

Universidade do Vale do Paraíba
Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento
Programa de Pós-Graduação Processamento de Materiais

Rodrigo Otávio Venturini Salamão

**“Estudo da influência das características mecânicas em chapas dissimilares
soldadas no processo MIG/MAG aplicada em carrocerias automotivas”**

São José dos Campos, SP.
2019

RODRIGO OTÁVIO VENTURINI SALAMÃO

“Estudo da influência das características mecânicas em chapas dissimilares soldadas no processo MIG/MAG aplicada em carrocerias automotivas”

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Processamento de Materiais da Universidade do Vale do Paraíba, como complementação dos créditos necessários para obtenção do título de Mestre em Processamento de Materiais.

Orientadora:
Prof^ª. Dr^ª. Erika Peterson Gonçalves

São José dos Campos, SP.
2019

TERMO DE AUTORIZAÇÃO DE DIVULGAÇÃO DA OBRA

Ficha catalográfica

Salamão, Rodrigo Otávio Venturini

Estudo da influência nas características mecânicas em chapas dissimilares soldadas no processo MIG/MAG aplicada em carrocerias automotivas / Rodrigo Otávio Venturini Salamão; orientadora, Profa. Dra. Erika Peterson Gonçalves. - São José dos Campos, SP, 2019.

1 CD-ROM, 72 p.

Dissertação (Mestrado Profissional) - Universidade do Vale do Paraíba, São José dos Campos. Programa de Pós-Graduação em Processamento de Materiais e Catálise.

Inclui referências

1. Processamento de Materiais e Catálise. 2. Compostos metálicos-Soldabilidade. 3. Revestimento em alumínio. 4. Indústria automobilística. I. Gonçalves, Profa. Dra. Erika Peterson, orient. II. Universidade do Vale do Paraíba. Programa de Pós-Graduação em Processamento de Materiais e Catálise. III. Título.

Eu, Rodrigo Otávio Venturini Salamão, autor(a) da obra acima referenciada:

Autorizo a divulgação total ou parcial da obra impressa, digital ou fixada em outro tipo de mídia, bem como, a sua reprodução total ou parcial, devendo o usuário da reprodução atribuir os créditos ao autor da obra, citando a fonte.

Declaro, para todos os fins e efeitos de direito, que o Trabalho foi elaborado respeitando os princípios da moral e da ética e não violou qualquer direito de propriedade intelectual sob pena de responder civil, criminal, ética e profissionalmente por meus atos.

São José dos Campos, 23 de Setembro de 2019.


23/9/19.

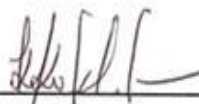
Autor(a) da Obra

RODRIGO OTÁVIO VENTURINI SALAMÃO

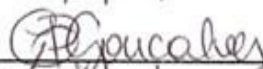
“Estudo da influência nas características mecânicas em chapas dissimilares soldadas no processo MIG/MAG aplicada em carrocerias automotivas”

Dissertação aprovada como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre, do Programa de Pós-Graduação em Processamento de Materiais, do Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento da Universidade do Vale do Paraíba - Univap, pela seguinte banca examinadora:

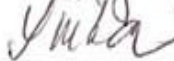
PROF.^ª DR.^ª KUMIKO KOIBUCHI SAKANE



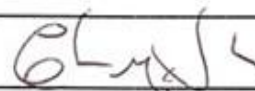
PROF.^ª DR.^ª ERIKA PETERSON GONÇALVES



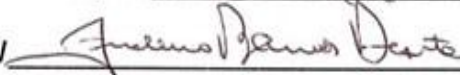
PROF. DR. VILIAM SINKA



PROF. DR. EDISON MARCELO SERBINO – FAENG-FSA/VW



PROF. ME. FREDERICO BARROS DESETA – VW



Prof. Dr. Leandro José Raniero

Diretor do IP&D – Univap

São José dos Campos, 06 de setembro de 2019.

DEDICATÓRIA

Dedico esta dissertação a minha avó, tenho a plena certeza que onde estiver ela está olhando por mim...

“Sem sonhos, as perdas se tornam insuportáveis, as pedras do caminho se tornam montanhas, os fracassos se transformam em golpes fatais.

Mas, se você tiver grandes sonhos...

Seus erros produzirão crescimento, seus desafios produzirão oportunidades, seus medos produzirão coragem.” (Augusto Cury, 2004).

AGRADECIMENTOS

A minha família pelo apoio e compreensão das horas ausentes neste período de pesquisa.

A Prof^a. Dr^a. Erika Peterson Gonçalves, por me dar a oportunidade de aprender e de adquirir conhecimento em diversas metodologias até então desconhecidas. Obrigado por confiar em minha capacidade para desenvolver este trabalho e também por vibrar diante de cada resultado, e assim motivar o desenvolvimento deste. Obrigado pelo incentivo, confiança, paciência, compreensão e respeito com que me tratou esse período. Tenho profunda admiração por você!

Agradeço as minhas duas filhas Anas, a Clara e a Carol pelos afagos diários e pelo apoio motivacional com os meus estudos. Sou apaixonado por elas.

Agradeço a minha esposa Luciani, pelo apoio para que eu realizasse meus estudos e pela compreensão nos momentos de ausência.

Agradeço aos professores e funcionários do IP&D, que colaboraram com o meu aprendizado e desenvolvimento pessoal e profissional.

Agradeço a Deus por todos os dias me dar serenidade, saúde e o ar que respiro. Seu sonho de ver a espécie humana unida, fraterna e solidária é o maior de todos os sonhos.

Estudo da influência das características mecânicas em chapas dissimilares soldadas no processo MIG/MAG aplicada em carrocerias automotivas

RESUMO

A indústria automobilística atualmente aceita, segundo a DIN EN ISO 5817, 2014, que o espaçamento entre juntas soldadas pelo processo MIG/MAG 0,2 mm +0,07 vezes a espessura do metal de base de menor espessura. Porém durante a realização do processo industrialmente, parte da produção deve passar por processos de retrabalho que impactam negativamente tanto no que relaciona aos custos quanto no tempo de produção dos automóveis. O presente trabalho estuda o impacto do espaçamento entre as chapas dissimilares largamente empregadas nas estruturas das carrocerias de automóveis. Estudaram-se os aços 22MnB5 (DIN EN 10083-3) produzidos por Hot Stamping e o HX 340 LAD (DIN EN 10346), produzidas por laminação a frio. Corpos de provas submetidos à soldagem MIG/MAG com corrente constante de 128,0 A, velocidade de soldagem constante de 7,6 m.min⁻¹ e tensão de soldagem constante de 19,1 V em robô para execução da soldagem marca KUKA VKRC4 com seis eixos com uma garantia de repetitividade de 0,06 mm. As amostras foram estudadas com espaçamento de 0,12 mm; 0,36 mm; 0,48 mm; 0,60 mm; 0,78 mm além daqueles corpos de prova de controle onde o espaçamento foi nulo. Por meio de ensaios mecânicos em tração, dobramento, líquido penetrante e microscopia eletrônica de varredura comprovaram que independente dos espaçamentos impostos às juntas soldadas as características mecânicas são mantidas ocorrendo a ruptura na chapa de menor resistência mecânica. Os ensaios por líquidos penetrantes realizados após os ensaios de dobramento apresentaram juntas integras sem a presença de trincas e fissuras na região de solda. Ambos os resultados relatados foram comprovados pelos ensaios microestruturais realizados, onde se observou que não ocorreu a desestabilização da martensita característica das chapas produzidas por Hot Stamping.

Palavras-chave: MIG/MAG. Chapas dissimilares. Espaçamento entre chapas.

Study of the influence on the mechanical characteristics of welded dissimilar plates in the MIG / MAG process applied to automotive bodies.

ABSTRACT

The automotive industry currently accepts, according to DIN EN ISO 5817, 2014, that the joint spacing welded by the MIG / MAG process $0.2 \text{ mm} + 0.07 \times$ the thickness of the thinner base metal. However, during the industrial process, part of the production must go through rework processes that negatively impact both the costs and the production time of the cars. The present work studies the impact of the spacing between the dissimilar plates widely used in the car body structures. The 22MnB5 (DIN EN 10083-3) steels produced by Hot Stamping and the HX 340 LAD (DIN EN 10346) steels produced by cold rolling were studied. Specimens subjected to MIG / MAG welding with constant current 128.0 A, constant welding speed $7.6 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ and constant welding voltage 19.1 V in robot for KUKA VKRC4 welding. With six axes with a repeatability guarantee of 0.06mm. The samples were studied with 0.12 mm spacing; 0.36 mm; 0.48 mm; 0.60 mm; 0.78 mm in addition to those control specimens where the spacing was zero. Mechanical tests on tensile, bending, penetrating liquid and Scanning electron microscopy proved that, regardless of the spacing imposed on welded joints, the mechanical properties are maintained with the breaking of the sheet of lower mechanical strength. The penetrating liquid tests performed after the bending tests showed integral joints without the presence of cracks and cracks in the weld region. Both reported results were confirmed by the microstructural tests performed, where it was observed that the martensite destabilization characteristic of the plates produced by Hot Stamping did not occur.

Keywords: MIG / MAG. Dissimilar plates. Spacing between plates.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Processo de soldagem de juntas entre duas chapas e o respectivo retrabalho.....	14
Figura 2: Diagrama de Equilíbrio de Fases do Sistema Fe-C.	17
Figura 3: Processo de estampagem a quente.....	19
Figura 4: Diagrama TTT aço 22MnB5.	20
Figura 5: Soldagem MIG/MAG.	22
Figura 6: Representação da Impressão Vickers.....	25
Figura 7: Tipos característicos de impressão Vickers, (a) em metais recozidos; (b) impressão perfeita e (c) em metais encruados.	26
Figura 8: Tipos de ensaios de dobramento, em (a) e (b) Dobramento livre esquemático, em (c), (d), (e) e em (f) Dobramento semi-guiado esquemático.	28
Figura 9: (a) representa uma máquina universal de ensaio de tração e em (b) o gráfico gerado pelo ensaio: diagrama tensão <i>versus</i> deformação.....	29
Figura 10: Corpo de prova seção retangular.....	33
Figura 11: Ensaio de tração.	34
Figura 12: Chapas usadas para a soldagem da junta em a) as chapas de estampagem a quente e, em b) as chapas zincadas.....	35
Figura 13: SPECTROMAXx, equipamento utilizado para a verificação da composição química.	37
Figura 14: Diagrama de bloco de desenvolvimento do projeto	38
Figura 15: Amostra para certificação da composição química.	38
Figura 16: Corpos de prova para o ensaio de tração.	39
Figura 17: Dimensões do CDP.....	40
Figura 18: Esquema da junta soldada.....	41
Figura 19: Equipamento de soldagem Fronius (a), e em (b) o Robô usado para soldagem dos corpos de prova.	41
Figura 20: Desenho esquemático da junta soldada.	43
Figura 21: Falhas na soldagem.....	43
Figura 22: Resultados do Ensaio de Tração.	50
Figura 23: Corpos de provas, embutidos na baquelite, para verificação da dureza.	53

Figura 24: Imagens obtidas por MEV da ZTA. (a) o metal de solda e o metal de base, (b) microscopia óptica aumento de 200x região 22MnB5 (c) vista transversal em detalhe da amostra 01 mostrando a região de transição do metal de solda com o metal de base com espaçamento de 0,00 mm, (d) estrutura martensítica.	56
Figura 25: Imagens obtidas por MEV da ZTA. (a) o metal de solda e o metal de, (b) vista transversal em detalhe da amostra 02 mostrando a região de transição do metal de solda com o metal de base com espaçamento de 0,12 mm, (c) estrutura martensítica.	57
Figura 26: Imagens obtidas por MEV da ZTA. (a) o metal de solda e o metal de, (b) vista transversal em detalhe da amostra 03 mostrando a região de transição do metal de solda com o metal de base com espaçamento de 0,36 mm, (c) estrutura martensítica.	57
Figura 27: Imagens obtidas por MEV da ZTA. (a) o metal de solda e o metal de, (b) vista transversal em detalhe da amostra 04 mostrando a região de transição do metal de solda com o metal de base com espaçamento de 0,48 mm, (c) estrutura martensítica.	59
Figura 28: Imagens obtidas por MEV da ZTA. (a) o metal de solda e o metal de, (b) vista transversal em detalhe da amostra 05 mostrando a região de transição do metal de solda com o metal de base com espaçamento de 0,60 mm, (c) estrutura martensítica.	61
Figura 29: Imagens obtidas por MEV da ZTA. (a) o metal de solda e o metal de, (b) vista transversal em detalhe da amostra 06 mostrando a região de transição do metal de solda com o metal de base com espaçamento de 0,78 mm, (c) estrutura martensítica.	62
Figura 30: Amostras antes e depois do ensaio de dobramento com a aplicação do líquido penetrante.	64

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Níveis estruturais e técnicas de análises aplicadas.	24
Tabela 2: Apresenta as características mecânicas para tais materiais; a tabela 2 (a) da DIN EN 10083-3 22MnB5 estampado a quente, e a Tabela 2(b) propriedades mecânicas do aço HX 340LAD DIN EN10346 laminados a frio.	35
Tabela 3, apresenta a composição química expressa em porcentagem de massa prevista pelas normas vigentes, na Tabela 3 (a) é a composição segundo a DIN EN 10083-3 22MnB5 e a na Tabela 3(b) é a composição segundo a DIN EN 10346 para a liga HX 340 LAD.	36
Tabela 4: Composição química especificada da chapa zincada.	45
Tabela 5: Resultado do ensaio de composição química realizado na chapa zincada.	45
Tabela 6: Composição química de acordo com a DIN EN 10083-3 22MnB5.	46
Tabela 7: Resultado do ensaio de composição química realizado na DIN EN 10083-3 22MnB5 com sobremetal de alumínio e silício.	46
Tabela 8: Composição química do arame de solda de acordo com a AWS A5.18 – 2010 ER70S6.	47
Tabela 9: Composição química encontrada do arame de solda.	47
Tabela 10: Resultados do ensaio de macrografia.	47
Tabela 11: Resultados do ensaio de dureza Vickers	53
Tabela 12: Imagem de identificação das amostras para a realização dos ensaios por MEV	55
Tabela 13: Resultados do ensaio de Dobramento.	63

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
2	OBJETIVOS	15
2.1	OBJETIVO GERAL	15
2.2	OBJETIVO ESPECÍFICO	15
3	REVISÃO DA LITERATURA.....	16
3.1	AÇOS	16
3.2	MICROESTRUTURA DOS AÇOS.....	17
3.3	AÇOS MICRO LIGADOS	18
3.4	PROCESSO DE CONFORMAÇÃO A QUENTE <i>HOT-STAMPING</i>.....	19
3.5	SOLDAGEM	21
3.6	SOLDAGEM MIG/MAG	22
3.7	ZONA FUNDIDA.....	23
3.8	ZONA TERMICAMENTE AFETADA.....	23
3.9	TÉCNICAS DE ANÁLISE DA METALURGIA NA SOLDAGEM	24
3.10	ENSAIO DE DUREZA	25
3.11	ENSAIO DE DUREZA VICKERS	25
3.12	ENSAIO DE DOBRAMENTO	26
3.13	ENSAIO DE TRAÇÃO	28
4	MATERIAIS E MÉTODOS.....	35
4.1	MATERIAIS	35
4.1.1	OS MATERIAIS DO ESTUDO.....	35
4.1.2	CARACTERIZAÇÕES DO METAL DE BASE	36
4.1.3	CARACTERIZAÇÃO DO CONSUMÍVEL DE SOLDAGEM	37
4.2	MÉTODOS.....	37
4.2.1	RECEBIMENTO DA MATÉRIA PRIMA.....	38
4.2.2	ANÁLISE DA COMPOSIÇÃO QUÍMICA	39
4.2.3	PREPARAÇÃO DO CORPO DE PROVA PARA SOLDAGEM.....	39
4.2.4	CONFECÇÃO DOS CORPOS DE PROVAS	39
4.2.5	SOLDAGEM DOS CDP´S	40
4.2.6	ENSAIOS	41
4.3	CRITÉRIOS DE APROVAÇÃO	42
4.4	ANÁLISE ESTATÍSTICA DAS AMOSTRAS DO ENSAIO DE TRAÇÃO	44
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	45
5.1	CARACTERÍSTICAS DAS CHAPAS ENSAIADAS (METAL DE BASE)	45

5.2	CARACTERÍSTICAS DO ARAME DE SOLDA.....	46
5.3	ENSAIO MACROGRÁFICO DOS CORDÕES DE SOLDA.....	47
5.4	ENSAIO DE TRAÇÃO	49
5.5	ENSAIO DE DUREZA	53
5.6	ENSAIO POR MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV).....	54
5.7	ENSAIO DE DOBRAMENTO	62
6	CONCLUSÕES	66
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	67
	APÊNDICE A – MEVs de todas as amostras com todos os espaçamentos.....	69
	APÊNDICE B – MEVs de todas as amostras com todos os espaçamentos.....	70
	APÊNDICE C – MEVs De Todas As Amostras Com Todos Os Espaçamentos..	71
	APÊNDICE D – MEVs de todas as amostras com todos os espaçamentos.....	71
	APÊNDICE E – MEVs de todas as amostras com todos os espaçamentos.....	72
	APÊNDICE F – MEVs de todas as amostras com todos os espaçamentos.	72

1 INTRODUÇÃO

Apesar das vantagens do processo de soldagem MIG/MAG ser conhecidas, foi identificada uma irregularidade no processo relacionado ao aumento no retrabalho devido à formação de espaçamentos, *gap*, entre as chapas que são soldadas.

O aumento da automação dos processos de solda acarreta em uma série de problemas relacionados à qualidade e repetitividade dos mesmos, uma delas é a variação dimensional das peças onde muitas das vezes apresentam entre as chapas a serem soldadas espaçamentos, “*gap's*”, que segundo a norma podem ser de apenas $0,2 \text{ mm} + 0,07$ vezes a espessura do metal de base de menor espessura (DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG, 2014a).

O interesse na soldagem MIG/MAG de chapas metálicas conformadas pelo processo *Hot Stamping* tem aumentado consideravelmente, devido a exigências do mercado de produzir veículos cada vez mais leves e mais resistentes mecanicamente, sem que sejam prejudicados os níveis de segurança para os passageiros.

Por se tratar de uma tecnologia altamente precisa, as variáveis de processos precisam ser controladas, sob o risco de falha no controle resultar em danos no desempenho do processo, gerando perdas e retrabalho. O desempenho do processo é a medida de quão bem um processo funciona. É medido comparando-se o nível de desempenho real do processo com o nível de desempenho ideal do processo (YANG; EL-HAIK, 2008).

A Figura 1 apresenta os pontos onde é usado o material *Hot Stamping*, o retrabalho que é necessário fazer e a superfície do cordão de solda.

Figura 1: Processo de soldagem de juntas entre duas chapas e o respectivo retrabalho.



Fonte: Arcelor Mittal (2015), adaptado pelo Autor

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

O presente trabalho visa avaliar o comportamento da soldagem de juntas sobrepostas, compostas por materiais dissimilares, quando se variam os espaçamentos entre chapas, mantendo constantes os parâmetros estipulados de uso no setor produtivo.

2.2 OBJETIVO ESPECÍFICO

- Avaliar as características mecânicas por ensaio de tração;
- Avaliar as características mecânicas por ensaio de dureza;
- Avaliar a composição química dos materiais envolvidos por porcentagem de massa;
- Avaliar as características da zona afetada termicamente por Microscopia eletrônica de varredura- MEV;
- Avaliar o comportamento da zona afetada termicamente após o ensaio de dobramento usando líquido penetrante.

3 REVISÃO DA LITERATURA

Neste capítulo estão apresentados estudos e teorias relacionados à área da soldagem. Foram levantados embasamentos técnicos voltados à análise dos aços e uma revisão em temas importantes no estudo do processo e comportamento da soldabilidade de materiais. Com a união destes temas foi possível elaborar e fundamentar este trabalho.

Considerando que o presente estudo envolve áreas de abrangência relativamente vastas, a presente pesquisa se dividirá em três grandes blocos de conhecimento, sendo eles: Metalurgia e Soldagem MIG/MAG, Ensaaios Mecânicos e análises Microestruturais.

3.1 AÇOS

Denomina-se aço, a liga ferro-carbono que apresenta a composição de geralmente 0,008% até aproximadamente 2,11% de carbono, contendo também uma estrutura com pequenas quantidades de elementos residuais oriundos dos processos de fabricação. Assim, aços com teores superiores de elementos de liga são denominados aços-liga.

Segundo Chiaverini (2005), pode-se ainda subdividir os aços-carbono a partir do teor de carbono:

- Baixo teor de carbono: inferior a 0,2%;
- Médio carbono: de 0,2% a 0,5%;
- Alto teor de carbono: superior a 0,5%.

A presença de elementos de liga subdivide os aços-ligas em:

- Baixa liga: inferior a 8%;
- Alta liga: superior a 8%.

Devido à ampla classificação dos materiais do sistema Fe-C, é necessária a padronização mundial.

As mais aceitas estão de acordo com a *American Iron and Steel Institute* (AISI) ou com a *Society of Automotive Engineers* (SAE). Existem também alguns aços classificados pelo sistema alemão *Deutsches Institut für Normung e.V.* (DIN).

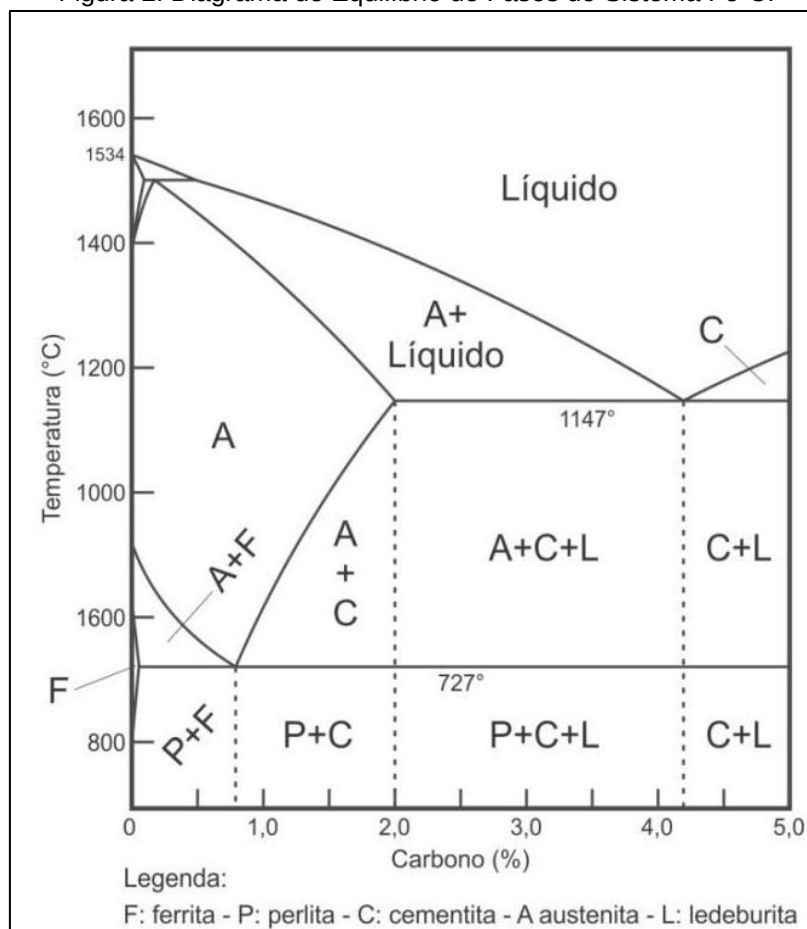
Este trabalho usará o Sistema DIN como padronização das ligas.

3.2 MICROESTRUTURA DOS AÇOS

Além da composição química, outro fator importante é a microestrutura do material. Que pode ser alterada pela presença de elementos de liga e por etapas de processamento.

O diagrama de equilíbrio de fases do sistema Fe-C, conforme Figura 2, mostra as fases da liga em função da temperatura e composição da mesma. Algumas microestruturas básicas encontradas nos aços são: a cementita, a ferrita, a perlita, austenita e ledeburita (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2005).

Figura 2: Diagrama de Equilíbrio de Fases do Sistema Fe-C.



Fonte: adaptado pelo autor de Marques, Modenesi e Bracarense (2005).

A cementita é um carbeto de ferro (Fe_3C) com 6,7% de carbono na composição. Esta microestrutura contribui para a elevada dureza e resistência mecânica dos aços que são responsáveis pela fragilização do material devido à redução de sua ductilidade aumentando o módulo de elasticidade.

A ferrita é constituída por ferro à temperatura ambiente com uma estrutura cristalina cúbica de corpo centrado (CCC) e sob a forma alotrópica alfa (α). Possui características magnéticas em temperaturas inferiores a 770 °C. Ao contrário da cementita, possui baixas dureza e resistência mecânica, porém a alta ductilidade dá a esta fase elevada resistência ao impacto (VAN VLACK, 2003).

A perlita é uma união composta de ferrita e cementita, disposta na forma de lâminas. Por se tratar de um composto bifásico apresenta propriedades intermediárias às das duas fases anteriormente citadas. Em sua composição eutética apresenta resistência à tração média de 740 MPa.

Por fim, a quarta fase desenvolvida no sistema Fe-C é a austenita. É formada por uma solução sólida de carbono precipitada na matriz de ferro na forma alotrópica gama (γ), com uma estrutura cristalina cúbica de face centrada (CFC), contribuindo para a maior solubilidade do carbono, apresentando boa resistência mecânica e tenacidade (CALLISTER, 2012; CHIAVERINI, 2005).

3.3 AÇOS MICRO LIGADOS

A evolução da metalurgia de produção em série, em conjunto com as necessidades de melhorias nos processos produtivos da indústria automobilística, resultou no desenvolvimento de aços de ligas especiais chamados “aços micro ligados”, que são os indicados para determinadas aplicações em construções de carrocerias (WAGENER, 1997, p. 343).

Estes aços, que tem em sua composição a adição controlada de elementos químicos, tais como Nióbio (Nb), Titânio (Ti), Vanádio (V), resultam em materiais que apresentam modificações em suas propriedades mecânicas, que favorecem seu processamento e aplicação.

A adição de Nb, Ti e V na liga aumenta os limites de alongamento, permitindo a produção de formas mais profundas em processo de estampagem, o

que é necessário para conformação de perfis de colunas B de veículos, por exemplo.

Os aços micro ligados especificados na norma DIN EN 10346 que apresentam resistência à tração variando de 380 MPa a 590 MPa, são indicados para estampagem profunda, portanto indicados para construção de perfis estruturais como longarinas e colunas de portas (DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG, 2015).

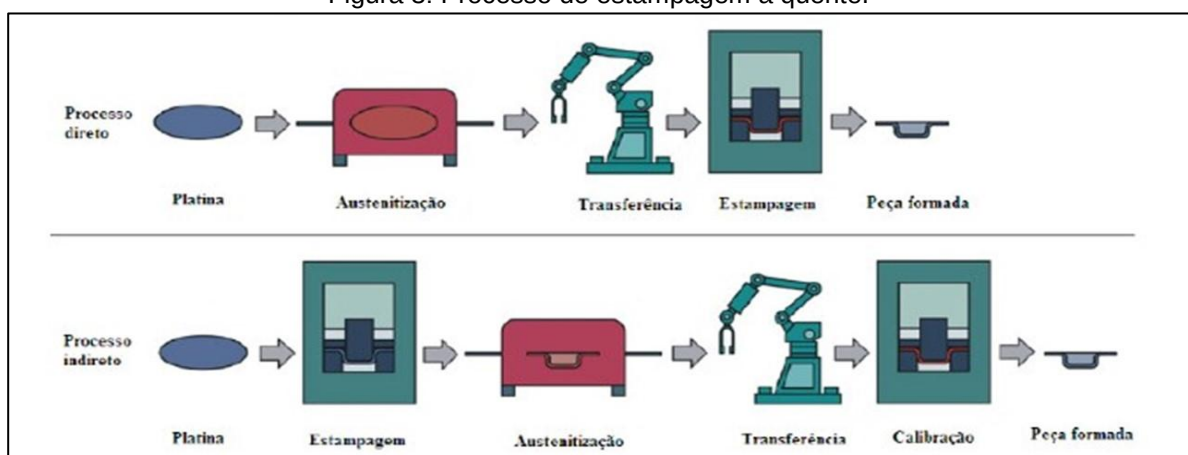
3.4 PROCESSO DE CONFORMAÇÃO A QUENTE *HOT-STAMPING*

Os aços para estampagem a quente são classificados internacionalmente como *Ultra High Strength Steels* (UHSS), foram desenvolvidos e patenteados pela empresa sueca Plannja em 1977. Desde então, para atender às exigências de redução de peso e aumento de resistência mecânica, várias montadoras adotaram seu uso em posições estratégicas das carrocerias (KARBASIAN; TEKKAYA, 2010).

O alto grau de conformabilidade que o aço 22MnB5 apresenta em altas temperaturas, permite a conformação de peças com geometria relativamente complexa, com estrutura final martensítica e espessura reduzida, além de melhor precisão geométrica devido a redução do efeito *springback* (LIU et al., 2010).

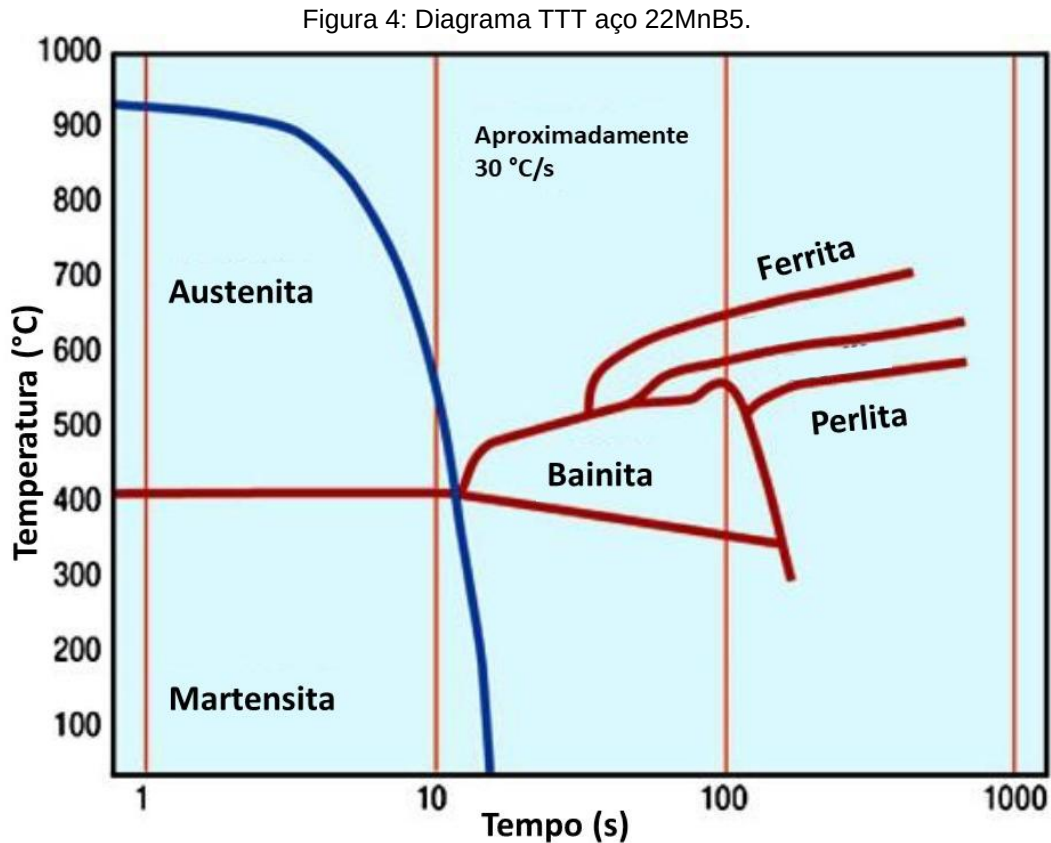
Dois processos de estampagem a quente são aplicados pela indústria automotiva, o direto e o indireto estão apresentados na Figura 3.

Figura 3: Processo de estampagem a quente.



Fonte: Karbasian e Tekkaya (2010, p. 2104).

No processo direto a chapa é aquecida e então prensada em ferramenta refrigerada, o que provocará o resfriamento rápido do produto, gerando uma microestrutura martensítica como previsto no diagrama que relaciona o Tempo, a Temperatura e a Transformação (TTT), (Figura 4).



Fonte: Altan (2007).

No processo indireto, a conformação do produto se dá à temperatura ambiente em processo de estampagem convencional e a transformação martensítica se faz no produto já conformado em uma operação de calibração.

O processo de estampagem direta apresenta vantagens, pois para sua aplicação é necessário um ferramental único, reduzindo relativamente o investimento necessário por apresentar um ciclo de produção reduzido quando comparado ao outro método. Entretanto, aspectos construtivos do componente, tais como furos ou contornos específicos devem permitir sua aplicação, pois o pós-processamento só é possível através de operações de corte a laser, jato de água ou corte a quente devido a alta resistência do material (KARBASIAN; TEKKAYA, 2010).

A estampagem a quente de chapas sem proteção superficial gera formação de óxidos durante o processo de austenitização e têmpera, o que ocorre

principalmente com o contato da chapa com o ar ao ser retirada do forno à cerca de 900 °C (MORI; ITO, 2009).

Como a carroceria deve estar isenta de óxidos para ser submetida ao processo de pré-tratamento anticorrosivo e de pintura, há a necessidade de eliminação dos óxidos formados antes da montagem do componente estampado a quente, para se evitar que entre flanges de soldagem existam resíduos decorrentes do processo de estampagem que favoreçam a corrosão (KARBASIAN; TEKKAYA, 2010).

Após o processo de limpeza dos óxidos por jateamento após a estampagem, é necessário o tratamento superficial de Al-Si (10% Si, 3% Fe e 87% Al), que nas condições específicas do processo de austenitização gera uma camada protetora que evita a formação de óxidos na superfície da peça (KARBASIAN; TEKKAYA, 2010).

3.5 SOLDAGEM

Entre os métodos de união de materiais, a soldagem é a opção de processo mais utilizada na indústria, sendo aplicada desde a fabricação de estruturas de portões até aplicações em plantas nucleares, automotivas, navais e etc. (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2005).

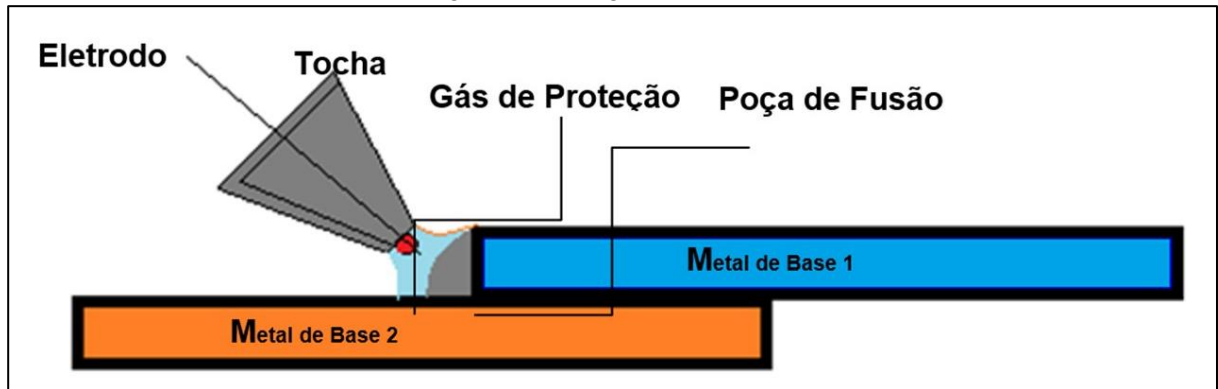
O processo pode ocorrer por meio da fusão de ambos os materiais a serem soldados, com ou sem a adição de um material, ou pelo contato direto dos dois em fase sólida ou semissólida (MACHADO, 1996).

As juntas são regiões onde ambas as peças serão unidas através do processo de soldagem (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2005). Os materiais primários dos componentes que estão sendo soldados levam o nome de metal base. Nos métodos de soldagem por fusão, geralmente ocorre à utilização de um material adicional a ser fundido, o chamado metal de adição. No decorrer do processo, estes elementos serão fundidos, formando a poça de fusão.

3.6 SOLDAGEM MIG/MAG

Segundo Scotti e Ponomarev (2008), MIG/MAG é um processo de soldagem por arco elétrico mantido entre a peça a soldar e a extremidade de um arame nu consumível, fornecido por um alimentador contínuo, mostrado na Figura 5.

Figura 5: Soldagem MIG/MAG.



Fonte: Autor.

A região da solda é protegida por uma atmosfera de gás, este pode ser inerte ou ativo ou ainda utilizar-se uma mistura deles.

O processo de soldagem que utiliza gás de proteção inerte, geralmente Argônio, o qual não tem nenhuma reação com a poça de fusão, é denominado MIG, da língua inglesa *Metal Inert Gas* (FORTES, 2005).

Sendo denominado MAG, do inglês *Metal Active Gas*, o processo de soldagem em que a proteção gasosa é feita com um gás ativo usualmente CO_2 , o qual, por sua vez, interage com a poça de fusão (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2009).

Os gases de proteção usualmente utilizados no processo MIG são o Argônio ou o Hélio ou ainda uma mistura de ambos. O processo MAG geralmente utiliza CO_2 ou mistura de gás inerte com CO_2 ou com O_2 . O emprego de CO_2 , um gás oxidante com custo inferior quando comparado a outros gases de proteção, faz do processo MAG um dos mais utilizados na soldagem de estruturas de aço.

Devido à atmosfera oxidante, ocorre a formação de FeO que se combina com o carbono existente no aço e origina CO .

Uma vez que a solidificação do metal em fusão é muito rápida, o monóxido de carbono (CO) pode ficar preso no interior do metal e causar porosidades. A fim

de impedir a formação de CO, usa-se metal de adição com desoxidantes como o Silício (Si) e o Manganês (Mn), em proporções maiores que as utilizadas no processo MIG, e que produzem variadas reações.

Quando se utiliza mistura de Argônio (Ar) e CO₂, é preciso controlar a porcentagem de Argônio existente na mistura. O aumento de Argônio na mistura com CO₂ estabiliza o arco elétrico e, em consequência, atenua o respingo, uma vez que há um aumento na frequência de gases de proteção (WAINER; BRANDI; MELLO, 1992).

3.7 ZONA FUNDIDA

A região da zona fundida mais próxima do arco elétrico apresenta maior temperatura da poça de fusão, ocorrendo à mistura entre os materiais do metal de base e do eletrodo. A interação com os gases de proteção também é evidenciada nesta região.

Na fronteira entre a poça de fusão e o metal de base não fundido, a temperatura irá diminuir gradativamente até a atingir a temperatura de solidificação do material, resultando numa estrutura com menor tenacidade. É nesta etapa do processo em que descontinuidades como a porosidade e a formação de inclusões podem aparecer (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2005; WAINER; BRANDI; MELLO, 1992).

Durante o resfriamento da poça de fusão e após a solidificação do material, algumas modificações tais como o aumento no tamanho de grão, formação de carbeto e transformações de fase do metal de solda podem ocorrer (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2005; WAINER; BRANDI; MELLO, 1992).

3.8 ZONA TERMICAMENTE AFETADA

Segundo Marques, Modenesi e Bracarense (2005), as características da ZTA estão interligadas com o material de base e processo de soldagem.

Um grande aumento no tamanho da região austenítica é observado na região mais próxima da zona fundida. Comportamento este, influenciado pelo tipo de material e energia envolvida na operação. O tamanho final do grão austenítico e a

taxa de resfriamento além dos níveis de carbono e dos elementos de liga são os fatores determinantes para a estrutura definitiva. Esta área geralmente é a mais crítica devido à interface entre zonas com diferentes tamanhos de grãos o que pode resultar no surgimento de trincas.

Nas demais regiões da ZTA ocorrem alterações que não causam grandes problemas ao material. Evidencia-se nesta o refino de grão, com temperaturas próximas das aplicadas em processos de normalização dos aços (900 a 1200 °C) e algumas transformações da microestrutura pouco perceptíveis (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2005).

3.9 TÉCNICAS DE ANÁLISE DA METALURGIA NA SOLDAGEM

A soldagem provoca alterações na estrutura da junta, estas são oriundas das mudanças da temperatura e deformações plásticas ocorridas no processo. Grande parte das alterações pode prejudicar o desempenho do material e por isso devem ser cuidadosamente controladas relacionando-as com a sensibilidade do material escolhido (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2005).

Existem diversos métodos que visam analisar as propriedades em vários níveis da estrutura do material, estes estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1: Níveis estruturais e técnicas de análises aplicadas.

Nível estrutural	Dimensões aproximadas	Exemplos de técnicas de estudo	Detalhes comuns
Macroestrutura	> 100 µm	Macrografia, Radiografia	Segregação, trincas, camadas cementadas
Microestrutura	100 µm a 0,1 µm	Microscopia ótica (MO), microscopia eletrônica de varredura (MEV)	Tamanho de grão, microconstituintes, microtrincas.

Fonte: adaptado pelo autor de Machado (1996).

3.10 ENSAIO DE DUREZA

A dureza, como característica mecânica, é bastante utilizada para indicar e comparar os materiais. É por meio da dureza de um material que se pode identificar a sua resistência à ruptura, assim como a capacidade de deformar-se sob a ação de esforços.

A definição de dureza é complexa devido as diferentes interpretações que são empregadas, de modo simples pode-se dizer que é a resistência à deformação plástica localizada.

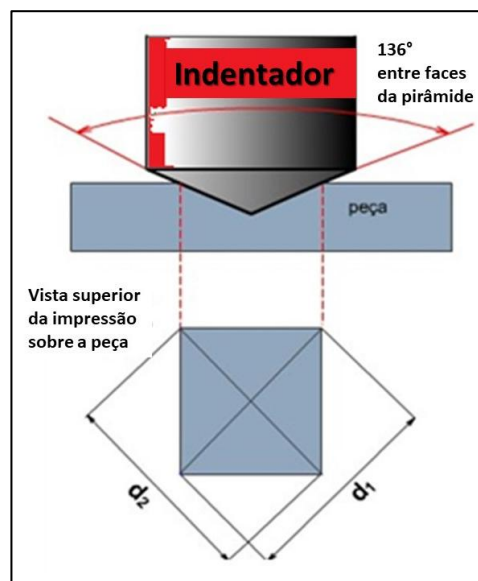
3.11 ENSAIO DE DUREZA VICKERS

A dureza Vickers é empregada devido às dificuldades de determinação da dureza de microestrutura de materiais frágeis, de peças pequenas ou extremamente finas. (RATTICHERI, 2004).

A carga utilizada pode variar, assim como o tempo de indentação, porém apenas a carga é considerada no cálculo da dureza. O tempo maior ou menor será determinado pela resiliência do material analisado. (RATTICHERI, 2004).

A Figura 6 representa esquematicamente o ensaio de Dureza Vickers e a impressão deixada pelo indentador de diamante.

Figura 6: Representação da Impressão Vickers.



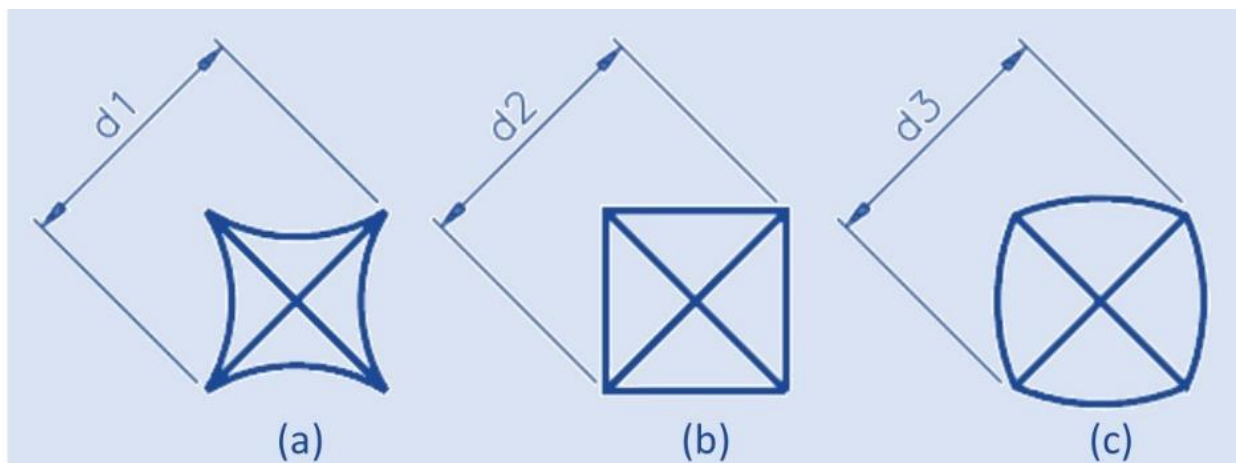
Fonte: CIMM - Centro de Informação Metal Mecânica (2019), adaptado pelo autor.

O durômetro Vickers não fornece o valor da área de impressão da pirâmide, mas permite obter, por meio de um microscópio acoplado, as medidas das diagonais formadas pelos vértices opostos da base da pirâmide. A partir destas medidas é possível determinar a dureza do material ensaiado.

O tempo de aplicação da carga varia de 10 a 15 segundos. Quando a duração é diferente, indica-se o tempo de aplicação após a carga. Como na representação 440 HV 30/20, o último número indica que a carga foi aplicada por 20 segundos (FERREIRA, 2015).

Uma impressão perfeita deve conter os lados da base do triângulo retos, Figura 7(b), porém, pode-se encontrar imperfeições, devido ao afundamento ou aderência do metal em volta das faces do penetrador, como visto na Figura 7(a) e (c).

Figura 7: Tipos característicos de impressão Vickers, (a) em metais recozidos; (b) impressão perfeita e (c) em metais encruados.



Fonte: Zolin (2011), adaptado pelo autor.

3.12 ENSAIO DE DOBRAMENTO

Segundo Souza (1986) o ensaio de dobramento é avaliado a deformação plástica obtida por meio de esforços em flexão de corpos de prova padronizados.

Devido a sua relativa simplicidade, o ensaio de dobramento é largamente utilizado nas indústrias e laboratórios com o objetivo de verificar a capacidade de deformação dos materiais, na detecção de defeitos de compactidade, metalúrgicos e

de soldagem assim como obter valores comparativos de ductilidade dos materiais Souza (1986).

As descontinuidades oriundas do processo de soldagem mais comumente observadas no ensaio de dobramento são:

- Falta de fusão;
- Inclusões metálicas
- Inclusões não metálicas;
- Poros.

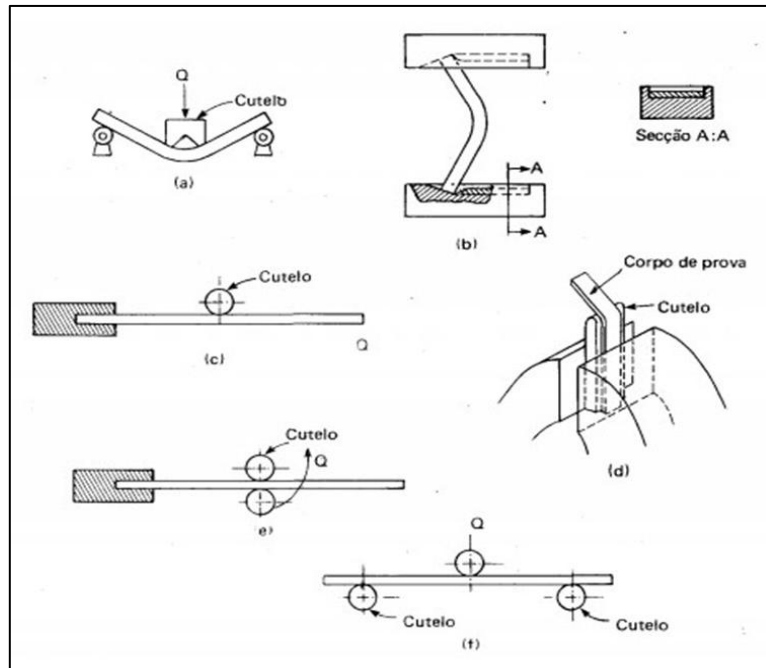
No ensaio de dobramento, como os esforços aplicados são de flexão, um lado do corpo de prova é tracionado enquanto o lado oposto é comprimido.

O corpo de prova pode ser retirado dos produtos acabados ou pode ser o próprio produto, como por exemplo, parafusos, pinos, barras que apresentem dimensões adequadas para serem colocados na máquina de dobramento.

Para analisar o resultado do ensaio, examina-se a olho nu a zona tracionada do corpo de prova. Para o corpo de prova ser aprovado, ele não deve conter trincas ou descontinuidades.

O resultado do ensaio é considerado reprovado se o corpo de prova apresentar estes defeitos ou se romper antes de atingir o ângulo especificado.

Figura 8: Tipos de ensaios de dobramento, em (a) e (b) Dobramento livre esquemático, em (c), (d), (e) e em (f) Dobramento semi-guiado esquemático.



Fonte: Souza (1986).

Existem três maneiras de realizar o ensaio, dobramento livre, dobramento semi-guiado e dobramento guiado. No dobramento livre a força é aplicada nas duas extremidades do corpo de prova, sem aplicação no centro ou na zona de dobramento máximo (Figura 8a), no dobramento semi-guiado, uma das extremidades do corpo de prova é engastada e a tensão é aplicada em outro ponto da barra (Figura 8b), além disso, os apoios nesse caso tem apenas a função de sustentar a barra e não de guiar o dobramento, conforme ocorre no dobramento guiado (Figura 8d) onde o corpo de prova é apoiado em um cutelo e com o apoio manual aplica-se o esforço até alcançar 90°.

3.13 ENSAIO DE TRAÇÃO

O ensaio de tração consiste na aplicação de uma carga uniaxial crescente em um corpo de prova específico até a ruptura. Mede-se a variação do comprimento (L) com a função da carga (P). Trata-se de um ensaio amplamente utilizado na indústria de componentes mecânicos dos materiais, onde se destacam principalmente o limite de resistência à tração dos componentes e o limite de resistência ao escoamento (STOCCO, 2010).

direta entre tensão e deformação, sendo válida somente no regime elástico, apresenta-se na equação 1. (ZOLIN, 2011).

$$(1)$$

Onde σ é a tensão, E é o módulo de elasticidade e ϵ é a deformação linear do material.

O módulo de elasticidade é uma característica que mostra o quanto um material resiste à deformação elástica. É a medida de sua rigidez. Segundo Chiaverini (2005) módulo de elasticidade dependente das forças interatômicas e, embora variando com o tipo de ligação atômica, não é sensível a modificações estruturais. Assim, por exemplo, se num determinado tipo de aço, a resistência mecânica pode aumentar apreciavelmente por fatores que afetem sua estrutura, como tratamentos térmicos ou pequenas adições de elementos de liga, esses fatores praticamente não influem no módulo de elasticidade do material. A variação da temperatura produz alteração no módulo de elasticidade. Aumentando a temperatura, diminui o módulo de elasticidade do material que mais aquecido, fica com menor resistência à deformação elástica, ocasionando com maior facilidade, deformações plásticas (ZOLIN, 2011).

O gráfico da tensão-deformação mostra duas regiões que estão relacionadas ao regime de deformação elástica ou plástica. A primeira é chamada de proporcional em que há relação direta (linear) entre o esforço aplicado e o alongamento verificado no material. A deformação ocasionada pela aplicação de uma carga é temporária. Quando cessa a força, o material retorna ao estado dimensional inicial. Nessa parte da deformação, regime elástico, vale a Lei de Hooke (ZOLIN, 2011).

A segunda, em que a linearidade do gráfico não é mais verificada é a região de deformação plástica, onde a Lei de Hooke não mais pode ser aplicada. Aqui a deformação não é mais temporária, mas definitiva, cessada a força não há retorno a dimensões iniciais. No início, a deformação é pequena e proporcional à força aplicada. Após a fase de deformação elástica, continuando o aumento de carga, o material começa a se deformar plasticamente. Inicialmente de forma rápida, até atingir a tensão máxima que ele pode suportar. O limite de elasticidade é o valor de

carga máxima que pode suportar o material sem apresentar deformação permanente. O limite de resistência à tração é o valor de tensão máxima que o material suporta. É relação entre a carga aplicada pela área da secção transversal do material ou corpo de prova. Materiais com maior ductilidade, aços carbonos de baixo teor de carbono, nos ensaios de tração, apresentam o fenômeno chamado: escoamento, que serve para definir bem o início da fase plástica. A definição dos limites do escoamento, que serve para definir bem o início da fase plástica, depende das normas que serão adotadas (ZOLIN, 2011).

Nos materiais que não apresentam nitidamente o fenômeno de escoamento, aços com médio teor de carbono, o método empregado para definir esses limites é o gráfico conforme a Figura 9 interrompe o ensaio já na fase de deformação plástica quando o alongamento tem valor residual permanente. O método gráfico define o limite convencional n para materiais que não apresentam nitidamente o fenômeno de escoamento. Esse limite n é adotado de forma arbitrária, geralmente especifica-se como 0,2% de deformação, que corresponde à deformação permanente de 0,002 por unidade de comprimento. O valor de n é definido traçando uma paralela ao gráfico da deformação elástica, marcando nas abscissas o valor de 0,002 (gráfico da direita na Figura 9). Nos materiais em que a deformação é pequena, aços dedicados para à fabricação de molas, que possuem alto teor de carbono, ou ligas não ferrosas de alta dureza, o valor de n (significa que o limite n (σ_n) é a tensão aplicada que, após seu descarregamento, provoca n por cento de deformação permanente), pode ser adotado 0,1%. Nos menos dúcteis, esse valor é de 0,01%. Nos materiais em que a deformação é grande, o cobre e suas ligas, o valor de n pode ser de 0,5% (0,005), medido a partir da origem e traçando uma perpendicular ao eixo das abscissas (paralela ao eixo das ordenadas) para definir o valor do limite convencional n do material. A importância do conhecimento do limite convencional “ n ” ou do limite de escoamento dos metais e suas ligas residem no fato de que esses valores são os utilizados pelos engenheiros para seus projetos e cálculos, sobretudo quando se trata de ligas dúcteis. O conhecimento do limite de resistência à tração, por outro lado, tem sua importância ligada ao fato de que é, por seu intermédio, que os materiais são especificados. (CHIAVERINI, 2005).

A tensão nominal no diagrama tensão-deformação corresponde à resistência à tração (limite de resistência) é definida pelo valor máximo da carga e pela área da

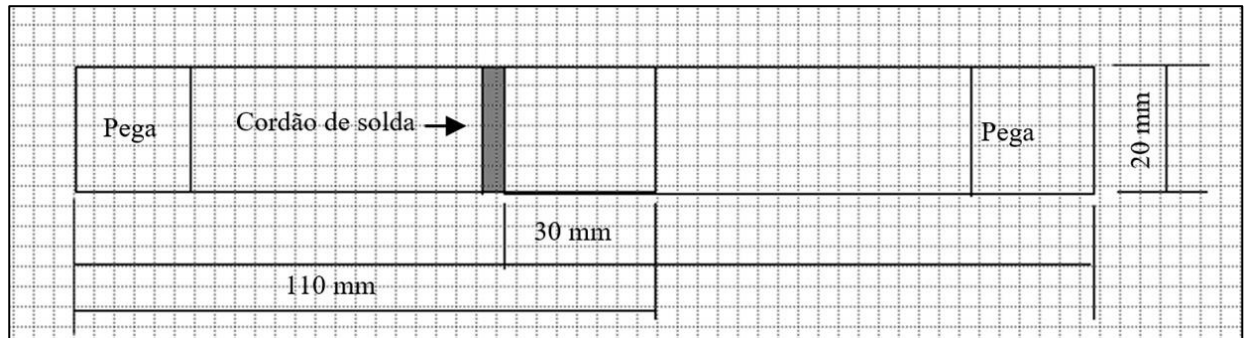
secção transversal original do corpo de prova. Essa relação em alguns materiais mais dúcteis, não expressa o verdadeiro comportamento da tensão (CHIAVERINI, 2005).

Quando for determinar a tensão de fato ou a resistência à tração verdadeira, usa-se o quociente entre a carga máxima verificada do ensaio e a área da secção transversal do corpo de prova no instante desejado. O diagrama verdadeiro será a curva representativa dessa relação matemática (carga/área). Para efeito de dimensionamentos em projetos, a curva de tensão-deformação empregada é a nominal, enquanto a verdadeira ou real é utilizada para fins de pesquisa. Do mesmo modo que a “tensão real” é obtida dividindo-se a carga aplicada, em qualquer estágio de sua aplicação, pela área de secção real, pode-se obter a “deformação real” ou “deformação logarítmica” que equivale, para um determinado aumento de carga, à relação da mudança comprimento devido ao incremento da carga para a grandeza do comprimento, imediatamente, antes da aplicação do incremento de carga. (CHIAVERINI, 2005).

É importante observar a excentricidade da aplicação das cargas nos ensaios de tração, pois, ao colocar o corpo de prova nas garras, ele pode ficar desalinhado, causando uma não uniformidade das tensões. Outro cuidado é a velocidade da aplicação da carga: uma maior rapidez produz aumento da resistência e diminuição da ductilidade.

Os ensaios de tração podem ser realizados com uma parte do próprio material. Para isso retiram-se amostras de barras redondas, quadradas ou retangulares, diretamente da peça que se deseja ensaiar. Mesmo que o ensaio possa ser realizado diretamente em um pedaço do próprio material no qual se busque descobrir algumas características. Porém, é necessário, para efeito de maiores confiabilidade e comparações, um padrão nas amostras ensaiadas, para isso utiliza-se o chamado corpo de prova, na Figura 10 estão apresentadas as dimensões dos corpos de prova utilizados neste estudo.

Figura 10: Corpo de prova seção retangular.



Fonte: Deutsches Institut für Normung, 2001, adaptado pelo Autor.

O corpo de prova tem forma e dimensões especialmente indicadas para o ensaio e obedece a normas específicas. A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) tem o método MB-4 que indica a forma e as dimensões de um corpo de prova, segundo o caso e o material usados no ensaio. A seção transversal desses corpos de prova pode ser circular, quadrada ou retangular. Geralmente, a parte central do corpo de prova possui uma seção transversal menor do que as extremidades, de modo a provocar a ruptura numa seção em que as tensões não são afetadas pelas garras da máquina de ensaio (CHIAVERINI, 2005). A parte útil do corpo de prova pode ter a forma da seção transversal circular ou retangular, conforme as dimensões do produto acabado do qual foi retirado. Os corpos de prova retirados de chapas, lâminas ou placas, mantêm a espessura da secção transversal do material original e a forma retangular.

Figura 11: Ensaio de tração.



Fonte: Autor.

O estudo realizado é de suma importância para entender qual é o comportamento das juntas dissimilares com a presença de *gap's* na soldagem MIG/MAG, um tema inédito tratando-se de materiais dissimilares.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 MATERIAIS

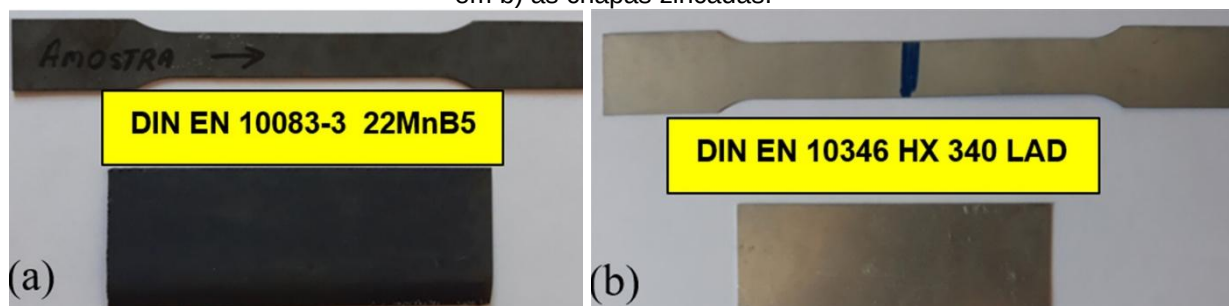
4.1.1 OS MATERIAIS DO ESTUDO

O material dos componentes que é o objeto de estudo é composto por uma junta dissimilar, ou seja, materiais de composição química e características mecânicas diferentes.

O primeiro destes materiais são chapas de aço Aço 22MnB5 DIN EN 10083-3 estampadas a quente pelo processo de *Hot Stamping* com 1,0 mm de espessura o segundo são chapas de aço HX 340 LAD da DIN EN 10346 com 0,8 mm de espessura com tratamento superficial zincado, laminados a frio (DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG, 2006).

A Figura 12 mostra as imagens dos corpos de prova produzidos com as chapas dissimilares; a Figura 12(a) mostra o Aço 22MnB5 DIN EN 10083-3 e na Figura 12(b) o aço HX 340 LAD da DIN EN 10346.

Figura 12: Chapas usadas para a soldagem da junta em a) as chapas de estampagem a quente e, em b) as chapas zincadas.



Fonte: Autor.

Tabela 2: Apresenta as características mecânicas para tais materiais; a tabela 2 (a) da DIN EN 10083-3 22MnB5 estampado a quente, e a Tabela 2(b) propriedades mecânicas do aço HX 340LAD DIN EN10346 laminados a frio.

Tabela 2 (a): da DIN EN 10083-3 22MnB5 estampado a quente.

Aço	Limite de Escoamento (MPa)	Limite de Resistência (MPa)	Alongamento Total (%)
4225+AS DIN EN 10305-3	320 a 620	500 a 700	≥ 14

Fonte: Deutsches Institut für Normung (2006), adaptado pelo autor.

Tabela 2 (b): propriedades mecânicas do aço HX 340LAD DIN EN10346 laminados a frio.

Aço	Limite de Escoamento (MPa)	Limite de Resistência (MPa)	Alongamento Total (%)
HX 340 LAD DIN EN 10346	340 a 420	410 a 510	≥ 24

Fonte: Deutsches Institut für Normung (2015), adaptado pelo autor

Tabela 3, apresenta a composição química expressa em porcentagem de massa prevista pelas normas vigentes, na Tabela 3 (a) é a composição segundo a DIN EN 10083-3 22MnB5 e a na Tabela 3(b) é a composição segundo a DIN EN 10346 para a liga HX 340 LAD (DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG, 2006).

Tabela 3 (a): Composição química de acordo com a DIN EN 10083-3 22MnB5.

C	Si	Mn	Cr	Mo	P	S	Ti	Al	B	Cu
0,20 à 0,25	≤ 0,50	1,10 à 1,50	≤ 0,35	≤ 0,35	≤ 0,025	≤ 0,0050	0,020 à 0,050	0,020 à 0,060	0,0020 à 0,0050	≤ 0,20

Fonte: Deutsches Institut für Normung (2006), adaptado pelo autor.

Tabela 3 (b): Aço DIN EN 103 46 HX 340 LAD, com tratamento superficial zincado.

C	Si	Mn	Mo	P	S	Ti	Al
Máx 0,12	Máx 0,50	Máx 1,40	Máx --	Máx 0,030	Máx 0,025	Máx 0,15	Máx ≥0,015

Fonte: Deutsches Institut für Normung (2015), adaptado pelo autor.

4.1.2 CARACTERIZAÇÕES DO METAL DE BASE

Para a garantia de um processo eficiente é necessário que as características químicas e físicas sejam conhecidas, para tanto, os materiais envolvidos no processo são submetidos aos ensaios que possibilitem analisar estas características.

O equipamento de espectrometria de emissão ótica Spectromaxx (OES) Figura 13 é usada para a determinação da composição química em amostras metálicas, utilizando a excitação de arco e de centelha. Este processo é amplamente utilizado nas indústrias de fabricação de metais e manufatura. Ela determina todos os elementos utilizados na indústria, incluindo análise de carbono, fósforo e enxofre.

Figura 13: SPECTROMAXx, equipamento utilizado para a verificação da composição química.



Fonte: Autor.

O maior benefício é o curto tempo de análise e o sistema é extremamente eficaz no controle de processamentos de ligas.

Esta análise pode ser aplicada em muitas etapas do ciclo de produção, onde a composição química do material metálico seja determinante das propriedades e respostas da vida em serviço; tais como na inspeção de entrada de materiais, no processamento de metais, no controle de qualidade de produtos semiacabados e acabados e em muitas outras aplicações.

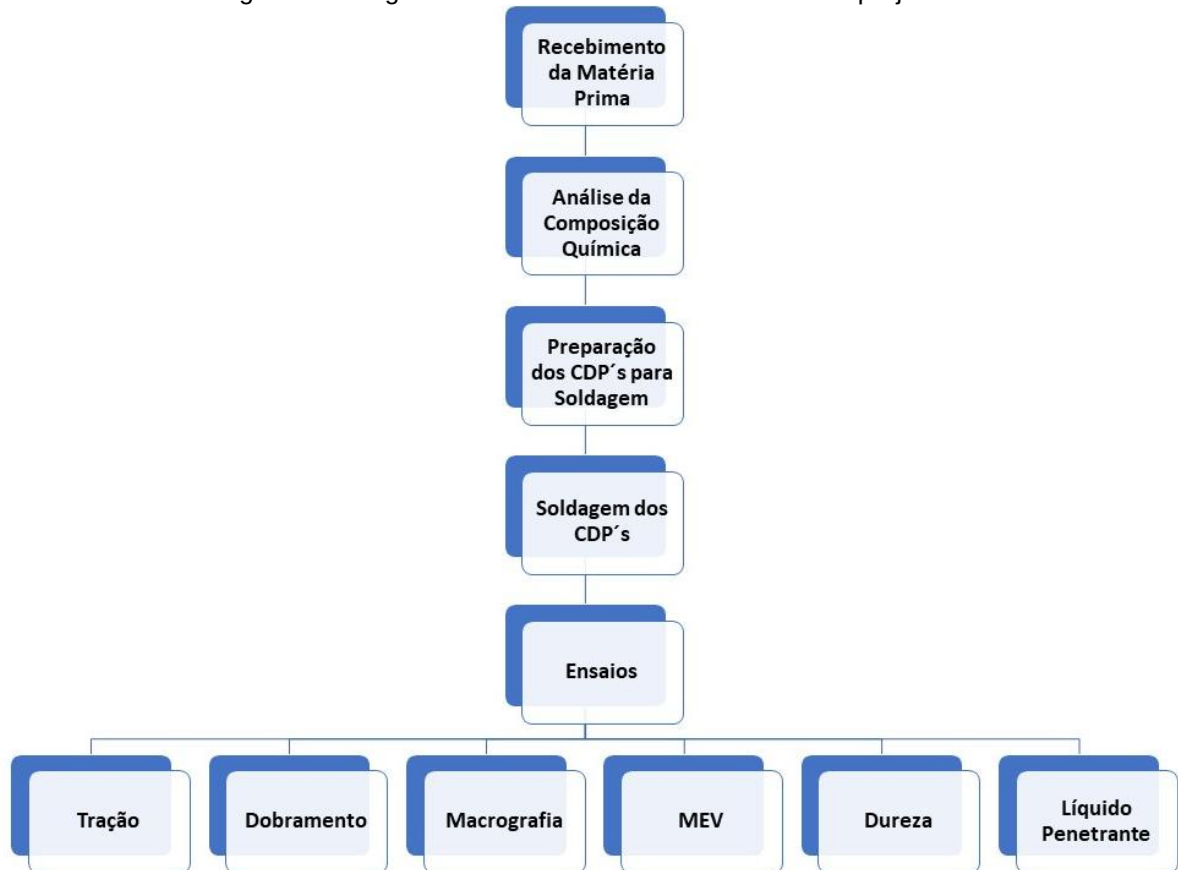
4.1.3 CARACTERIZAÇÃO DO CONSUMÍVEL DE SOLDAGEM

Utilizou-se uma mistura de 88% de Argônio e 12% de CO₂ a uma vazão de 20 L.min⁻¹, sendo o fornecedor a empresa AGA.

4.2 MÉTODOS

Os métodos para a realização das análises seguiram um padrão que foi representado no diagrama de blocos mostrado na Figura 14.

Figura 14: Diagrama de bloco de desenvolvimento do projeto

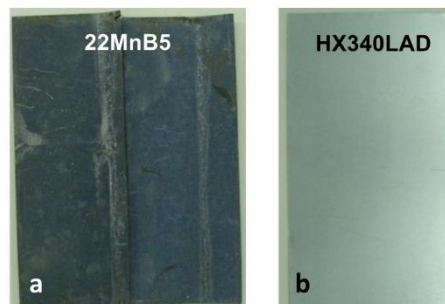


Fonte: Autor.

4.2.1 RECEBIMENTO DA MATÉRIA PRIMA

A matéria prima é recebida em chapas onde é retirado amostras para serem analisadas a composição química. Na figura 15(a) mostra uma amostra da chapa estampada a quente 22MnB5 e na figura 15(b) uma amostra da chapa zincada

Figura 15: Amostra para certificação da composição química.



Fonte: Autor.

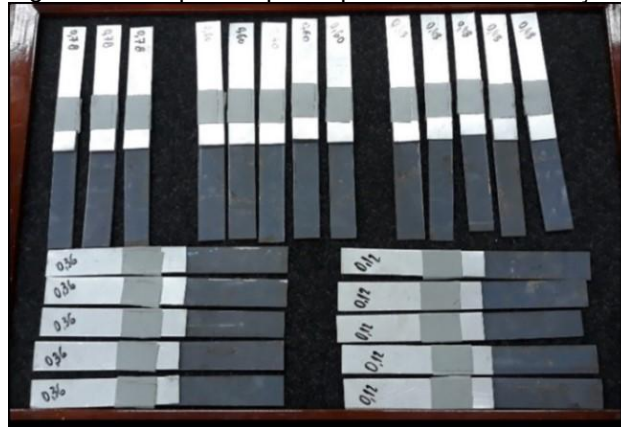
4.2.2 ANÁLISE DA COMPOSIÇÃO QUÍMICA

A composição química foi realizada usando o espectrômetro de emissão ótica da marca Espectromaxx, usando o gás argônio puro como gás de arraste.

4.2.3 PREPARAÇÃO DO CORPO DE PROVA PARA SOLDAGEM

Para a confecção dos corpos de prova foi usado serra para corte das chapas, lixadeira de bancada com lixa de grão 80 e espaçadores metálicos de calibre do folga com espessura de 0,06 mm.

Figura 16: Corpos de prova para o ensaio de tração.

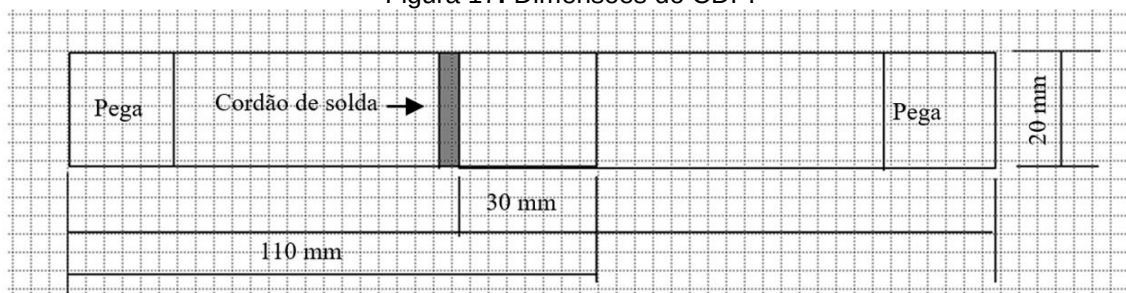


Fonte: Autor.

4.2.4 CONFECÇÃO DOS CORPOS DE PROVAS

Os CDP's foram confeccionados de acordo com a norma DIN EN 10002-1/2001. As dimensões para confecção dos mesmos estão apresentadas na Figura 17 (DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG, 2001).

Figura 17: Dimensões do CDP.



Fonte: Autor.

4.2.5 SOLDAGEM DOS CDP'S

Para a confecção dos corpos de prova foi usada uma corrente de soldagem constante de 128,0 A, uma velocidade de soldagem constante de $7,6 \text{ m.min}^{-1}$ e uma tensão de soldagem constante de 19,1 V.

O Robô usado para execução da Soldagem foi o KUKA modelo VKRC4 com seis eixos com uma garantia de repetitividade de 0,06 mm.

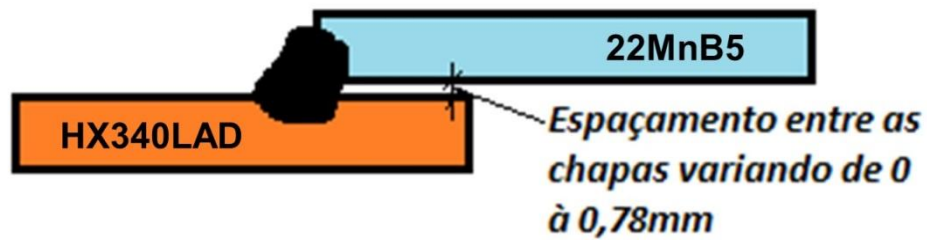
A soldagem foi realizada em um centro tecnológico alocado na indústria automobilística e foram utilizados os mesmos parâmetros de soldagem que se aplica no processo produtivo, tais como, os mesmos consumíveis, equipamentos e parâmetros de soldagem.

Soldaram-se juntas sobrepostas com penetração parcial ao longo do cordão, realizou-se apenas um passe.

Os corpos de provas, submetidos ao ensaio de tração, entre os corpos de provas forma colocadas lâminas de espessura de 0,06 mm. No total foram ensaiados 150 corpos de provas divididos em blocos que se diferenciavam pela quantidade de calibres de folga a fim de atingir espaçamento com espessura entre 0,00/ 0,12/ 0,36/ 0,48/ 0,56 e 0,78 mm. Para o ensaio de tração foram enviados 25 corpos de prova de cada lote.

A Figura 18 mostra esquematicamente a junta soldada das chapas dissimilares com os espaçadores.

Figura 18: Esquema da junta soldada



Fonte: Autor

A Figura 19(a) mostra o equipamento e soldagem utilizada para a confecção dos corpos de prova marca Fronius, CMT ADVANCED; e a Figura 19(b) KUKA VKRC4 com seis eixos com uma garantia de repetitividade de máximo 0,06 mm.

Figura 19: Equipamento de soldagem Fronius (a), e em (b) o Robô usado para soldagem dos corpos de prova.



Fonte: Autor.

4.2.6 ENSAIOS

O ensaio de tração e dobramento foram realizados na máquina de ensaios universal marca EMIC, DL 1000 com capacidade de 10 kN, com velocidade constante de deformação de 10mm/min.

As macrografias dos cordões de solda foram realizadas após a soldagem.

Para avaliar a integridade das amostras após o ensaio de dobramento, realizou-se o ensaio por líquido penetrante usando o revelador aquoso da marca Metal Chek.

Realizou-se um corte transversal ao cordão de solda para a realização dos ensaios por microscopia eletrônica de Varredura. As amostras foram preparadas para o embutimento por lixamento com lixa grão 80, embutidas em baquelite com auxílio de uma embutidora Arotec, modelo PRE 40.

As amostras embutidas foram lixadas e polidas para estarem isentas de riscos e deformidades para o ensaio. Utilizou-se a sequência de lixas 300, 600 e 1200 Mesh. Após o lixamento as amostras foram polidas com abrasivo de Al_2O_3 com granulometria 0,3 μm em politriz Arotec, modelo Aropol E.

O ataque químico foi realizado conforme a norma E407-07 (2011) solução nº 148, Nital 5%. A superfície atacada foi avaliada em estereomicroscópio Olympus SZX7.

As amostras preparadas foram analisadas por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), em um microscópio marca ZEISS, modelo EVO MA 10 para a averiguação zona termicamente afetada.

O ensaio de dureza foi realizado nas amostras embutidas usando o durômetro Enco Test da empresa Enco, modelo M4 C025 G3 e foi usada a escala de dureza Vickers com carga de 10 Kg.

4.3 CRITÉRIOS DE APROVAÇÃO

As amostras devem suportar a força mínima para o ensaio de tração, nesse caso a norma determina 70% da resistência mecânica da chapa de menor espessura, tendo a norma para a aceitação do critério sendo preservada por se tratar de sigilo industrial.

A chapa de menor espessura é a laminada a frio, que tem uma resistência mecânica de 340 a 420 MPa.

No ensaio de dobramento não pode haver a existência de trincas ou ruptura das amostras, assim como no ensaio por microscopia por varredura.

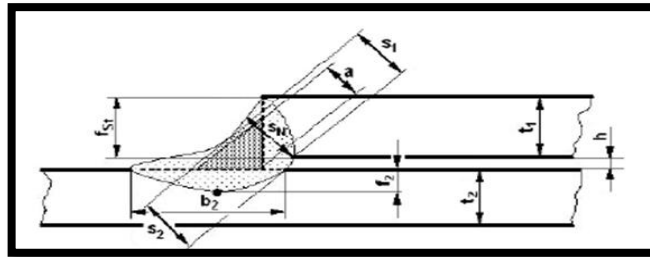
Para o ensaio macrográfico segue o padrão de aceitação mostrado na Figura 20.

Critério de aceitação:

$a \leq 0,7.t \text{ mín}$, $S1 = \geq 0,7.t \text{ mín}$, $SN = \geq S1$ e $\geq 0,7.t \text{ mín}$, $f1 = \geq 0,2 \text{ mm}$, $f2 = \geq 0,2 \text{ mm}$ com $t2 \leq 1,0 \text{ mm}$, $fst = 100\%$ e $b2 = \geq t2$.

No processo de soldagem não pode ser admitir as seguintes falhas mostradas na figura 21.

Figura 20: Desenho esquemático da junta soldada.



Legenda: a = Espessura aritmética do cordão, s_1 =espessura do cordão da chapa 1, s_n = Menor espessura comum do cordão, f_2 = penetração lateral na chapa t_2 , f_{st} = superfície frontal, b_2 = largura da penetração da chapa 2, $t_{1,2}$ = espessura de chapa e h = dimensão do (GAP).

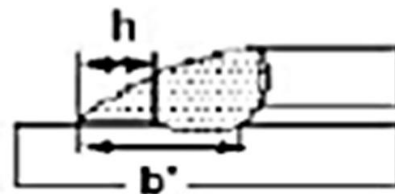
Fonte: Deutsches Institut für Normung (2014), adaptada pelo autor.

Figura 21: Falhas na soldagem



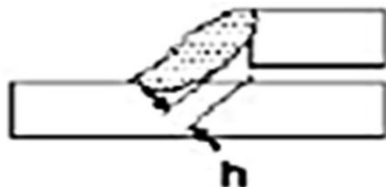
Falha na ligação lateral

(a)



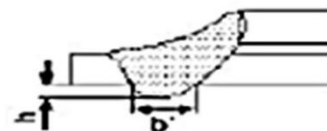
Desvio do Consumível

(b)



Penetração insuficiente da soldadura

(c)



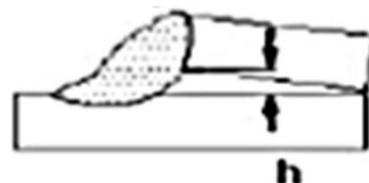
Convexidade da raiz
Passagem pela raiz

(d)



Mordedura

(e)



Dimensão da fissura

(f)

Fonte: Deutsches Institut für Normung (2014), adaptada pelo autor

As possíveis falhas no processo de soldagem são apresentadas na figura 21, sendo que na figura 21(a) apresenta a falha na ligação da raiz, ou seja, falta material fundido em um determinado local do cordão de solda situado na raiz da solda, na figura 21(b) apresenta falha no desvio de consumível, falha provável devido ao levantamento da tocha no momento da soldagem, na figura 21(c) apresenta a penetração insuficiente, causada devido à amperagem de soldagem estar baixa, na figura 21(d) apresenta a convexidade na raiz, causado devido o aporte térmico estar muito elevado, na figura 21(e) apresenta a falha de mordedura, causada devido à velocidade de soldagem e corrente de soldagem muito elevada e, na figura 21(f) apresenta o desalinhamento, causado devido à falha na preparação da junta soldada.

4.4 ANÁLISE ESTATÍSTICA DAS AMOSTRAS DO ENSAIO DE TRAÇÃO

Para a execução do ensaio de tração, foram elaborados um total de 25 corpos de provas para cada bloco de espessuras variando de 0 à 0,78mm. Para execução da análise estatística dos resultados obtidos, foi usado o software MINITAB, foram obtidas as curvas Gaussianas para cada bloco de ensaio sendo que um bloco de ensaio é composto por 25 corpos de provas.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 CARACTERÍSTICAS DAS CHAPAS ENSAIADAS (METAL DE BASE)

As chapas ensaiadas possuem especificações definidas de acordo com norma DIN EN 10346 2015, para a chapa com proteção superficial de zinco as características de composição química estão sendo ilustrada na tabela 4, tendo como especificação a norma.

Tabela 4: Composição química especificada da chapa zincada.

<i>C</i>	<i>Si</i>	<i>Mn</i>	<i>P</i>	<i>S</i>	<i>Ti</i>	<i>Al</i>
Máx 0,12	Máx 0,50	Máx 1,40	Máx 0,030	Máx 0,025	Máx 0,15	Máx ≥0,015

Fonte: Deutsches Institut für Normung (2015), adaptado pelo Autor.

No ensaio realizado com o Espectrômetro ótico encontrou-se para a chapa com proteção superficial de zinco os seguintes componentes químicos, ilustrados na Tabela 5.

Tabela 5: Resultado do ensaio de composição química realizado na chapa zincada.

<i>C</i>	<i>Si</i>	<i>Mn</i>	<i>P</i>	<i>S</i>	<i>Ti</i>	<i>Al</i>
0,021	0,002	0,077	0,001	0,001	0,035	0,018

Fonte: Autor.

Observa-se nos resultados apresentados na Tabela 5 que as chapas zincadas recebidas para a realização dos ensaios estão dentro das especificações previstas em norma, o que garante que o comportamento mecânico das chapas deverá resultar conforme o esperado e previsto em norma.

Para a chapa com proteção superficial de alumínio e silício, estampadas a quente pelo processo de *hot stamping*, as características de composição química estão sendo ilustrada na tabela 6, tendo como especificação a DIN EN 10083-3 22MnB5 (DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG, 2006).

Tabela 6: Composição química de acordo com a DIN EN 10083-3 22MnB5

<i>C</i>	<i>Si</i>	<i>Mn</i>	<i>Cr</i>	<i>Mo</i>	<i>P</i>	<i>S</i>	<i>Ti</i>	<i>Al</i>	<i>B</i>	<i>Cu</i>
0,20 à 0,25	≤ 0,50	1,10 à 1,50	≤ 0,35	≤ 0,35	≤ 0,025	≤ 0,0050	0,020 à 0,050	0,020 à 0,060	0,0020 à 0,0050	≤ 0,20

Fonte: Deutsches Institut für Normung (2006), adaptado pelo Autor.

No ensaio realizado com o Spectrômetro ótico encontrou-se para a chapa com proteção superficial de alumínio e silício os seguintes componentes químicos, ilustrados na Tabela 7.

Tabela 7: Resultado do ensaio de composição química realizado na DIN EN 10083-3 22MnB5 com sobremetal de alumínio e silício.

<i>C</i>	<i>Si</i>	<i>Mn</i>	<i>Cr</i>	<i>Mo</i>	<i>P</i>	<i>S</i>	<i>Ti</i>	<i>Al</i>	<i>B</i>	<i>Cu</i>
0,196	0,286	1,39	0,211	0,002	0,0043	0,001	0,037	0,058	0,0021	0,013

Fonte: Autor.

Nos resultados apresentados na Tabela 7 pode-se observar que a composição de carbono encontra-se ligeiramente abaixo da prevista em norma, porém devido ao pequeno desvio espera-se que esta variação não influencie na resistência mecânica final da chapa, pois pequenas variações como as apresentadas podem ser relacionadas a problemas de homogeneidade dos elementos de liga constantes no material. Os demais elementos de liga presentes encontra-se em consonância com a referida norma, o que indica que o comportamento previsto na mesma pode ser esperado nos ensaios mecânicos.

5.2 CARACTERÍSTICAS DO ARAME DE SOLDA

O arame de solda usado (consumível de soldagem) possuem as especificações definidas de acordo com norma AWS ER70S-6 este arame é o mais indicado para este tipo de junta (ESAB, 2018).

A composição química especificada para este consumível é determinada pela AWS ER70S-6, estando sendo ilustrados os valores de composição química na Tabela 8.

Tabela 8: Composição química do arame de solda de acordo com a AWS A5.18 – 2010 ER70S6.

C	Si	Mn	P	S	Cu
0,06 a 0,15	0,80 a 1,15	1,40 a 1,85	Máx. 0,025	Máx. 0,035	Máx. 050

Fonte: Autor

No ensaio realizado com o Espectrômetro ótico encontrou-se para arame de solda os seguintes componentes químicos, ilustrados na Tabela 9.

Tabela 9: Composição química encontrada do arame de solda.

C	Si	Mn	P	S	Cu
0,06	0,92	1,49	0,0043	0,001	0,013

Fonte: O autor

Nos resultados apresentados na Tabela 9 notou-se que os valores encontrados para o arame de solda estão tendendo para os valores nominais, atendendo plenamente as especificações da norma AWS A5.18 – 2010 ER70S6.

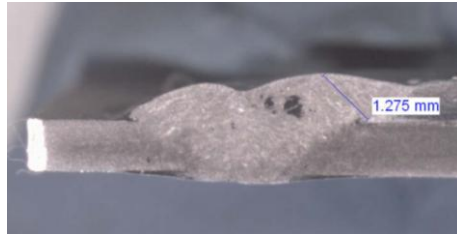
5.3 ENSAIO MACROGRÁFICO DOS CORDÕES DE SOLDA

A soldagem realizada nos corpos de provas segue prescrições da norma DIN EN ISO 5817, os corpos de provas devem ser cortados transversalmente ao cordão de solda sendo que os valores encontrados na macrografia segue apresentado na Tabela 10 (DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG, 2014a).

Todos os corpos de provas submetidos ao ensaio de macrografia atendem as especificações da norma DIN EN ISO 5817, atentando aos valores de *gap* que estão maiores devido ao tema proposto da dissertação (DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG, 2014a) .

Tabela 10: Resultados do ensaio de macrografia.

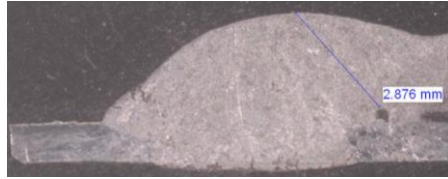
Nº AMOSTRA	FOTO MACRO (8x)	MEDIDA ENCONTRADA	ESPECIFICADO
01		f1 Caldeamento 100%	f1 ≥ 0,2 mm
		f2 0,389	f2 ≥ 0,2 mm
		Tamanho do cordão 20mm	Informativo



Sn1	1,890	Sn 1 ≥ 1,05
Gap	0	h ≤ 0,28 mm

Nº AMOSTRA	FOTO MACRO (8x)	MEDIDA ENCONTRADA	ESPECIFICADO
------------	-----------------	-------------------	--------------

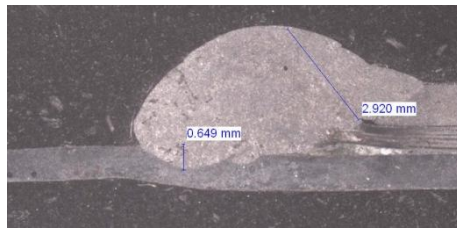
02



f1	Caldeamento 100%	f1 ≥ 0,2 mm
f2	Caldeamento 100%	f2 ≥ 0,2 mm
Tamanho do cordão	20mm	Informativo
Sn1	2,876	Sn 1 ≥ 1,05
Gap	0,12	h ≤ 0,28 mm

Nº AMOSTRA	FOTO MACRO (8x)	MEDIDA ENCONTRADA	ESPECIFICADO
------------	-----------------	-------------------	--------------

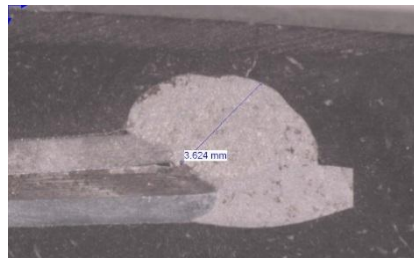
03



f1	Caldeamento 100%	f1 ≥ 0,2 mm
f2	0,649	f2 ≥ 0,2 mm
Tamanho do cordão	20mm	Informativo
Sn1	2,920	Sn 1 ≥ 1,05
Gap	0,36	h ≤ 0,28 mm

Nº AMOSTRA	FOTO MACRO (8x)	MEDIDA ENCONTRADA	ESPECIFICADO
------------	-----------------	-------------------	--------------

04

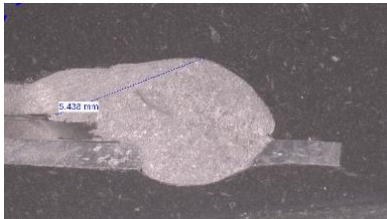
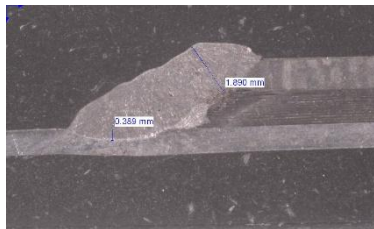


f1	Caldeamento 100%	f1 ≥ 0,2 mm
f2	0,649	f2 ≥ 0,2 mm
Tamanho do cordão	20mm	Informativo
Sn1	3,624	Sn 1 ≥ 1,05
Gap	0,48	h ≤ 0,28 mm

Nº AMOSTRA	FOTO MACRO (8x)	MEDIDA ENCONTRADA	ESPECIFICADO
------------	-----------------	-------------------	--------------

05

f1	Caldeamento 100%	f1 ≥ 0,2 mm
f2	Caldeamento 100%	f2 ≥ 0,2 mm

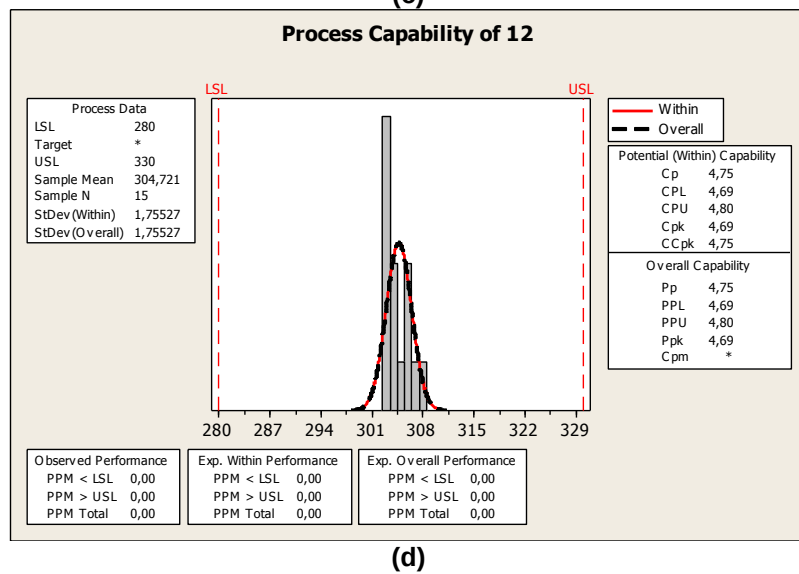
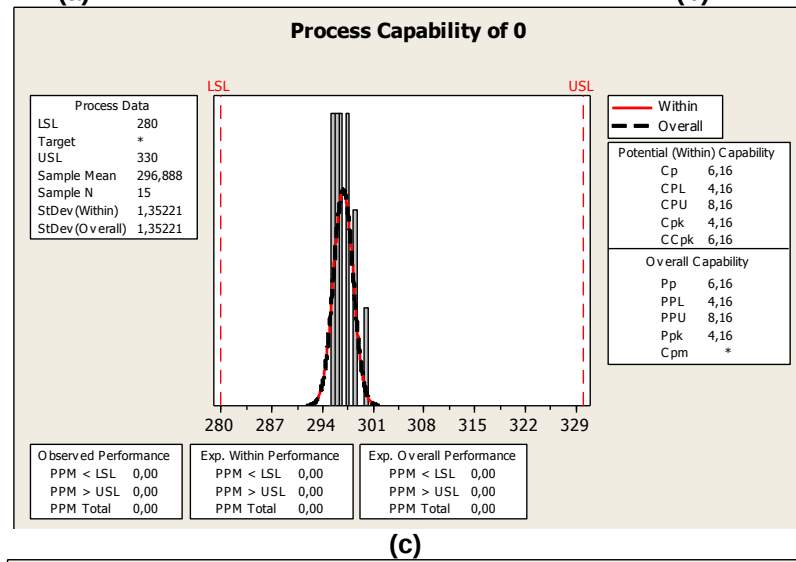
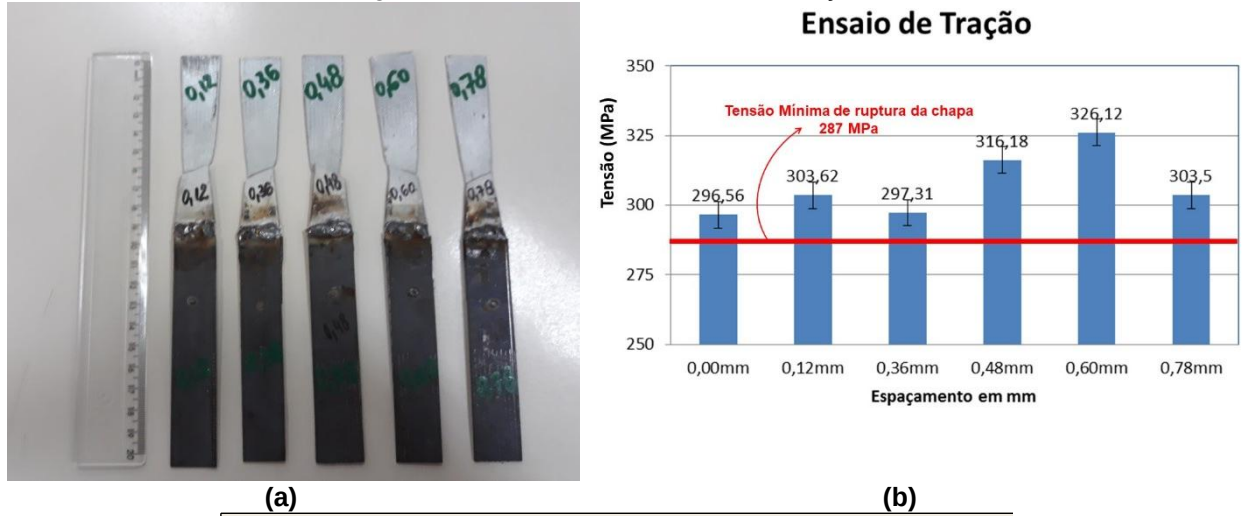
		Tamanho do cordão	20mm	Informativo
		Sn1	5,438	Sn 1 ≥ 1,05
		Gap	0,60	h ≤ 0,28 mm
Nº AMOSTRA	FOTO MACRO (8x)	MEDIDA ENCONTRADA		ESPECIFICADO
06		f1	Caldeamento 100%	f1 ≥ 0,2 mm
		f2	0,389	f2 ≥ 0,2 mm
		Tamanho do cordão	20mm	Informativo
		Sn1	1,890	Sn 1 ≥ 1,05
		Gap	0,78	h ≤ 0,28 mm
Fonte: Autor				

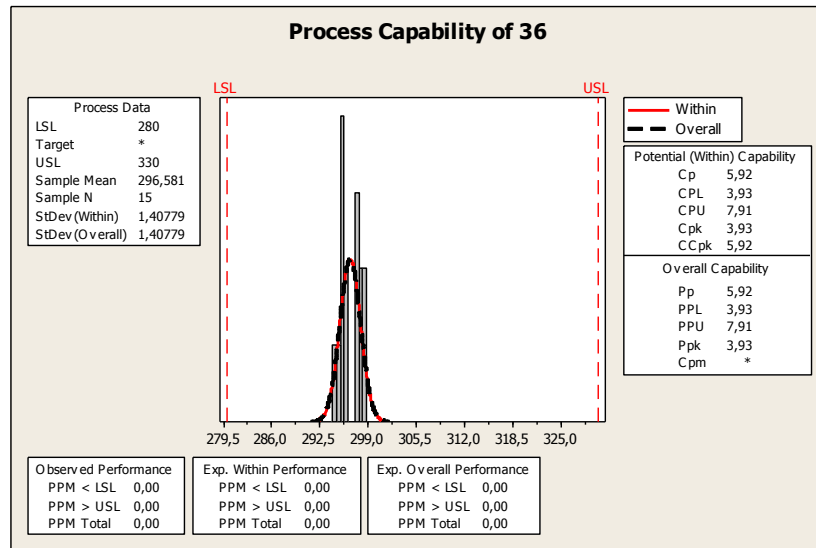
5.4 ENSAIO DE TRAÇÃO

Os corpos de provas ensaiados em tração estão apresentados na Figura 22 (a) observa-se a posição com a qual as amostras foram ensaiadas, e que em todos os casos a fratura ocorreu na parte superior do cordão de solda, sendo esta localizada na chapa zincada. Isto indica que a resistência na região da junta soldada não foi prejudicada pela presença do espaçamento entre as chapas dissimilares.

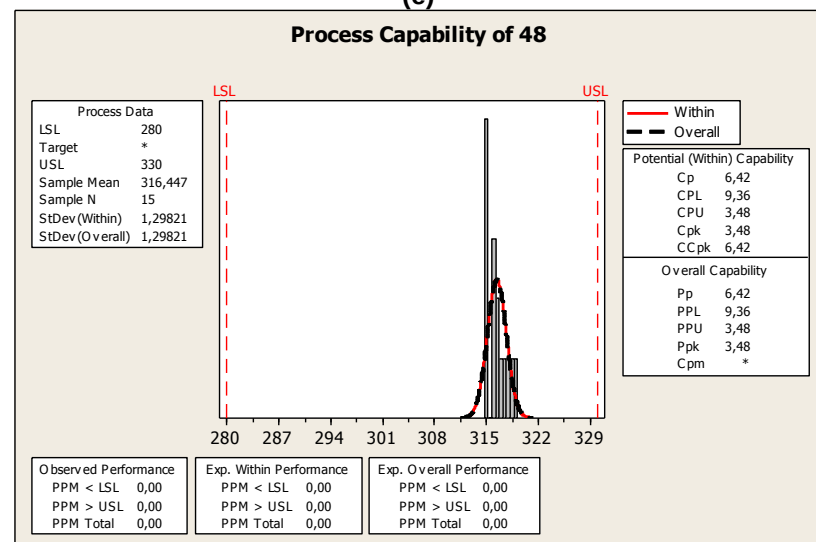
O rompimento na chapa HX 340LAD (DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG, 2015) laminadas a frio é coerente visto que segundo o previsto em norma seu limite de resistência deve estar em valores entre 410 a 510 MPa, enquanto que a chapa 22MnB5 (DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG, 2006), segundo a norma, apresenta limite de resistência entre 500 e 700 MPa.

Figura 22: Resultados do Ensaio de Tração.

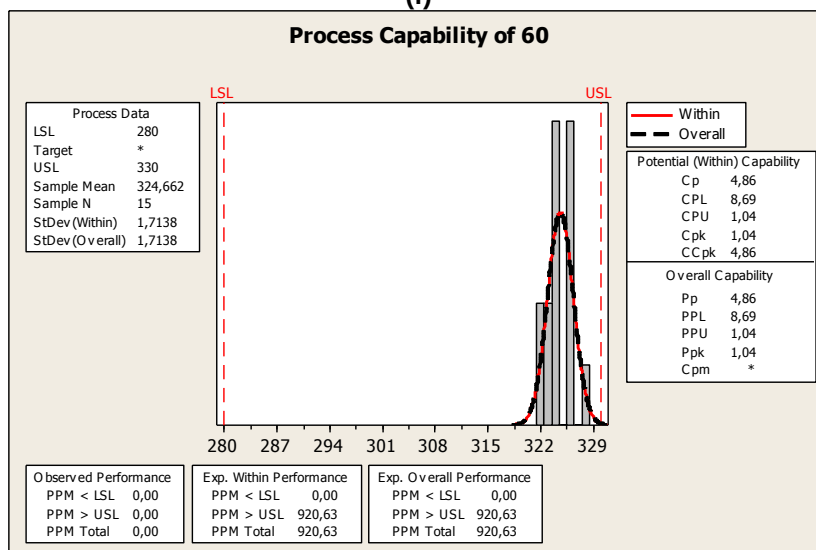




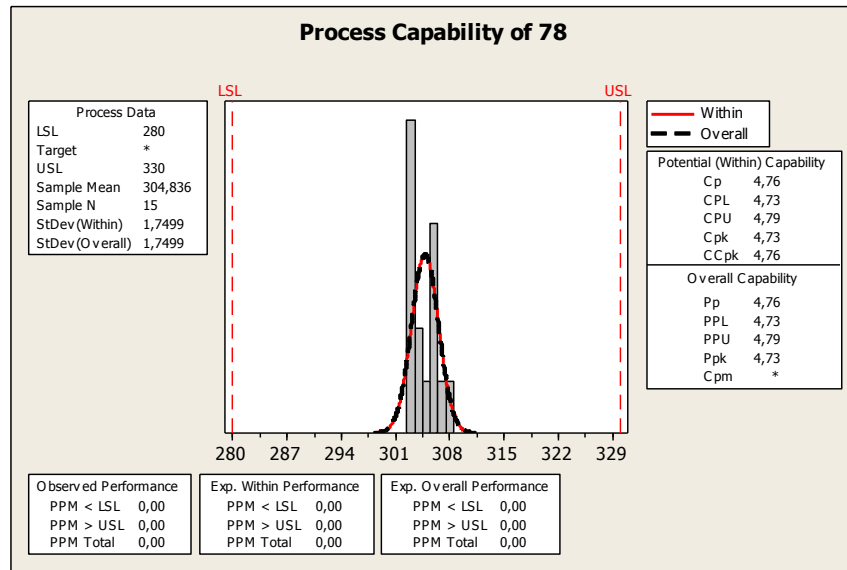
(e)



(f)



(g)



(h)

Fonte: O autor

A tensão mínima de ruptura considerada para a indústria automobilística como conformidade é de 287 MPa, deste modo, como pode ser observado na Figura 22(b) que independente do espaçamento imposto entre as juntas dissimilares sobrepostas a resistência é superior à mínima especificada pela indústria. Na Figura 22 (c), (d), (e), (f), (g) e (h) apresenta-se os valores estatísticos das coletas realizadas no ensaio de tração, levantou-se as curvas Gaussianas para cada bloco analisado.

As amostras com 0,12 mm de espaçamento, Figura 22 (d), e com 0,78 mm de espaçamento apresentado na Figura 22 (h) estão tendendo para a nominal entre 301 a 308 MPa, sendo que, o limite de controle superior é de 329 MPa e o limite de controle inferior é de 287 MPa.

As amostras sem espaçamento, Figura 22 (c) e as amostras do com 0,36 mm de espaçamento representada pelo Figura 27(e) estão 2,3 % abaixo da nominal.

As amostras com 0,48 mm de espaçamento, Figura 22 (f) apresentam valores 2,8% maiores que a nominal e as amostras com 0,60 mm de espaçamento Figura 22(g) estão 6,8% acima da nominal.

5.5 ENSAIO DE DUREZA

Foi realizada a verificação da dureza no ponto de solda, e também na zona afetada termicamente em corpos de provas, com todos os espaçamentos estudados. A Figura 23 mostra os corpos de prova preparados para o ensaio de dureza Vickers.

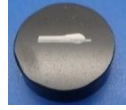
Figura 23: Corpos de provas, embutidos na baquelite, para verificação da dureza.



Fonte: Autor.

Os resultados do ensaio de dureza estão apresentados na Tabela 11.

Tabela 11: Resultados do ensaio de dureza Vickers

CORPO DE PROVA	Espaçamento (mm)	DUREZA NA SOLDA (HV10)	DUREZA NA Z.T.A. (HV10)	Dureza na Chapa Hot Stamping (HV10)	Dureza na chapa Zincada (HV10)
	0,00	206	265	295	150
	0,12	194	279	292	154
	0,36	215	289	298	153
	0,48	197	253	290	148
	0,60	187	270	293	152
	0,78	206	283	297	150

Fonte: Autor.

Os valores encontrados no ensaio de dureza demonstram que mesmo com o aumento do *gap entre as chapas* não ocorre o aumento ou a diminuição da dureza nos pontos de medição, os valores encontrados de dureza estão de acordo com a DIN EN 1043-1 e DIN EN 1043-2: 2014 que especifica que valores de dureza até 380 HV não são considerados críticos (DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG, 2014b; 2014c). Os valores encontrados nas chapas de *Hot Stamping* e também nas chapas zincadas são valores de dureza já esperados se comparar com a resistência mecânica da chapa, valores por conversão também são encontrados na DIN EN ISO 18265:2014 (DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG, 2014d).

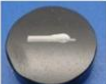
5.6 ENSAIO POR MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)

Foi realizado o ensaio de MEV na zona termicamente afetada, o intuito do ensaio é verificar se existem trincas ou micro-trincas existentes na região de solda.

Os corpos de provas que foram analisados por MEV já haviam sido submetidos ao ensaio de tração, o intuito era verificar a integridade microestrutural do material após ter sofrido um esforço trativo.

A Tabela 12 apresenta a nomenclatura utilizada para identificar os lotes de corpos de prova produzidos com seus respectivos espaçamentos estudados.

Tabela 12: Imagem de identificação das amostras para a realização dos ensaios por MEV

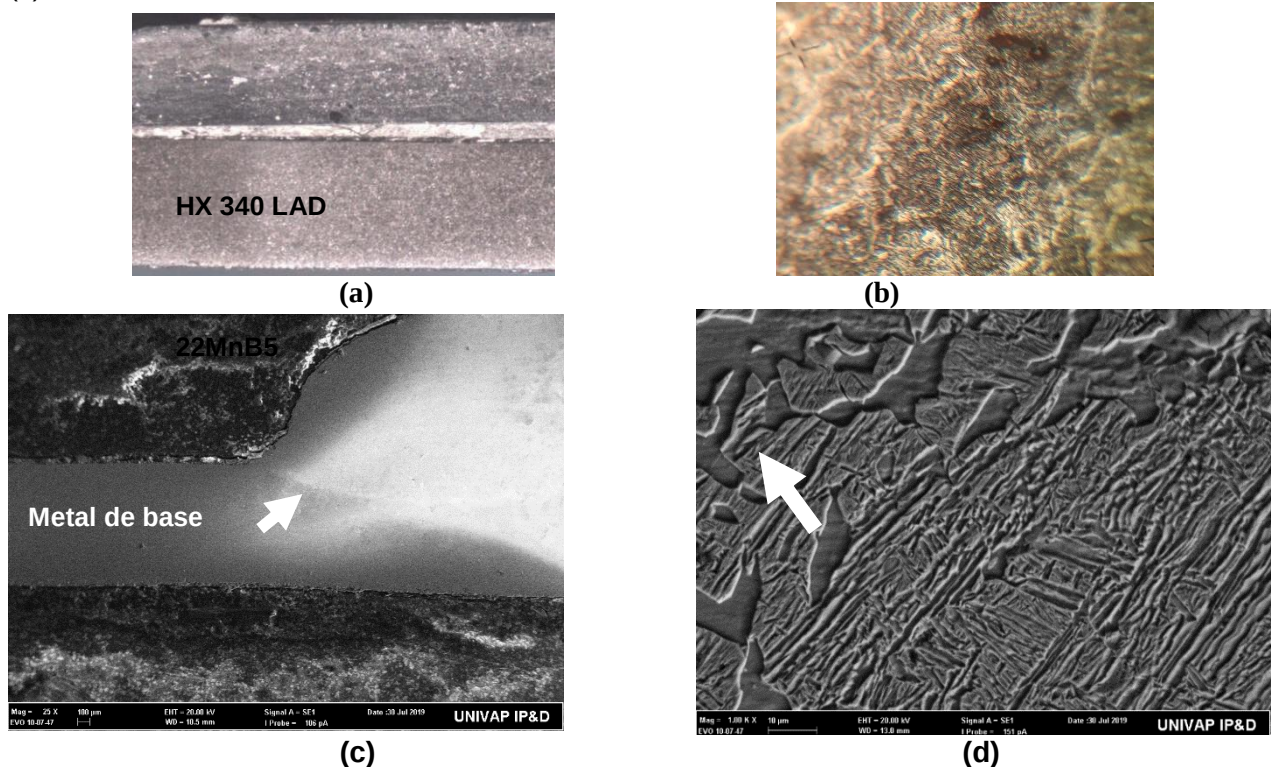
<i>Número da Amostra</i>	<i>Imagem da Amostra</i>
Amostra 01: com 0,00mm de espaçamento	
Amostra 02: com 0,12mm de espaçamento	
Amostra 03: com 0,36mm de espaçamento	
Amostra 04: com 0,48mm de espaçamento	
Amostra 05: com 0,60mm de espaçamento	
Amostra 06: com 0,78mm de espaçamento	

Fonte: Autor.

As amostras avaliadas por MEV, após processo de preparo metalográfico, foram atacadas com solução 148 – NITAL 5% para a revelação dos grãos, microestrutura e imperfeições das amostras o que permitiu a análise superficial das regiões observadas (ASTM E-407, 2011).

Na Figura 24, apresenta-se a superfície de corte transversal da região de solda das chapas de materiais dissimilares sem *gap*. Na Figura 24(a) mostra-se o a ausência do espaçamento, na Figura 24(b) observa-se em detalhe a zona termicamente afetada e, na Figura 24(c) observa-se a estrutura martensítica da chapa de material 22MnB5.

Figura 24: Imagens obtidas por MEV e MO da ZTA. (a) o metal de solda e o metal de base, (b) microscopia óptica aumento de 200x região 22MnB5 (c) vista transversal em detalhe da amostra 01 mostrando a região de transição do metal de solda com o metal de base com espaçamento de 0,00 mm, (d) estrutura martensítica.



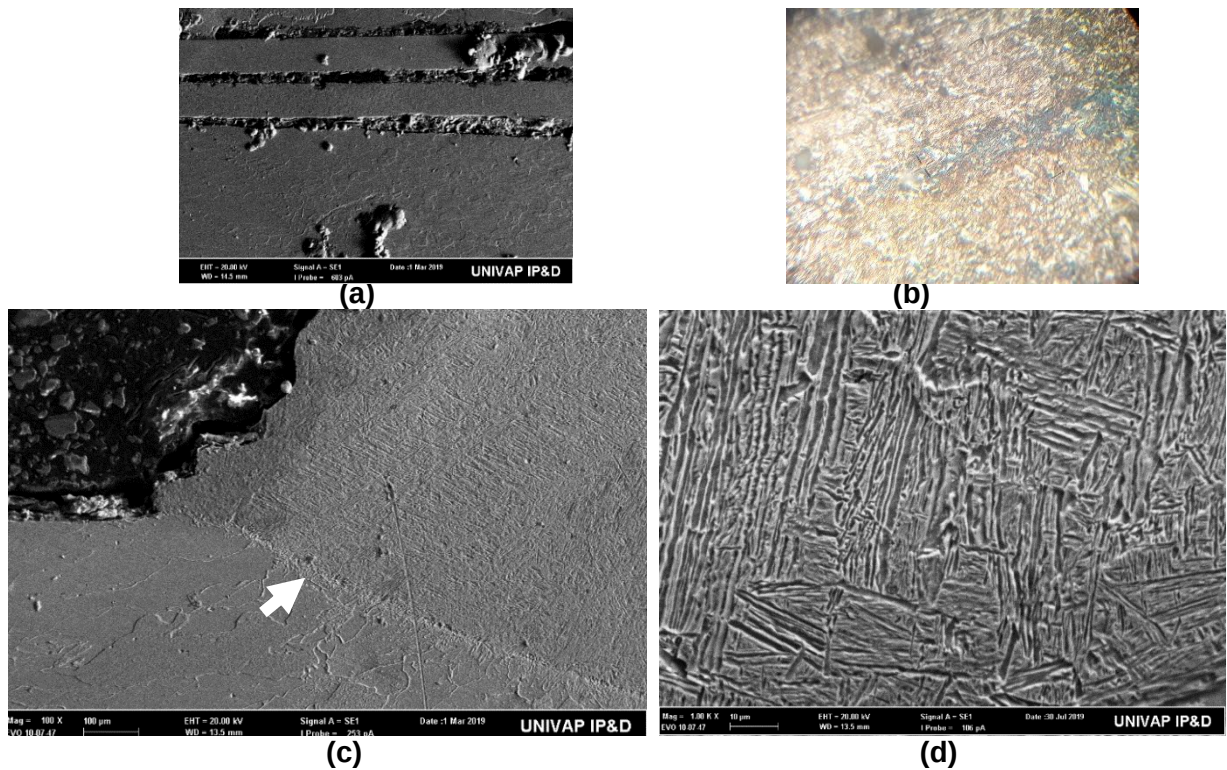
Fonte: Autor

A utilização dos espaçadores não se fez necessário neste grupo de amostras visto que este é o grupo controle, onde a soldagem foi realizada sem espaçamento entre as chapas dissimilares sobrepostas. Na figura 24(b) está apresentado a micrografia óptica da região da ZTA no metal de base 22MnB5 com aumento de 200X. Na região marcada pela seta na Figura 24(c) está indicando a região de transição entre o metal de solda e o metal base (HX340 LAD) assim como se percebe que a textura da chapa zincada manteve-se inalterada com pouco crescimento dos grãos na ZTA. Na Figura 24(d) observa-se um comportamento semelhante, visto que a estrutura martensítica manteve-se inalterado na ZTA o que indica que o aporte térmico não foi suficiente para desestabilizar a martensita nesta região. Porém, observa-se que na região marcada pela seta, apresenta a estrutura de martensita grosseira, o que indica que houve um superaquecimento proveniente do aporte térmico gerado pela soldagem.

Na Figura 25, apresenta-se a superfície de corte transversal da região de solda das chapas de materiais dissimilares com gap de 0,12 mm. Na Figura 25(a) mostra-se o espaçamento para garantir o gap de 0,12 mm, na Figura 25(b) está

apresentado a micrografia da região da ZTA no metal de base 22MnB5 com aumento de 200X. Na Figura 25(c) observa-se em detalhe a zona termicamente afetada e, na Figura 25(d) observa-se a estrutura martensítica da chapa de material estampada a quente.

Figura 25: Imagens obtidas por MEV e MO da ZTA. (a) o metal de solda e o metal de, (b) microscopia óptica aumento de 200x região 22MnB5 (c) vista transversal em detalhe da amostra 02 mostrando a região de transição do metal de solda com o metal de base com espaçamento de 0,12 mm, (d) estrutura martensítica.

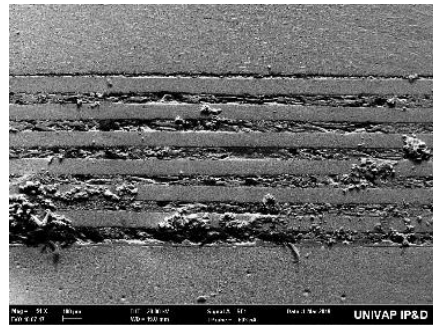


Fonte: Autor.

Na figura 26, apresenta-se a superfície de corte transversal da região de solda das chapas de materiais dissimilares com *gap* de 0,36 mm. Na Figura 26(a) mostra-se o espaçamento para garantir o *gap* de 0,12 mm, na Figura 26(b) está apresentado a micrografia da região da ZTA no metal de base 22MnB5 com aumento de 200X. Na Figura 26(c) observa-se em detalhe a zona termicamente afetada e, na Figura 26(d) observa-se a estrutura martensítica da chapa de material 22MnB5.

Figura 26: Imagens obtidas por MEV e MO da ZTA. (a) o metal de solda e o metal de, (b) microscopia óptica aumento de 200x região 22MnB5 (c) vista transversal em detalhe da amostra 03 mostrando a

região de transição do metal de solda com o metal de base com espaçamento de 0,36 mm, (d) estrutura martensítica.



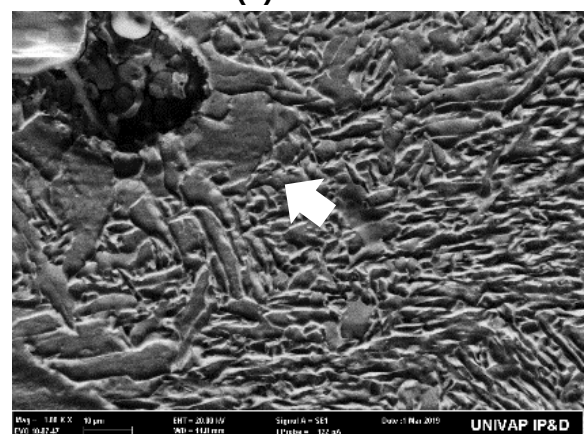
(a)



(b)



(c)



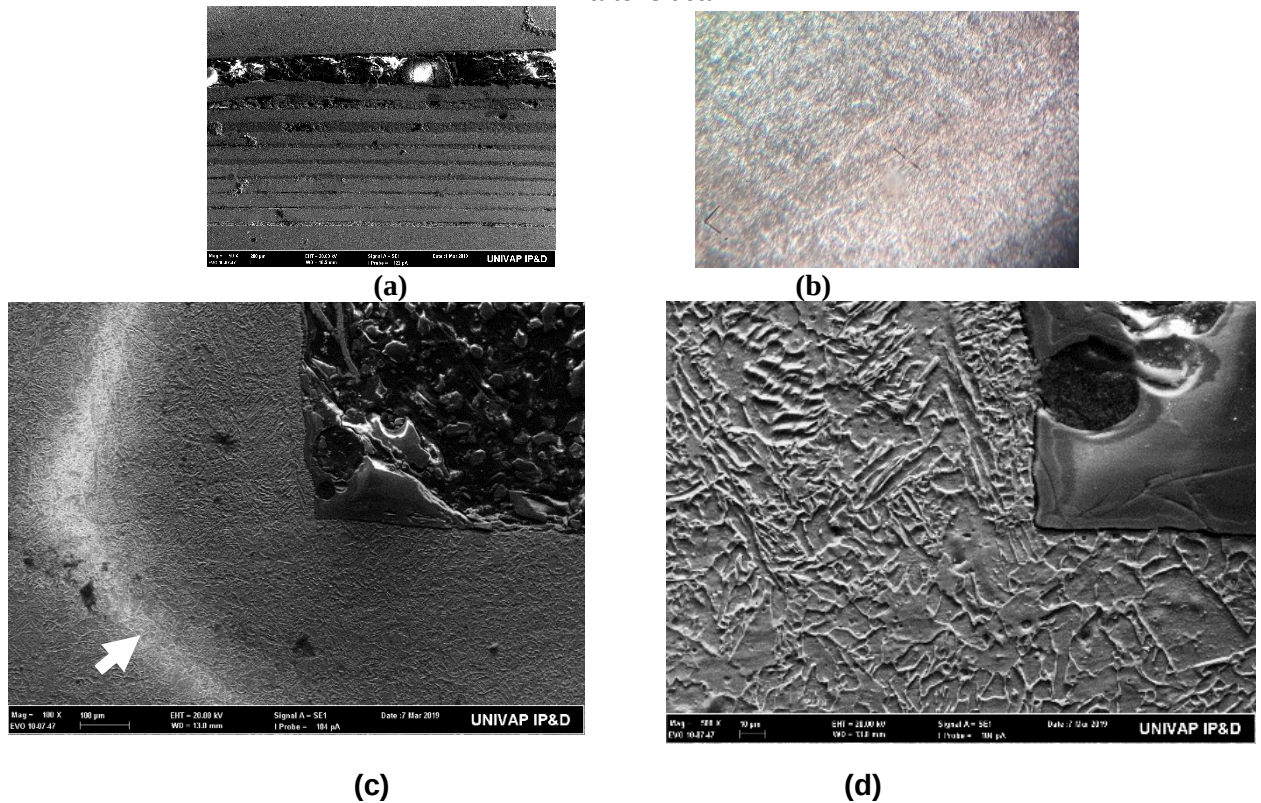
(d)

Fonte: Autor.

A ausência de delaminação na região de inserção dos espaçadores mostrou-se efetivo o que pode ser comprovado pela análise da Figura 26(a), isto é um fator importante, pois, as amostras analisadas por MEV foram submetidas à ensaio de tração, o que indica que o esforço aplicado nos corpos de prova não foram suficientemente altos para ocasionar falhas na região de solda com os espaçadores. Na região marcada pela seta na Figura 26(c) indica a região de transição assim como se percebe que a textura da chapa zincada manteve-se inalterada com pouco crescimento dos grãos na ZTA, não é possível observar descontinuidades e presença de poros que indicam que o processo de soldagem MIG/MAG não sofreu alterações com o espaçamento imposto nas amostras, já na Figura 26(d) observa-se a estrutura martensítica, característica das chapas 22MnB5, a manutenção desta microestrutura indica que o calor gerado no processo de soldagem não foi suficientemente alto para influenciar na transformação da fase martensítica, porém, observa-se que na região marcada pela seta, apresenta a

estrutura de martensita grosseira, o que indica que houve um superaquecimento proveniente do aporte térmico gerado pela soldagem.

Figura 27: Imagens obtidas por MEV da ZTA. (a) o metal de solda e o metal de, (b) microscopia óptica aumento de 200x região 22MnB5 (c) vista transversal em detalhe da amostra 04 mostrando a região de transição do metal de solda com o metal de base com espaçamento de 0,48 mm, (d) estrutura martensítica.



Fonte: Autor.

Na Figura 27, apresenta-se a superfície de corte transversal da região de solda das chapas de materiais dissimilares com *gap* de 0,48 mm. Na Figura 27(a) mostra-se o espaçamento para garantir o *gap* de 0,12 mm, na Figura 27(b) está apresentado a micrografia da região da ZTA no metal de base 22MnB5 com aumento de 200X. Figura 27(c) observa-se em detalhe a zona termicamente afetada e, na Figura 27(d) observa-se a estrutura martensítica da chapa de material 22MnB5.

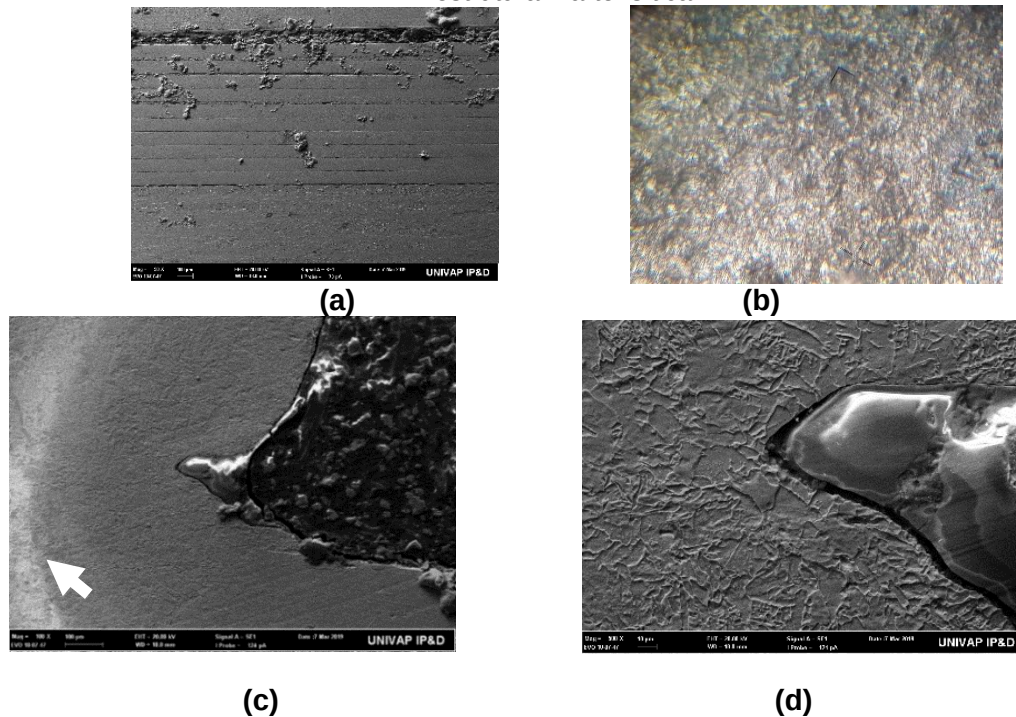
Do mesmo modo que reportado nas amostras anteriormente discutidas, utilização dos espaçadores mostrou-se efetiva, mesmo com o aumento do *gap* entre as chapas dissimilares, como pode ser observado na Figura 27(a). Na região marcada pela seta na Figura 27(b) está indicado à região de interface entre os metais de adição e base, nela não é possível observar anomalias na microestrutura tais como trincas, descontinuidades e porosidade gerada sejam pelo processo de

soldagem, seja pelo processo de carregamento para a realização do ensaio mecânico em tração. A microestrutura da chapa zincada manteve-se inalterada, com a presença de grãos refinados na ZTA, já na Figura 27(c) está apresentada a estrutura martensítica inalterada sem que possa ser averiguado o crescimento excessivo dos grãos tampouco a transformação de fase que pode ocorrer com o aumento da temperatura.

Na Figura 28, é observada a superfície de corte transversal da região de solda das chapas de materiais dissimilares com *gap* de 0,60 mm. Na Figura 28(a) mostra-se o espaçamento para garantir o *gap* de 0,60 mm, na Figura 28(b) está apresentado a micrografia da região da ZTA no metal de base 22MnB5 com aumento de 200X. Figura 28(c) observa-se em detalhe a zona termicamente afetada e, na Figura 28(d) observa-se a estrutura martensítica da chapa de material 22MnB5.

A presença dos espaçadores, Figura 28(a), que como pode ser comprovado pela Figura 28(c) não influenciou na integridade da região de transição, marcada pela seta. Não foram observadas descontinuidades no material nesta região, o que garante a integridade da região de solda. Na Figura 28(d) observa-se um comportamento semelhante ao anteriormente discutido, com a manutenção da estrutura martensítica da chapa estampada a quente.

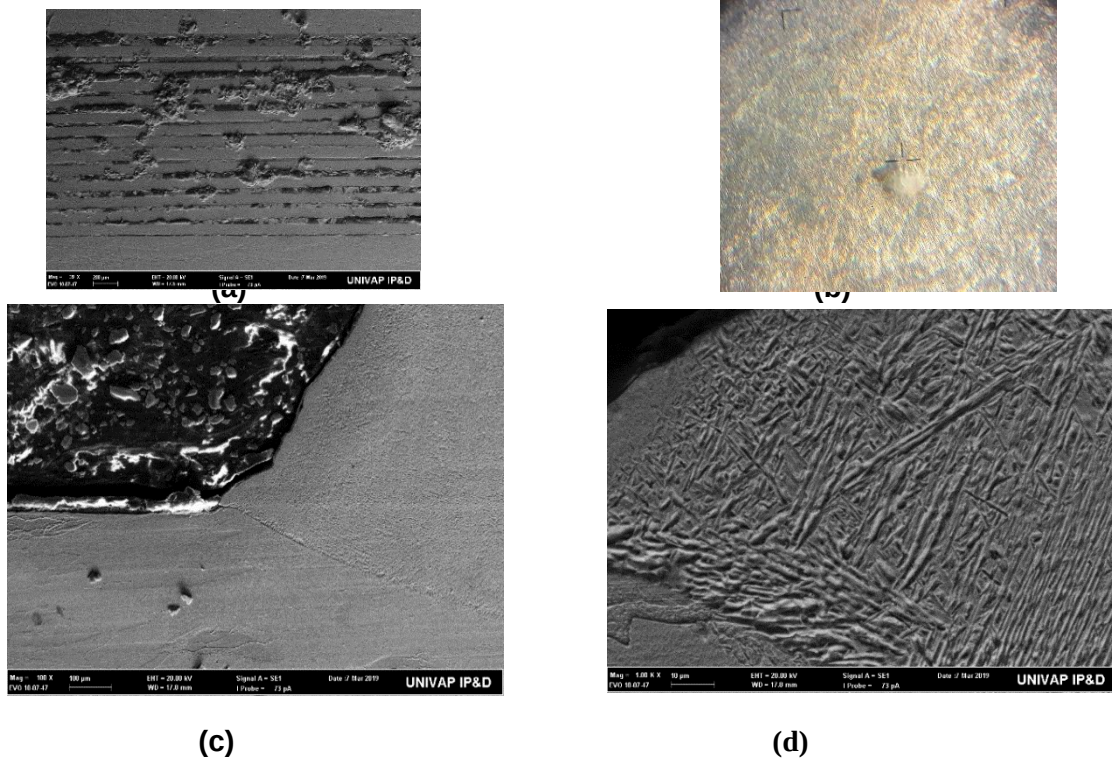
Figura 28: Imagens obtidas por MEV da ZTA. (a) o metal de solda e o metal de, (b) microscopia óptica aumento de 200x região 22MnB5 (c) vista transversal em detalhe da amostra 05 mostrando a região de transição do metal de solda com o metal de base com espaçamento de 0,60 mm, (d) estrutura martensítica.



Fonte: Autor.

Na Figura 29, apresenta-se a superfície de corte transversal da região de solda das chapas de materiais dissimilares com *gap* de 0,78 mm. Na Figura 29(a) mostra-se o espaçamento para garantir o *gap* de 0,78 mm, na Figura 29(b) está apresentado a micrografia da região da ZTA no metal de base 22MnB5 com aumento de 200X. Figura 29(c) observa-se em detalhe a zona termicamente afetada e, na Figura 29(d) observa-se a estrutura martensítica da chapa de material 22MnB5.

Figura 29: Imagens obtidas por MEV da ZTA. (a) o metal de solda e o metal de, (b) microscopia óptica aumento de 200x região 22MnB5 (c) vista transversal em detalhe da amostra 06 mostrando a região de transição do metal de solda com o metal de base com espaçamento de 0,78 mm, (d) estrutura martensítica.



Fonte: Autor.

5.7 ENSAIO DE DOBRAMENTO

Foi realizado o ensaio de dobramento as amostras 01, 02, 03, 04, 05 e 06. O ensaio teve o intuito de verificar se existem pontos de trincas ou micro trincas existentes após o dobramento a 90°.

A Tabela 13 apresenta os resultados obtidos no ensaio de dobramento para todos os lotes de amostra. Nela estão apresentadas imagens exemplificando as amostras ensaiadas e o referido resultado de presença e/ou ausência de trincas.

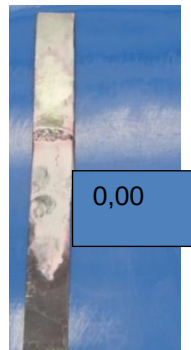
Tabela 13: Resultados do ensaio de Dobramento.

Número da Amostra	Imagem da Amostra	Imagem do ensaio de Dobramento
Amostra 1: 0,00 mm de espaçamento		Ausência de trincas
Amostra 2: 0,12 mm de espaçamento		Ausência de trincas
Amostra 3: 0,36 mm de espaçamento		Ausência de trincas
Amostra 4: 0,48 mm de espaçamento		Ausência de trincas
Amostra 5: 0,60 mm de espaçamento		Ausência de trincas
Amostra 6: 0,78 mm de espaçamento		Ausência de trincas

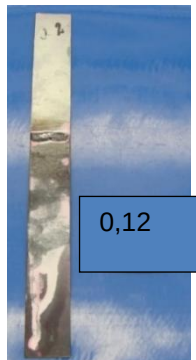
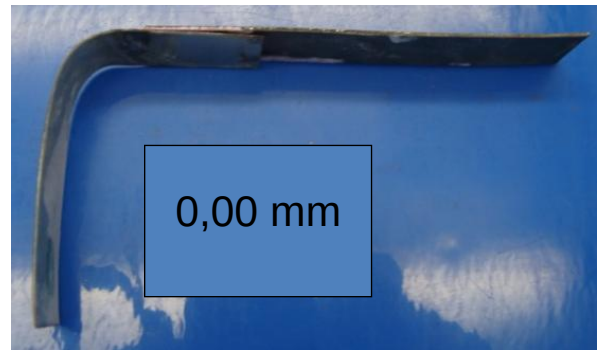
Fonte: Autor.

Para todos os lotes ensaiados, independente do espaçamento impostos entre as chapas dissimilares soldadas, não correu trincamento da região de dobramento, o que pode ser verificado pelo ensaio de líquido penetrante, apresentado na figura 30 este resultado corrobora os anteriormente discutidos, ensaio de tração e análise microestrutural.

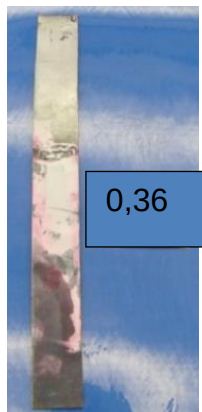
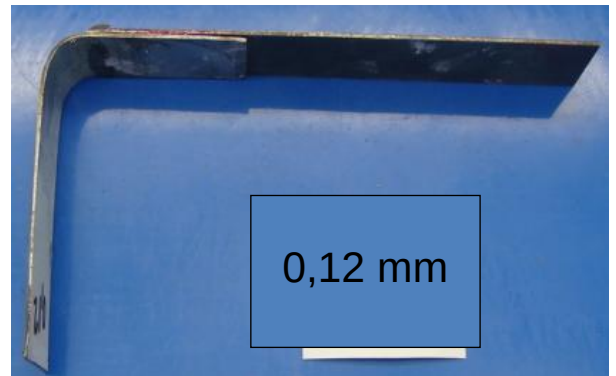
Figura 30: Amostras antes e depois do ensaio de dobramento com a aplicação do líquido penetrante.



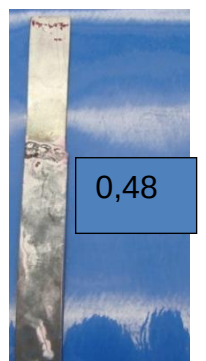
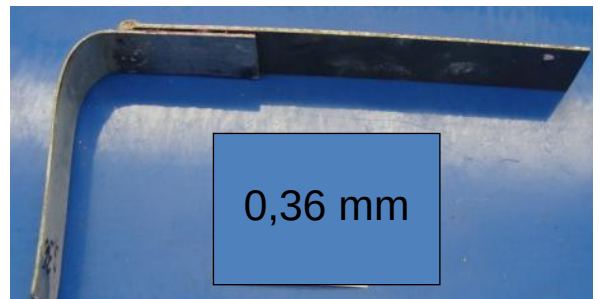
(a)



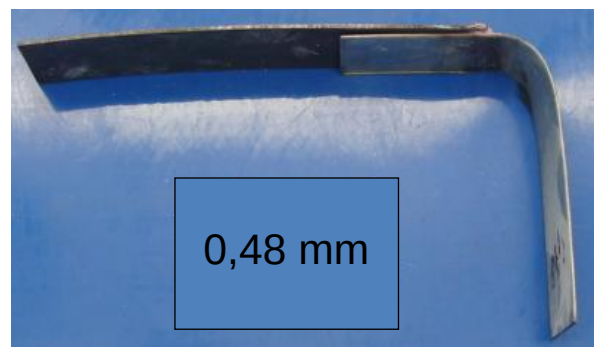
(b)

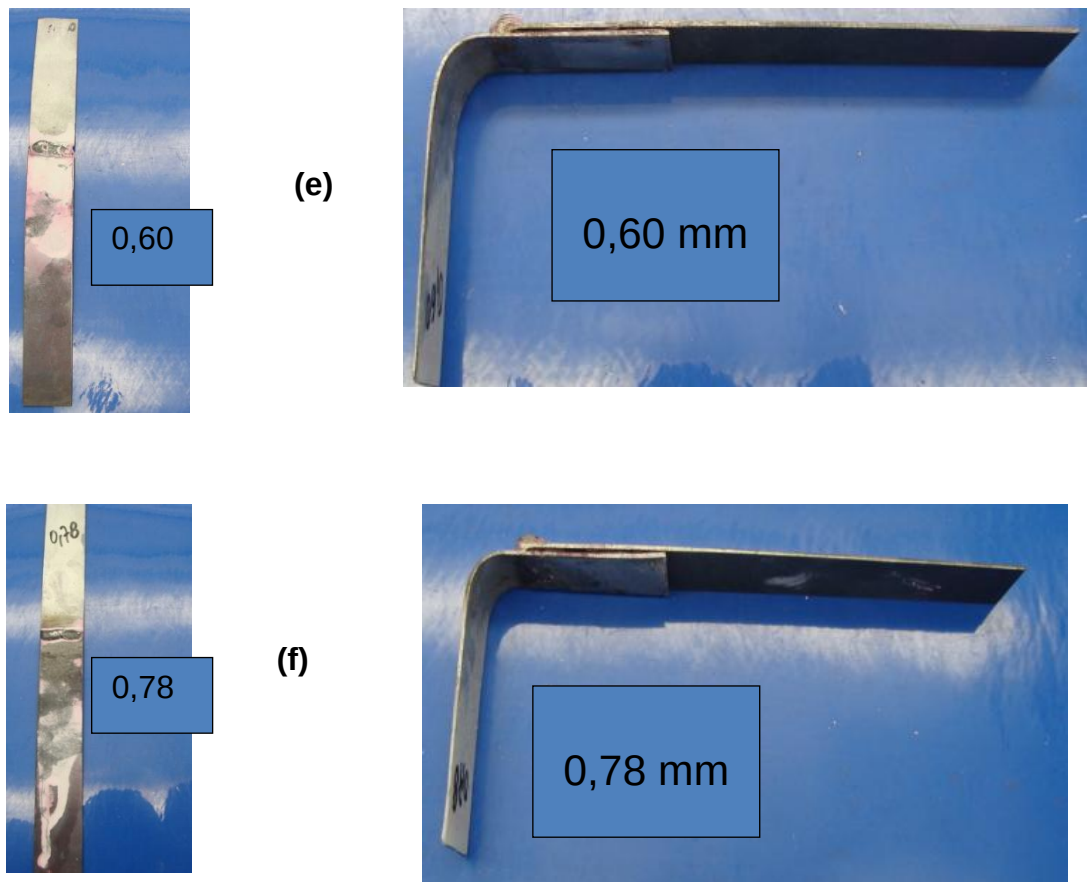


(c)



(d)





Fonte: Autor

Em todos os ensaios realizados com líquido penetrante, tanto antes como depois do ensaio de dobramento, não foi verificado a presença de trincas nas amostras, como pode ser observado na figura 30(a) com o espaçamento de 0mm, na figura 30(b) com espaçamento de 0,12mm, na figura 30(c) com espaçamento de 0,36mm, na figura 30(d) com espaçamento de 0,48mm, na figura 30(e) com espaçamento de 0,60mm e na figura 30(f) com espaçamento final de 0,78mm.

6 CONCLUSÕES

De acordo com os resultados obtidos através das análises realizadas, pode-se concluir que a utilização de parâmetros de soldagem corretos é importante para não prejudicar as características mecânicas dos componentes soldados;

Nos ensaios de tração realizados nos corpos de provas que foram divididos em blocos, leva-se a concluir que para amostras com espaçadores de 0,12 e 0,78mm apresentaram uma estabilidade na resistência mecânica à tração tendendo para o valor da nominal que é de 301 a 308 MPa, porém todas as amostras atenderam o mínimo de resistência mecânica especificado para a indústria que é de 287 MPa.

A microestrutura e a dureza, principalmente obtida nas ZTA's das amostras, ficaram inalteradas após o ensaio de tração e não apresentaram formação de fissuras e microtrincamentos.

Mesmo com uma pequena alteração na porcentagem de carbono da chapa 22MnB5, não houve qualquer alteração nas propriedades mecânicas da junta soldada, como pode-se observar nos resultados obtidos pelo ensaio de tração.

A microestrutura formada na região de transição ficou constante em todos os corpos de provas com todos os *gap's* utilizados, o que mostra que com o espaçamento pode-se melhorar a dissipação do calor e não alterar a microestrutura do aço.

Não houve a presença de trincas na região da ZTA em nenhuma das amostras ensaiadas, o que comprova que mesmo com o espaçamento existente o material mantém-se íntegro, nas amostras com espaçamento 0mm e 0,36mm houve o engrossamento da martensita na região da ZTA do material 22MnB5 devido ao aporte térmico da soldagem, este engrossamento não prejudicou a resistência mecânica dos corpos de provas.

No ensaio de dobramento a 90° não se observou a presença de quaisquer imperfeições e ou trincas.

Com o estudo realizado comprovou-se que é possível ter uma economia muito grande de tempo tacto e no retrabalho de solda, se usar espaçamento entre chapas de até 0,78 mm, sendo que atualmente pode ser admitido um espaçamento de no máximo 0,28 mm para chapa com espessura de 0,8 mm.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARCELOR MITTAL Aços Planos América Latina – Brasil. **Catálogo de produtos laminados**. Serra, ES: ArcelorMittal Vega, 2015.

ALTAN, T. R & D update: Hot-stamping boron-alloyed steels for automotive parts – Part I. **Stamping Journal**, 2007. Disponível em: <http://www.thefabricator.com/article/stamping/hot-stamping-boron-alloyed-steels-for-automotive-parts>. Acesso em; 20 mar. 2019.

ASTM. **Designation: E407-07**: Standard Practice for Microetching Metals and Alloys. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2011. Disponível em: <https://compass-astm.ez102.periodicos.capes.gov.br/download/E407-07e1.5886.pdf>. Acesso em: jan. 2019.

CALLISTER, William D. **Ciência e engenharia de materiais**: uma introdução. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

CHIAVERINI, Vicente. **Aços e ferros fundidos**: características gerais, tratamentos térmicos, principais tipos. 7. ed. São Paulo: ABM, 2005.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG e.V. (DIN). DIN EN ISO 5817:2014-06 **Welding - Fusion-welded joints in steel, nickel, titanium and their alloys (beam welding excluded) - Quality levels for imperfections (ISO 5817:2014); German version EN ISO 5817:2014**, 2014a.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG e.V. (DIN). DIN EN 10083-3:2006 **Steels for quenching and tempering - part 3: technical delivery conditions for alloy steels**. 2006.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG e.V. (DIN). DIN EN 10346:2015-10 **Continuously hot-dip coated steel flat products for cold forming - Technical delivery conditions; German version EN 10346:2015**, 2015.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG e.V. (DIN). DIN EN 10002-1:2001-12 **Metallic materials - Tensile testing - Part 1: Method of testing at ambient temperature; German version EN 10002-1:2001**, 2001.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG e.V. (DIN). DIN EN DIN EN 1043-1 **Hardness testing of welds in metallic materials - Hardness test on arc welded joints; German version EN 1043-1:2014**, 2014b.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG e.V. (DIN). DIN EN DIN EN 1043-2 **Destructive test on welds in metallic materials - Hardness test - Part 2: Micro hardness testing on welded joints; German version EN 1043-2:2014**, 2014c.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG e.V. (DIN). DIN EN ISO 18265:2014-02 **Metallic materials - Conversion of hardness values (ISO 18265:2014)**; German version EN ISO 18265:2014, 2014d.

ESAB. **Apostila de Soldagem MIG/MAG**. 2005. Disponível em: <https://www.esab.com.br/br/pt/education/apostilas/upload/1901104rev0_apostilasoldagemmigmag_low.pdf>. Acesso em: 25 de mai. 2016. Acesso em: 23 abr. 2019.

CIMM - CENTRO DE INFORMAÇÃO METAL MECÂNICA (). **Ferramental**. 2019. Disponível em: <https://www.revistaferramental.com.br/empresa/cimm-centro-de-informacao-metal-mecanica/> acesso em: maio 2019.

FERREIRA, P. M. S. **Estudo da maquinabilidade das ligas ti-6Al-4V por gume de corte [mm/dente] espessura média da apara [mm] hv valor da dureza vickers [kgf/mm²]**. 2015. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade de Aveiro, Aveiro, 2015

FORTES, C. **Soldagem MIG/MAG**- traduzido e adaptado, ESAB. Agosto, 2005.

KARBASIAN, H.; TEKKAYA, A. E. A review on hot stamping. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 210, n. 15, p. 2103 – 2118, 2010.

LIU, H. S. *et al.* Investigation of the Hot-Stamping Process for Advanced High-Strength Steel Sheet by Numerical Simulation. **Journal of Materials Engineering and Performance**, v. 19, n. 3, p. 325–334, abr. 2010.

MACHADO, I. G. **Soldagem & técnicas conexas**: processos. Porto Alegre: Ed. do Autor, 1996.

MARQUES, P. V.; MODENESI, P. J.; BRACARENSE, A. Q. **Soldagem: Fundamentos e Tecnologia**. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2011.

MORI, K.; ITO, D. Prevention of oxidation in hot stamping of quenchable steel sheet by oxidation preventive oil. **CIRP Annals – Manufacturing Technology**, n. 58, p. 267-270, 2009.

RATTICHERI, F. **Avaliação da Microdureza Superficial do esmalte dentário irradiado com laser 960N.m**. São Paulo, 2004. 69f. Dissertação (Mestrado em Ciências na área de Tecnologia Nuclear-Materiais) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.

SCOTTI, A.; PONOMAREV, V. **Soldagem MIG/MAG. Melhor entendimento, melhor desempenho**. São Paulo: Artliber Editora, 2008. 17p

SOUZA, S. A. **Ensaio Mecânicos de Materiais Metálicos, fundamentos teóricos e práticos**, São Paulo: Edgard Blücher, 1986.

STOCCO, Danilo, Caracterização de solda por resistência a ponto através de avaliações não destrutivas. 2010. 110f. Dissertação (Mestrado) Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

VAN VLACK, L. H. **Materials for engineering**. Reading, Addison Wesley, 1989.

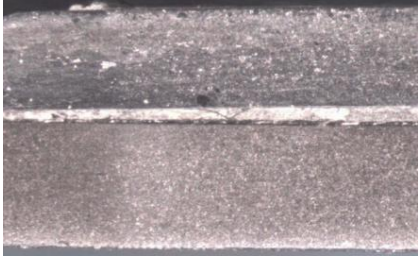
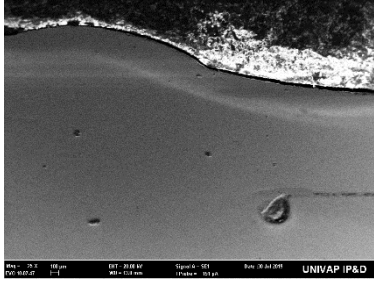
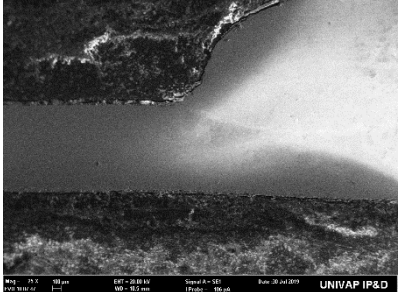
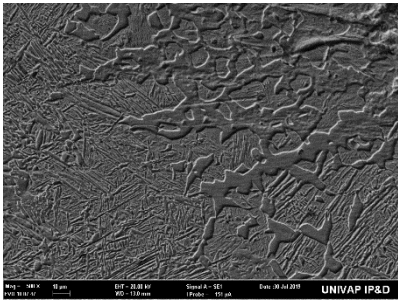
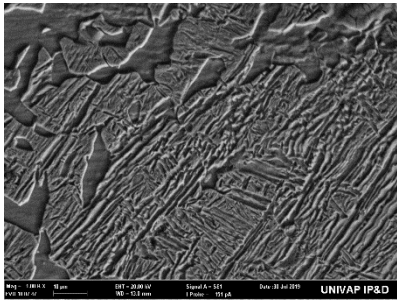
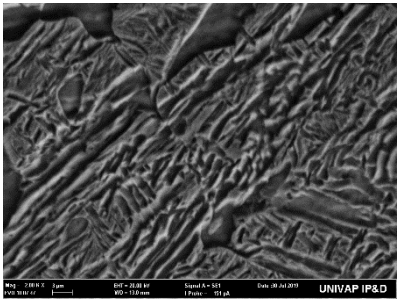
ZOLIN, I. **Curso técnico em automação industrial**: ensaios mecânicos e análises de falhas. Santa Maria : Universidade Federal de Santa Maria : Colégio Técnico Industrial de Santa Maria, 2011. Disponível em: https://www.ufsm.br/unidades-universitarias/ctism/cte/wp-content/uploads/sites/413/2018/11/15_ensaios_mecanicos_analises_falhas.pdf. Acesso em: maio 2019.

WAGENER, H-W. New developments in sheet metal forming: sheet materials, tools and machinery. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 72, n. 3, p. 342-357, 1997.

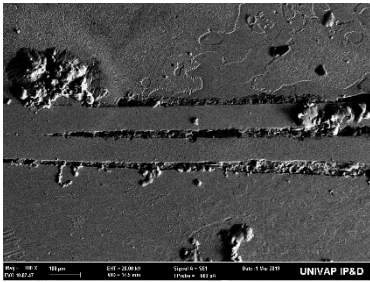
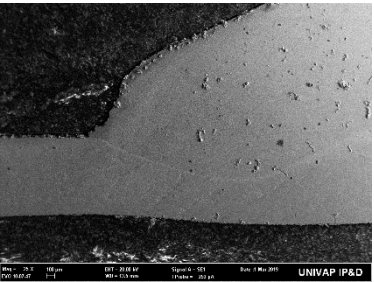
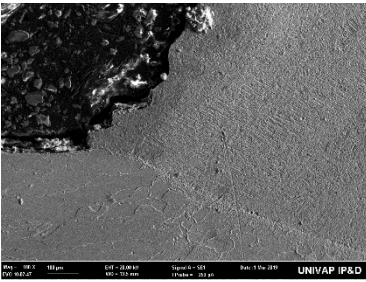
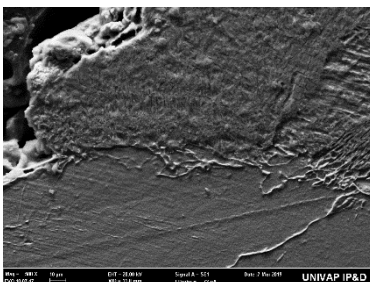
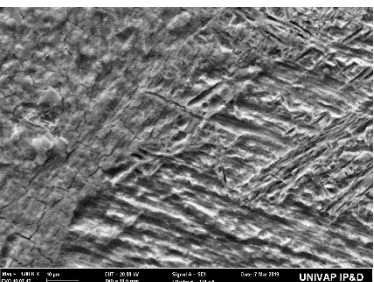
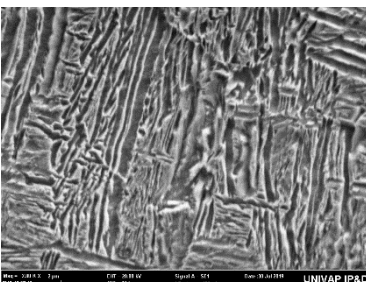
WAINER, E.; BRANDI, S. D.; MELLO, F. D. H. **Soldagem**: Processos e Metalúrgia. São Paulo: Editora Edgar Blücher, 1992. 123-126p.

YANG, K.; EL-HAIK, B. **Projeto para Six Sigma**: um roteiro para o desenvolvimento do produto. São Paulo: Educator, 2008, p. 37 – 380.

APÊNDICE A – MEVs de todas as amostras com todos os espaçamentos.

Identificação: 0,00mm	Aumento de 25x	Aumento de 100x
		
Aumento de 500x	Aumento de 1000x	Aumento de 2000x
		

APÊNDICE B – MEVs de todas as amostras com todos os espaçamentos.

Identificação: 0,12mm	Aumento de 25x	Aumento de 100x
		
Aumento de 500x	Aumento de 1000x	Aumento de 2000x
		

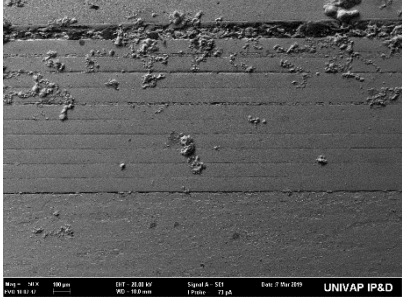
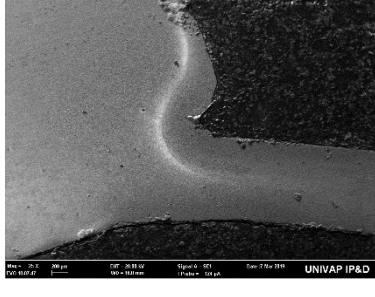
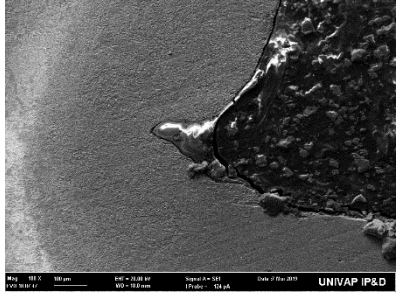
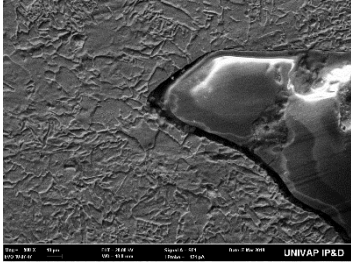
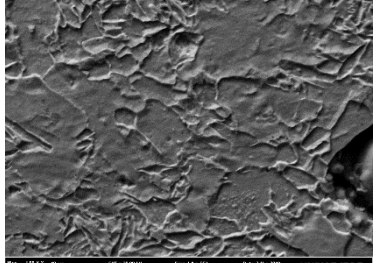
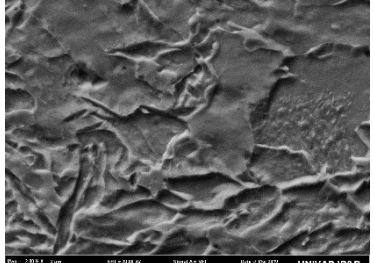
APÊNDICE C – MEVs De Todas As Amostras Com Todos Os Espaçamentos.

Identificação: 0,36mm	Aumento de 25x	Aumento de 100x
Aumento de 500x	Aumento de 1000x	Aumento de 2000x

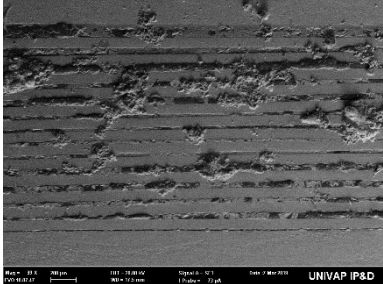
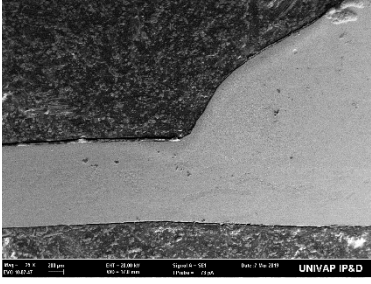
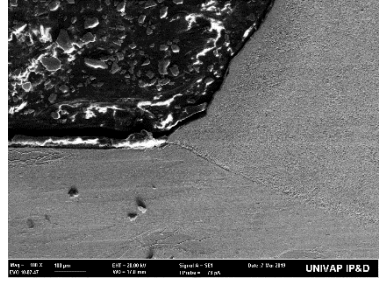
APÊNDICE D – MEVs de todas as amostras com todos os espaçamentos.

Identificação: 0,48mm	Aumento de 25x	Aumento de 100x
Aumento de 500x	Aumento de 1000x	Aumento de 2000x

APÊNDICE E – MEVs de todas as amostras com todos os espaçamentos.

Identificação: 0,60mm	Aumento de 25x	Aumento de 100x
		
Aumento de 500x	Aumento de 1000x	Aumento de 2000x
		

APÊNDICE F – MEVs de todas as amostras com todos os espaçamentos.

Identificação: 0,78mm	Aumento de 25x	Aumento de 100x
		
Aumento de 500x	Aumento de 1000x	Aumento de 2000x
