER,2017).

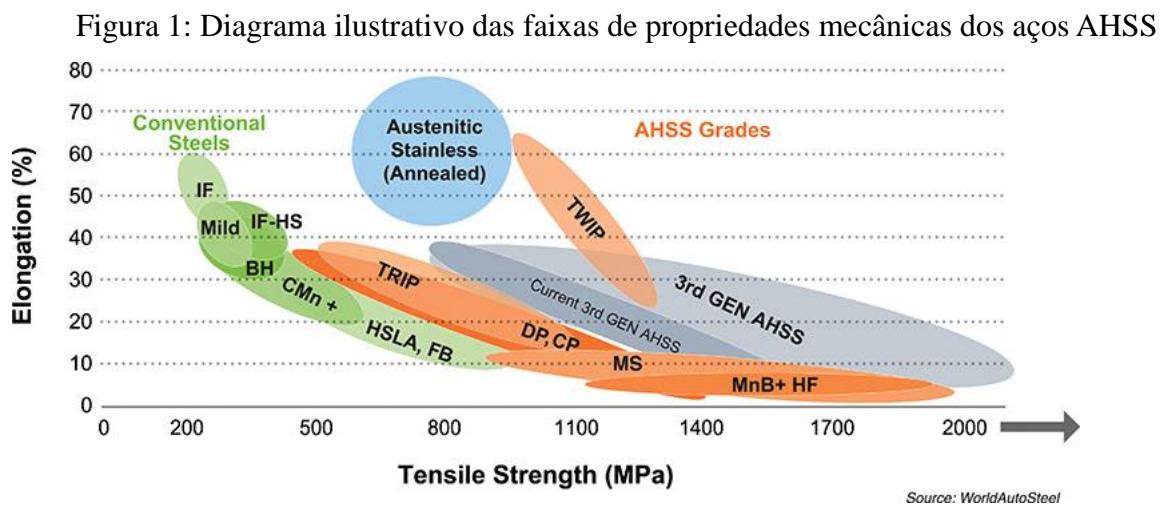
2 OBJETIVOS

Em colaboração com Freitas et al. o objetivo deste trabalho é o de avaliar qual combinação dos parâmetros de soldagem apresentará as melhores propriedades mecânicas nas juntas sobrepostas em aços DP980 e TRIP780, utilizando, como base de avaliação, os ensaios de dureza Vickers, tração uniaxial e a análise macrográfica das soldagens.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 AÇOS AVANÇADOS DE ALTA RESISTÊNCIA

A classe dos AHSS (Advanced High Strength Steels) foi desenvolvida visando a combinação de elevada resistência mecânica e ductilidade, como apresentado na Figura 1. Esses aços também possuem uma microestrutura multifásica resultante de um controlado processo de aquecimento e resfriamento do material.



Nesse sentido, essa classe tem sido amplamente aplicada à fabricação de produtos para a indústria automobilística, como os componentes que compõem a carroceria dos veículos ou os relacionados às suas estruturas primárias.

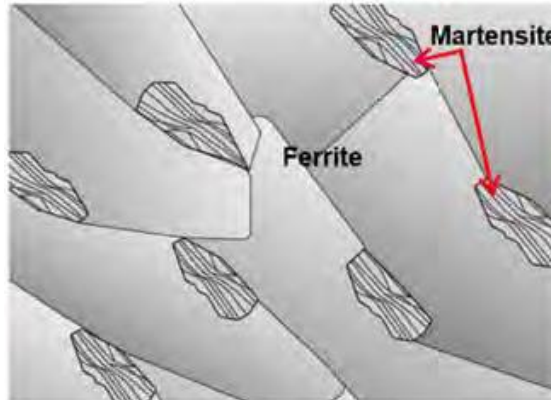
Atualmente, a família dos aços AHSS conta com duas gerações, dentre as quais foram desenvolvidos os aços Dual Phase (DP), Complex Phase (CP), Ferritic Bainitic (FB), Martensitic (MS/MART), Transformation Induced Plasticity (TRIP), Hot Formed (HF) e Twinning Induced Plasticity (TWIP). Dentre esses aços, os DP e TRIP destacam-se pela sua elevada capacidade em absorver energia, e, desse modo, tem grande utilidade nas zonas de colisão do carro.

3.1.1 Aço DP

O aço Dual Phase (DP) tem sua microestrutura constituída de ilhas de martensita envolvidas por uma matriz ferrítica, como esquematizado na Figura.2. Essas duas fases são

responsáveis pelas características mecânicas desse aço, enquanto a matriz ferrítica fornece ao aço boa ductilidade e, por conseguinte, boa conformabilidade, as ilhas de martensita conferem ao aço resistência mecânica.

Figura 2: Esquema da microestrutura do aço DP.



Fonte: World Auto Steel (2017).

Essa configuração microestrutural também concede ao aço DP, quando deformado, elevada taxa de encruamento, uma vez que a fase ferrítica concentra a energia proveniente da deformação.

A formação desse aço dá-se por dois meios diferentes. O aço proveniente da laminação a quente terá o seu resfriamento controlado a partir da fase austenita. Já o aço proveniente da laminação a frio, após recozimento, terá sua formação partindo-se de um campo bifásico ferrita e austenita, com o intuito de transformar alguma dessa austenita em ferrita, uma vez que o resfriamento rápido transformará o restante de austenita, nas ilhas de martensita. Vale ressaltar que a transformação da austenita é influenciada tanto pelo teor de Carbono quanto pela temperatura do tratamento da liga.

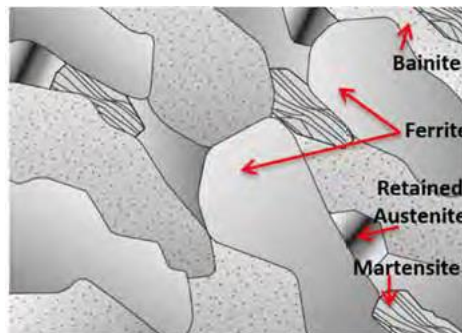
Apesar de possuírem majoritariamente duas fases, os aços DP podem apresentar pequenas quantidades de bainita, perlita e austenita retida, a depender do teor de carbono do aço e dos processos escolhidos.

O aço DP também pode ser utilizado na condição galvanizada, que é amplamente aplicada na indústria automobilística. Para a produção desse tipo de aço, é necessário que, após a laminação do aço, seja realizado um banho de galvanização a quente, que consiste na introdução de Zn no aço, a uma temperatura que varia entre 600 e 630°C. Dessa forma, devido à elevada condutividade do Zn, o banho faz com que o aço se resfrie a uma taxa de 100°C/s.

3.1.2 Aço TRIP

O aço Transformation Induced Plasticity(TRIP) é um aço multifásico que tem em sua composição microestrutural ferrita, bainita, austenita retida e martensita, como esquematizado na Figura 3. Esse aço possui esse nome, plasticidade induzida por transformação, devido, principalmente, a seus teores de austenita retida, ou seja, como essa austenita está em uma fase metaestável, quando o aço sofre deformação, essa austenita retida transforma-se em martensita. Tal transformação resulta em um incremento na resistência mecânica do material e também em uma elevação de sua taxa de encruamento, uma vez que as fases mais duras serão dispersas na matriz macia de ferrita. Desse modo, o aço tem sua resistência aumentada, além de deformar mais antes de fraturar.

Figura 3: Esquema da microestrutura do aço TRIP.



Fonte: World Auto Steel (2017).

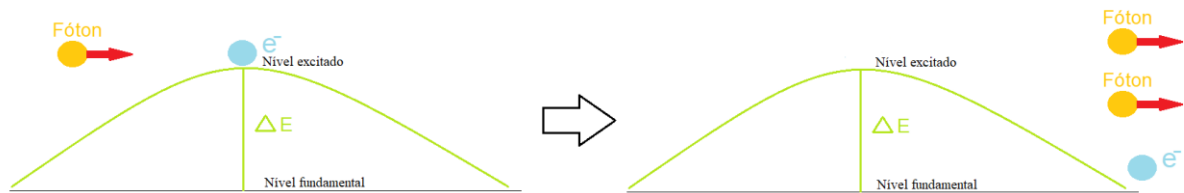
Alguns fatores podem afetar as concentrações de cada fase no aço TRIP, bem como a velocidade de transformação da austenita retida para a martensita. São exemplos disso a adição de Níquel e Silício a aços TRIP de baixo teor de Carbono. Neste caso, o Níquel e o Silício serão responsáveis pela estabilização da Austenita. Outro exemplo é o teor de Carbono do aço. Aços TRIP com reduzido teor de Carbono, ao serem deformados, apresentam transformação da Austenita retida em Martensita quase que imediata, enquanto aços com elevado teor de Carbono possuem a Austenita retida em uma forma mais estável, portanto, esta apenas se transforma em Martensita com uma deformação muito elevada, provinda de um Crash Test, por exemplo.

3.2 PRINCÍPIOS DO LASER

O laser baseia-se no processo de emissão estimulada (KOECHNER,1999). Ou seja, estimula-se a população de elétrons para um estado de maior energia, como essa migração não é estável na natureza, ela deve ser provocada por uma energia externa. Esta pode ser proveniente de um bombeamento por lâmpada (luz) ou uma diferença de potencial, esses sistemas podem ocorrer em meio sólido, líquido ou gasoso.

Em suma, a emissão do laser se dá através de elétrons excitados que na presença de fótons incidentes, retornam ao seu estado fundamental, esse retorno libera outro fóton, de mesmas características que o primeiro, e assim, ambos os fótons incidirão até outro elétron, formando, então, uma reação em cadeia, como demonstra a Figura 4.

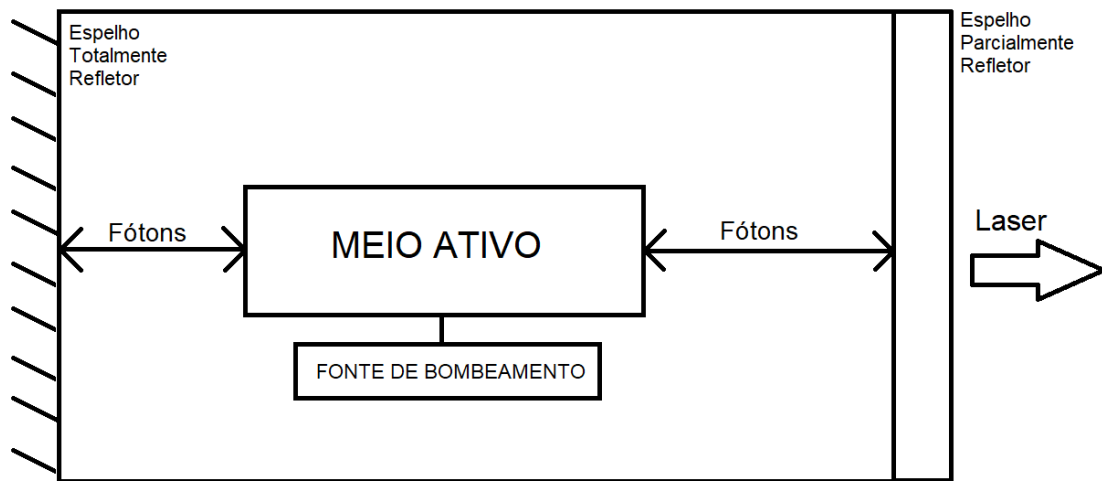
Figura 4: Esquema do processo de emissão estimulada



Fonte: Autoria própria (2020).

Utilizando-se espelhos, uma fonte de bombeamento e um meio ativo, onde essa reação de emissão estimulada esteja ocorrendo, pode-se formar o laser, uma vez que a fonte de bombeamento é responsável por iniciar o decaimento dos elétrons do nível excitado para o fundamental. Já os espelhos, sendo um totalmente refletor e o outro parcialmente, são responsáveis por manter os fótons no meio ativo, incentivando a reação. Portanto, os fótons que ultrapassam o espelho parcialmente refletor, e saem da cavidade, são o Laser em si, como esquematiza a figura 5.

Figura 5: Esquema simplificado de uma cavidade laser

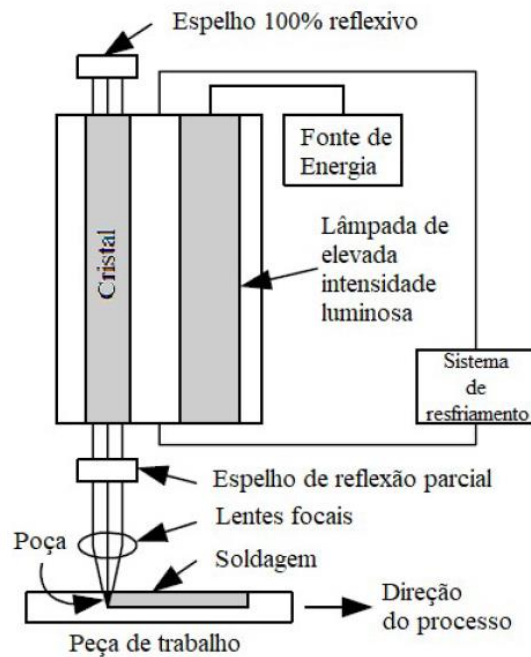


Fonte: Autoria própria (2020).

3.3 SOLDAGEM A LASER

Segundo Kou (2003), a soldagem a laser consiste em um processo de união por fusão do metal base, onde o calor é provindo do feixe de laser com elevada densidade de energia. Desse modo, a soldagem a laser apresenta diversas vantagens frente às outras técnicas, como sua capacidade de focar em pequenos pontos, mas com grande concentração de energia (105 a 107 W/cm²). Além disso, a soldagem a laser também se sobressai por poder ser utilizada em atmosfera normal, produzir soldas de pequena espessura, não possuir eletrodo ou metal de adição, formar pequenas ZTA e possuir grande precisão com relação a diâmetro, posição e profundidade da solda. A Figura 6 esquematiza o processo de soldagem, nesta estão presente elementos já explicados anteriormente e esquematizados pela Figura 5.

Figura 6: Processo de soldagem a partir de um laser tipo estado sólido



Fonte: Adaptado de Kou (2003).

Há duas formas de se realizar a solda a laser, uma por condução e a outra por Keyhole. O processo de soldagem por condução é utilizado para se soldar peças com pequenas espessuras e reduzida energia. Nesse sentido, a convecção determinará a geometria da poça de fusão, bem como sua composição durante a soldagem. Formando, assim, pequenos cordões com baixas profundidades.

Já o processo de soldagem Keyhole, também chamado de modo de penetração profunda, ocorre quando o laser não apenas funde o material desejado, como também, o vaporiza. Nesse sentido, a pressão do vapor metálico desloca o metal líquido, formando um furo. Desse modo, enquanto a tensão superficial e o fluxo do líquido tendem a fechar a cavidade, o vapor tende a abri-la. Como resultante desse processo, o metal perdido por vaporização ocasiona em depressões superficiais, porosidades ou uma combinação de ambas. Em contra partida, esse processo torna-se muito eficiente ao se soldar chapas mais espessas, uma vez que, como o próprio nome indica, este é um modo de penetração profunda.

3.3.1 Variáveis do processo

A elevada gama de parâmetros presentes no processo de soldagem a laser tem influência direta na qualidade final da solda. Nesse sentido, essa seção visará apresentar os principais

parâmetros, e quais as suas influências na soldagem.

O primeiro parâmetro é da potencia do laser, responsável pelo aquecimento e fundição do material a ser soldado. Para se escolher a potência adequada na soldagem de um material, devem-se verificar as propriedades do mesmo. Calor específico e condutividade térmica são dois exemplos de propriedades que, respectivamente, estão relacionadas à energia necessária de fusão e a quantidade energia dissipada por todo o material. Outra propriedade que deve ser avaliada é o coeficiente de absorção do material, fundamental para definir o nível de energia irradiada que será absorvida pelo material.

Outro parâmetro importante e interligado com a potência do laser é a velocidade da soldagem. Essa relação entre esses parâmetros tem-se demonstrado através de curvas que buscam especificar condições ideais de soldagem (ROSSINI, 2002), avaliando espessura, potência e velocidade. Desse modo, quando uma soldagem é realizada com velocidade muito elevada, corre-se o risco do material não receber energia suficiente para se fundir ou vaporizar o que ocasionaria em uma solda pouco profunda e estreita. Já no caso de uma soldagem muito lenta, é possível que ocorra o efeito chamado de Burn-through, que consiste na perfuração do material devido ao excesso de energia.

Um terceiro parâmetro a ser considerado é o diâmetro do feixe, o qual é responsável pela distribuição espacial da energia gerada determinando, assim, a área de incidência. Um fator importante nesse parâmetro é o ponto focal, que deve ser posicionado adequadamente, tomando como base características da peça a ser soldada, como sua espessura.

O gás de proteção também figura entre os fatores importantes em um processo de soldagem. Argônio(Ar) e Hélio(He) são os gases inertes mais utilizados. Em soldagens com elevada potência e velocidade, a formação de plasma pode absorver e dispersar o feixe laser, podendo causar uma diminuição da penetração. Nesse sentido, o gás Hélio é utilizado, uma vez que possui maior potencial de ionização que os outros gases, o que resulta na eliminação da formação de plasma. Em compensação, gases mais leves como o Hélio podem apresentar dificuldades em realizar essa função de neutralização do plasma quando tem-se uma soldagem com elevada velocidade. Para solucionar esse problema, pode-se misturar esse gás com um gás mais pesado, como o Argônio. Estudos anteriores demonstram que uma relação ideal é a de 10% de Argônio e 90% de Hélio (MAZUNDER,1982).

3.4 ENSAIO MACROGRÁFICO

Segundo Callister (2002), o ensaio macrografico consiste na verificação a olho nu ou a

uma aproximação de até 10 X de uma superfície plana. Para a realização dessa técnica é necessária uma preparação prévia. Essa consiste em uma extração da amostra do material a ser analisado, seguida de lixamento (desbaste) e polimento. Após essa etapa, realiza-se um ataque químico na amostra, visando evidenciar os detalhes macroestruturais de interesse.

A análise macrográfica consiste, então, na obtenção de informações com caráter qualitativo da amostra. Desse modo aspectos de superfícies, falhas, furos, dureza, textura, trincas são itens que constituem o objeto da análise.

No caso da análise macrográfica de uma junta soldada, escopo deste trabalho, pode-se verificar integridade do cordão de solda, bem como a presença de falhas ou porosidades. Além disso, é possível distinguir visualmente a zona termicamente afetada (ZTA) do metal base e da zona fundida.

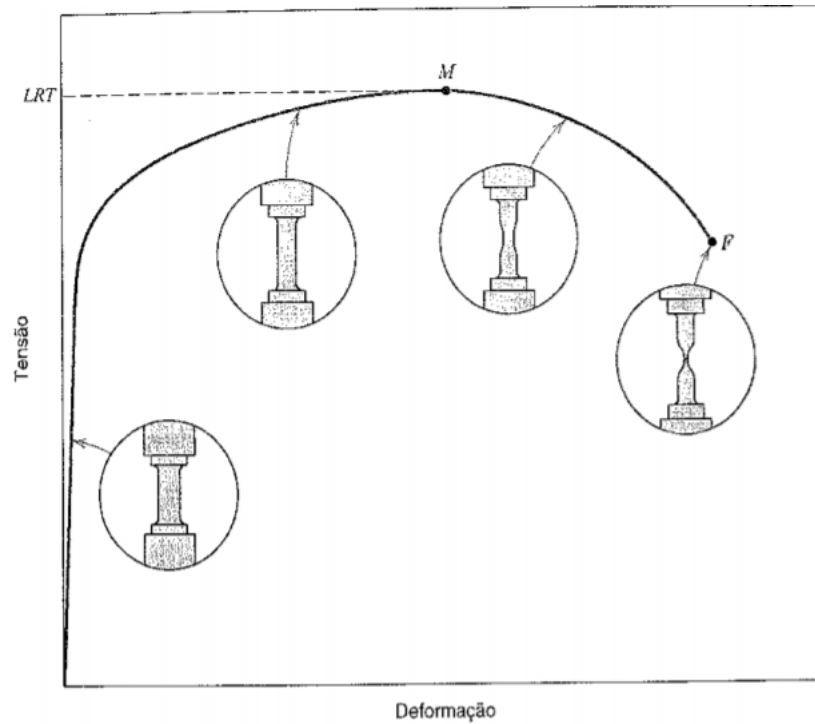
3.5 ENSAIOS MECÂNICOS

3.5.1 Ensaio de tração uniaxial

O ensaio de tração uniaxial é um ensaio mecânico considerado destrutivo e estático, ou seja, ele provoca a inutilização parcial ou total do corpo de prova, após este sofrer a ação de uma carga aplicada de forma lenta (CALLISTER,2002). Portanto ele é um ensaio que consiste na aplicação de uma força axial em um corpo de prova deformando-o na direção do esforço aplicado.

Nesse sentido, o ensaio de tração sempre é realizado por uma máquina universal, sendo está hidráulica ou eletromecânica, ligada a um dinamômetro, cuja função será medir a carga aplicada ao corpo de prova. Ao ser vinculada a um sistema, essa máquina fornece um diagrama de força pela deformação. A Figura 7 evidencia tal diagrama.

Figura 7: Comportamento da curva tensão deformação



Fonte: Adaptado de Callister (2002).



Vale ressaltar que todos os corpos de prova para este ensaio possuem características especificadas por normas técnicas. No caso da extração de um corpo de prova de um material soldado, a retirada pode ser feita com o cordão de solda no meio do corpo de prova, ou com o CDP no sentido longitudinal da soldagem.

Algumas informações mecânicas extraídas dos gráficos de tensão *versus* deformação são o limite elástico do material, o limite de resistência à tração e o limite de ruptura, além disso, ao se avaliar tais gráficos, pode-se averiguar se o material é dúctil ou frágil a partir dos formatos de suas curvas.

3.5.2 Ensaio de dureza Vickers

Neste ensaio, um penetrador de diamante muito pequeno, com geometria piramidal, é forçado contra a superfície do corpo de prova (CALLISTER,2002). A carga aplicada neste ensaio varia de 1 a 100 gramas e, a partir de um microscópio, é possível medir a impressão resultante do ensaio. Essa medição é então convertida baseada em um índice de dureza. A Figura 8 evidencia esse fator de conversão.

Figura 8: Técnicas de ensaio de dureza Vickers

Ensaio	Penetrador	Forma da Impressão		Carga	Fórmula para o Número Índice de Dureza ^a
		Vista Lateral	Vista Superior		
Microdureza Vickers	Pirâmide de diamante			P	$HV = 1,854P/d_1^2$

Fonte: Adaptado de Callister (2002).

Nesta figura, o valor da dureza é obtido em HV, enquanto p é a carga aplicada em Kg e d1 é a diagonal da impressão, medida em mm.

A importância deste ensaio está na obtenção da dureza dos materiais, bem como na possibilidade da realização de perfis de dureza ao longo do material avaliado. No caso de juntas soldadas, a possibilidade da realização de um perfil de dureza torna-se um atrativo pois tais perfis podem evidenciar a resposta mecânica fornecida pelas mudanças microestruturais que ocorrem na ZTA e na zona fundida.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 MATERIAIS

Para a realização deste trabalho, foram utilizados os aços avançados de elevada resistência TRIP 780 e DP980, ambos na condição galvanizada, devido a sua ampla aplicação na indústria automobilística.

A Tabela 1 apresenta a composição química do metal base e do revestimento de galvanização dos aços TRIP e DP. Essa composição foi obtida via fluorescência de raios-x através do equipamento Axios MAX, marca PANalytical, do laboratório de caracterização química da Escola de Engenharia de Lorena, Universidade de São Paulo.

Tabela 1: Composição química do metal base e revestimento de galvanização dos aços DP980 e TRIP780, em percentual massa.

Aço DP 980 Base		Aço DP980 Revestimento		Aço TRIP 780 Base		Aço TRIP 780 Revestimento	
Fe	95,11	Zn	87,19	Fe	93,37	Zn	90,89
Mn	2,28	Fe	11,89	Zn	3,02	Fe	8,36
Zn	1,59	Al	0,52	Mn	1,73	Al	0,61
Si	0,32	Mn	0,22	Al	1,42	Mn	0,11
Cr	0,29	Mo	0,11	Si	0,28	Si	0,02
Al	0,21	Si	0,05	Cr	0,14	S	0,01
Mo	0,16	S	0,01	Nb	0,02		
Ti	0,02			P	0,01		
Nb	0,01			S	0,01		

Fonte: Autoria própria (2020)

4.2 METODOLOGIA

A realização deste trabalho pode ser dividida em duas etapas, sendo uma a prévia experimental, e a outra o experimento principal. Em ambas as etapas as chapas foram recebidas já soldadas por seus devidos parâmetros, que serão posteriormente apresentados.

Nesse sentido, tendo em vista a vasta gama de parâmetros que influenciam o processo a laser, foram escolhidos três para a avaliação nesse experimento, utilizando a abordagem da melhor escolha (MONTGOMERY, 2013), onde, com base nos conceitos da literatura, avaliou-

se aqueles que tivessem maior impacto na penetração do metal base. Sendo assim, escolheu-se a potência do feixe, a velocidade de soldagem e o material da face durante a soldagem, visando verificar a influência da absorvidade de cada aço.

A partir dessa escolha, uma prévia experimental foi realizada visando à determinação dos melhores valores para cada um dos parâmetros. A prévia está descrita na seção seguinte.

4.2.1 Prévia experimental

Para essa etapa, foram recebidas chapas já soldadas de TRIP 780 com DP 980. Essas foram soldadas juntando-se amostras iguais, de ambos os aços, com medidas de 200 x 150 x 1,2 mm. Visando reduzir a refletividade do feixe, as chapas foram lixadas com lixa de 200 mesh de Carbetto de Silício (SiC) e lavadas com Acetona 95%, tudo antes da soldagem. Nessa etapa do processo, o aço DP 980 foi escolhido para ficar na face em todas as soldagens, ou seja, ele foi o aço a receber o primeiro contato do feixe do laser. Foram realizadas doze soldagens ao todo, variando-se os valores de potência do feixe e velocidade de soldagem segundo demonstra a Tabela 2.

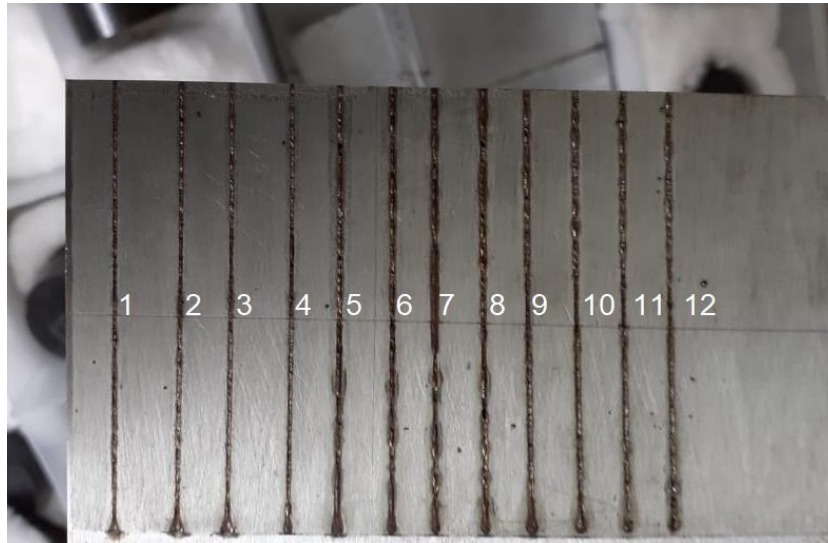
Tabela 2: Prévia experimental: combinação de variáveis para a soldagem de juntas sobrepostas em DP980 e TRIP780.

Nº da Soldagem	Potência(W)	Velocidade(mm/min)
1	1500	3000
2	1400	3000
3	1300	3000
4	1200	3000
5	1500	2000
6	1400	2000
7	1300	2000
8	1200	2000
9	1500	2500
10	1400	2500
11	1300	2500
12	1200	2500

Fonte: Autoria própria (2020)

Figura 9: Chapas recebidas com as juntas sobreposta de DP980 e TRIP780, soldada pelas 12

diferentes combinações de Potência e Velocidade.



Fonte: Autoria própria (2019).

O intuito dessa análise prévia é o de averiguar a integridade do cordão de solda para cada uma das doze soldagens realizadas. Essa análise determinará quais valores de potência e velocidade podem ser descartados para a fase do experimento principal.

Para a realização dessa análise de integridade do cordão, realizou-se um ensaio macrográfico. Esse consistiu na preparação de uma amostra para cada cordão, totalizando doze amostras. Para obtê-las realizou-se o seccionamento dos cupons transversalmente ao cordão de solda através do método de eletroerosão, utilizando o equipamento modelo FW 2U do fabricante GF AGIECHARMILLES presente no laboratório de estudos da usinagem do DMT/FEG/UNESP. Após essa etapa, realizou-se o embutimento das amostras utilizando-se baquelite como matéria prima e a embutidora PANPRESS 30-PANAMBRA TÉCNICA IMP. EXP. LTDA, do Laboratório de Metalografia do DMT/FEG/UNESP. Uma vez embutidas, as amostras foram submetidas à lixamento, utilizando-se da seguinte sequencia de lixas: 220,320,400,600,1000 e 1200 mesh. Dessa forma pôde-se poli-las com politrizes automáticas e, então, realizou-se o ataque químico com o agente Nital 3%, pelo método de esfregamento. Após esse processo, levou-se as amostras atacadas para a análise macrográfica em estereomicroscópio. Todas essas etapas foram realizadas com os equipamentos pertencentes ao DMT/FEG/UNESP.

4.2.2 Experimento principal

Tomando por base os resultados apresentados pela prévia experimental, pôde-se definir

quais valores de potência do laser e velocidade de soldagem apresentam cordões de solda visualmente mais íntegros.

A partir dessa análise, realizou-se uma nova operação de soldagem, variando-se, agora, o material da face e os parâmetros anteriormente citados, produzindo, assim, oito cordões diferentes. A Tabela 3 demonstra os valores utilizados para essa etapa de soldagem.

Tabela 3: Experimento principal: combinação de variáveis para a soldagem de juntas sobrepostas em DP980 e TRIP780.

Nº da soldagem	Potência(W)	Velocidade(mm/min)	Material da face
1	1200	2000	TRIP780
2	1300	2000	TRIP780
3	1200	3000	TRIP780
4	1300	3000	TRIP780
5	1200	2000	DP980
6	1300	2000	DP980
7	1200	3000	DP980
8	1300	3000	DP980

Fonte: Autoria própria (2020).

Deve-se ressaltar que todas as juntas recebidas, tanto da prévia experimental quanto do experimento principal, foram soldadas no laboratório DeDALO do IEAV/CTA, através de um laser de fibra de vidro dopado com Itérbio (Yb), modelo IPG-YLR-2000. Todos os processos foram realizados de forma autógena, com uma configuração de junta sobreposta, sem abertura, na função keyhole, com posição plana no sentido coincidente da laminação do material.

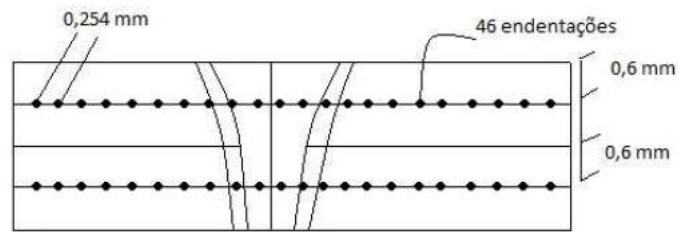
Após essa etapa, o mesmo processo descrito anteriormente será realizado para a análise macrográfica desses oito diferentes cordões de solda. O processamento das imagens assim como as medições realizadas foram feitas através do software de domínio público IMAGEJ. Novamente, a macrografia foi utilizada com o intuito de verificar os cordões de solda sadios e de analisar a zona fundida e a termicamente afetada (ZTA).

Ao se verificar a integridade de cada um dos oito cordões, levou-se as amostras para se realizar o ensaio de dureza Vickers por microendentação. Este foi realizado através de um durômetro da marca WILSON, modelo 401 MVD do laboratório de estudos da usinagem do DMT/FEG/UNESP, utilizando-se uma carga de 200 g com um tempo de 15s por endentação e tendo a norma ASTM E384 (2017) como referência. Os perfis de dureza visaram abranger as

regiões do metal base, da ZTA e da zona fundida.

Nesse sentido, levantaram-se dois perfis para cada um dos oito cordões de solda. Um perfil sendo realizado sobre a região superior, onde se encontra o material da face, e o outro realizado na região inferior, onde está o material da raiz. Precisamente, o primeiro perfil foi realizado em uma linha com 0,6 mm de distância da superfície, enquanto o segundo foi realizado em uma linha com 1,8mm de distância da superfície. Em ambos os perfis foram realizadas 46 endentações com distanciamento de 0,254 mm entre cada uma delas. A Figura 10 exemplifica esse ensaio.

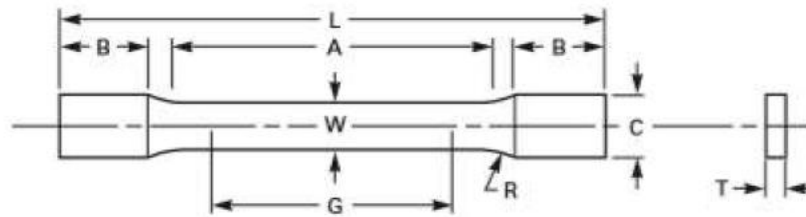
Figura 10: Esboço do perfil de dureza Vickers por microendentação



Fonte: Autoria própria (2020).

Após a realização deste ensaio, retirou-se, das amostras, corpos de prova para a realização do ensaio de tração uniaxial cisalhante. Para a realização deste, tomou-se corpos de prova dos oito diferentes cordões de solda, bem como dos metais base, ou seja, um corpo de prova apenas de TRIP 780 e outro apenas de DP980. Esse ensaio foi realizado tendo como referência a ASTM E8/E8M (2016a), como indica a Figura 11. Para cada cordão, foram retirados três corpos de prova, totalizando vinte e quatro corpos de prova. Esses foram retirados transversalmente ao sentido de laminação da chapa e ao cordão de solda.

Figura 11: Dimensões do corpo de prova de tração prismático na condição reduzida.



Onde, $G = 25,0 \pm 0,08$ mm

$W = 6,25 \pm 0,05$ mm

$T = 1,2$ para material base e $2,40$ mm para junta soldada.

$R = 6$ mm

$L = 100$ mm

$A = 32$ mm

$B = 32$ mm

$C = 10$ mm

Fonte: Adaptado de ASTM E8/E8M (2016a).

Vale ressaltar, que esses ensaios de tração foram realizados com o auxílio da máquina universal de ensaios, modelo AGX-V do fabricante SHIMADZU, pertencente ao DMT/FEG/UNESP. Tendo sido utilizada uma carga de célula de 50 KN com velocidade de 1mm/min. A interface da máquina para a obtenção dos dados foi realizada através do software TRAPEZIUM. Com este tornou-se possível a obtenção de um arquivo do tipo .csv, relacionando o tempo de ensaio, a evolução da carga, em N, e o deslocamento da travessa superior, em mm. Este arquivo foi modificado para uma extensão .xlsx de maneira a facilitar a interpretação dos dados e então foi importado para o software ORIGINPRO visando gerar as curvas de tensão versus deformação.

Após todos esses ensaios, os resultados mecânicos serão comparados com as imagens da macrografia dos cordões de solda, para então responder ao objetivo deste trabalho, ou seja, qual das oito variações de potência, velocidade e material da face, apresenta o cordão de solda mais sadio e com as melhores propriedades mecânicas.

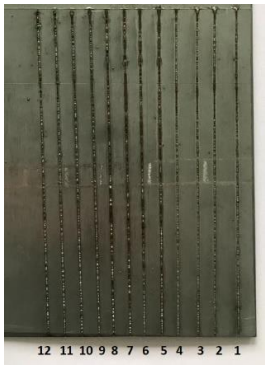


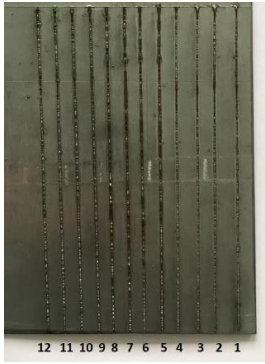

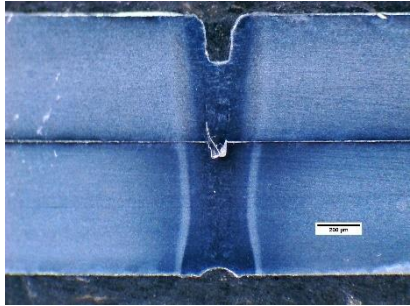
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

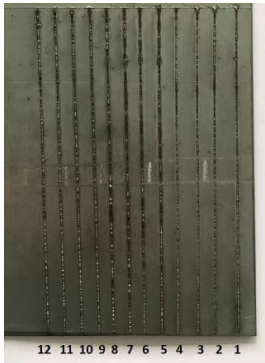

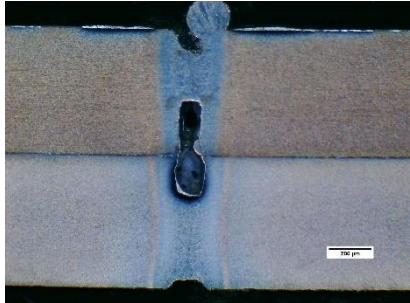
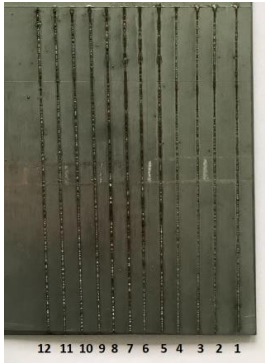

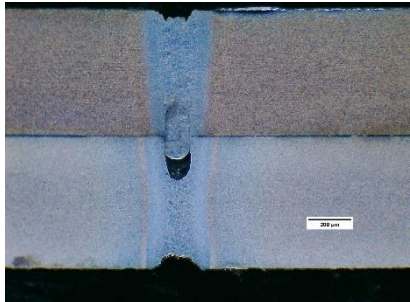
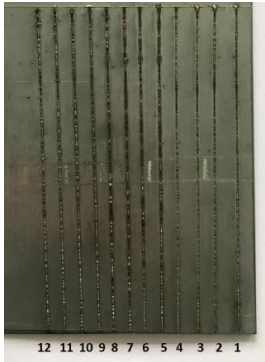

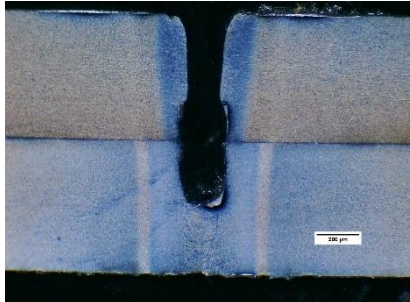
5.1 AVALIAÇÃO DA ETAPA EXPERIMENTAL PRÉVIA



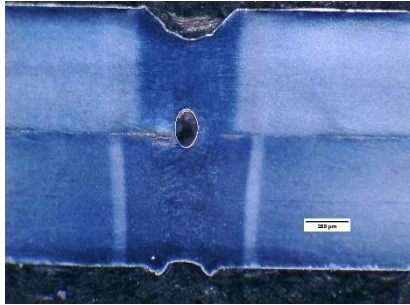


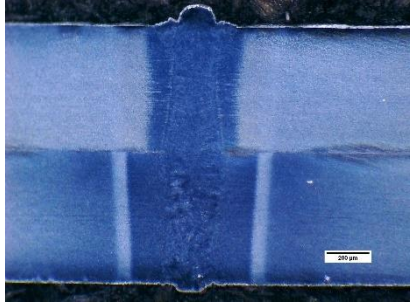


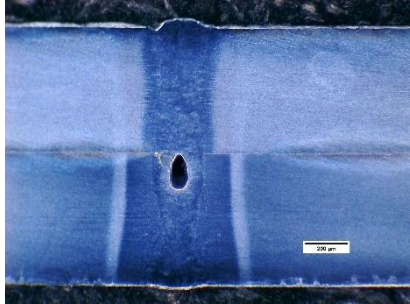
Nesta primeira etapa inicial do experimento buscou-se avaliar a integridade de cada um dos doze cordões de solda das juntas DP980 e TRIP780, cujos parâmetros foram apresentados na Tabela 2. Lembrando que em todos os cordões do material da face foi o DP 980.



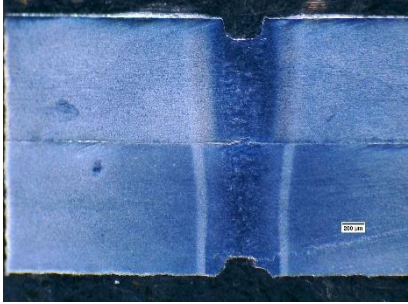


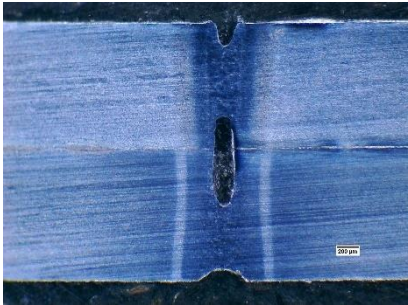


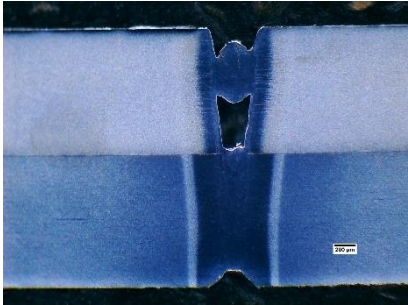
Nesse sentido, os resultados da análise metalográfica dos cordões encontra-se no quadro 1 abaixo.

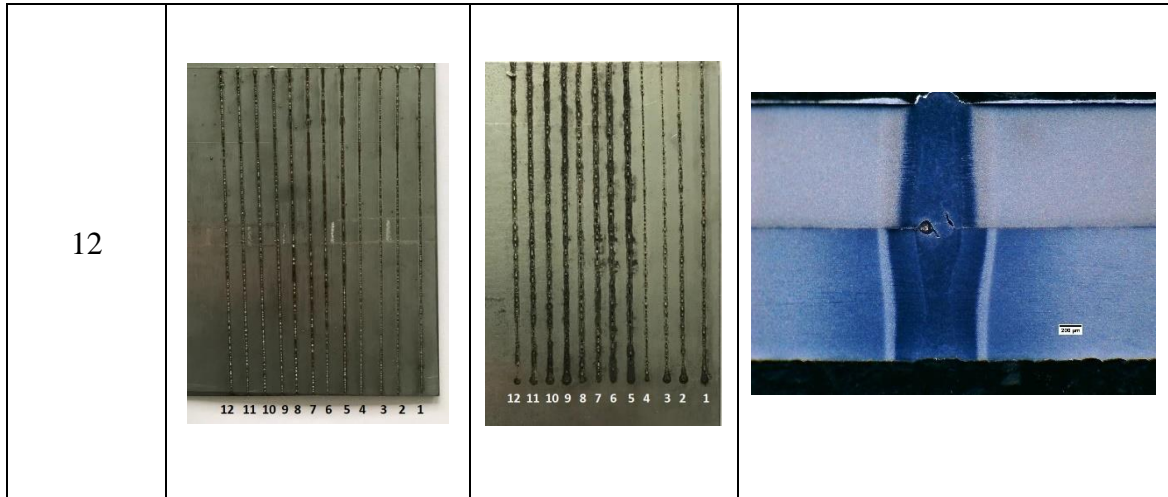
Quadro1: Avaliação da soldabilidade das juntas sobrepostas em DP980/TRIP780.

Nº da Soldagem	Aspecto Visual da Face	Aspecto Visual da Raiz	Aspecto Macrográfico, 2,5x
1			
2			

3	 <p>12 11 10 9 8 7 6 5 4 3 2 1</p>	 <p>12 11 10 9 8 7 6 5 4 3 2 1</p>	 <p>50 µm</p>
4	 <p>12 11 10 9 8 7 6 5 4 3 2 1</p>	 <p>12 11 10 9 8 7 6 5 4 3 2 1</p>	 <p>50 µm</p>
5	 <p>12 11 10 9 8 7 6 5 4 3 2 1</p>	 <p>12 11 10 9 8 7 6 5 4 3 2 1</p>	 <p>50 µm</p>

<p>6</p>			
<p>7</p>			
<p>8</p>			

<p>9</p>			
<p>10</p>			
<p>11</p>			



Fonte: Autoria própria (2019).

Ao se avaliar as doze macrografias acima, busca-se encontrar os cordões com maior integridade, tendo em vista que fatores como, vazios, defeitos internos, poros, má penetração ao longo da espessura da junta e falhas presentes na interface dos dois aços, podem interferir na integridade dos cordões.

Desse modo, a análise da instabilidade microestrutural da solda deu-se a partir da observação da área ocupada pela ZTA e zona fundida.

A partir dos resultados apresentados no Quadro 1 e na Tabela 2, pode-se realizar uma triagem dos parâmetros de soldagem, velocidade e potência, baseando-se na integridade de cada um desses cordões e visando uma simplificação na etapa principal do experimento.

Sendo assim, avalia-se que, na soldagem de número 5, a macrografia apresenta um vazio que abrange toda a região da zona soldada do aço DP980 bem como grande parte do aço TRIP780 da junta. Esse vazio justifica-se devido aos parâmetros dessa soldagem. Com uma potência de 1500 W e uma velocidade de soldagem de 2000 mm/min, era esperado que esse cordão apresentasse mais defeitos que os demais, uma vez que ele foi constituído com a maior potência e a menor velocidade dentre os doze. Nesse sentido, uma elevada potência por um grande período de tempo justificou a degradação presente nesse cordão, considerando a provável evaporação do material (FREITAS ET AL., 2019).

Já ao se analisar os cordões 1,2,3 e 4, todos soldados com a velocidade de 3000 mm/min, nota-se que, nas quatro soldagens há a presença de vazios, localizados nas regiões de interface entre os dois aços. Enquanto os cordões de 1 e 3 apresentam vazios de maior expressão, os cordões 2 e 4 apresentam vazios de tamanho mais reduzido. A presença desses vazios é justificada pelo Zn, proveniente da galvanização realizada em ambos os aços. Ao ser aquecido

pelo processo de soldagem, o Zn evapora, e esse vapor de Zinco, pode ficar contido na interface dos materiais, ocasionando em poros ou vazios (FREITAS ET AL., 2019).

Em contra partida, ao se analisar a largura desses quatro cordões, nota-se que, a área ocupada pela ZTA para a soldagem 3 e 4 é menor do que a ocupada pelas soldagens 1 e 2. Ou seja, há menos instabilidade microestrutural em 3 e 4 do que em 1 e 2.

Ao se analisar os cordões 6, 7 e 8, todos com velocidade de soldagem de 2000 mm/min, nota-se a presença dos mesmos defeitos referidos anteriormente. Enquanto a soldagem 6 e 8 apresentam vazios oriundos da vaporização do Zn, a soldagem de número 7 não apresenta poro algum, mostrando-se ser um cordão íntegro. Porém, visivelmente todos esses três cordões apresentam uma zona de instabilidade microestrutural maior que as analisadas nas soldagens de 1 a 4.

Por fim, os cordões 9,10,11 e 12, foram todos soldados com velocidade de 2500 mm/min. Quanto aos vazios, o nono cordão não apresentou nenhum, mostrando-se ser um cordão íntegro, enquanto o cordão 12 apresentou alguns poros bem sutis. Já os demais apresentaram vazios consideráveis. Vale ressaltar que em todas as doze soldagens houve penetração total ao longo da espessura das juntas.

Visando cumprir com seu objetivo, essa etapa experimental prévia permitiu uma melhor triagem dos parâmetros de potência e velocidade para a próxima parte deste trabalho. Nesse sentido, os valores escolhidos para o experimento principal são os apresentados na Tabela 3. Segue, abaixo, a justificativa para tais escolhas.

Quando analisadas todas as doze soldagens, notou-se que a de número 7 foi a melhor, pois além de não apresentar nenhum vazio ou poro, ela apresentou largura do cordão menor que a soldagem de número 9, única que além da sétima não apresentou vazio algum. Devido a isso, os parâmetros da soldagem 7 foram selecionados para a etapa do experimento principal, ou seja, potência de 1300 W e velocidade de 2000 mm/min.

Já quando se considerou os cordões de 9 a 12, notou-se que a utilização de uma velocidade de 2500 mm/min, resultava em áreas consideráveis onde há instabilidade na microestrutura da junta. Por esse motivo, o valor dessa velocidade não foi utilizado para a próxima etapa do experimento.

Tomando-se por base esse critério, a velocidade de 3000 mm/min, utilizada nas juntas de 1 a 4, apresentou os valores mais reduzidos de largura da ZTA, portanto, essa velocidade será selecionada para a etapa principal.

Por fim, escolheu-se a potência de 1200 W. Os cordões soldados por esse valor de potência são os 4, 8 e 12. Ao se analisar esses cordões, nota-se que de todas as dez soldagens

que apresentaram vazios ou poros, essas três apresentaram a menor região de instabilidade. Justificando, assim, a escolha desse valor de potência.

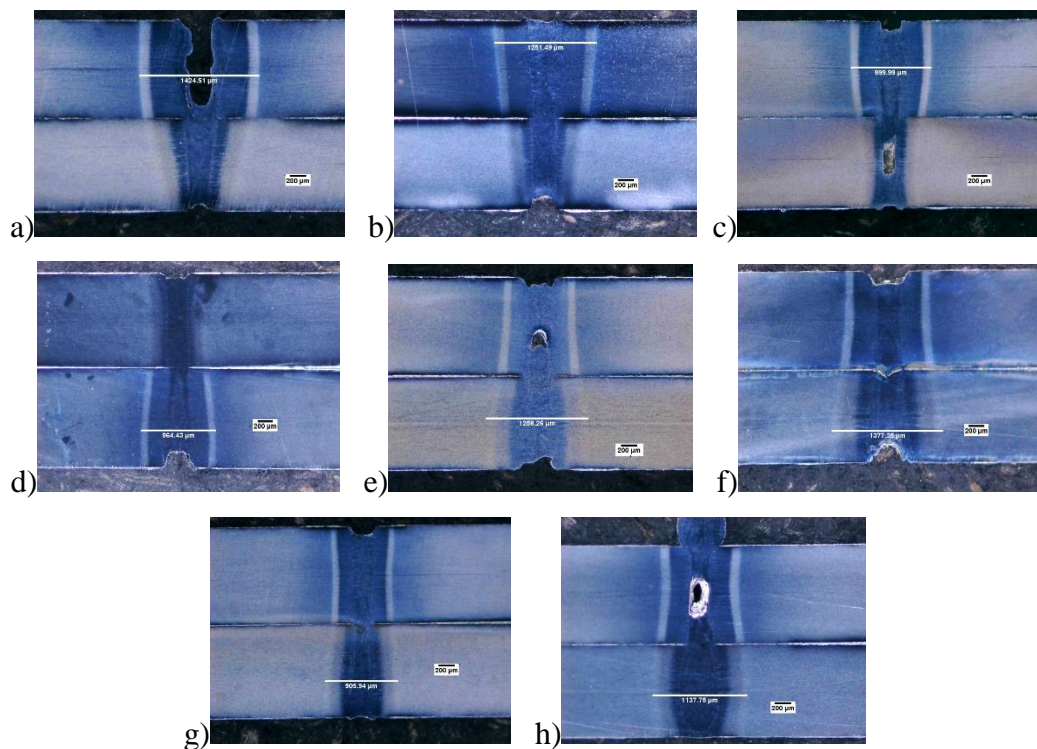
5.2 AVALIAÇÃO DA ETAPA EXPERIMENTAL PRINCIPAL

5.2.1 Análise metalográfica

Do mesmo modo que na seção anterior, a realização da Metalografia visou à verificação da integridade do cordão de solda para cada uma das oito soldas realizadas, cujos parâmetros foram apresentados na Tabela 3.

Os resultados da análise macroscópica, bem como os valores da largura do cordão de solda estão presentes na Figura 12 e na Tabela 4, respectivamente.

Figura 12: Imagens dos cordões de solda referentes às corridas experimentais do planejamento principal (a) S1, (b) S2, (c) S3, (d) S4, (e) S5, (f) S6, (g) S7, (h) S8.



Fonte: Autoria própria (2019).

Tabela 4: Relação de medições da largura dos cordões da soldagem do planejamento principal.

Nº da soldagem	Largura L(μm)
S1	1424,51
S2	1251,49
S3	999,99
S4	964,43
S5	1258,26
S6	1377,35
S7	905,94
S8	1137,75

Fonte: Autoria própria (2020).

5.2.2 Dureza Vickers por microindentação

Os perfis de dureza de cada amostra estão representados na Figura 13.

Figura 13: Perfis de dureza Vickers das amostras do planejamento principal (a) S1, (b) S2, (c) S3, (d) S4, (e) S5, (f) S6, (g) S7, (h) S8.

(continua)

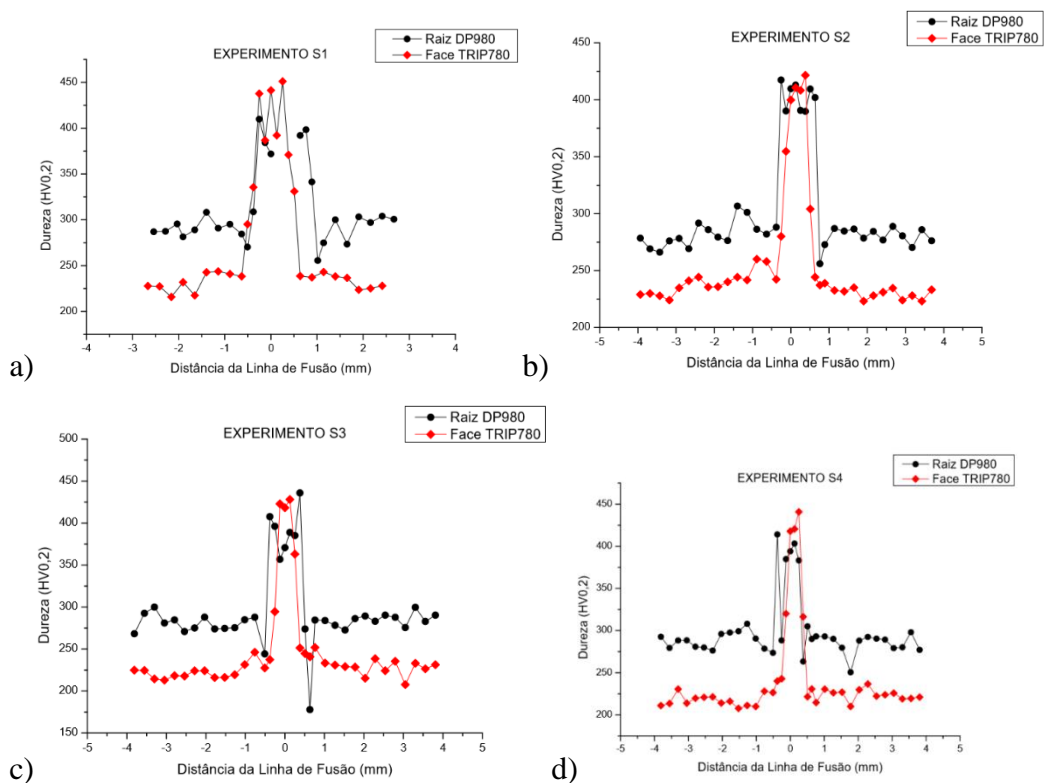
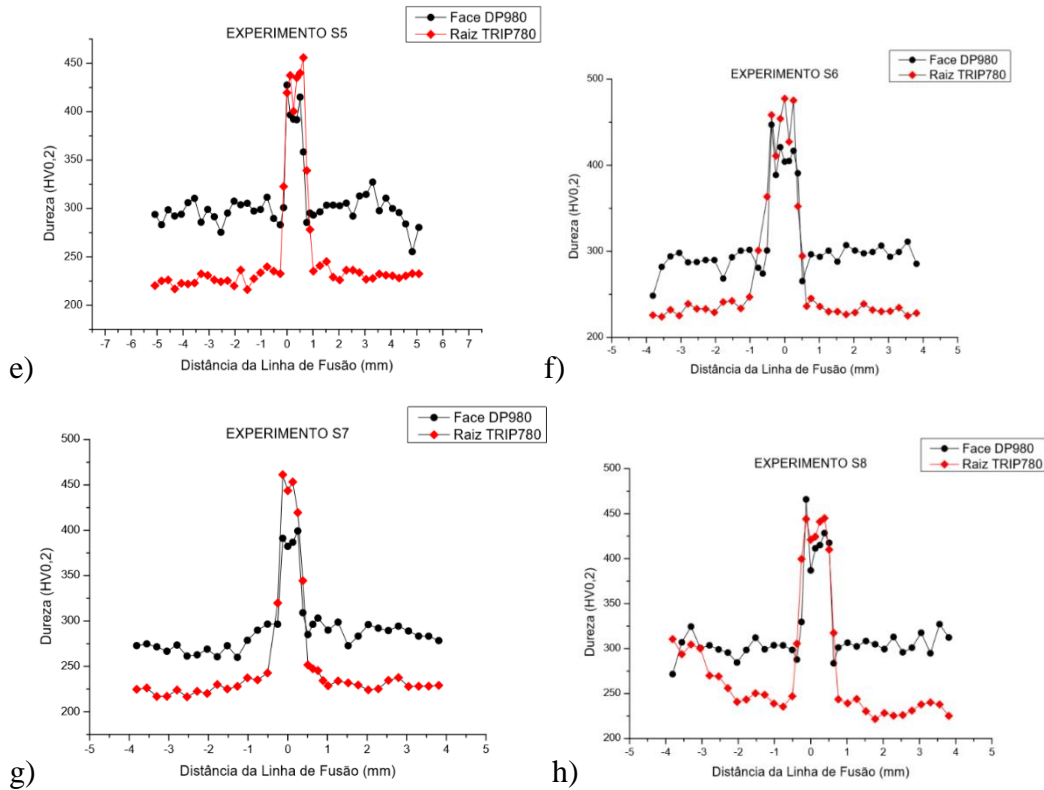


Figura 13: Perfis de dureza Vickers das amostras do planejamento principal (a) S1, (b) S2, (c) S3, (d) S4, (e) S5, (f) S6, (g) S7, (h) S8.

(conclusão)



Fonte: Autoria própria (2020).

Ao se analisar o perfil de dureza das oito soldagens, nota-se que, em todas, há uma considerável elevação da dureza na região da ZTA (zona termicamente afetada) e uma leve queda nesse valor na região da zona fundida, apesar dessa queda ainda apresentar valores de dureza superiores aos do metal base. Essa variação ocorre devido aos processos térmicos que essas regiões sofrem durante a soldagem a laser, tanto o aquecimento quanto o resfriamento, causados por esse processo de soldagem, influenciam na microestrutura dos aços. Nesse sentido, o elevado valor de dureza na ZTA pode ser justificado pela alta taxa de resfriamento envolvida, e o valor elevado, porém menor que o da ZTA, presente na zona fundida deve-se ao fato do material ter sofrido a fundição.

5.2.3 Ensaio de tração uniaxial

Este ensaio foi realizado com o intuito de verificar o limite de resistência à tração das juntas. Na Figura 14 encontram-se os gráficos de tensão versus deformação de cada junta, bem como um gráfico representando os valores para os metais bases, TRIP 780 e DP 980.

Figura 14: Curvas tensão versus deformação referentes à análise do planeamento principal (a) S1, (b) S2, (c) S3, (d) S4, (e) S5, (f) S6, (g) S7, (h) S8, i) material base (continua)

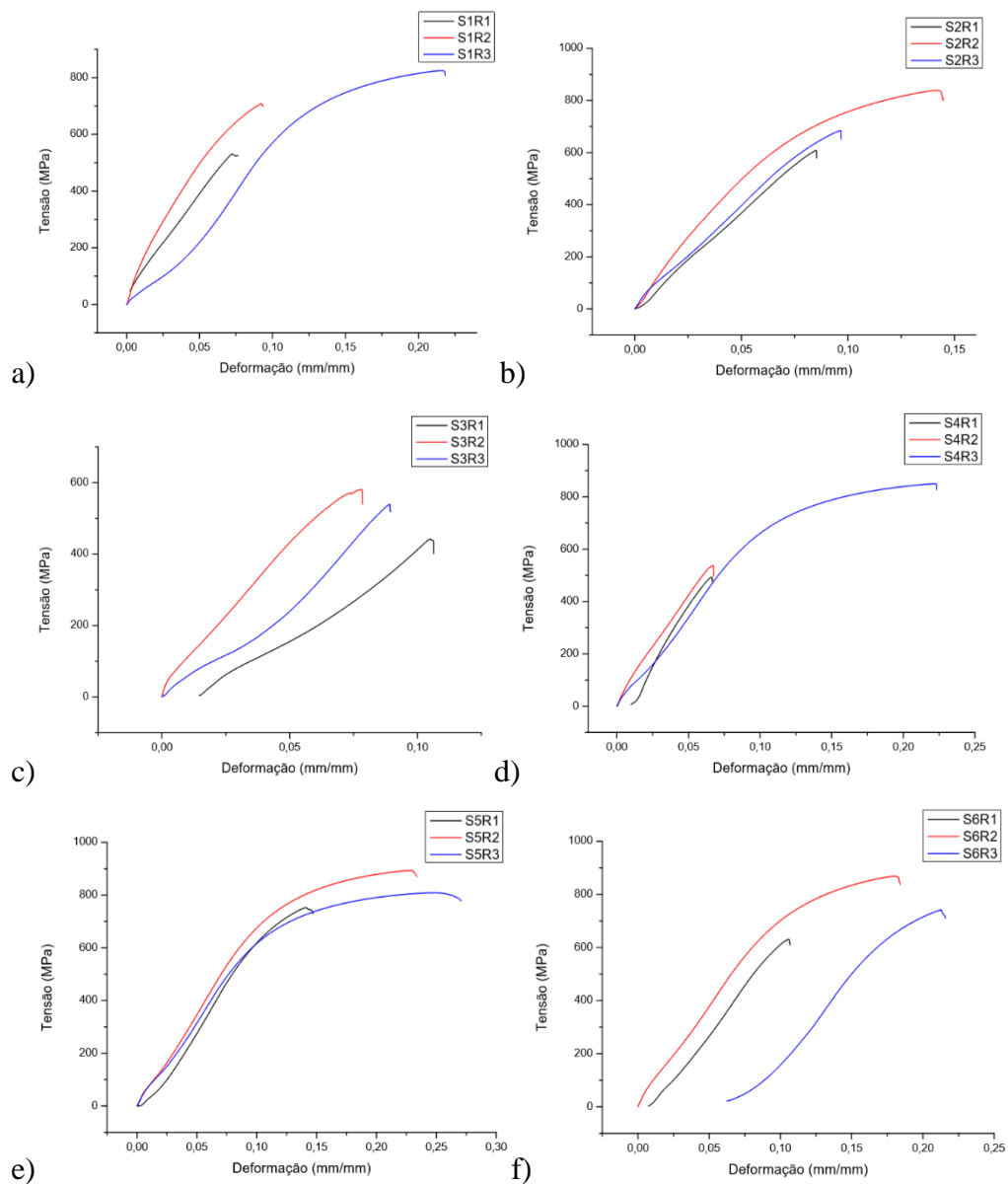
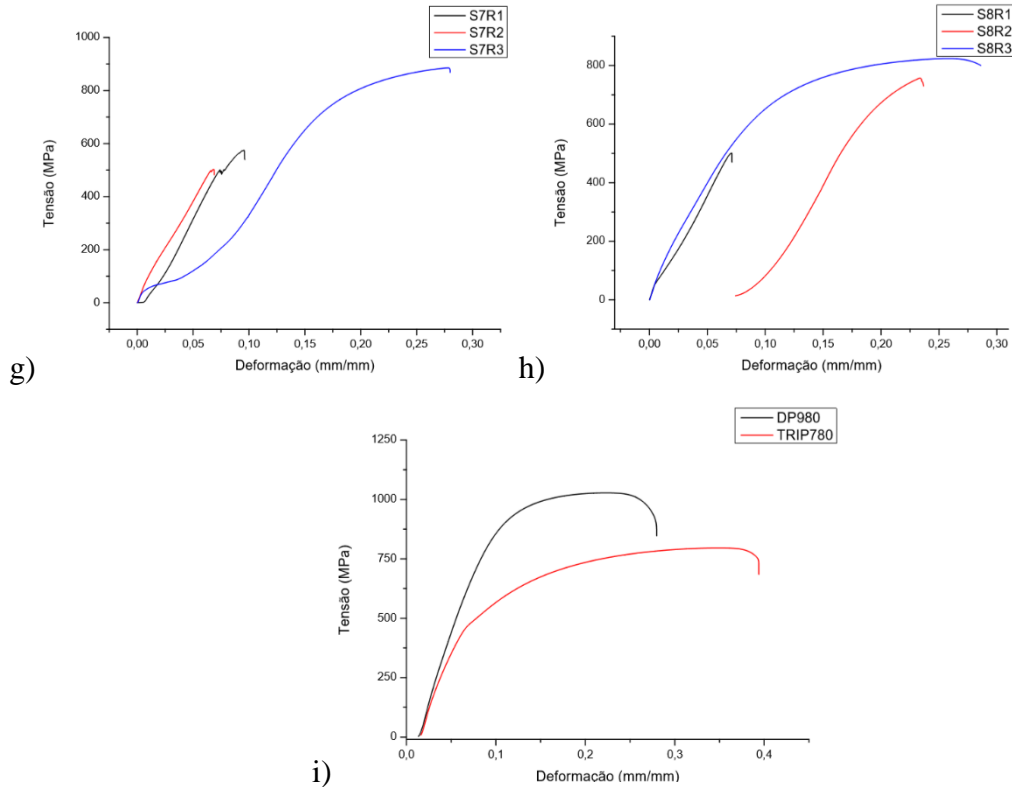


Figura 14: Curvas tensão versus deformação referentes à análise do planeamento principal (a) S1, (b) S2, (c) S3, (d) S4, (e) S5, (f) S6, (g) S7, (h) S8, i) material base (conclusão)



Fonte: Autoria própria (2020).

Segundo Souza (1982), os materiais soldados que são heterogêneos, possuem como valor de interesse a carga de ruptura, uma vez que a determinação da parte que sofre o escoamento é duvidosa. Desse modo, pode-se medir o valor da eficiência da solda(%), uma vez que esta é o quociente da carga de ruptura do material soldado pela carga de ruptura do material base.

Nesse sentido, toma-se, para a realização dos cálculos, como carga de ruptura do material base a do material menos resistente, ou seja, o TRIP 780, como evidencia a Figura 14 gráfico (i). A Tabela 5 apresenta os resultados obtidos de cada limite de ruptura a tração, bem como o cálculo da eficiência da solda.

Tabela 5: Valores dos limites de ruptura à tração (MPa) das juntas soldadas, material base e eficiência de solda.

Amostra	Ensaio	Réplica	Tréplica	Média	Eficiência da solda (%)
DP 980	838,614	-	-	-	-
TRIP780	729,967	-	-	-	-
S1	495,384	552,263	819,267	622,304	85,251
S2	604,779	781,677	682,306	689,587	94,468
S3	436,041	576,939	527,776	513,585	70,357
S4	482,487	533,847	845,131	620,488	85,002
S5	641,663	806,239	771,865	739,922	101,364
S6	595,633	781,296	646,177	674,369	92,383
S7	533,882	500,431	877,510	637,274	87,302
S8	500,569	727,172	778,001	668,581	91,591

Fonte: Autoria própria (2020).

5.2.4 Discussão dos resultados apresentados

A análise de cada uma das etapas dessa seção do experimento principal é essencial para a decisão de qual a melhor combinação de fatores, entre potência, velocidade e material da face, oferece o cordão mais sadio e com as melhores propriedades mecânicas.

Quanto a análise macrográfica, nota-se que a soldagem de número 1 apresentou um grande vazio que percorre quase a zona fundida, do material da face, inteira. Já as soldagens de número 2, 4, 6 e 7 não apresentaram poros ou vazios, portanto possuem boa integridade no cordão de solda. Já as soldagens 3, 5 e 8 apresentaram poros e vazios discretos quando comparados com a soldagem de número 1.

Já a análise da microdureza dos cordões, permitiu a averiguação do perfil de dureza de todas as juntas, podendo-se avaliar, suas regiões de metal base, ZTA e zona fundida. Todos os perfis apresentaram coerência com o esperado pela literatura, ou seja, uma elevação da dureza na ZTA e uma leve redução desta na zona fundida. Ao tomar por base o distanciamento da linha de fusão e os valores da largura do cordão de solda, apresentados na tabela 5, pode-se notar nos perfis de dureza, a instabilidade microestrutural de cada soldagem.

A análise das curvas de tensão versus deformação de cada soldagem permitiu a avaliação da tensão de ruptura média de cada cordão, bem como a eficiência de cada solda.

A partir desses resultados nota-se que, a soldagem de número 5, cujos parâmetros são:

1200 W de potência, 2000 mm/min de velocidade e material da face DP980, apresentou a maior eficiência de todas as soldagens. Porém, ao se analisar a macrografia da mesma, nota-se a presença de um vazio na região do aço DP980.

A presença de tal defeito na soldagem de número 5 pode estar relacionada aos parâmetros utilizados ou a alguma fonte de erro no processo de soldagem. Apesar da impossibilidade de se realizar outra soldagem com esses mesmos parâmetros, e assim verificar qual a real causa desse defeito, a soldagem de número 5 pode ser considerada como uma das ideais, como já dito anteriormente, por conta de sua elevada eficiência.

A partir desta análise, visando aumentar a gama de bons resultados para os objetivos propostos, busca-se a soldagem com o segundo maior índice de eficiência, ou seja, a soldagem de número 2, com valor aproximado de 94%. Ao se analisar a macrografia dessa soldagem, nota-se que não há a presença de vazios e, portanto, o cordão de solda é sadio.

Analisando-se a largura de seu cordão de solda, percebe-se que essa tem tamanho considerável, uma vez que é a quarta maior dentre as oitos. Esse fator, porém, não é determinante para a exclusão de tal soldagem como uma boa resposta aos objetivos propostos, uma vez que os cordões que apresentaram largura menor são o terceiro, quarto, sétimo e oitavo.

Desse modo, a soldagem de número 2, cujos parâmetros são: potência 1300W, velocidade de soldagem 2000 mm/min e material da face TRIP 780, é a que apresenta o melhor conjunto de eficiência, dureza e largura dentre as demais.

Após essa, a soldagem mais apropriada seria a de número 7, cujos parâmetros são: 1200 W de potência, 3000 mm/min de velocidade e material da face DP980. Uma vez que essa soldagem apresentou cordão integro, eficiência de 87%, perfil de dureza coerente e largura do cordão de solda igual a 905,94 μm , ou seja, a menor largura de todas as soldagens.

6 CONCLUSÃO

De acordo com o presente trabalho, verificou-se que dentre todos os parâmetros de soldagem a laser existentes, os que mais influenciam na integridade do cordão de solda são a velocidade de soldagem, a potência do feixe incidente e o material da face.

Nesse sentido, a partir das propriedades mecânicas das juntas e de suas macrografias, pôde-se averiguar para quais valores de tais parâmetros, apresenta-se, como resposta, um cordão mais sadio.

Desse modo, a soldagem com eficiência mais elevada foi a de número 5, cujos parâmetros são 1200 W de potência, 2000 mm/min de velocidade de soldagem e utilizando-se o aço DP980 como material da face. Porém, como está soldagem expôs problemas na integridade de seu cordão, uma vez que - devido à incapacidade de se realizar novos experimentos - não se sabe a origem do vazio apresentado, escolheram-se outras duas soldagens com resultados satisfatórios para os objetivos do presente trabalho.

Tendo em vista tal análise, conclui-se então que, para um valor de 1300 W de potência do feixe incidente combinado com uma velocidade de soldagem de 2000 mm/min e utilizando-se o aço TRIP780 como o material da face, o cordão de solda possui a sua maior integridade.

Quanto aos ensaios mecânicos, notou-se que sua importância deu-se ao fornecer a eficiência da soldagem em porcentagem, bem como ao apresentar o perfil de dureza da junta, e assim, verificar a região de maior instabilidade microestrutural. Desse modo, para as condições descritas no parágrafo anterior, teve-se uma eficiência de 94% da soldagem e notou-se coerência no perfil de dureza obtido, quando relacionado com a literatura.

E, em última análise, para uma potência de 1300 W, velocidade de 2000 mm/min e utilizando-se o aço DP980 como material da face, obteve-se uma eficiência de 87% da soldagem e notou-se que ,quanto ao cordão, este apresentou a menor área de instabilidade microestrutural dentre todas as soldagens.

REFERÊNCIAS

- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E384**: standard test method for microindentation hardness of materials: designation. West Conshohocken: ASTM, 2017.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E8/E8M**: standard test methods for tension testing of metallic materials: designation. West Conshohocken: ASTM, 2016a.
- CALLISTER, W. D. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2002.
- COLPAERT, H. **Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns**. 3. ed. São Paulo: Edgard Blücher LTDA, 1974.
- ION, J. **Laser processing of engineering materials: principles, procedure and industrial application**. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2005.
- KATAYAMA, S.; KAWAHITO, Y.; MIZUTANIA, M. Elucidation of laser welding phenomena and factors affecting welding penetration and welding defects. **Physics Procedia**, Lane, n. 5, p. 9-17, 2010.
- KEELER, S.; KIMCHI, M. **Advanced high strength steels application and guidelines: version 5**. Worldautosteel, 2017.
- KEELER, S.; KIMCHI, M.; J MOONEY, P. **Advanced high strength steels: applications guidelines: version 6.0**. Disponível em: <http://www.worldautosteel.org>. Acesso em: 11 dez. 2020.
- KOECHNER, W. **Solid state laser engineering**. 5. ed. Berlin- Springer-Verlag, 1999.
- KOU, S. **Welding metallurgy**. 2 nd ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2003.
- MAZUNDER, J. Laser welding: state of the art review. **Journal of Metals**, v. 34, n. 7, p. 16 24, jul. 1982.
- MONTGOMERY, D. **Design and analysis of experiments**. 8.ed. New York: John Wiley & Sons, 2013.
- ROSSINI, F. R. **Soldas em chapas grossas de aço baixo carbono utilizado laser de CO2**. 2002. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2002.
- SOUZA, S. A. **Ensaio mecânicos de materiais metálicos**. 3. ed. São Paulo: Edgard Bluncher LTDA, 1974.
- WORLD AUTO STEEL. **Advanced high-strength steel (AHSS) definitions**. Disponível em: <http://www.worldautosteel.org>. Acesso em: 13 jan. 2021.

WORLDAUTOSTEEL. **FutureSteelVehicle phase 2**. Disponível em:
<http://www.worldautosteel.org>. Acesso em: 14 dez. 2020.