



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAIS**

**Leonardo Silva Porto**

**EFEITO DOS PARÂMETROS DE SOLDAGEM SOBRE AS PROPRIEDADES  
MECÂNICAS E A MICROESTRUTURA DE JUNTAS DE PINO M6 COM CHAPA HOT  
STAMPING UTILIZANDO O PROCESSO STUD WELDING**

Campina Grande - PB

Setembro/2019

**Leonardo Silva Porto**

**EFEITO DOS PARÂMETROS DE SOLDAGEM SOBRE A MICROESTRUTURA E AS  
PROPRIEDADES MECÂNICAS DE JUNTAS DE PINO M6 COM CHAPA HOT  
STAMPING UTILIZANDO O PROCESSO STUD WELDING**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-  
Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais  
como requisito parcial à obtenção do título de  
**Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais.**

**Orientador:** Prof. Dr. Theóphilo Moura Maciel

Campina Grande – PB

2019

P853e

Porto, Leonardo Silva.

Efeito dos parâmetros de soldagem sobre a microestrutura e as propriedades mecânicas de juntas de pino M6 com chapa hot stamping utilizando o processo stud welding / Leonardo Silva Porto. – Campina Grande, 2019.

82 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia, 2019.

"Orientação: Prof. Dr. Theóphilo Moura Maciel".

Referências.

1. Processos de Soldagem. 2. Pino Tucker. 3. Hot Stamping. 4. Stud Arc Welding. I. Maciel, Theóphilo Moura. II. Título.

CDU 621.791.75(043)

## VITAE DO CANDIDATO

- Engenheiro de Materiais pela UFCG (2012);
- Acumuladores Moura S/A - Estagiário da Engenharia de Processos no Processo de Injeção do conjunto plástico da carcaça da bateria automotiva (Setor automotivo – 2011 à 2012);
- CertBIO - Laboratório de Análises e Desenvolvimento de Biomateriais (Setor de Biomateriais – 2011 à 2012);
- Fiat Chrysler Automóveis - Analista da Qualidade (Setor Automotivo - 2013 à 2016);
- Fiat Chrysler Automóveis - Coordenador do Laboratório de Materiais da Qualidade (setor automotivo - 2016 à 2018);
- Fiat Chrysler Automóveis – Engenheiro de Qualidade Fornecedores (setor automotivo – 2019 à atual).

LEONARDO SILVA PORTO

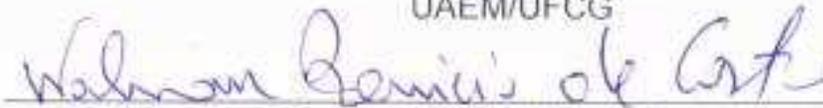
EFEITO DOS PARÂMETROS DE SOLDAGEM SOBRE A MICROESTRUTURA E AS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE JUNTAS DE PINO MG COM CHAPA HOT STAMPING UTILIZANDO O PROCESSO STUD WELDING

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais como requisito parcial à obtenção do título de **Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais**.

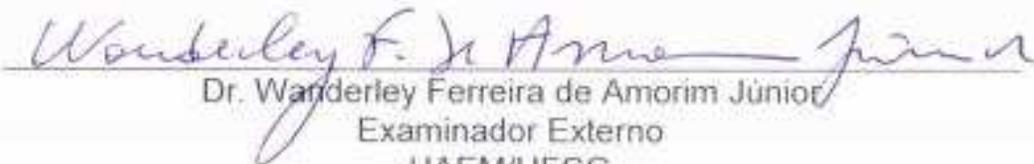
Aprovado em: 07/06/2019



Theophilo Moura Maciel  
Orientador  
UAEM/UFCG



Dr. Walman Benicio de Castro  
Examinador Interno  
UAEM/UFCG



Dr. Wanderley Ferreira de Amorim Júnior  
Examinador Externo  
UAEM/UFCG

*Dedico este trabalho ao Dr. Iapuêne José de Melo  
Lula, médico do meu Pai, que trouxe paz e  
tranquilidade para minha família, tornando ser  
possível a dedicação do meu tempo para realização  
deste trabalho.*

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente à Deus pela possibilidade de concluir mais um digno trabalho.

Ao meu orientador Theóphilo Maciel pela compreensão e dedicação nas sábias orientações.

À minha esposa e filha (Marcela e Lara) pelo apoio e força nos momentos cansativos

Aos meus Pais (Ótímar e Rosa) pela educação e honestidade em seguir com trabalho justo

Aos meus irmãos (Alessandro, Luciana, Adriana e Milena) por serem meus irmãos.

Aos meus colegas (Eric Herrera, Luiz Ayrton, Marcio Moura, Ana Caroline, Elieber Barros, Thiago Tibério,

Maria Gabriela) que contribuíram de forma única para este trabalho e a empresa FCA pela disponibilidade da estrutura do laboratório.

## RESUMO

A seleção adequada dos materiais aplicados e parâmetros de processo corretamente ajustados, são fatores que tem influencia direta na qualidade do conjunto soldado de Pinos Tuckers, processo conhecido por Stud Arc Welding (SW). Este processo vem chamando atenção na indústria automotiva por sua versatilidade e aplicação, inclusive na união de Pinos com chapas de Ultra-Alta Resistência, como o Hot Stamping. Neste trabalho, diferentes combinações de processo entre Pinos Tuckers e chapa Hot Stamping foram utilizadas (corrente de soldagem, tempo e distância entre o pino e a chapa - lift). Corpos de prova foram confeccionados a partir das combinações de processo com o objetivo de avaliar a qualidade da solda por meio da técnica de microscopia, microdureza, ensaios de resistência à tração e torque. Por microscopia e microdureza Vickers, foi verificado que há variação de microestrutura na região soldada e do comportamento da ZTA (Zona Termicamente Afetada). Poros se formam na região de fusão da solda, atuando como concentrador de tensão durante solicitações mecânicas. Os valores médios de penetração da solda e da resistência à tração são fortemente influenciados pelos parâmetros de processo, onde a corrente de soldagem tem grande interferência nestes resultados, seguidos pelo tempo e lift. No caso dos valores de resistência ao torque, o tempo de soldagem foi o parâmetro de processo que apresentou maior influencia durante os testes.

**Palavras-chave:** Pino Tucker, Hot Stamping, Stud Arc Welding e processos de soldagem.

## **ABSTRACT**

The appropriate selection of the materials to be used and a process parameters correctly preset are factors that precisely reflect on the quality of the welded Tuckers Stud, process known as Stud Arc Welding (SW). This process has been drawing the attention of automotive industry due to its versatility and application, also by joining Studs with sheets of Ultra – High Resistance such as Hot Stamping. In this work it were used different process combination between Tuckers Studs and Hot Stamping sheets (welding current, time and lift). Specimen were made from process combination with the purpose of evaluating the weld quality by means of the microscopy, hardness, tensile strength testing and torque. Through microscopy and Vickers microhardness test, was verified that there is microstructure variation on the welded parts in the behavior of the HAZ (Heat Affected Zone). Porosity appear on the fusion welding area acting as tension concentrator during mechanical stresses. The mean values of weld penetration and tensile strength are strongly influenced by the process parameters, where the welding current has greater interference in these results, followed by time and lift. In the case of torque values, the welding time was the process parameter that showed the greatest influence during the tests.

**Keywords:** Stud Tucker, Hot Stamping, Stud Arc Welding and welding process.

## **PUBLICAÇÕES**

PORTO, Leonardo Silva.; MACIEL, Theóphilo Moura. Efeito dos parâmetros de soldagem sobre a microestrutura e a resistência à tração de juntas de pino M6 com chapa hot stamping utilizando o processo stud welding. Revista Eletrônica de Materiais e Processos, Campina Grande, v. 14, n. 1, p. 37-42, fev/abr. 2019.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Principais processos de solda usados na atualidade.....	23
Figura 2 – Processo de Soldagem de Pinos mostrando a) posicionamento da tocha, b) abertura do arco e levantamento do pino, c) término do período de arco com pino pressionado contra o metal base e d) soldagem completa .....	25
Figura 3 – Seção transversal típica de um Pino Tucker soldado na base metálica e as zonas características .....	26
Figura 4 – Esquema de medição (a) penetração da solda e (b) perfil de dureza Vickers realizado em duas amostras soldadas com diferentes parâmetros de processo .....	27
Figura 5 – Comportamento da solda na região da zona endurecida das amostras 1B e 4B .....	27
Figura 6 - Pistola manual usada para processos de Soldagem de Pinos .....	28
Figura 7 - Evolução da microestrutura de um aço martensítico na operação de estampagem .....	30
Figura 8 – Composição química dos aços ao boro dos principais fornecedores mundiais .....	30
Figura 9 - Esquema do cisalhamento e inclinação da superfície na formação de uma placa de martensita.....	31
Figura 10 - Microestrutura martensítica em forma de placas .....	32
Figura 11 - Microestrutura martensítica em forma de ripas. Ampliação 175X .....	32
Figura 12 - Microscopia óptica do revestimento após estampagem a quente .....	33
Figura 13 - Diagrama CCT típico para o aço 22MnB5 .....	34
Figura 14 – Seção transversal da solda pelo processo GMAW dos aços hot stamping .....	35
Figura 15 - Microestruturas do metal de solda de junta soldada pelo processo GMAW de um aço ao boro e outro FB590 com os aportes térmicos (a) 0,29 kJ/mm, (b) 0,48 kJ/mm e (c) 0,67 kJ/mm.....	35

Figura 16 – Microestrutura da ZTA formada na diferentes regiões (a) ZTA 1, (b) ZTA2 e (c) ZTA3 .....	36
Figura17 - Perfil de dureza do metal de solda e ZTA da união pelo processo GMAW dos aços ao boro e FB590 .....	37
Figura 18 – Perfil de Dureza e microestruturas formadas no Metal Base, ZTA e ZF da solda ....	38
Figura 19 – Perfil de Dureza da junta soldada a laser do aço martensítico (22MnB5) para várias velocidades de soldagem .....	38
Figura 20 – Microestrutura formada de uma solda ponto entre uma aço martensítico 22MnB5 e um aço DP800 .....	39
Figura 21 – Típica (a) microestrutura e (b) perfil de dureza do ponto de solda do aço martensítico .....	40
Figura 22 – Perfil de dureza em relação a corrente de soldagem (a) na Zona de Fusão e na (b) Zona Termicamente .....	41
Figura 23 – Variação da força de tensão cruzada com tempo e corrente de soldagem.....	42
Figura 24 – Fluxograma das etapas de realização das análises .....	44
Figura 25 - Esquema da medição da penetração da solda e da porosidade .....	46
Figura 26 - Esquema da medição de dureza do Pino Tucker e da Chapa Hot Stamping .....	48
Figura 27 – Esquema do ensaio de tração realizado no conjunto soldado Pino/Chapa.....	48
Figura 28 – Esquema do ensaio de torque realizado no conjunto soldado Pino/Chapa.....	49
Figura 29 - Esquema da medição de microdureza nas amostras soldadas.....	50
Figura 30 – Microestrutura (A) do núcleo da chapa composta por martensita revenida e (B) superfície da camada de AISI. Nital 4%.....	52
Figura 31 – Microestrutura do Pino M6 composta por ferrita com traços de perlita. Nital 4%.....	54

Figura 32 – Microestrutura característica formada a partir do processo de solda entre o Pino Tucker e a Chapa Hot Stamping.....	55
Figura 33 – Esquema da medição de Microdureza Vickers em relação às fases no conjunto soldado.....	57
Figura 34 – Perfil de microdureza vickers das amostras.....	59
Figura 35 – Esquema do corpo de prova para análise de penetração e porosidade da solda.....	62
Figura 36 – Relação da (A) influência dos parâmetros do processo nos resultados de porosidade das soldas e a (B) interação entre ambos.....	63
Figura 37 – Relação da (A) influência dos parâmetros do processo nos resultados de penetração das soldas e a (B) interação entre ambos.....	65
Figura 38 – Relação da (A) influência dos parâmetros do processo nos resultados de torque e a (B) interação entre ambos.....	66
Figura 39 – Imagens das fraturas obtidas após ensaio de torque referente a cada ordem.....	67
Figura 40 – Relação da (A) influência dos parâmetros do processo nos resultados de resistência à tração das soldas e a (B) interação entre ambos .....	72
Figura 41 - Imagens das fraturas obtidas após ensaio de tração referente a cada amostra .....	73

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição química nominal da chapa hot stamping.....	43
Tabela 2 – Valores de composição química do Pino M6.....	43
Tabela 3 – Valores de corrente, tempo e lift usadas para definir as combinações de processo.....	45
Tabela 4 – Combinações de processo em relação aos parâmetros corrente, tempo e lift.....	45
Tabela 5 – Relação entre medição e deslocamento para medição de microdureza das amostras.....	50
Tabela 6 – Resultados de resistência à tração das amostras de chapa Hot Stamping.....	51
Tabela 7 – Resultados da Dureza HRC e HV da chapa Hot Stamping (núcleo da amostras.....	51
Tabela 8 – Valores de composição química da chapa de aço hot stamping.....	53
Tabela 9 – Resultados da Dureza HRB do Pino M6.....	53
Tabela 10 – Valores de composição química do Pino M6.....	54
Tabela 11 – Valores de dureza vickers das amostras soldadas em relação à distancia.....	58
Tabela 12 – Resultados penetração, porosidade, resistência à tração e resistência ao torque em relação aos parâmetros de processo utilizado em cada corpo de prova.....	62

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A – Ampere

A.C. – Antes de Cristo

ASM - American Society for Metals

ASTM - American Society for Testing and Materials

C – Carbono

CCC – Cúbica de Corpo Centrado

CFC – Cúbica de Face Centrada

CP – Corpo de prova

DOE - Design of Experiments

F – Força

HAZ - Heat Affected Zone

HV – Dureza Vickers

HRB - Dureza Rockwell B

HRC – Dureza Rockwell C

ISO - Organização Internacional de Padronização

kN – Quilonewtons

M6 – Diâmetro seis

MEV - Microscopia Eletrônica de Varredura

mm – Milímetros

mm/min – Milímetros por minuto

ms – Milissegundos

MPa – Mega pascal

N – Newtons

SW - Stud Welding

ZTA – Zona Termicamente Afetada

## LISTA DE SÍMBOLOS

°C – Graus Celsius

°C/s - Graus Celsius por segundo

%p – Percentual em peso

$\alpha$  - alfa

$\gamma$  - gama

$\beta$  - beta

% - Percentual

° - Grau

## SUMÁRIO

1. Introdução .....	20
1.1 Relevância do Tema .....	21
2. Objetivos .....	22
2.1 Objetivo Geral .....	24
2.2 Objetivos Específicos .....	24
3. Revisão da Literatura .....	25
3.1 Soldagem .....	25
3.2 Soldagem de Pinos à Arco Elétrico (Stud Welding) .....	25
3.3 Chapas de Aços Martensíticos .....	30
3.4 Metalurgia da soldagem de aços martensíticos.....	34
3.4.1 Solda Arco Elétrico.....	34
3.4.2 Soldagem a laser.....	38
3.4.3 Solda a Ponto.....	40
4. Materiais e Métodos .....	43
4.1 Materiais .....	43
4.2 Metodologia .....	44
4.2.1 Obtenção, preparação e caracterização dos corpos de prova (CP's) .....	46
4.2.2 Caracterização das amostras e testes especificados para análise dos CP's obtidos do processo de solda projeção .....	44
5. Resultados e Discussão... ..	51
5.1 Resistência à tração das chapa.....	51
5.2 Dureza Rockwell C da chapa.....	51
5.3 Espessura da camada de revestimento e microestrutura da chapa.....	52
5.4 Análise de composição química da chapa.....	53
5.5 Dureza do Pino M6.....	53

5.6 Microestrutura do Pino M6.....	54
5.7 Análise de composição química da Pino M6.....	54
5.8 Análise da microestrutura formada na região de solda entre o Pino e a Chapa.....	55
5.9 Análise do perfil de microdureza das juntas soldadas.....	58
5.10 Influência dos parâmetros de soldagem em relação a porosidade, penetração da solda e resistência à tração.....	62
5.10.1 Influência dos parâmetros de soldagem em relação a porosidade na região de fusão.....	63
5.10.2 Influência dos parâmetros de soldagem em relação a penetração da solda.....	64
5.10.3 Influência dos parâmetros de soldagem em relação a resistência ao torque das soldas.....	66
5.10.4 Análise visual dos corpos de prova após ensaios de resistência ao torque das soldas.....	67
5.10.5 Influência dos parâmetros de soldagem em relação a resistência à tração das soldas.....	72
5.10.6 Análise visual dos corpos de prova após ensaios de resistência à tração das soldas.....	73
6. Conclusão.....	78
7. Referencias Bibliográficas.....	80

## 1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, impulsionado pela crise do petróleo vivida na década de 80, pela acirrada competição em escala global da década de 90 e pelos desafios ecológicos no início do milênio, dois grandes e importantes desafios a indústria automobilística tem enfrentado. 1.Fazer com que os veículos se tornassem mais seguros, promovendo um melhor comportamento ao choque quando submetidos a um acidente, preservando a integridade física e até a vida dos seus ocupantes; 2.Reduzir o consumo de combustível para que os veículos se tornassem mais econômicos, tanto para aumentar a sua competitividade no mercado como para reduzir a emissão de poluentes, no sentido de atender as novas legislações ambientais vigentes de impacto global (NETO, 2015). Essas duas exigências levou a criação de duas tendências: a primeira, visa desenvolver aços para uma carroceria mais leve, porém que não comprometa a segurança e nem as propriedades estruturais, sem custos elevados para as montadoras; e a segunda tem como objetivo tornar a fabricação de automóveis dentro de um conceito de sustentabilidade através de redução de peso, emissões nocivas e processos sustentáveis. Diante deste cenário, projetos trazem consigo, o uso massivo de chapas de aços de ultra-alta resistência, onde podemos destacar os aços martensíticos (FURTADO, 2006). Estes aços, associados a processos de soldagem robustos e com alta velocidade de produção trazem novos conceitos de segurança e eficiência para indústria automotiva, onde podemos citar a Soldagem de Pinos à Arco Elétrico (Stud Arc Welding - SW) comumente usada para unir, principalmente pinos e parafusos (como o próprio nome diz) à peças metálicas (ASM, 1993). O processo de soldagem é realizado através da criação de um arco elétrico entre a ponta do pino e a peça a ser soldada, iniciando o processo de superaquecimento e fusão parcial das áreas a serem soldadas e, em seguida, o contato entre ambas por uma leve pressão garante o processo de união entre as peças. Devido ao curto período de tempo do ciclo de soldagem, simplicidade no uso do equipamento, eficiência de custos e qualidade do produto final esse processo vem chamando atenção dos especialistas da área de soldagem nos mais diversos setores da indústria (NISHIKAWA 2003). Este processo tem sido usado como alternativa de fixação de materiais metálicos, onde milhões de pinos são soldados por este processo na construção civil, indústria de eletrodomésticos, naval e automobilística. Na indústria automotiva, os Pinos Tuckers tem varias funções, dentre elas podemos destacar como parte do conjunto de fixação dos reservatórios de fluidos à carroceria do veículo. Esta fixação se dá através do

processo de torque controlado entre a porca e o pino, prendendo a peça (reservatório) à chapa metálica. Os torques para garantir a fixação destes componentes geralmente são baixos (em torno de 8Nm), onde o principal cuidado é o desprendimento do Pino por uma solda ineficiente ou desgaste dos filetes de rosca da porca e Pino por torque excessivo.

### **1.1 RELEVÂNCIA DO TEMA**

Diante dos grandes desafios de segurança e sustentabilidade enfrentada pela indústria automotiva, novos produtos e processos tem-se destacado, surgindo a necessidade de se estudar novos materiais associados a processos robustos e de alto padrão de qualidade. Dentre esses materiais, chapas estampadas de aço martensítico (Hot Stamping) destacam-se no cenário da indústria, apresentando características mecânicas de elevada resistência associadas à alta capacidade de absorção de impacto. Com relação à soldagem de pinos dessas matérias para a indústria automobilística o processo, ao Arco Elétrico (*Stud Welding*) surge como alternativa para o desenvolvimento de produtos que atendam às especificações de alto padrão de qualidade e com custo competitivo quando comparado a processos tradicionais. A qualidade da junta soldada por sua vez, depende de inúmeros fatores, como o tipo de metal base e pinos aplicados, posição de soldagem e, principalmente, a seleção adequada de parâmetros de soldagem.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo geral**

Otimizar os parâmetros de soldagem para a união entre as chapas Hot Stamping e Pinos M6 utilizando o processo de Soldagem de Pinos (STUD WELDING – SW).

### **2.2 Objetivos específicos**

- Caracterizar através de análise química, ensaios mecânicos e metalografia as amostras de Chapa Hot Stamping e Pino M6 dos lotes utilizados no experimento;
- Otimizar os parâmetros de soldagem dos pinos pelo processo Stud Welding;
- Analisar a microestrutura, as propriedades mecânicas (resistência à tração e ao torque) e o perfil de dureza das juntas soldadas;
- Relacionar as propriedades mecânicas obtidas com a microestrutura da junta soldada.

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 Soldagem

O processo de Soldagem é a união entre dois corpos metálicos utilizando uma fonte geradora de calor, com ou sem aplicação de força entre os corpos, sendo o resultado denominado “solda” (ZAMIN, 2013). Alguns processos, tais como a brasagem e a soldagem por forjamento, têm sido utilizados desde épocas remotas. No Museu do Louvre, na Pérsia, existe, um pingente de ouro com indicações de ter sido obtido pelo processo de soldagem por volta de 4000 A.C.. Mas foi a partir da I Guerra Mundial, que a soldagem se desenvolveu mais rapidamente. Os processos usados até então foram aperfeiçoados, novos processos foram desenvolvidos e novos equipamentos e tecnologias foram incorporados à soldagem (MODENESI, 2012). Em um certo aspecto a soldagem pode ser considerada um processo de fabricação, e nos dias atuais existem uma variedade de métodos de soldagem, onde podemos destacar a Soldagem a Arco, Soldagem por Gás Combustível, Soldagem no Estado Sólido, Brasagem Forte, Brasagem Fraca e Soldagem por Projeção (MARQUES, 2009). De acordo com a Figura 1 é possível observar os principais processos de solda.

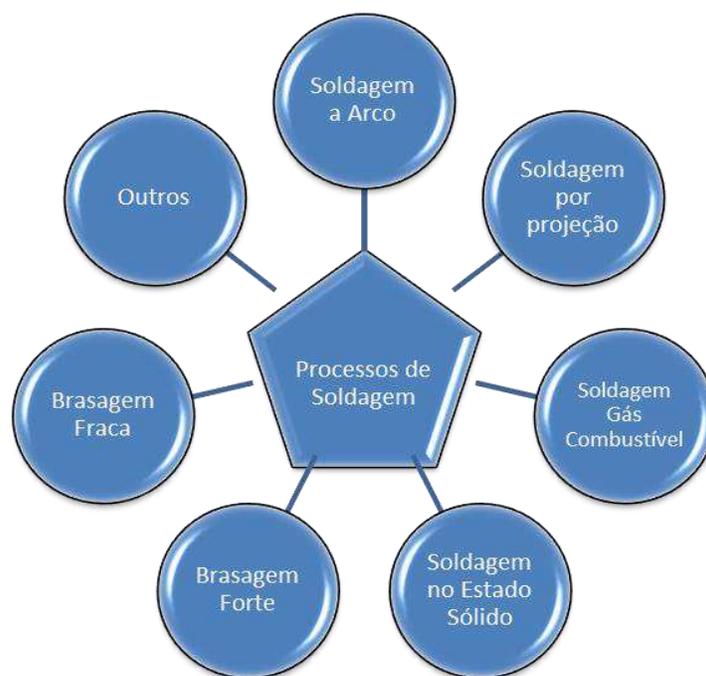


Figura 1 – Principais processos de solda usados na atualidade (MARQUES, 2009).

Nos dias atuais, o processo de soldagem é amplamente empregado na união de componentes de estruturas metálicas e de equipamento para as mais diversas finalidades. As grandes vantagens da soldagem sobre os demais processos de união consistem em sua simplicidade e economia, uma vez que a execução das juntas soldadas requerem quantidade relativamente pequenas de material. Os processos de soldagem estão presentes nos mais variados campos de aplicação, onde podemos destacar a construção naval, estruturas civis, vãos de pressão, tubulações, equipamentos diversos, usinas hidrelétricas, materiais metro e ferroviário, componentes nucleares, indústria automotiva, dentre outros (OKUMURA, 1982).

A classificação dos processos de soldagem estão classificados, principalmente, em função da fonte geradora de energia. Dentre essas fontes podemos citar:

- Fonte mecânica: o calor é gerado por atrito, por ondas de choque ou deformação plástica;
- Fonte química: o calor é gerado por reações químicas exotérmicas;
- Fonte radiante: o calor é gerado por radiação eletromagnética ou por um feixe de elétrons acelerados através de um potencial;
- Fonte elétrica: existem dois casos, no primeiro o calor é gerado pela passagem da corrente elétrica em decorrência do efeito Joule, no segundo caso o calor é gerado pelo arco elétrico decorrente do potencial de ionização (MARQUES, 2009).

Os processos associados ao uso da fonte elétrica vem crescendo nos últimos anos, principalmente a soldagem obtida pelo calor da passagem da corrente elétrica, onde podemos citar o processo de Soldagem a Arco Elétrico de Pinos, também conhecido como *Stud Welding* (termo em inglês).

### **3.2 Soldagem de Pinos à Arco Elétrico (Stud Welding)**

A Soldagem de Pinos à Arco Elétrico (Stud Welding) envolve os mesmos princípios elétricos, mecânicos e metalúrgicos encontrados em qualquer outro processo de soldagem a arco. Este processo é caracterizado pelo aquecimento do Pino e do Metal Base através do arco elétrico formado entre ambos. Quando as superfícies a serem unidas estão adequadamente aquecidas, elas são colocadas em contato com uma leve pressão. Após este contato, a tensão de arco vai a zero volts e a corrente de solda é desligada. A Figura 2 mostra de forma resumida as principais etapas do processo de soldagem de pinos. Bocais cerâmicos são comumente usados entre o pino e a peça

para concentrar o calor do arco e limitar a entrada de ar na região aquecida. O processo é muito rápido, apresentando tempo de operação inferior a um segundo, e simples, utilizando em geral, pistolas manuais ou automáticas (MODENESI, 2006).

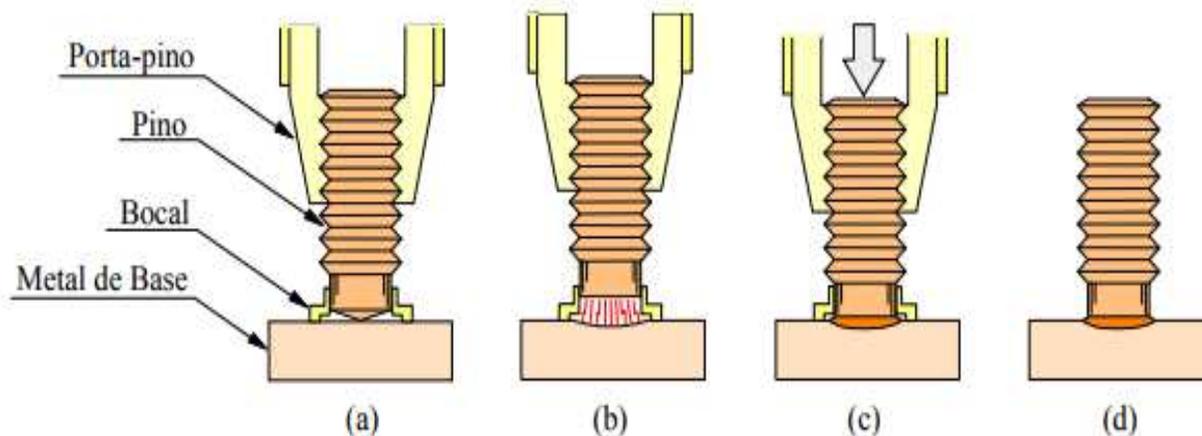


Figura 2 – Processo de Soldagem de Pinos mostrando a) posicionamento da tocha, b) abertura do arco e levantamento do pino, c) término do período de arco com pino pressionado contra o metal base e d) soldagem completa (MONDENESE, 2006).

A seção transversal da solda é mostrada na Figura 3, com as 5 principais áreas identificadas pelas letras de A à E. A zona A é formada apenas pelo região do pino, que não sofre efeitos da temperatura durante o processo de soldagem. A Zona B é a transição entre o Pino e a zona de fusão (ZF), onde o aporte térmico transforma a região do Pino em Zona Termicamente Afetada (ZTA). A região de fusão da solda é identificada pela Zona C, sendo intermediárias entre as ZTA's do Pino e do metal base, caracterizada pela região de maior aquecimento durante o processo (Zona de Fusão – ZF). A região D é característica por ser a Zona Termicamente Afetada (ZTA) do metal base, sofrendo forte influencia do calor durante a soldagem. A Zona E é o metal base (MB) propriamente dito, não afetado pelo fenômeno de aquecimento (CHAMBERS, 2001).

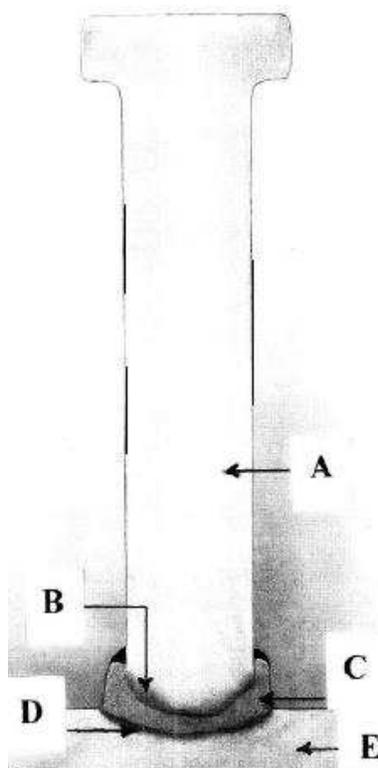


Figura 3 – Seção transversal típica de um Pino Tucker soldado na base metálica e as zonas características (CHAMBERS, 2001).

Samardzic e colaboradores mostram que os parâmetros de soldagem (corrente e tempo) e a geometria do metal base apresentam grande influência nas características da solda, principalmente a Zona de Fusão (ZF). Durante análise, fica evidente que o aumento da corrente e do tempo de soldagem resulta no aumento da profundidade de fusão e que, a corrente é o fator mais importante na qualidade do produto final, seguido do tempo e da geometria do metal base. A Figura 4A mostra de forma esquemática a medição de penetração ( $d$ ) da solda por microscopia. Samardzic também avaliou as interações dos fatores e observou que são significativamente baixa através de experimentos fatoriais. Através da Figura 4B, Samardzic apresenta uma macrografia com o esquema de medição do perfil de dureza Vickers, onde 2 amostras soldadas com diferentes combinações de processo (Amostra 1B: corrente de 500A e 0,35 t/s / Amostra 4B: 600A e 0,45 t/s) são analisadas. A partir das análises do perfil de dureza nas amostras 1B e 4B, observou-se que com incremento nos parâmetros de soldagem há uma mudança significativa da característica da zona endurecida na área soldada. Na Figura 5, os autores mostraram os resultados da medição,

onde é possível observar o aumento nos valores de dureza na região de solda e, também, um maior comprimento da zona endurecida (área marcada) na amostra 4B quando comparado a amostra 1B.

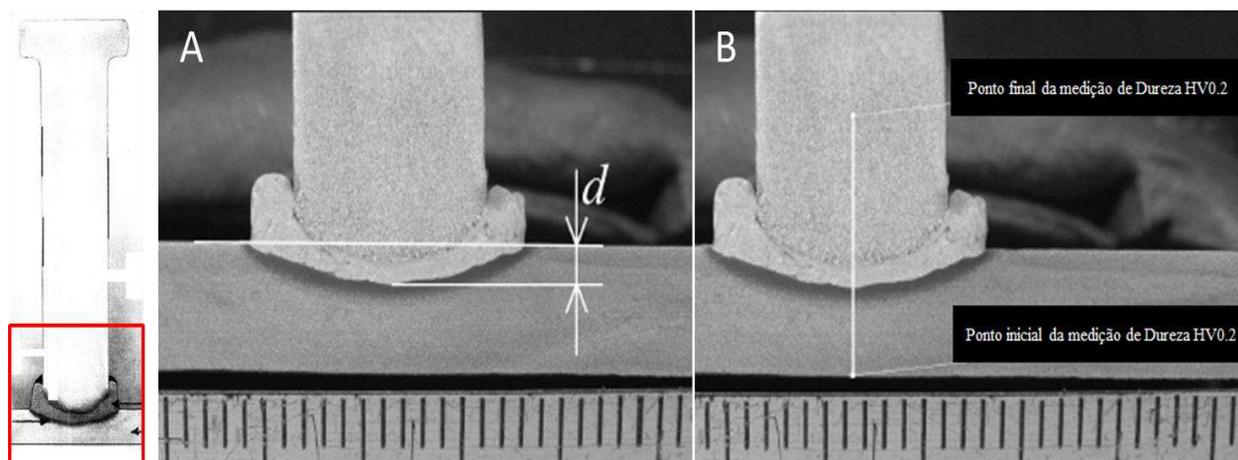


Figura 4 – Esquema de medição (a) penetração da solda e (b) perfil de dureza Vickers realizado em duas amostras soldadas com diferentes parâmetros de processo (SAMARDZIC, 2008).

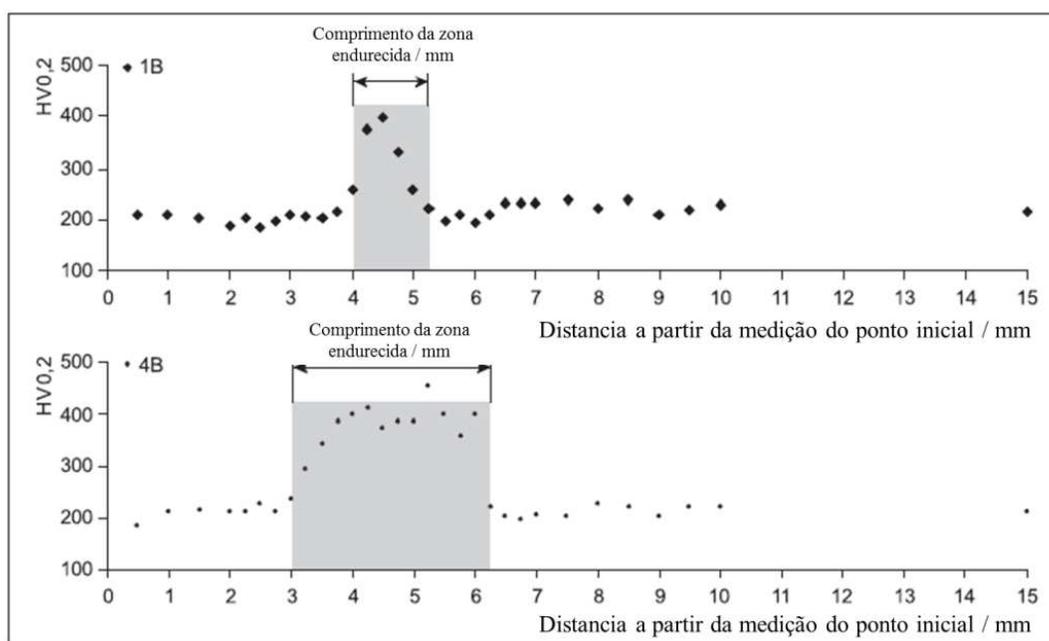


Figura 5 – Comportamento da solda na região da zona endurecida das amostras 1B e 4B (SAMARDZIC, 2008).

A soldagem de pinos à arco elétrico é um processo bem estabelecido para uma variedade de espessuras de materiais, sendo hoje muito empregado em vários setores da indústria, como a de construção civil, eletrodomésticos, indústria naval e automobilística (RAMASAMY, 2002).

O crescimento do processo de soldagem de pinos foram realizados com a disponibilidade de uma gama de parafusos e pinos de soldagem, com o desenvolvimento de equipamentos de produção de alta velocidade e a seleção adequada de técnicas de processo de soldagem. Corrente e tempo de soldagem são parâmetros que estão diretamente relacionados à qualidade da solda, bem como a distância entre o Pino e a chapa (chamado Lift) também devem ser controlados durante o processo. A qualidade dos materiais, a geometria da junta a ser soldada, a limpeza superficial das peças, influenciam diretamente nas propriedades do produto final (SHOUP, 1976).

Para o processo de Soldagem de Pinos, geralmente aplica-se pistolas que podem variar de acordo com a necessidade do usuário. Estas podem ser manuais, semiautomáticas e automáticas, mas sempre apresentam princípios de funcionamento e composição similar entre elas. A Figura 6 mostra de forma esquemática uma pistola manual para processos de soldagem de Pinos. A pistola possui um circuito ativado por gatilho com um mecanismo de elevação para retirar o pino do material de base e iniciar o arco de soldagem. Os principais componentes deste equipamento são o mandril de apoio ao Pino, duas hastes, um pé de apoio, arruela de fixação do pino e bocal de proteção do arco elétrico, conforme ilustrado na Figura 5 (CHAMBERS, 2001).

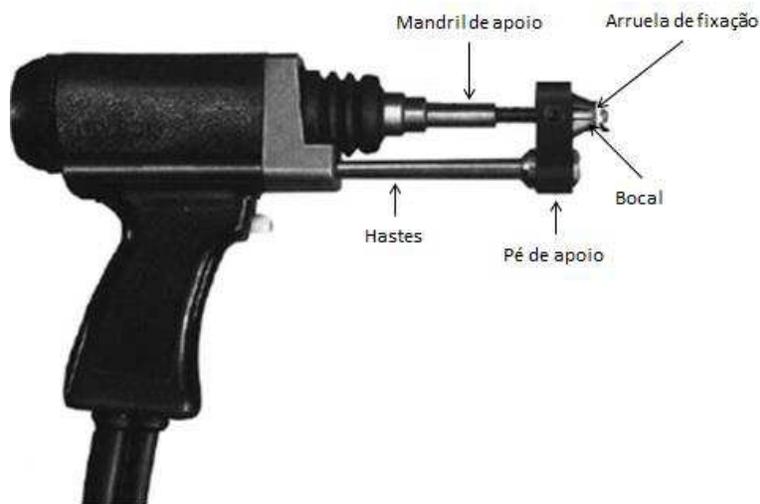


Figura 6 - Pistola manual usada para processos de Soldagem de Pinos (CHAMBERS, 2001).

Alguns cuidados devem ser tomados durante o processo de soldagem, como isenção de sujeira, óleos, graxas, tinta, oxidação na superfície a ser soldada, e de materiais não soldáveis que dificultem a soldagem.

O processo de soldagem de pinos apresenta inúmeras vantagens, dentre estes podemos citar:

- Não é necessário o uso de metal de adição;
- Não há necessidade de furar o material base, evitando sem infiltrações e corrosão;
- O uso de gás é opcional;
- O ciclo de solda é realizado em ms;
- Sistema é de fácil automação industrial;
- É possível soldar chapas a partir de 0,6mm de espessura, inclusive chapas de aço martensíticos.

### 3.3 Chapas de Aço Martensíticos

As chapas de aços martensíticos, também conhecidas como aços ao boro, são obtidas pelo processo de estampagem a quente, também conhecidas como *Hot Stamping*. Esse processo é composto basicamente por 3 etapas: a primeira consiste no aquecimento da chapa entre 900 e 950°C, de 5 a 10 minutos, ocorrendo a total austenitização na microestrutura do aço; a segunda etapa é caracterizada pela conformação do aço na prensa, ainda na fase austenítica, garantindo uma melhor deformação de peças com geometria complexa. Esse processo é possível devido ao baixo limite de escoamento em altas temperaturas; a terceira etapa ocorre juntamente com a segunda, onde o resfriamento da chapa se inicia com o contato da chapa nas matrizes, e deve atingir um gradiente superior a 27°C/s. Sendo assim, as características mecânicas de elevada resistência são alcançadas, pela transformação da austenita para a fase martensítica, que se inicia em faixas que variam de 200 a 400 °C de acordo com a composição química do aço (LONGHI, 2013). A Figura 7 mostra de forma simplificada as etapas do processo de conformação típico de chapas de aço martensíticos.

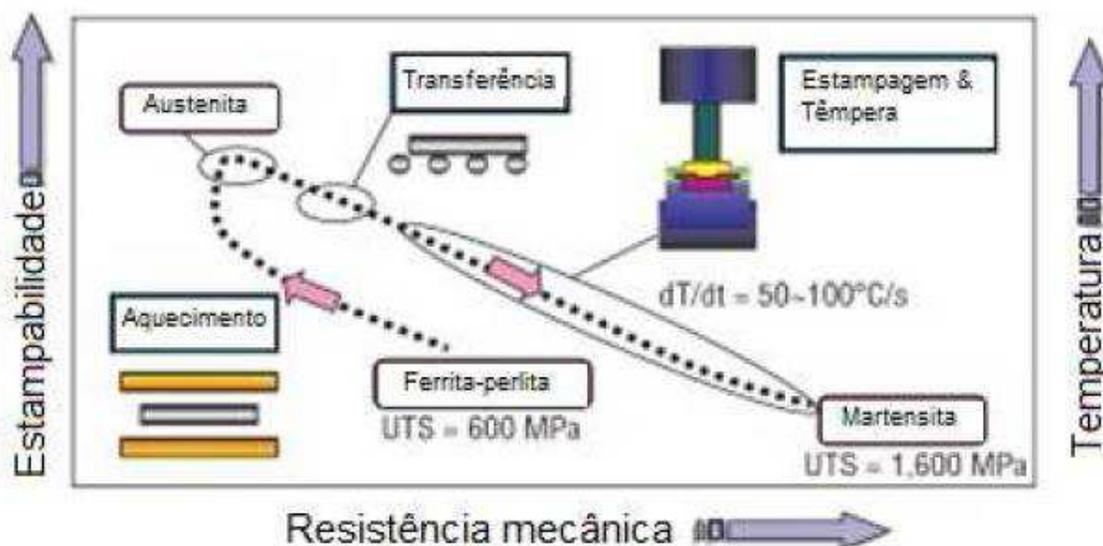


Figura 7 - Evolução da microestrutura de um aço martensítico na operação de estampagem (LONGHI, 2013).

Na estampagem a quente o aço ao boro mais utilizado, versão 22MnB5, apresenta uma composição química favorável à formação de martensita a uma taxa de resfriamento baixa. Na Figura 8 encontram-se os projetos de ligas dos principais fornecedores dessa qualidade de aço:

	Usibor 1500	Docol Boron 02	Racold B24 Raex B24	SALZGITTER 22MnB5	USIMINAS 22MnB5
C %	< 0,25	0,20-0,25	0,20-0,255	0,22-0,25	0,19-0,25
Si %	< 0,35	0,20-0,35	< 0,40	0,20-0,30	< 0,40
Mn %	< 1,40	1,00-1,30	< 1,43	1,20-1,40	1,10-1,40
P %	--	< 0,030	< 0,025	< 0,020	< 0,025
S %	--	< 0,010	< 0,015	< 0,005	< 0,015
Cr %	< 0,30	0,14-0,26	0,18-0,44	0,11-0,20	0,15-0,35
B %	< 0,0050	< 0,0050	< 0,0050	0,002-0,0035	< 0,0050

Figura 8 – Composição química dos aços ao boro dos principais fornecedores mundiais (MIRANDA, 2015).

Os aços martensíticos são assim chamados, por apresentar uma microestrutura composta por martensita, onde a fase inicial e final numa transformação martensítica têm uma relação cristalográfica específica. Os movimentos de átomos durante tal transformação são cooperativos, mudando a forma da região transformada e provocando um declive na superfície (inclinação) devido a interseção entre a nova região formada com a fase de origem (austenita). Na Figura 9 é possível observar uma placa de martensita obtida a partir do cisalhamento e inclinação da

superfície do material durante o processo de transformação. A definição de transformação martensítica inclui várias formas resultantes, subestruturas e estruturas cristalinas de unidades martensíticas, todas as quais podem variar com a composição de um dado material. As transformações martensíticas ocorrem em ligas à base de ferro, sistemas não ferrosos e, principalmente, em aços (ASM, 1992).

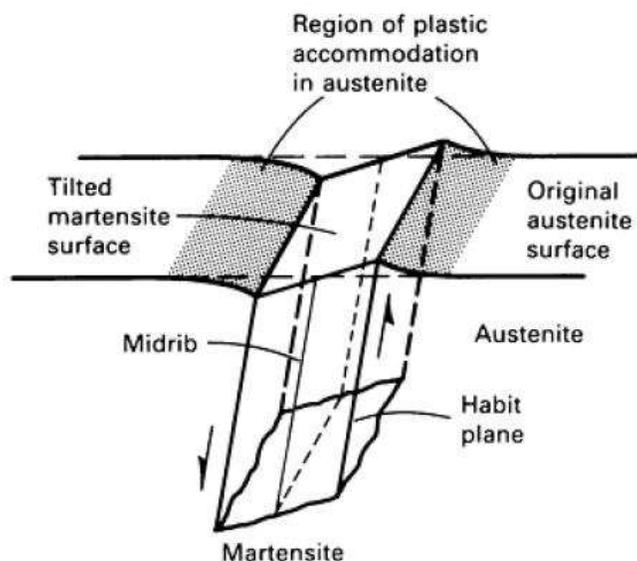


Figura 9 - Esquema do cisalhamento e inclinação da superfície na formação de uma placa de martensita (ASM, 2009).

Dois microestruturas martensíticas muito diferentes são encontradas em ligas ferro-carbono: do tipo ripas e do tipo placas. A martensita do tipo placas é característica em ligas ferro-carbono que contêm concentrações de carbono superiores a 0,6%p C, apresentando uma aparência em formato de agulha ou em formato de placas. As estruturas de martensita em placas tem altas resistências mecânicas, mas não são dúcteis, e frequentemente contem microtrincas decorrente do impacto entre placas, que podem iniciar falhas subsequentes (HUALLPA, 2011). A Figura 10 mostra a martensita característica do tipo placas, onde os grãos de martensita lenticular são mostrados como as regiões escuras, enquanto a fase branca é composta de austenita retida, que não se transformou durante o resfriamento rápido.

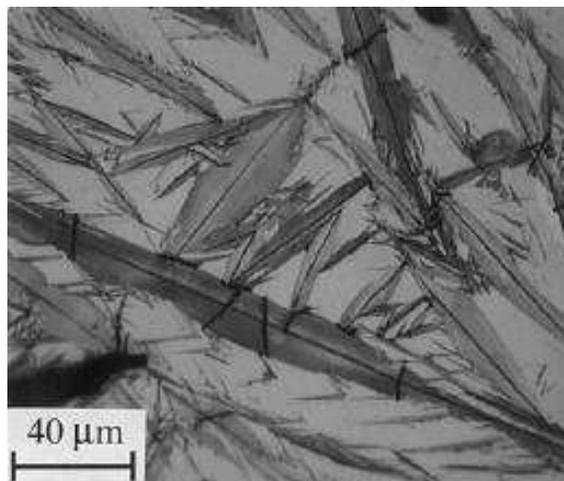


Figura 10 - Microestrutura martensítica em forma de placas (HUALLPA, 2011).

Para ligas que contêm menos do que cerca de 0,6%p C, os grãos de martensita se formam como ripas, com aparência de placas longas e finas, organizadas lado a lado, alinhados paralelamente uns aos outros. As ripas estão agrupadas em entidades estruturais maiores, conhecidas por blocos. Para revelar os detalhes deste tipo de martensita é necessário o uso de técnicas de micrografia eletrônica. A Figura 11 mostram a morfologia da martensita em ripas. Este tipo de martensita apresenta alta dureza e maior ductilidade, porém menor resistência mecânica quando comparada à martensita do tipo placas (HUALLPA, 2011). Neste trabalho será utilizado a chapa hot stamping composta por microestrutura do tipo martensita em ripas, com composição química nominal de carbono variando entre 0.2 à 0.6%, apresentando melhor condição de estampagem.

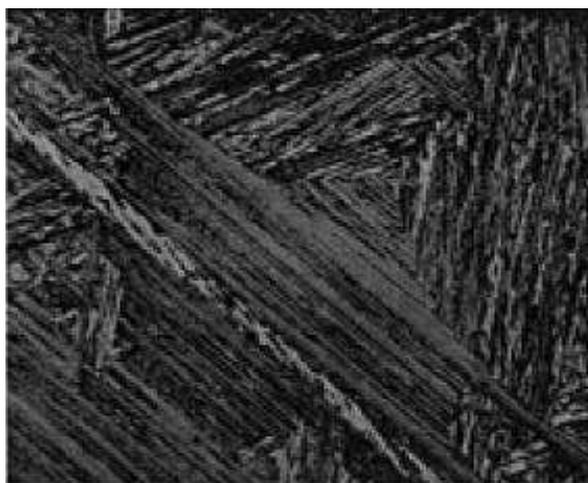


Figura 11 - Microestrutura martensítica em forma de ripas. Ampliação 175X (ASM, 2009).

Devido à elevadas temperaturas durante o processo de estampagem, as chapas de aço martensíticas apresentam revestimento anti-corrosivo distinto das chapas estampadas à temperatura ambiente (compostas basicamente por uma liga de zinco), também conhecidas como chapas zincadas. No caso das chapas hot stamping, o revestimento (camada superficial) é composto basicamente por uma liga binária de AlSi, com espessura nominal de 30  $\mu\text{m}$  (SOUZA, 2013). A camada intermediária na interface com o substrato de aço tem uma espessura de 5-10  $\mu\text{m}$ , com composição básica de  $\text{FeAl}_3$  e  $\text{Fe}_2\text{Al}_5$ . A Figura 12 mostra de forma esquemática as camadas que revestem a chapa martensítica. A espessura do revestimento pode variar ligeiramente devido ao processo de aluminização por imersão a quente. Enquanto o revestimento AlSi tem uma temperatura de fusão de aproximadamente 650-700°C, os compostos  $\text{FeAl}_3$  e  $\text{Fe}_2\text{Al}_5$  da camada intermediária têm uma temperatura de fusão mais alta, em torno de 1000-1100°C (EHLING, 2009).

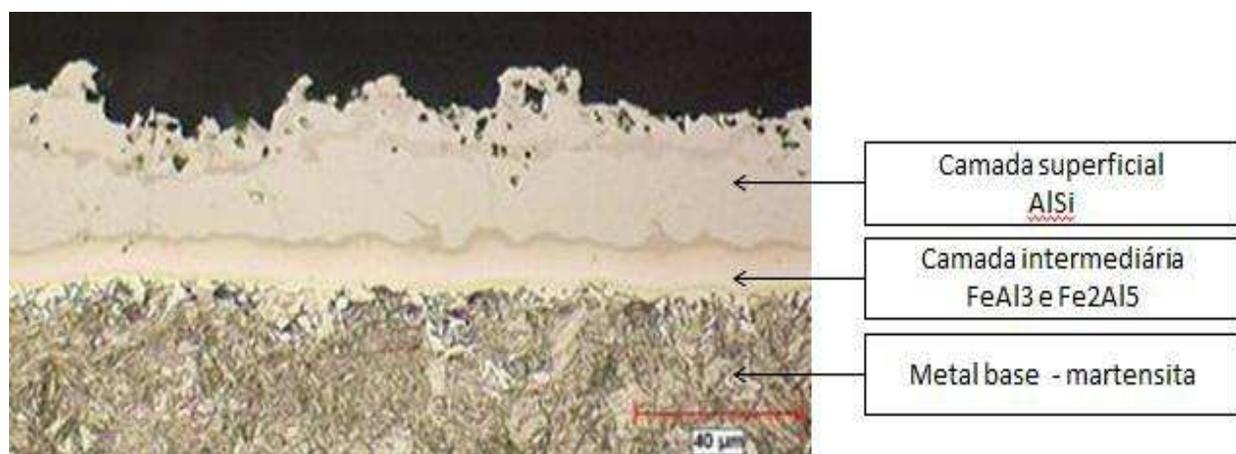


Figura 12 - Microscopia óptica do revestimento após estampagem a quente (EHLING, 2009)

Uma curva típica CCT para um aço 22MnB5 é mostrada na Figura 13. Nesse exemplo o material foi aquecido a uma temperatura de austenitização de 900°C por cinco minutos. Os números circulados correspondem aos valores de dureza Vickers (VH10) da microestrutura final de cada curva. Para uma taxa de aquecimento de 5°C/s a temperatura de início (AC1) para o surgimento da austenita foi de 720°C e a temperatura de transformação da ferrita primária para austenita (AC3) foi de 880°C. No resfriamento, as temperaturas de início (Ms) e final (Mf) da martensita foram, respectivamente, 410°C e 230°C. Pode-se verificar que a partir de uma taxa de resfriamento de 25°C/s a microestrutura foi totalmente martensítica (MIRANDA, 2015).

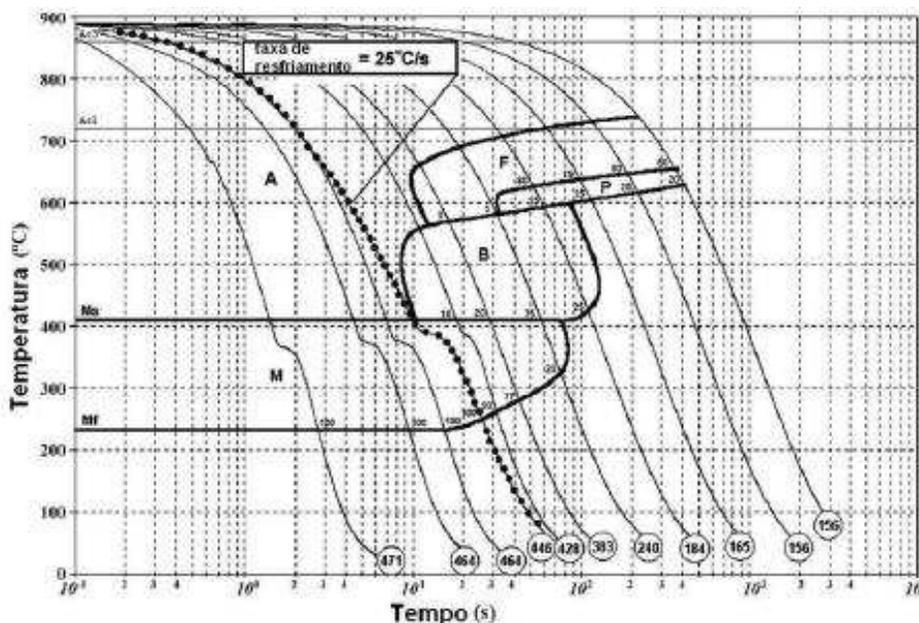


Figura 13 - Diagrama CCT típico para o aço 22MnB5 (MIRANDA, 2015).

### 3.4 Metalurgia da soldagem dos aços martensíticos

Embora os aços martensíticos necessitem de uma certa atenção durante o processo de soldagem, praticamente todos os processos comumente utilizados para outros aços também se aplicam para esta classe.

#### 3.4.1 Solda Arco Elétrico

Suh e colaboradores mostram através da Figura 14, uma microestrutura real e um esquema de uma junta soldada pelo processo GMAW com chapas sobrepostas. Apenas o metal de solda e a ZTA identificada por ZTA1, ZTA2 e ZTA3 serão discutidos por se tratar de um aço martensítico. As microestruturas do metal de solda relacionadas ao aporte térmico são mostradas na Figura 15, onde observou-se que a microestrutura na zona de fusão é influenciada pelo calor durante o processo de soldagem. Martensita foi observada na solda com menor entrada de calor da soldagem (0,29KJ/mm), enquanto a ferrita acicular e martensita foram observadas nas soldas com maior aplicação de calor (0,48 e 0,67kJ/mm). Suh observou que o aspecto da distribuição da

microestrutura na ZTA permaneceu praticamente a mesma, independentemente do aporte térmico durante o processo de soldagem. Na Figura 16A, ZTA1 foi austenitizado acima de A3 e depois rapidamente resfriado, resultando na formação de martensita. Na Figura 16B, a temperatura em ZTA2 foi elevada acima de A1 e depois arrefecida, resultando na formação de múltiplas fases de martensita, bainita e ferrita. Na Figura 16C, a temperatura em ZTA3 foi elevada abaixo de A1 e depois arrefecida, formando martensita revenida.

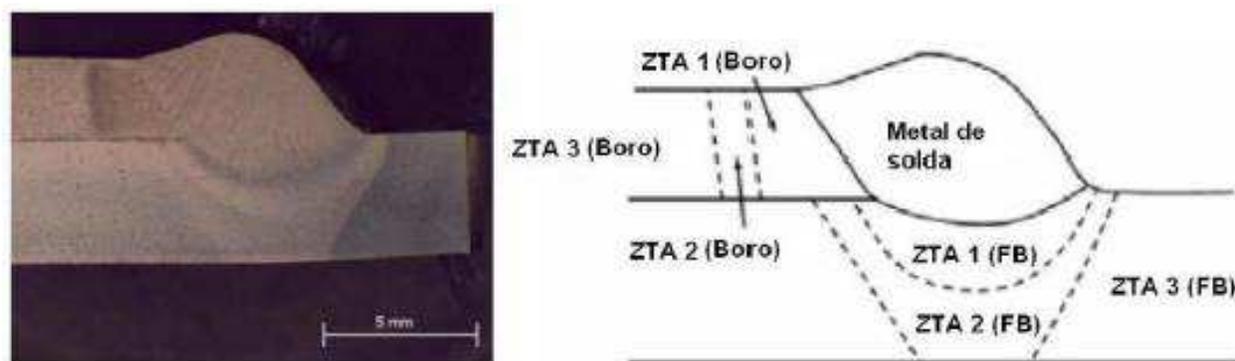


Figura 14 – Seção transversal da solda pelo processo GMAW dos aços hot stamping (SUH, 2011).

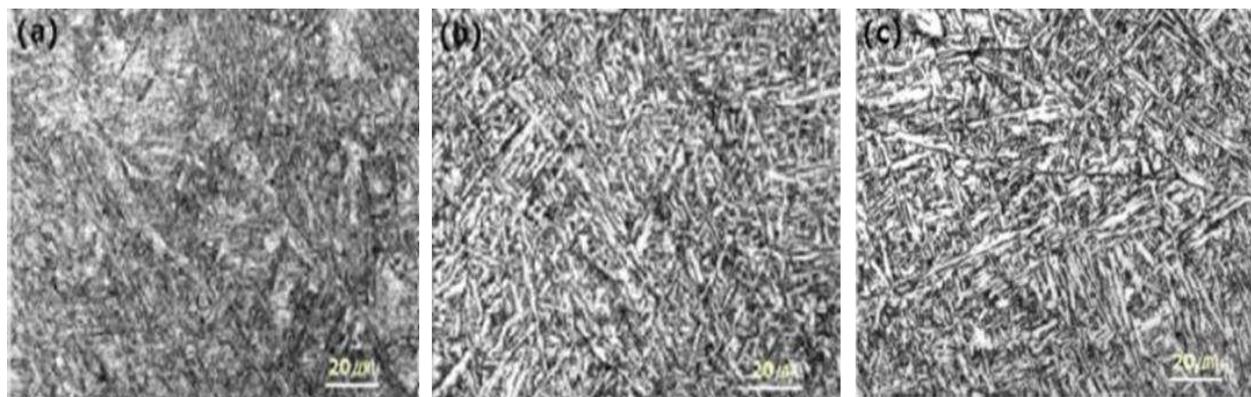


Figura 15 - Microestruturas do metal de solda de junta soldada pelo processo GMAW de um aço ao boro e outro FB590 com os aportes térmicos (a) 0,29 kJ/mm, (b) 0,48 kJ/mm e (c) 0,67 kJ/mm (SUH, 2011).

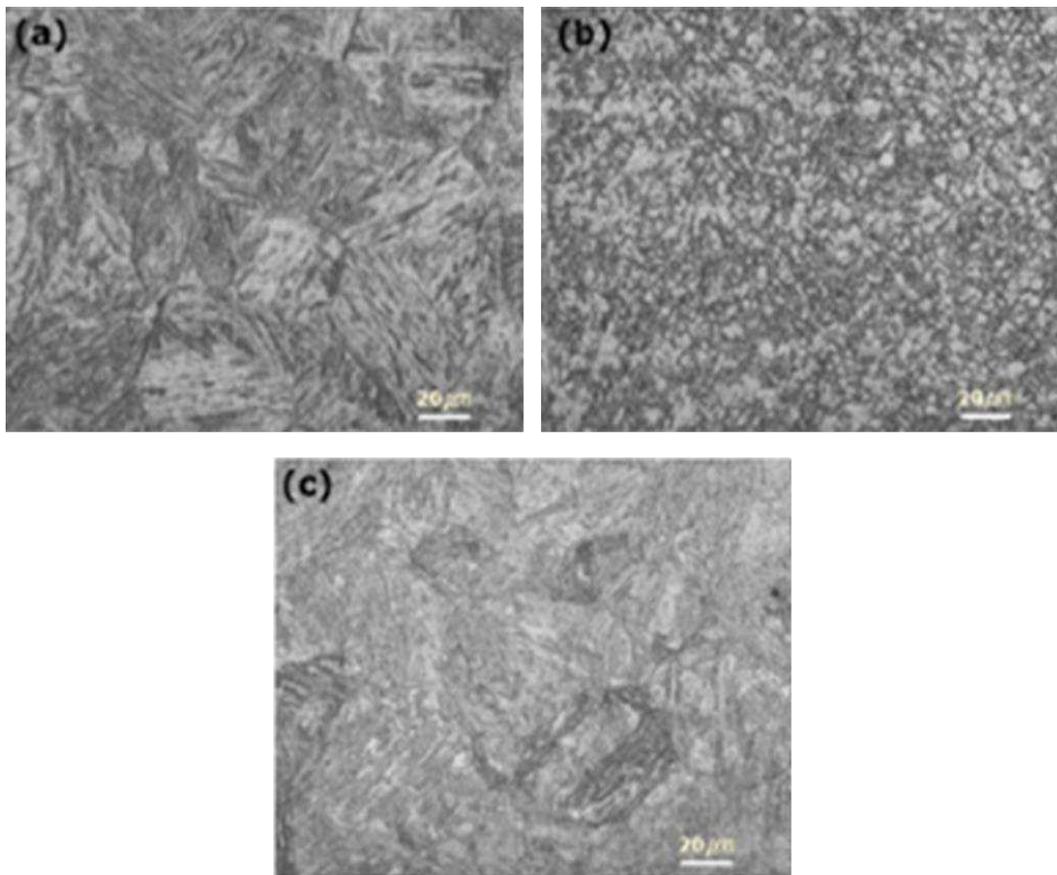


Figura 16 – Microestrutura da ZTA formada na diferentes regiões (a) ZTA 1, (b) ZTA2 e (c) ZTA3 (SUH, 2011).

De acordo com a Figura 17, Suh e colaboradores mostram variação no perfil de dureza entre o metal de solda e a zonas termicamente afetadas (ZTA's) para diferentes condições de processo (aporte térmico). A ZTA 1 mostra valores de dureza mais elevados quando comparado ao metal de solda, relacionando com os grãos mais grosseiros formados nessa região. A ZTA 2 apresenta redução de dureza, indicando que a taxa de resfriamento nessa região formou grãos mais finos devido o efeito do revenimento. Na ZTA 3 os valores de dureza voltam a crescer, ficando em valores muitos próximos ao do metal de solda. A microestrutura nessa região também apresentam grãos mais grosseiros quando comparado aos grão da ZTA 2 (Figura 15). A ZTA1 (FB), ZTA2 (FB) e ZTA3 (FB) mostradas na Figura 17 não são passíveis de análise por se tratar de material não martensítico.

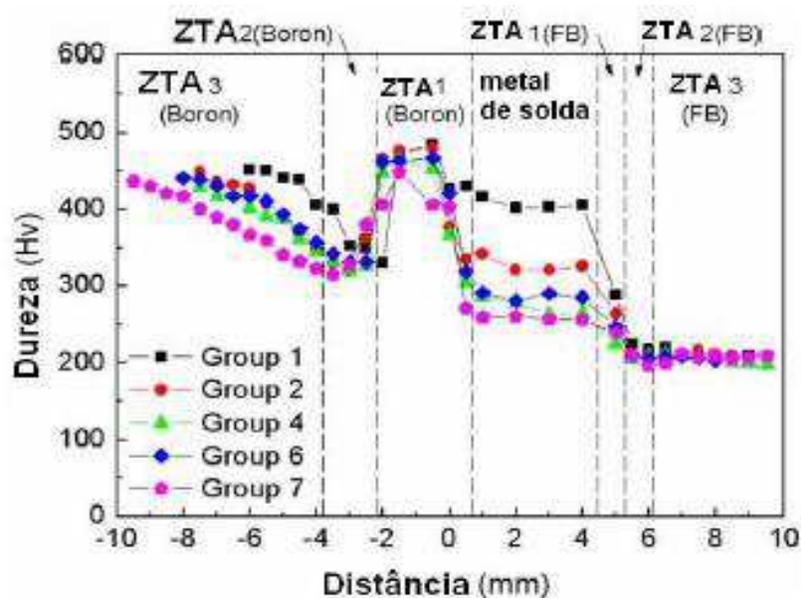


Figura17 - Perfil de dureza do metal de solda e ZTA da união pelo processo GMAW dos aços ao boro e FB590 (SUH, 2011).

### 3.4.2 Soldagem a laser

Kim e colaboradores mostram o perfil de Dureza HV em relação a seção da solda laser na Figura 18. Observa-se valores elevados de dureza nas regiões do metal base (ponto 1), onde há uma microestrutura formada apenas por martensita. Uma queda nos valores de dureza na região da ZTA é observada, este fenômeno está associado a formação de ferrita nessa região (ponto 2). Na região de fusão, notou-se que a dureza voltou a crescer consideravelmente, chegando a atingir valores superiores ao metal base. Através da Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) foi observado a heterogeneidade e formação das microestruturas característica para cada região da solda. Zhengwei e colaboradores observaram que a menor dureza na ZTA está localizada na região onde a temperatura máxima atingida foi próxima à temperatura AC1, também associando essa menor dureza com a formação de ferrita. Na Figura 19 observa-se o comportamento do perfil de dureza da junta soldada para várias velocidades de soldagem, onde os maiores valores de dureza estão localizados na zona de fusão (ZF), depois a dureza cai drasticamente na ZTA e volta a se aproximar do metal base.

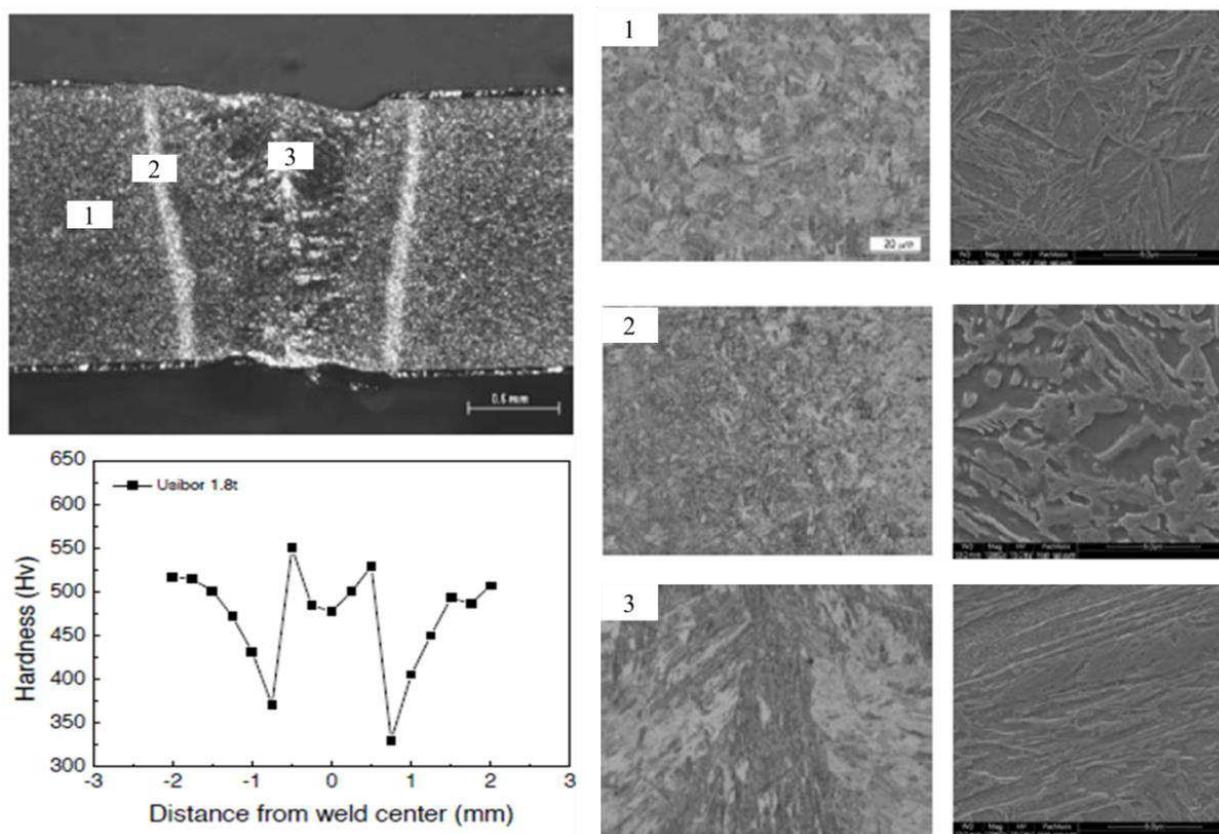


Figura 18 – Perfil de Dureza e microestruturas formadas no Metal Base, ZTA e ZF da solda laser (KIM, 2010).

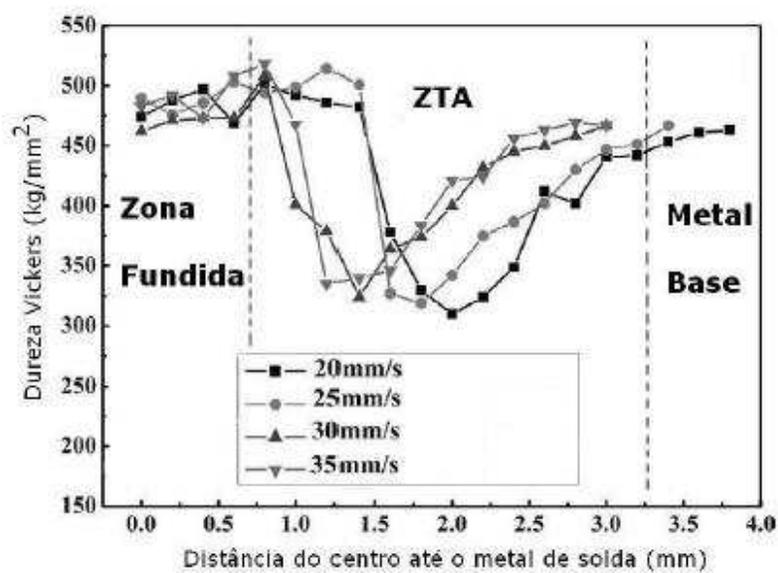


Figura 19 – Perfil de Dureza da junta soldada a laser do aço martensítico (22MnB5) para várias velocidades de soldagem (ZHENGWEI, 2011).

## Solda a Ponto

Por microscopia ótica, Miranda mostra os locais de cada região de solda e as microestruturas características de um ponto de solda entre o aço martensítico (22MnB5 – chapa superior) e um Dual Phase (DP800-chapa inferior). Na Figura 20 os pontos de 1 a 5 pertencem a ZTA e ZF do aço 22MnB5. O metal base da chapa inferior é composta por outro aço, não sendo objetivo de estudo para este trabalho.

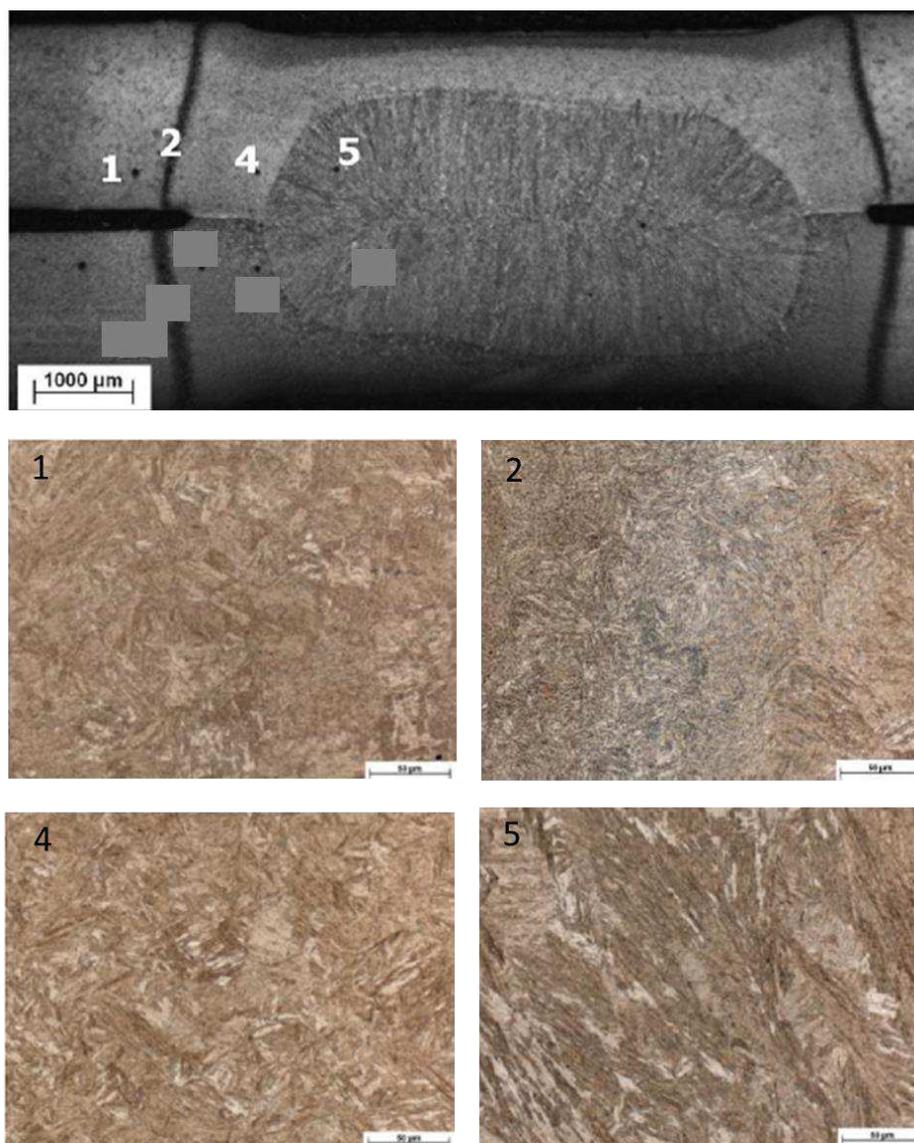


Figura 20 – Microestrutura formada de uma solda ponto entre uma aço martensítico 22MnB5 e um aço DP800 (MIRANDA, 2015).

A alta temperabilidade dessa aço em conjunto com altas taxas de resfriamento, propicia a formação de constituintes de baixa temperatura de transformação, como se verifica na maioria das regiões de avaliação mostradas na Figura 18. Durante análise, Miranda mostra que a ZTA do aço 22MnB5 pode ser separada em três regiões, onde o ponto 1 corresponde à região revenida, provavelmente foi submetida a uma temperatura de pico abaixo de AC1, causando um revenimento na microestrutura prévia; o ponto 2 à parcialmente temperada, atingindo temperatura entre AC1 e AC3. Como a região está acima de AC1, uma parte da microestrutura foi austenitizada e posteriormente transformada numa martensita diferente da original do metal base. O ponto 4 corresponde à região temperada, em que o aço alcançou uma temperatura acima da linha AC3, transformando a microestrutura prévia totalmente em austenita. Dessa forma, o resultado foi uma microestrutura martensítica. Segundo Tamiti, a variação da microestrutura através do processo de soldagem é o principal fator metalúrgico que rege o comportamento das falhas de soldas por pontos em aços de resistência. A Figura 21a e 21b mostram uma macroestrutura de um aço martensítico com perfis de dureza, indicando que uma microestrutura heterogênea foi criada através da soldagem devido ao gradiente de temperatura produzido no processo. No perfil de dureza, observa-se uma redução nos valores de dureza em determinada região da ZTA, associando este fenômeno a formação de uma microestrutura de fase dupla de ferrita e martensita.

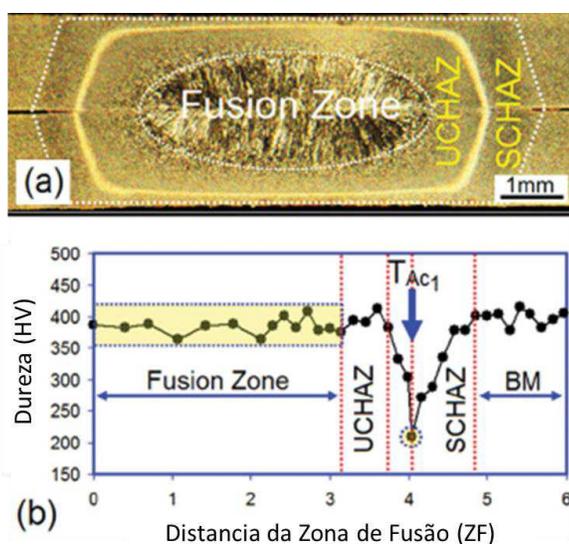


Figura 21 – Típica (a) microestrutura e (b) perfil de dureza do ponto de solda do aço martensítico (TAMITI, 2016).

Tamiti mostra através da Figura 22 o efeito da corrente de soldagem na dureza da ZTA e na relação de “amaciamento” dessa região. Na Figura 18a, percebe-se que o perfil de dureza da ZF é independente desse parâmetro de soldagem (linha vermelha do gráfico). Devido a taxa de resfriamento muito alta do processo e alta temperabilidade do aço investigado, o efeito de entrada de calor na microestrutura final de FZ pode ser ignorado. A relação de dureza (amaciamento) entre o metal base (MB) e a ZF mostra-se constante com a modificação de corrente (linha azul). Na Figura 18b, observou-se redução no perfil de dureza de 258HV para cerca de 200HV, aumentando a corrente de soldagem de 7 para 12kA. Isto é devido ao fato de que aumentar a entrada de calor causada pelo aumento da corrente de soldagem prolonga o tempo disponível para a difusão de carbono durante o revenimento. Quando a corrente passa de 12 para 15kA os valores de dureza se mantêm praticamente constante. A relação de amolecimento (definida como a relação entre a dureza mínima de SCHAZ e a dureza da BM) variou de 0,52 a 0,65, dependendo da corrente de soldagem.

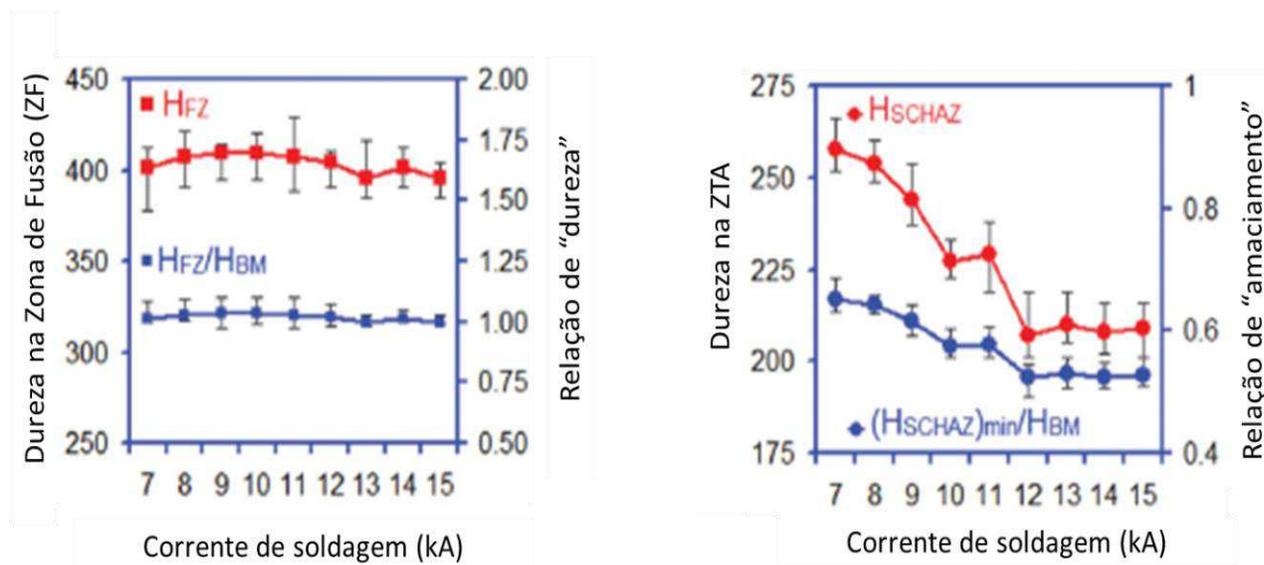


Figura 22 – Perfil de dureza em relação a corrente de soldagem (a) na Zona de Fusão e na (b) Zona Termicamente Afetada (TAMITI, 2016).

Analisando a influencia da corrente e do tempo de soldagem em relação à resistência da solda, Jong e colaboradores observaram que o aumento da corrente resulta no aumento significativo nos valores de força de tensão cruzada da solda (Figura 23). Um incremento adicional da força de tensão de cisalhamento não apareceu na corrente maior que 7 kA. Para

corrente de 4 e 5kA, os valores de força de tensão tem um aumento significativo com aumento do tempo de soldagem. Valor de corrente muito baixa (3kA) não se observa elevação nos valores de tensão cruzada.

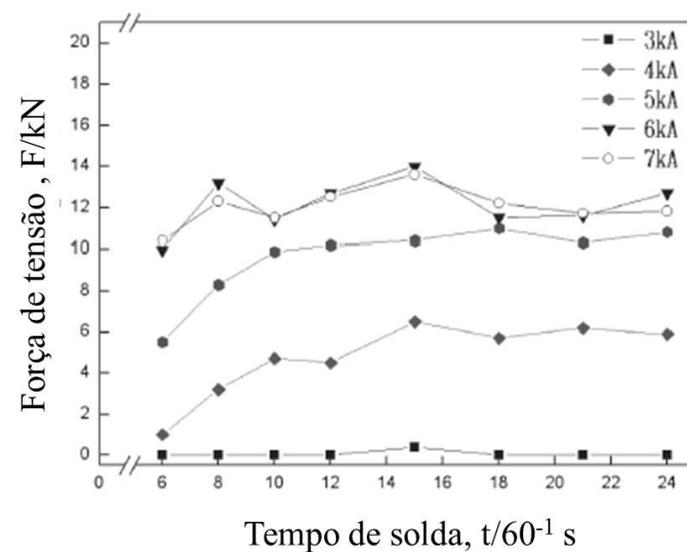


Figura 23 – Variação da força de tensão cruzada com tempo e corrente de soldagem (JONG, 2011).

## 4. MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1 Materiais

- Os materiais utilizados foram Chapas Hot Stamping de Ultra Alta Resistencia, com as seguintes propriedades mecânicas: limite de resistência à tração 1300 a 1650 MPa, limite de escoamento 950 a 1250 MPa e alongamento  $\geq 6\%$ . Dureza de núcleo com valores compreendido de 400 a 500HV, e dureza superficial de 41 a 49HRC. Composição química da chapa está descrita na Tabela 1. A microestrutura é composta por martensita revenida, apresentando camada superficial revestida a base de AlSi (por imersão), com espessura nominal variando entre 30 a 50  $\mu\text{m}$ . As características do material tem como referência a norma DIN EN 10083-3:2007-01.

Tabela 1 – Composição química nominal da chapa hot stamping

Valor	Composição química do aço (%)										
	C	Mn	P	S	Si	Cr	Mo	B	Ti	Al	N
Especificado	0.20	1,0	Max.	Max.	0.15	Max.	Max.	0.0005	0.02	0.02	Max.
	à	à	0.030	0.01	à	0.50	0.35	à	à	à	0.009
	0.26	1.4			0.40			0.005	0.07	0.06	

- Pino de aço 1006 (nome comercial CB4FF KD – com diâmetro nominal de 6mm, Pino M6) com percentual de carbono de acordo com a Tabela 2. O Pino M6 é bastante aplicado para fixação de componentes plásticos à carroceria dos veículos, onde o torque especificado fica em torno 8Nm e, geralmente seu processo de fixação à carroceria se dá por meio de soldagem à arco elétrico, também conhecido como soldagem de Pino Tucker (Stud Welding).

Tabela 2 – Valores de composição química do Pino M6

Valor	Composição química do aço (%)				
	C	Mn	Si	P	S
Especificado	Max. 0.06	0.20 à 0.40	Max. 0.10	Max. 0.040	Max. 0.040

## 4.2 Metodologia

O fluxograma aplicado a metodologia de caracterização das amostras e realização das análises nas amostras de solda é mostrado na Figura 24. Todos os ensaios foram realizados no Laboratório de Materiais FCA.

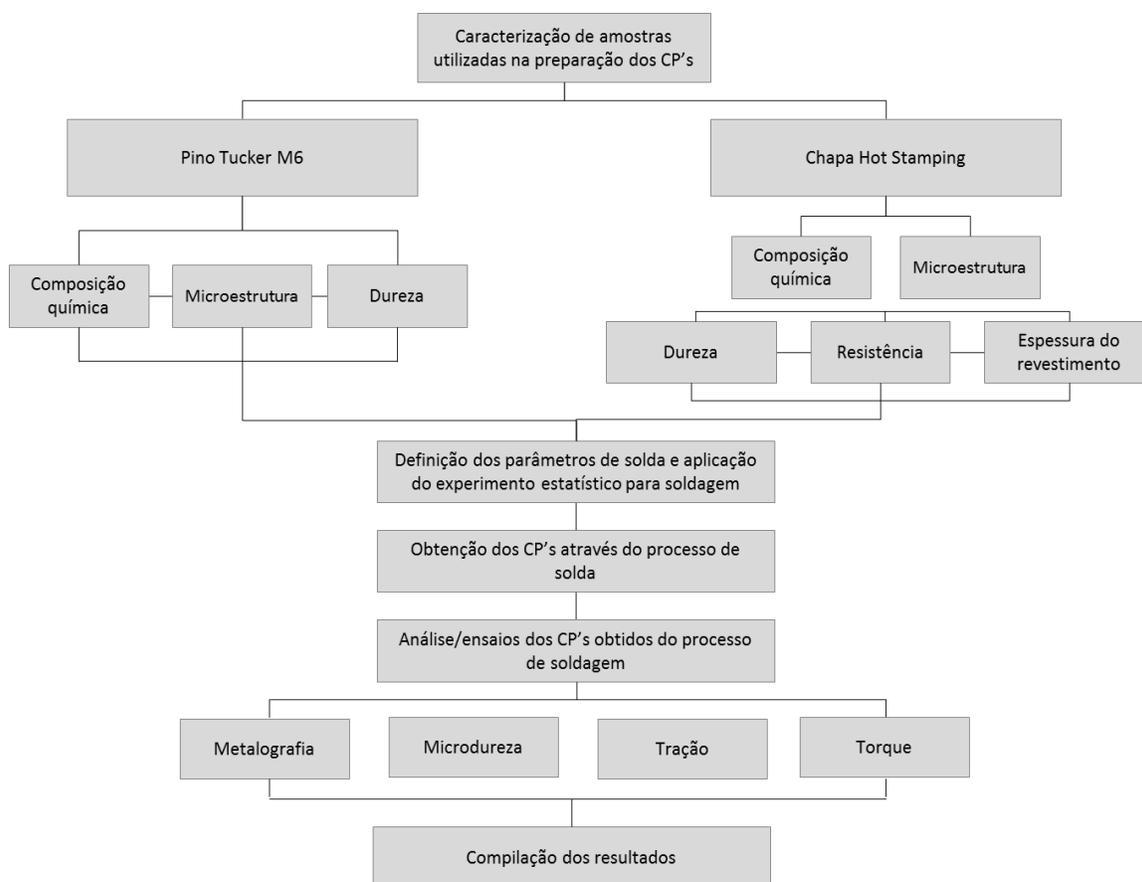


Figura 24 – Fluxograma das etapas de realização das análises

### 4.2.1 Obtenção, preparação e caracterização dos corpos de prova

As amostras de Chapa Hot Stamping e Pino Tucker foram caracterizadas e analisadas de acordo com o especificado para cada material. Esses materiais foram soldados através do processo *Stud Welding*, utilizando uma pistola de solda manual Modelo DCE 1500 Tucker. No processo de soldagem de Pino Tucker, os parâmetros de processo significativos a serem controlados são:

corrente de soldagem, o tempo e a distância entre o Pino e a chapa (Lift). Diferentes combinações de parâmetros de processo de solda foram utilizados neste trabalho. A Tabela 4 mostra os parâmetros e seus respectivos valores que foram aplicados na montagem das combinações do processo de soldagem dos Pinos, onde os valores de do Nível 1 são indicados pelo fabricante equipamento e, o Nível 2 são valores experimentais que tem como objetivo aumentar a resistência da solda.

Tabela 3 – Valores de corrente, tempo e lift usadas para definir as combinações de processo

Nível	Parâmetros de processo		
	Corrente (A)	Tempo (ms)	Lift (mm)
1	680	26	0.6
2	820	34	1.2

Com objetivo de planejar os experimentos, realizar as combinações de processo e análise dos resultados, será utilizado o Software Minitab, aplicando a metodologia DOE (sigla em inglês de Design of Experiments). Ainda de acordo com a Tabela 3, é possível afirmar que temos 2 níveis para cada um dos 3 fatores, gerando  $2 \times 2 \times 2 = 2^3 = 8$  combinações de fatores resultando em 8 amostras obtidas para cada tipo de análise (ver Tabela 4).

Tabela 4 – Combinações de processo em relação aos parâmetros corrente, tempo e lift.

Ordem	Corrente (A)	Tempo (ms)	Lift (mm)
1	680	34	1.2
2	680	34	0.6
3	820	34	0.6
4	680	26	1.2
5	820	34	1.2
6	680	26	0.6
7	820	26	0.6
8	820	26	1.2

Após preparação das soldas entre Pinos Tuckers e Chapa Hot Stamping (corpos de prova), as mesmas foram analisadas através de técnicas de metalografia e ensaios de mecânicos de resistência à traç. Na metalografia foi analisada a penetração da solda e a presença de poros e trincas. No ensaio de resistência ao destaque da solda, as amostras foram tracionadas com o objetivo de avaliar a força máxima (em Newtons) necessária para desprender o conjunto soldado (Chapa/Pino Tucker). O item 4.2.2 mostra de forma detalhada cada um dos ensaios realizados.

#### **4.2.2 Caracterização das amostras e testes especificados para análise dos Corpos de Prova**

Foram analisadas as propriedades mecânicas de resistência à tração, dureza, microestrutura e espessura da camada de AlSi que reveste a chapa. Após as soldagens utilizando-se as combinações apresentadas, as amostras foram submetidas as análises micrográficas, microdureza e ensaios mecânicos de tração e torque. Para verificar a penetração da solda e a presença de porosidade, foi utilizado a técnica metalográfica convencional de preparação de amostras (corte no sentido longitudinal do parafuso, seguido de embutimento, lixamento e polimento), com ataque de nital 4%. A penetração da solda foi medida (Figura 25A), tomando como base uma linha traçada na superfície da chapa até o final da região composta por uma microestrutura colunar, localizada entre a ZTA do Pino e da Chapa, onde também é notado a presença de poros. Para medição da porosidade, as amostras seguiram a mesma técnica de preparação, onde foi medido a área de cada poro individualmente e depois somada a área desses poros (Figura 25B). As amostras foram analisadas no microscópio ótico Leica S8AP0 acoplado a câmera MC170 HD, software LAS V4.5 com lentes de ampliação de 10 à 80X.

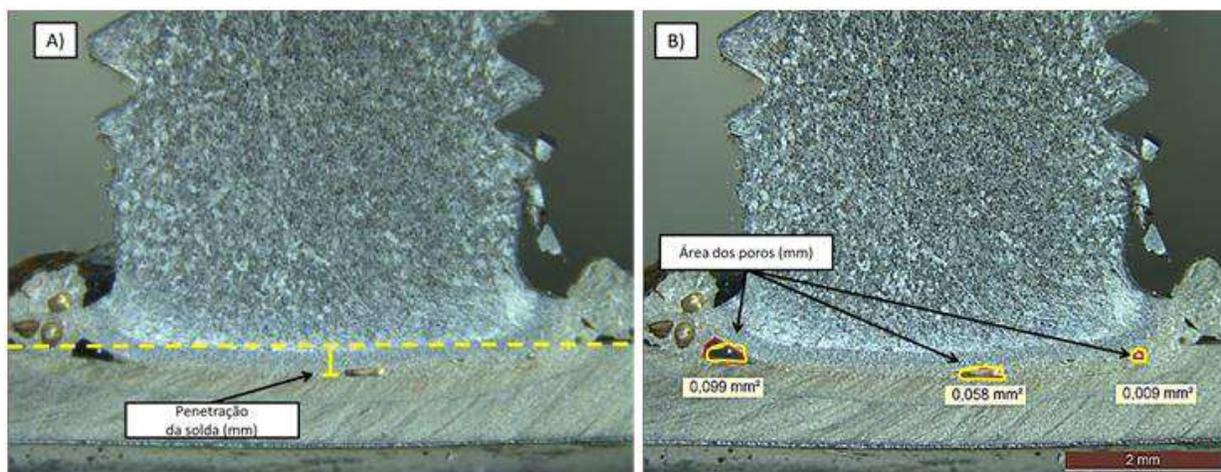


Figura 25 - Esquema da medição da penetração da solda e da porosidade

Para medir a espessura da camada de revestimento da chapa (AlSi) e identificação da microestrutura formada no conjunto soldado, foi utilizado o microscópio metalográfico Modelo AX10 Imager A2m, Zeiss, com ampliação de 10 a 1000X acoplado a uma estação de captura e de Imagens com Software Axivision.

Para análise de dureza do Pino Tucker e da chapa hot stamping, foi utilizado um Durômetro Universal Modelo Duravision Emtotest. O Pino foi analisado através do método de dureza Rockwell B, utilizando penetrador esférico de 1.58mm, pré-carga de 98.07N e carga principal de 980.7N. A chapa foi analisada através dos métodos de dureza Rockwell C com penetrador tipo cone de diamante, pré-carga de 98.07N e carga principal de 1.471kN. As medições foram realizadas através da seção longitudinal do núcleo da chapa e do pino (ver Figura 26). Para análise de dureza Rockwell foram utilizadas como referência a norma EN ISO 6508.

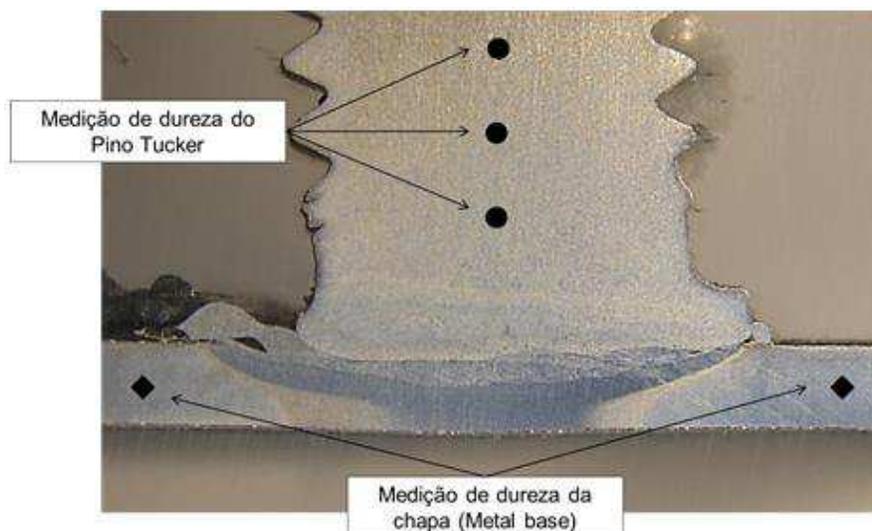


Figura 26 - Esquema da medição de dureza do Pino Tucker e da Chapa Hot Stamping.

Os ensaios mecânicos de tração (esquema na Figura 27) foram realizados em máquina universal de ensaios, Modelo Galdabini, célula de carga com capacidade de 20kN. Os ensaios foram utilizados para avaliar as propriedades mecânicas da chapa Hot Stamping e a resistência à tração dos corpos de prova soldados. Foi utilizado velocidade de ensaio de 1,2mm/minuto para os conjuntos soldados, que devem suportar força superior a 4200N para o completo destaque entre a chapa e o pino (PS50003/04). Para os corpos de prova da chapa, foi aplicando uma combinação de velocidades, com 1,2mm/minuto no regime elástico e 15mm/minuto no regime plástico (ISO 6892).

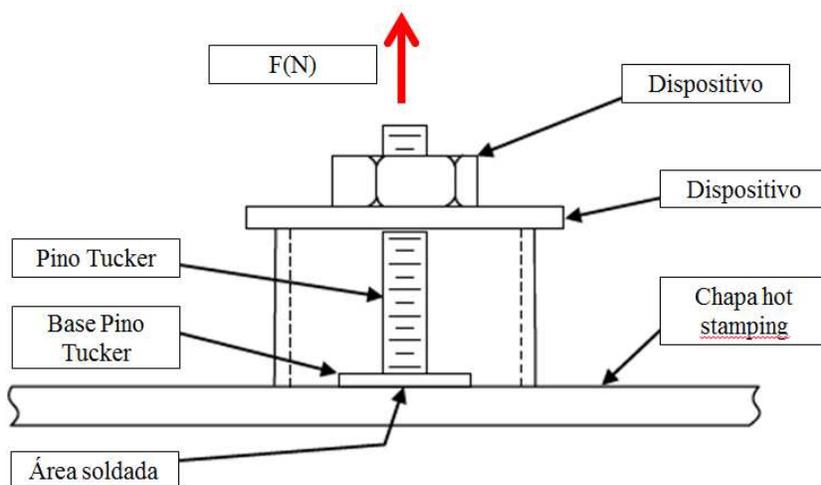


Figura 27 – Esquema do ensaio de tração realizado no conjunto soldado Pino/Chapa

Para análise de resistência ao torque, foi utilizado o torquímeter associado a um sextavado acoplado ao Pino Tucker conforme mostra a Figura 28. Durante o teste, foi analisado o torque máximo suportado e também a região de ruptura do conjunto soldado. Esta ruptura ocorre normalmente em 3 situações distintas: I) nos filetes do pino, II) na interface entre Pino/chapa com desprendimento da chapa, ou III) na interface entre Pino/chapa sem desprendimento da chapa, sendo o caso mais indesejado para o conjunto soldado, indicando que não houve fusão entre o Pino e a chapa.

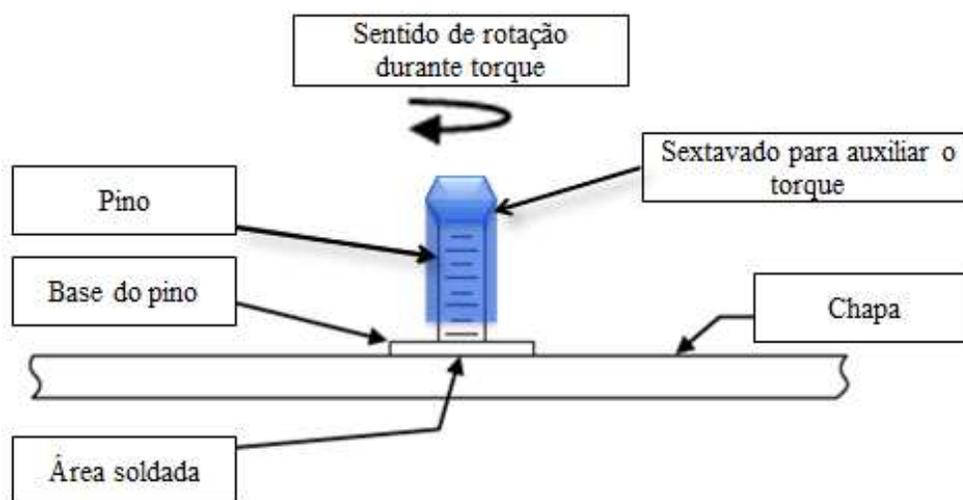


Figura 28 – Esquema do ensaio de torque realizado no conjunto soldado Pino/Chapa

Análises de microdureza foram realizadas utilizando um Microdurômetro Vickers Modelo Duravision Emcotest. As amostras foram seccionadas no sentido longitudinal do pino, embutidas e polidas. Esta análise tem como objetivo avaliar o perfil de dureza entre a chapa, a ZTA, a zona de fusão da solda e o pino. Para esta análise, foi adotado o esquema de medição conforme mostra a Figura 29.

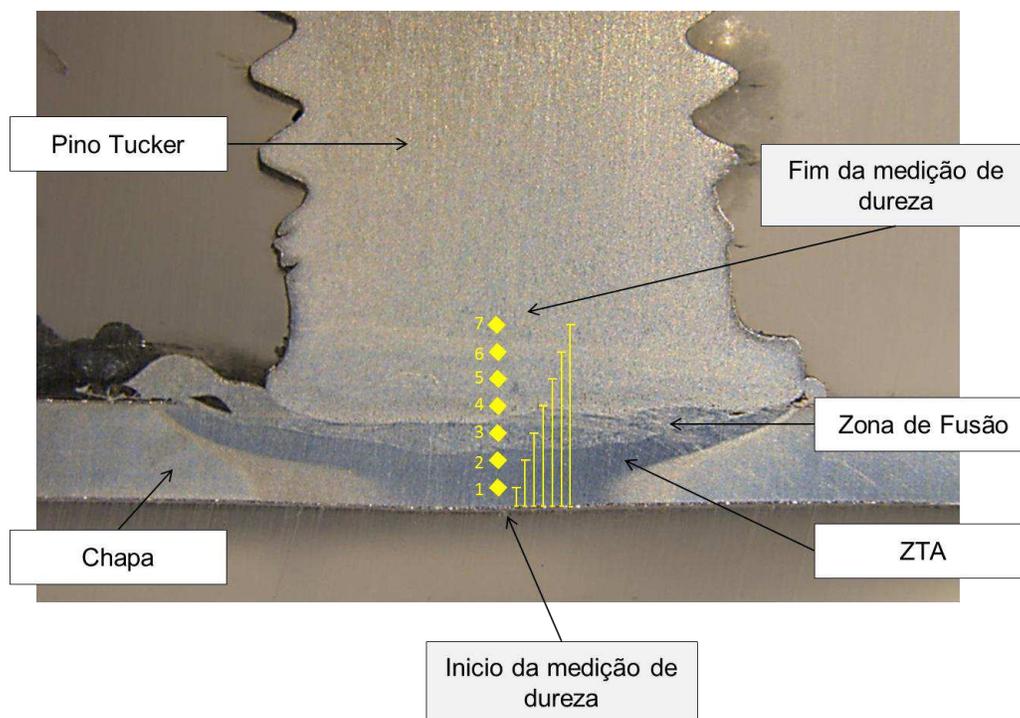


Figura 29 - Esquema da medição de microdureza nas amostras soldadas

No total foram realizadas 7 medições, partindo da base da chapa, passando pela ZTA da solda em direção ao núcleo do pino Tucker, controladas e padronizadas com o auxílio do micrômetro. A Tabela 5 mostra de forma esquemática a relação entre a medição e a distância que a mesma é controlada a partir da base da chapa.

Tabela 5 – Relação entre medição e deslocamento para medição de microdureza das amostras soldadas

Sequencia de medição	1	2	3	4	5	6	7
Deslocamento em relação à base da chapa (mm)	0.15	0.35	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 Resistência à tração das chapa

De acordo com a Tabela 6, foi verificado que os resultados das propriedades mecânicas das amostras analisadas apresentaram valores dentro da faixa especificada pela Norma DIN EN 10083-3 conforme indicado na tabela.

Tabela 6 – Resultados de resistência à tração das amostras de chapa Hot Stamping

Amostras analisadas	Propriedades mecânicas		
	Limite de Escoamento (MPa)	Limite de Resistência (MPa)	Alongamento (%)
1	1218,1	1465,8	7,8
2	1239,5	1477,5	7,5
3	1248,5	1492,5	7,3
4	1223,4	1500,8	6,9
5	1216,8	1430,5	8,1
<b>Valor especificado DIN EN 10083-3</b>	<b>950 à 1250</b>	<b>1300 à 1650</b>	<b>≥ 6</b>

### 5.2 Dureza Rockwell C da chapa

De acordo com a Tabela 7, foi verificado que os resultados de Dureza Rockwell C das amostras analisadas apresentam valores conforme especificado pela Norma DIN EN 10083-3). Os valores de Dureza Rockwell variam de 45,3 à 47,6HRC. É especificado valor de 41 à 49HRC.

Tabela 7 – Resultados da Dureza HRC e HV da chapa Hot Stamping (núcleo da amostra)

Medições	Resultado obtido (HRC)
1	45,3
2	46,0
3	46,1
4	47,4
5	47,6
<b>Valor especificado DIN 10083-3</b>	<b>41 à 49</b>

### 5.3 Espessura da camada de revestimento e microestrutura da chapa

A Figura 30A mostra a microestrutura do núcleo da chapa hot stamping. Na imagem é possível observar que a mesma é composta por uma microestrutura martensítica, em forma de ripas, homogênea e uniforme, ausente de descarbonetação ou quaisquer outras não-conformidade que comprometam a resistência da chapa. Esta é a microestrutura especificada para este material. Durante análise microscópica, foi medida a espessura da camada de revestimento anticorrosivo da chapa (composta por AlSi). A Figura 30B mostra a superfície da chapa formada pela camada de AlSi e o pelo metal base. Verifica-se que estas apresentaram valores de espessura variando de 30,9 à 36,7 $\mu\text{m}$ . Esses valores encontram-se dentro da faixa de tolerância, que varia de 30 à 50  $\mu\text{m}$ . A camada de revestimento mostrada abaixo é representativa para todas as amostras soldadas, não sendo evidenciado deslocamentos ou quaisquer anomalias que prejudiquem o processo de soldagem entre pino/chapa.

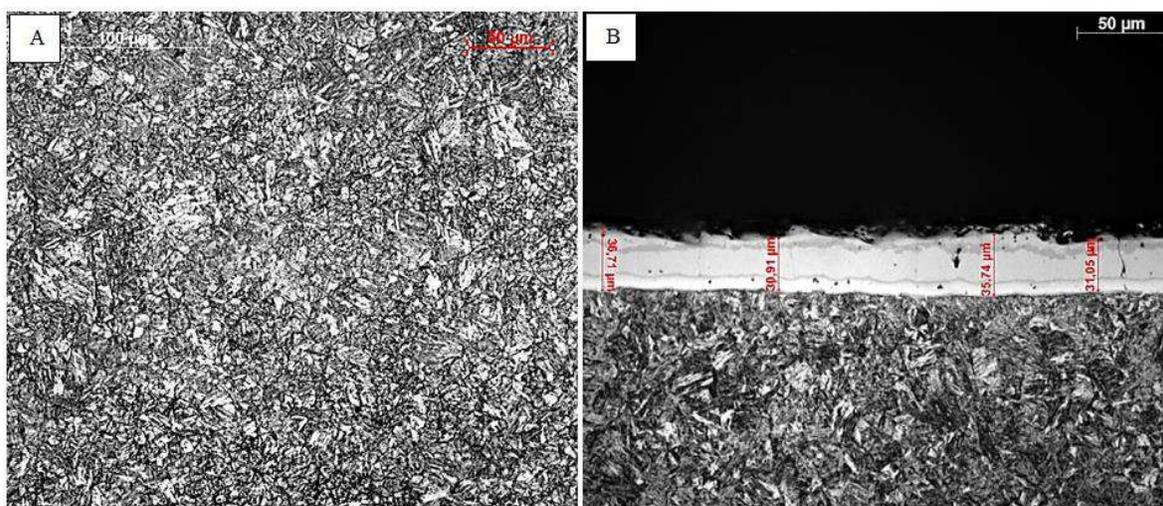


Figura 30 – Microestrutura (A) do núcleo da chapa composta por martensita revenida e (B) superfície da camada de AlSi. Nital 4%.

#### 5.4 Análise de composição química da chapa

A Tabela 8 apresenta os valores de composição química especificado e os valores obtidos para cada elemento químico da chapa em análise. É possível observar que a chapa possui composição dos elementos de acordo com o proposto, com percentual de carbono de 0.21%. Os demais elementos de liga também encontra-se dentro da faixa de tolerância (manganês, fósforo, enxofre, silício, cromo, molibidênio, boro, titânio, alumínio e nitrogênio).

Tabela 8 – Valores de composição química da chapa de aço hot stamping

Valor	Composição química do aço (%)										
	C	Mn	P	S	Si	Cr	Mo	B	Ti	Al	N
Especificado	0.20	1,0	Max.	Max.	0.15	Max.	Max.	0.0005	0.02	0.02	Max.
	à	à	0.030	0.01	à	0.50	0.35	à	à	à	0.009
	0.26	1.4			0.40			0.005	0.07	0.06	
Encontrado	0.21	1.3	0.017	0.006	0.38	0.032	0.11	0.0047	0.041	0.039	0.0031

#### 5.5 Dureza Rockwell B do Pino M6

De acordo com a Tabela 9, foi verificado que os resultados de Dureza Rockwell B (HRB) das amostras analisadas apresentam valores conforme especificado. Os valores de Dureza Rockwell variam de 61,3 à 65,9HRB. É especificado valor inferior à 68HRB.

Tabela 9 – Resultados da Dureza HRB do Pino M6

Medições	Resultado obtido (HRB)
1	61,3
2	64,5
3	64,8
4	65,5
5	65,9
<b>Valor especificado</b>	<b>≤ 68</b>

## 5.6 Microestrutura do Pino M6

De acordo com a Figura 31, foi observado que a amostra do Pino M6 analisado apresenta microestrutura homogênea e uniforme composta por Ferrita com traços de perlita globular. Este tipo de microestrutura é especificado para esta aplicação.

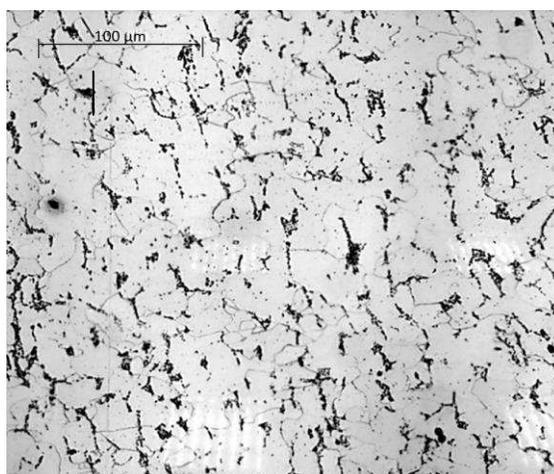


Figura 31 – Microestrutura do Pino M6 composta por ferrita com traços de perlita. Nital 4%.

## 5.7 Análise de composição química da Pino M6

A Tabela 10 apresenta os valores de composição química dos elementos químicos do Pino M6. É possível observar que o Pino apresenta valor de carbono de 0.031%, ficando dentro da faixa de tolerância solicitado. Os demais elemento de liga (manganês, silício, fosforo e enxofre) também apresentam resultados satisfatórios.

Tabela 10 – Valores de composição química do Pino M6

Valor	Composição química do aço (%)				
	C	Mn	Si	P	S
Especificado	Max. 0.06	0.20 à 0.40	Max. 0.10	Max. 0.040	Max. 0.040
Encontrado	0.031	0.22	0.08	0.027	0.033

### 5.8 Análise da microestrutura formada na região de solda entre o Pino e a Chapa

Com o objetivo de identificar a microestrutura formada na região de solda entre o Pino Tucker e a Chapa Hot Stamping, uma micrografia foi mapeada e analisada. Cinco regiões distintas são mostradas na Figura 32, onde é possível identificar as características de cada uma delas.

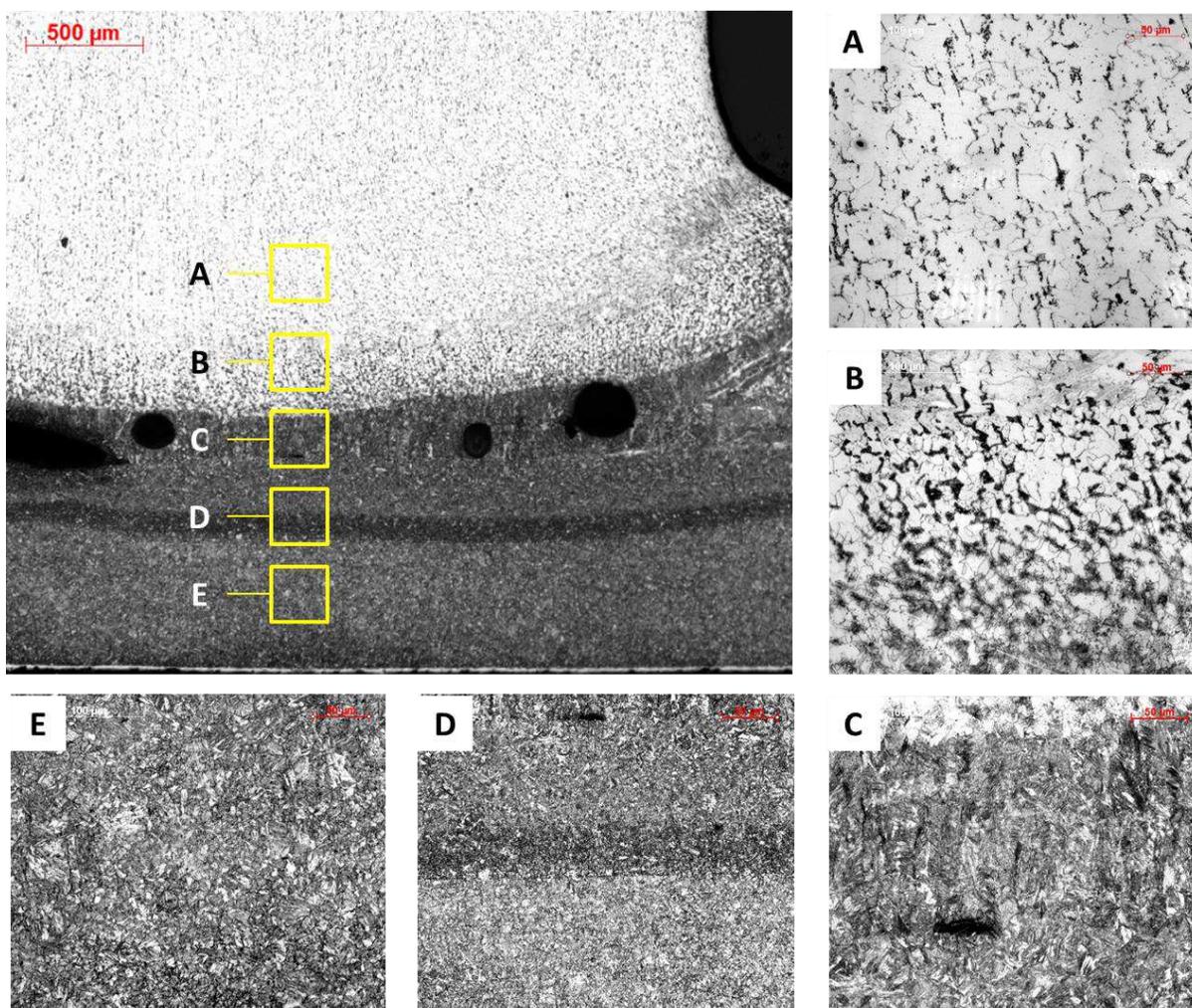


Figura 32 – Microestrutura característica formada a partir do processo de solda entre o Pino Tucker e a Chapa Hot Stamping

- A. Microestrutura do Pino Tucker composta por ferrita com traços de perlita;
- B. Zona Termicamente Afetada (ZTA) do Pino Tucker;
- C. Zona de fusão entre o Pino Tucker e a Chapa – poros são observados nesta região;
- D. Zona Termicamente Afetada (ZTA) da Chapa;
- E. Microestrutura da Chapa composta por martensita revenida.

De acordo com a Figura 30A, é possível verificar que o Pino composto por ferrita com pequenos traços de perlita, onde não observa-se quaisquer alteração na sua formação original. O pino apresenta sua microestrutura modificada na Zona Termicamente Afetada (ZTA), quando há um acréscimo de quantidade de perlita (Figura 30B). Esse fenômeno é decorrente do elevado aquecimento entre as peças durante o processo de soldagem (arco elétrico), fazendo com que o carbono derivado da chapa migre em direção ao Pino. A Figura 30C mostra a zona de fusão entre o Pino e a Chapa, caracterizada pela formação de uma microestrutura colunar, localizada entre a ZTA do Pino e da Chapa. De acordo com Suh e colaboradores, a Zona de Fusão (ZF) pode sofrer bastante alterações com o aporte térmico durante o processo de soldagem, podendo formar microestruturas homogêneas compostas apenas por martensita ou microestruturas mistas de martensita com ferrita. Segundo Miranda, a ZF parece ser composta por uma martensita mais alongada e de maior dimensão quando comparada a microestrutura formada na ZTA. Esse fenômeno pode estar associado a austenita originada da solidificação ou dos grãos de ferrita delta apresenta uma estrutura colunar e de grande tamanho de grão. A fusão da solda e sua penetração em direção a chapa são os principais responsáveis pela resistência da solda, onde uma maior zona de fusão e uma maior profundidade resultam em maior aderência do conjunto soldado. Por outro lado os poros afetam negativamente a qualidade da solda, atuando como concentradores de tensão, reduzindo a resistência mecânica da peça. A presença de poros é comum na região de fusão, sendo observada também na Figura 30C. A Figura 30D mostra a região de transição entre a ZTA com a microestrutura da chapa, onde na ZTA é possível observar uma microestrutura heterogênea composta por martensita e austenita retida. Suh observou que as características das microestruturas formadas nas ZTA's tem semelhanças independentemente do calor aplicado durante o processo de soldagem, formando uma martensita heterogênea para regiões mais próximas da zona de fusão (temperatura acima de A1), e apenas martensita na região mais afastada da zona de fusão (temperatura abaixo de A1). De acordo com Miranda, essa região possivelmente atinge temperatura entre AC1 e AC3, onde parte da microestrutura foi austenitizada e depois transformada em martensita diferente da original do metal base. Apenas martensita revenida é encontrada na região mostrada na Figura 30E, indicando que nesta região o calor não foi suficiente para alterar a microestrutura da chapa. Kim e colaboradores também observaram que a microestrutura do metal base não sofreu alterações, permanecendo martensita

revenida em sua composição. Miranda mostra que esta região provavelmente foi submetida a uma temperatura abaixo de AC1, formando uma microestrutura composta por martensita revenida.

### 5.9. Análise do perfil de microdureza das juntas soldadas

O perfil de dureza das amostras soldadas foram analisadas ao longo do corte longitudinal do Pino Tucker. Esta análise tem como objetivo, avaliar a evolução dos valores de dureza vickers na região termicamente afetada (ZTA) e de fusão, como também entender o comportamento/extensão que a mesma apresenta em cada corpo de prova. As microdurezas foram medidas em intervalos de distâncias a partir de 0.15 à 2.5mm, tomando como base o início da chapa em sentido ao pino. A Figura 33 mostra as identações partindo da base da chapa (em direção ao núcleo do Pino Tucker) com relação as fases de microestrutura formada ao longo da solda.

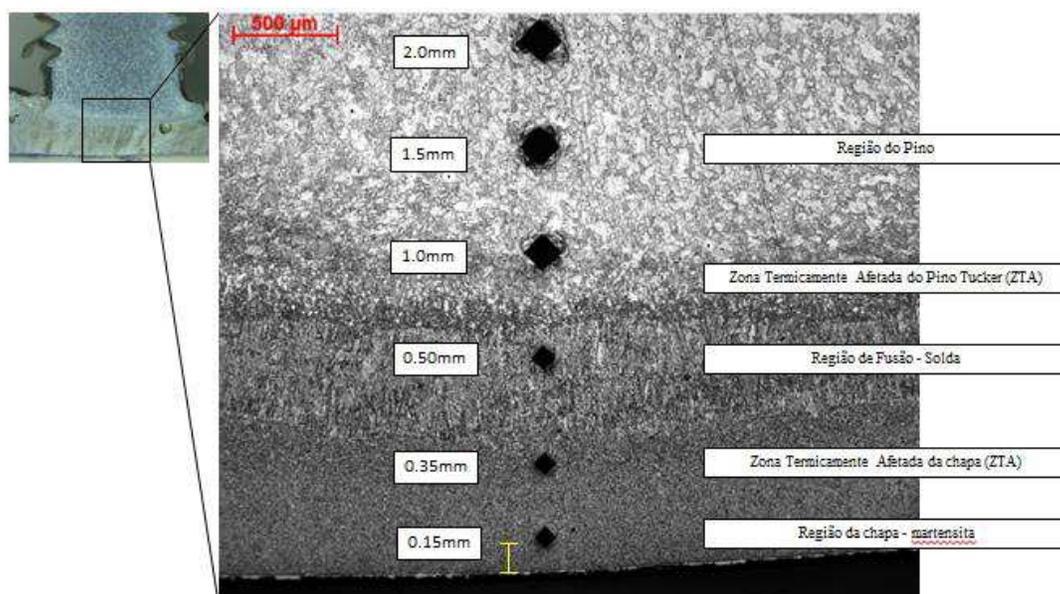


Figura 33 – Esquema da medição de Microdureza Vickers em relação às fases no conjunto soldado

A Tabela 11 mostra os valores de dureza obtidos de acordo com a distância percorrida durante o teste. A Figura 33 associada a Tabela 12 mostram uma microestrutura típica de um aço martensítico, indicando que uma microestrutura heterogênea foi criada através da soldagem devido ao gradiente de temperatura produzido durante processo de soldagem.

Tabela 11 – Valores de dureza vickers das amostras soldadas em relação à distancia

Distância	Amostras							
	1	2	3	4	5	6	7	8
0.15mm	294	301	378	306	481	301	295	290
0.35mm	308	307	478	318	478	314	300	313
0.50mm	408	412	277	427	198	391	368	353
1.0mm	182	212	171	181	161	191	192	183
1.5mm	182	199	147	149	139	191	174	153
2.0mm	152	151	136	124	133	143	139	136
2.5mm	147	142	131	122	130	126	136	126

Para melhor visualizar o perfil de dureza de cada amostra soldada em relação aos valores apresentados na Tabela 11, os gráficos da Figura 34 mostram o comportamento para cada uma das amostras analisadas, onde o eixo X do gráfico (abscissa) indica os valores da distância percorrida durante a medição de dureza e, o eixo Y (ordenadas) os valores de dureza obtidos durante o ensaio. Um bloco de coloração cinza foi plotado no gráfico com o objetivo de demarcar a área de dureza na região de ZTA associada à Zona de Fusão da solda. Ao lado de cada gráfico, a macrografia da solda referente a amostra analisada nos dar uma noção do comportamento da região soldada, mostrando principalmente a extensão da ZTA e da ZF.

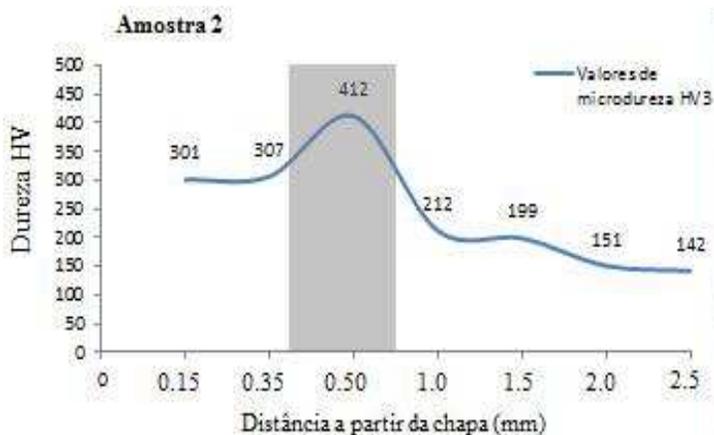
De acordo com o perfil de dureza, observa-se que com exceção da Amostra 6, as demais soldas apresentaram maior valor de dureza na Zona de Fusão (ZF), seguido da Zona Termicamente Afetada (ZTA) e, por ultimo, o metal base da chapa. No caso da Amostra 6, nota-se que a ZTA apresenta maior valor de dureza, seguido da ZF e do metal base. Esse fato pode está associado ao maior tempo de exposição e maior aplicação de calor através da corrente de solda na qual este solda foi submetida durante o processo (parâmetros: 34ms, 820A, L 1.2mm). Embora a Amostra 4 (parâmetros: 34ms, 820A, L 0.6mm) tenha apresentado ZF mais dura que a ZTA, nota-se que a extensão dessa região é maior quando comparada às demais soldas, indicando que o tempo de exposição associada a corrente de soldagem mais elevada, faz crescer a área da

ZTA e ZF. De acordo com Suh, Tamiti, Kim e Miranda, a variação do perfil de dureza é fortemente influenciada pelo aporte térmico no qual a solda é submetida durante o processo de soldagem.

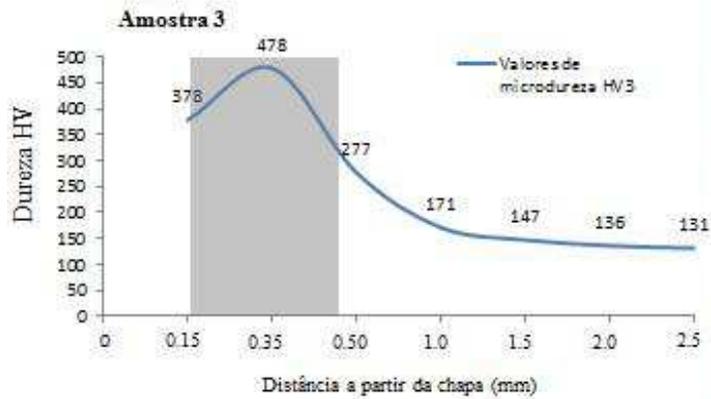
Parâmetros de soldagem - Corrente: 680A / Tempo: 34ms / Lif: 1.2mm



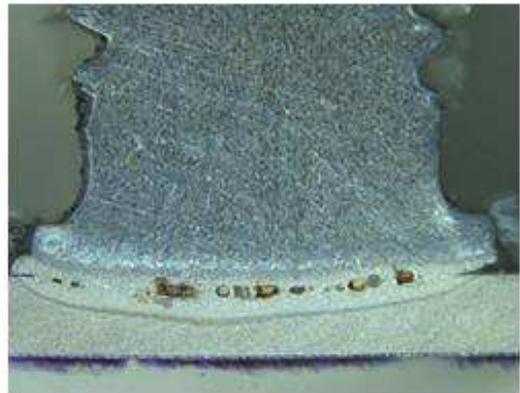
Parâmetros de soldagem - Corrente: 680A / Tempo: 34ms / Lif: 0.6mm



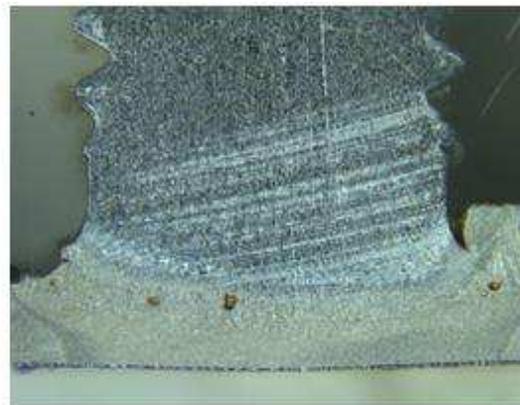
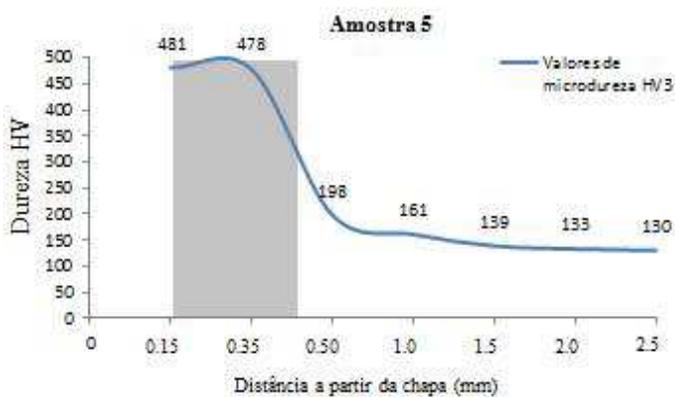
Parâmetros de soldagem - Corrente: 820A / Tempo: 34ms / Lift: 0.6mm



Parâmetros de soldagem - Corrente: 680A / Tempo: 26ms / Lift: 1.2mm



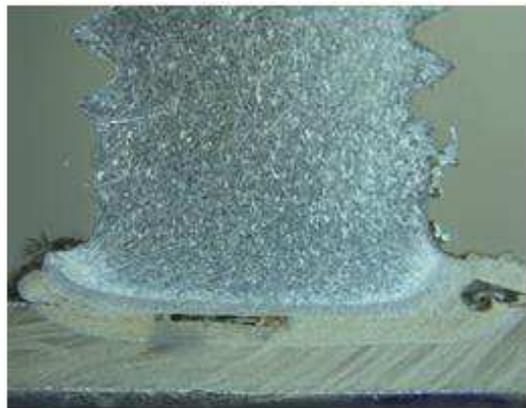
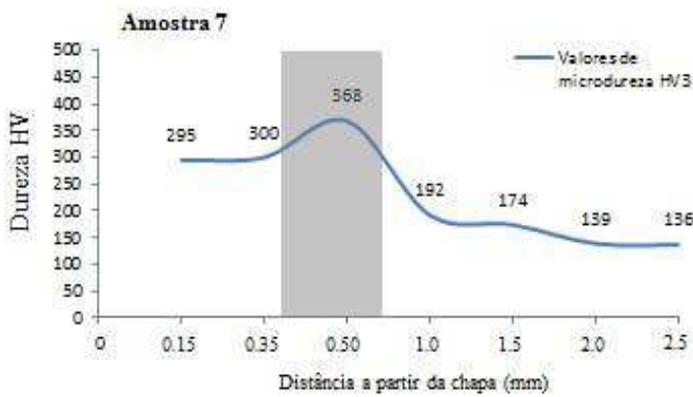
Parâmetros de soldagem - Corrente: 820A / Tempo: 34ms / Lift: 1.2mm



Parâmetros de soldagem - Corrente: 680A / Tempo: 26ms / Lift: 0.6mm



Parâmetros de soldagem - Corrente: 820A / Tempo: 26ms / Lift: 0.6mm



Parâmetros de soldagem - Corrente: 820A / Tempo: 26ms / Lift: 1.2mm

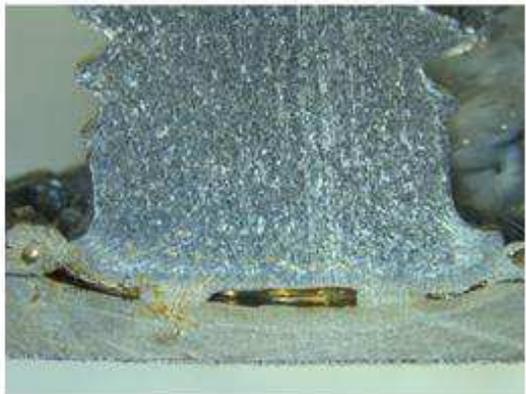


Figura 34 – Perfil de Dureza Vickers das amostras

### 5.10 Influência dos parâmetros de soldagem em relação a porosidade, penetração da solda, resistência à tração e ao torque

Para análise da penetração e porosidade da solda, macrografias de cada corpo de prova foi analisada individualmente. A Figura 35 mostra de forma esquemática como foi realizado a medição de penetração da solda (Fig. 35A) e porosidade na região de fusão (Fig. 35B).

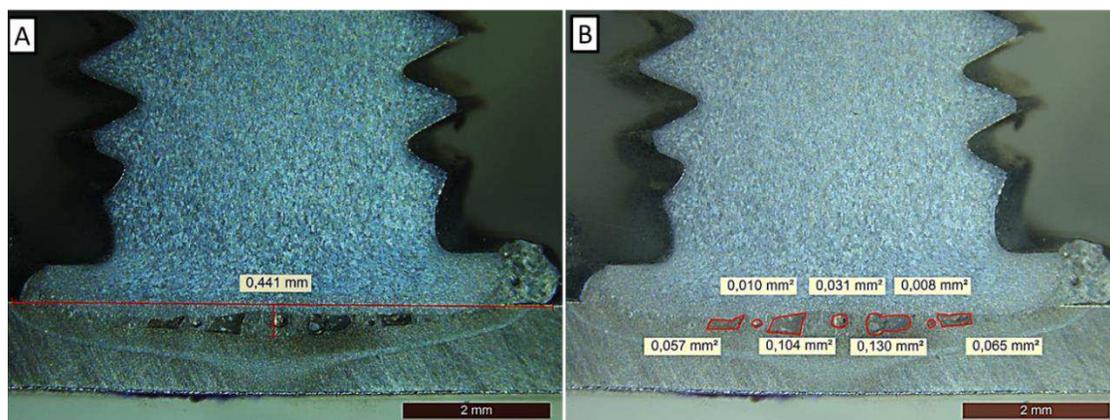


Figura 35 – Esquema do corpo de prova para análise de penetração e porosidade da solda

Os resultados de penetração, porosidade, resistência à tração e resistência ao torque analisados são mostrados na Tabela 12 em relação a cada combinação de parâmetros de processo, totalizando 8 corpos de prova para cada técnica de análise.

Tabela 12 – Resultados penetração, porosidade, resistência à tração e resistência ao torque em relação aos parâmetros de processo utilizado em cada corpo de prova

Ordem	Corrente (A)	Tempo (ms)	Lift (mm)	Penetração (mm)	Porosidade (mm <sup>2</sup> )	Resistência tração (N)	Resistência Torque (Nm)
1	680	34	1.2	0,44	0,405	6891	20.7
2	680	34	0.6	0,25	0,164	3523	13.4
3	820	34	0.6	0,44	0,204	6964	25.9
4	680	26	1.2	0,35	0,207	3658	14.3
5	820	34	1.2	0,48	0,091	6456	18.4
6	680	26	0.6	0,27	0,016	5145	12.2
7	820	26	0.6	0,32	0,25	6130	15.3
8	820	26	1.2	0,4	1,188	5938	17.5

Os dados da Tabela 12 relacionando os resultados de porosidade, penetração, resistência à tração e resistência ao torque com os parâmetros de processo (corrente, tempo e lift) foram plotados e mostrados através dos gráficos das Figuras 36A, 37A, 38A e 40A as quais mostram a influência do processo nas médias dos resultados obtidos, organizados de forma que no eixo das abcissas estão os valores referentes aos parâmetros de processo e, no eixo das ordenadas, os valores médios registrados durante as análises. Nestes gráficos, quanto maior a inclinação da reta (em relação ao eixo horizontal) e a dispersão de seus pontos, maior é a interferência do parâmetro do processo em relação aos resultados obtidos. As Figuras 36B, 37B, 38B e 40B mostram a possível interação entre os parâmetros do processo em relação aos resultados de penetração, porosidade, resistência ao torque e à tração. Nestes casos, as retas podem cruzar entre si, indicando que há interação entre os parâmetros, caso contrário não há interação. As Figuras 39 e 41 mostram o colapso dos Pinos após o ensaio de torque máximo e resistência à tração, respectivamente.

### 5.10.1 Influência dos parâmetros de soldagem em relação a porosidade na região de fusão

A medição da porosidade foi realizada com base no somatório das áreas dos poros ( $\text{mm}^2$ ), analisados por microscopia no corte longitudinal ao centro do pino soldado. A Figura 36 mostra o efeito dos parâmetros corrente, tempo e lift em relação à porosidade na região de fusão do conjunto soldado.

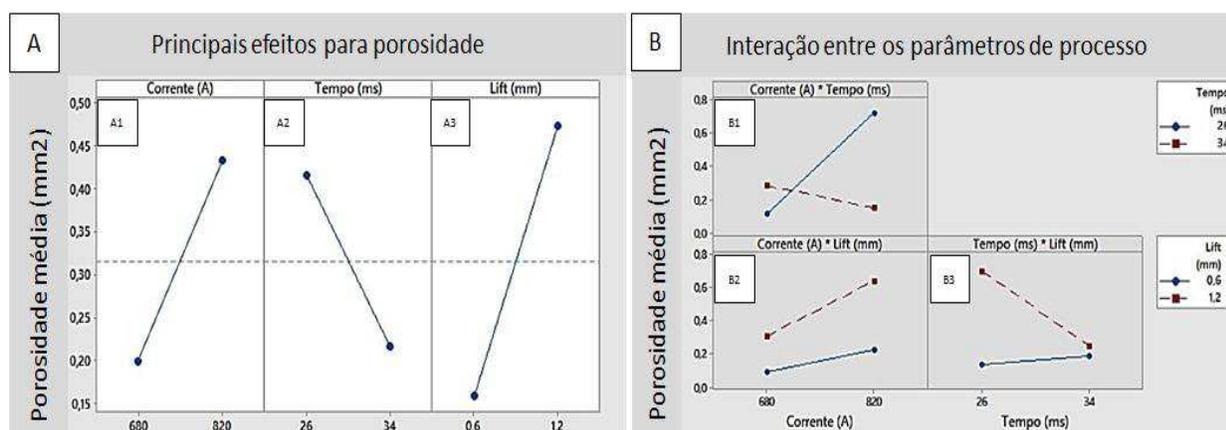


Figura 36 – Relação da (A) influência dos parâmetros do processo nos resultados de porosidade das soldas e a (B) interação entre ambos.

Através da Figura 36A, nota-se que as retas em relação aos parâmetros de corrente, tempo e lift estão inclinadas em relação ao eixo horizontal (linha tracejada) e com os pontos máximos e mínimos dispersos em relação ao valores médio de porosidade. Este comportamento do gráfico indica que a porosidade das soldas são fortemente influenciadas pelos parâmetros do processo. Dentre os parâmetros analisados, observa-se que o lift na Figura A1 (distância programada entre o pino tucker e a chapa) apresentou maior influência entre os parâmetros, fazendo a porosidade média passar de  $0,15\text{mm}^2$  para  $0,45\text{mm}^2$ , com distâncias de 0,6 e 1,2mm, respectivamente. A corrente de soldagem também apresentou influência nos valores de porosidade (A2), onde a maior aplicação de corrente leva ao maior número de poros na solda. Verifica-se que a porosidade média salta de aproximadamente  $0,20\text{mm}^2$  para  $0,45\text{mm}^2$  com aplicação de corrente de 680A e 820A, respectivamente. Em relação ao tempo (A3), é possível observar que este fenômeno ocorre de forma inversa quando comparado aos parâmetros corrente e lift. Com tempo de soldagem mais longo (34ms) a solda apresenta menor número de poros, enquanto o uso de tempo mais curto (26ms) praticamente dobra a área média da porosidade, passando de  $0,15\text{mm}^2$  para aproximadamente  $0,47\text{mm}^2$ . Os poros são comuns neste tipo de solda, mas indesejáveis por se tratar de pontos concentradores de tensão, podendo reduzir a resistência durante solicitações mecânicas. A Figura 36B mostra a interação entre a corrente, o tempo e o lift. Para que se observe interação entre os parâmetros de soldagem, as retas precisam se cruzar entre si. Neste caso, apenas a corrente e o tempo de soldagem apresentam interação (B1), onde verifica-se que com menor tempo de soldagem e corrente tem-se menor área porosa na solda. Em contrapartida, corrente mais elevada e mesmo com menor tempo, a ocorrência de poros é notada. Não foi evidenciado interação entre corrente/lift e tempo/lift, onde as retas não se cruzam (B2 e B3).

### 5.10.2 Influência dos parâmetros de soldagem em relação a penetração da solda

A medição da penetração da solda foi realizada com base na medição da superfície da chapa até a área de fusão da fusão (mm), analisados por microscopia no corte longitudinal ao centro do pino soldado. As retas inclinadas com os valores máximos e mínimos de cada parâmetro foi observado em relação a penetração de solda. Na Figura 37A, é possível notar a forte influencia do lift durante a análise. Para lift de 0,6mm tem-se uma penetração de 0,32mm e, com o lift de 1,2mm temos uma penetração de 0,42mm (A1). A mudança de corrente de 680 para 820A faz a penetração média passar de aproximadamente 0,33mm para pouco mais 0,40mm (A2). O parâmetro de tempo segue a mesma tendência do lift e corrente de soldagem, ou seja, quanto mais elevado o tempo maiores os valores de penetração da solda (A3). A penetração é extremamente importante para a resistência da solda, tornando-a em produto com maior resistência mecânica durante aplicação. Na Figura 37B foi verificado que não há interação entre os parâmetros de solda (as retas não se cruzam), onde as combinações corrente/tempo (B1), corrente/lift (B2) e tempo/lift (B3) seguem a mesma tendência.

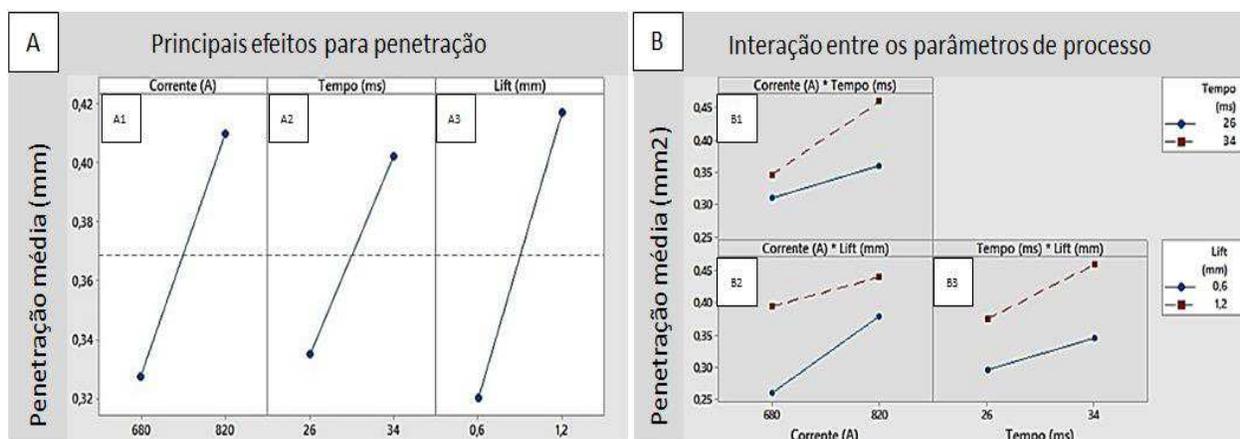


Figura 37 – Relação da (A) influência dos parâmetros do processo nos resultados de penetração das soldas e a (B) interação entre ambos.

### 5.10.3 Influência dos parâmetros de soldagem em relação a resistência ao torque das soldas

As amostras foram submetidas ao ensaio de resistência ao torque. Esta análise tem como objetivo, entender qual o torque máximo necessário para fazer a junta soldada entrar em colapso

(provocar a ruptura na região de solda) e qual a relação dos parâmetros do processo em relação aos valores obtidos no teste.

Analisando a Figura 38A é possível verificar que os parâmetros de soldagem apresentam forte influência nos valores médio de resistência ao torque, onde a inclinação das retas (em relação à linha horizontal tracejada do gráfico) é bem acentuada em relação ao parâmetro de tempo, seguido da corrente e do lift. Na Figura 36A1, nota-se que o aumento do tempo de 26 para 34ms, faz o torque máximo para fazer a solda entrar em colapso passar de ~ 15 para 19,5Nm, indicando que a solda tornou-se mais resistente com maior tempo de solda. A corrente segue a mesma tendência do tempo, onde maior corrente de soldagem aumenta a resistência da solda em relação ao torque. Analisando o comportamento da reta do lift (distância entre Pino e chapa), sua inclinação é menos acentuada, fazendo o torque médio ficar em torno de 17 à 18 Nm para distâncias de 0,6 e 1,2mm, respectivamente. A forma de colapso do conjunto soldado será abordado no próximo tópico. A Figura 38B mostra a interação entre os parâmetros de soldagem. Na Figura B2 as retas se cruzam indicando a interação entre a corrente e o lift, onde observa-se que a corrente de 820A e lift de 0,6mm a resistência ao torque atinge aproximadamente 21Nm. Para o mesmo lift e corrente de 680A, os valores de torque reduz para menos de 14Nm. O gráfico B3 mostra uma franca interação entre o tempo e o lift, onde observa-se maior resistência ao torque independentemente do lift com tempo de 34ms. Não foi observado interação entre corrente/tempo (B1).

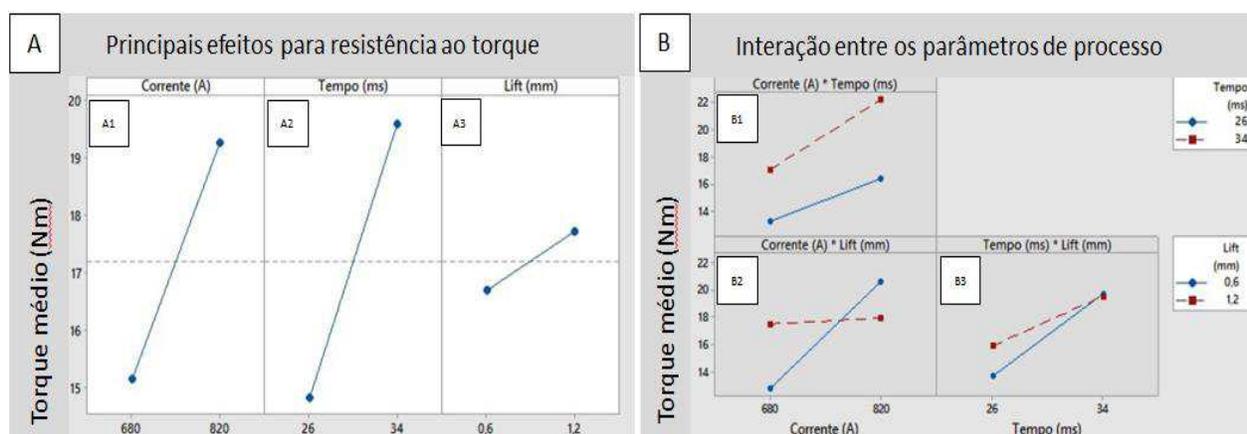


Figura 38 – Relação da (A) influência dos parâmetros do processo nos resultados de torque e a (B) interação entre ambos.

#### 5.10.4 Análise visual dos corpos de prova após ensaios de resistência ao torque das soldas

Os resultados de resistência ao torque são influenciados por inúmeros fatores durante o processo de soldagem, onde a área de fusão (penetração) entre o pino e a chapa tem papel fundamental na propriedade mecânica da solda. Seguindo essa lógica, as amostras (16 no total) foram analisadas visualmente com o objetivo de avaliar a região de fratura entre pino/chapa após o colapso da solda durante ensaio de torque. Há 3 formas de mecanismo que a fratura pode apresentar após o teste: I) na interface entre pino/chapa, II) na região da chapa, com destaque de material formando uma espécie de gema na base do pino e, em menor frequência, III) na região dos filetes do próprio parafuso. O primeiro caso caracteriza-se como uma fratura do tipo frágil, sem deformação do conjunto soldado e com frequente área porosa na região de base do pino e da chapa. Neste caso, a fusão entre as partes soldada é muito baixa, tornando-se uma condição indesejada ao processo SW. O caso II, fratura na região da chapa, indica que houve fusão parcial entre o pino e a chapa, tornando elevada a resistência da solda durante solicitações mecânicas quando comparado ao primeiro caso. O ultimo caso (III), é o mais desejável a ser obtido pelo processo de soldagem. O colapso do conjunto soldado ocorre na região dos filetes do parafuso, indicando que o desprendimento do material não ocorreu na solda durante esforços mecânicos. Este comportamento mostra que houve completa fusão entre pino/chapa, tornando o mecanismo de ruptura mais adequado quando comparado aos demais. A Figura 39 mostra a fratura característico das amostras após ensaio de torque.

Parâmetros de soldagem - Corrente: 680A / Tempo: 34ms / Lif: 1.2mm



Parâmetros de soldagem - Corrente: 680A / Tempo:34ms / Lif: 0.6mm

Amostra 2 – Torque 13.4Nm



Parâmetros de soldagem - Corrente: 820A / Tempo: 34ms / Lift: 0.6mm

Amostra 3 – Torque 25.9 Nm



Parâmetros de soldagem - Corrente: 680A / Tempo: 26ms / Lift: 1.2mm

Amostra 4 – Torque 14.3 Nm



Parâmetros de soldagem - Corrente: 820A / Tempo: 34ms / Lift: 1.2mm

Amostra 5 – Torque 18.4 Nm



Parâmetros de soldagem - Corrente: 680A / Tempo: 26ms / Lift: 0.6mm

Amostra 6 – Torque 12.2Nm



Parâmetros de soldagem - Corrente: 820A / Tempo: 26ms / Lift: 0.6mm

Amostra 7 – Torque 15.3 Nm



Parâmetros de soldagem - Corrente: 820A / Tempo: 26ms / Lift: 1.2mm



Figura 39 – Imagens das fraturas obtidas após ensaio de torque referente a cada amostra

De acordo com as imagens, é possível verificar que os corpos de prova apresentaram 2 tipos de fratura característicos: na região dos filetes do parafuso e na interface entre pino/chapa. O primeiro caso, na região do filetes do parafuso, indica que o processo de soldagem ocorreu de forma satisfatória. Neste caso, a fusão entre pino/chapa é resistente o suficiente para suportar o torque excessivo. Durante o aperto há um fenômeno de fechamento da junta, característico do torque nominal que o parafuso deve suportar (aproximadamente 8Nm). Ao exceder essa força, chamada sobretorque, o parafuso passa pelo processo de alongamento e, em seguida, o colapso da estrutura caso persista o aumento da força. As amostras com essa característica suportaram torque variando de 17.5 à 25.9Nm. O segundo tipo de fratura apresenta características diferente do primeiro caso. Nestes, o rompimento se dá na base entre o pino e a chapa. Dentre os tipos de colapso da solda este é o menos desejado, indicando que o processo de soldagem não foi adequado a ponto da solda suportar o excesso de torque. Analisando as juntas soldadas, não foi verificado alongamento no corpo dos mesmos, mostrando que a fratura ocorreu de forma frágil. Para estes, os valores de torque variam de 12.2 à 15.3Nm.

### 5.10.5 Influência dos parâmetros de soldagem em relação a resistência à tração das soldas

Para análise de resistência à tração das soldas, verifica-se através da Figura 40A que as retas dos gráficos encontram-se inclinadas e com os valores máximos e mínimos dos parâmetros de processos também dispersos, indicando que a corrente, o tempo e o lift tiveram influência significativa na resistência à tração. O gráfico A1 mostra que é possível atingir valores elevados de resistência em torno de 6400N com corrente de 820A e, em contrapartida, o uso de baixa corrente reduz drasticamente esses valores, chegando a atingir valores inferiores a 5000N. Jong e colaboradores observaram que o tempo e a corrente de soldagem mais elevados fazem aumentar os valores de tensão da solda. A Figura 40B mostra que não há interação entre a combinação de parâmetro tempo de solda/corrente, ou seja, com tempos de 26 e 34ms as retas do gráfico não se cruzam (B1). Nas demais combinações, a corrente/lift e tempo/lift é possível observar as interações entre esses parâmetros (retas se cruzam). O gráfico B2 mostra que independente do lift, a corrente de solda elevada (820A) resulta em elevados valores de resistência à tração. No último caso (gráfico B3), foi observado que o lift de 1,2mm o tempo tem relevância, principalmente com 34ms que faz a solda atingir aproximadamente 6500N e, em contrapartida, o mesmo lift com tempo de 26ms a resistência à tração da solda fica abaixo de 5000N. Para o lift de 0,6 mm nota-se uma pequena redução com elevação do tempo de soldagem, ficando abaixo de 5500N.

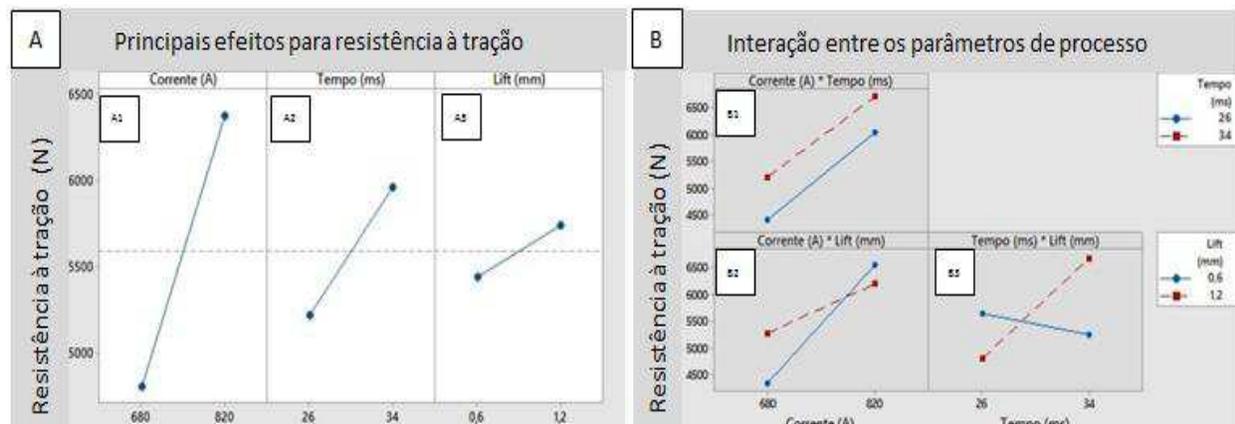


Figura 40 – Relação da (A) influência dos parâmetros do processo nos resultados de resistência à tração das soldas e a (B) interação entre ambos

### 5.10.6 Análise visual dos corpos de prova após ensaios de resistência à tração das soldas

Após os ensaios de tração, as amostras foram analisadas com objetivo de entender a característica do rompimento entre a chapa, a solda e o pino. Foi verificado que algumas amostras apresentam ruptura com aspecto frágil, sem deformação entre as peças soldadas e sem desprendimento de material (chapa). Nestas amostras, o rompimento ocorre na região entre o pino e a chapa, onde observa-se a presença de poros na superfície. Os poros atuam como concentradores de tensão, podendo reduzir a resistência mecânica da solda. Por outro lado, algumas amostras apresentaram deformação e desprendimento de chapa durante ensaio. A Figura 41 mostra de forma esquemática as imagens do Pino e da Chapa após o teste. O resultado do valor da carga (em Newtons) também é indicado em cada imagem.

Parâmetros de soldagem - Corrente: 680A / Tempo: 34ms / Lif: 1.2mm



Parâmetros de soldagem - Corrente: 680A / Tempo:34ms / Lif: 0.6mm

Amostra 2 – Tração 3523N



Parâmetros de soldagem - Corrente: 820A / Tempo: 34ms / Lift: 0.6mm

Amostra 3 – 6964Tração N



Parâmetros de soldagem - Corrente: 680A / Tempo: 26ms / Lift: 1.2mm

Amostra 4 – Tração 3658N



Parâmetros de soldagem - Conrente: 820A / Tempo: 34ms / Lift: 1.2mm

Amostra 5 – Tração 6456N



Parâmetros de soldagem - Corrente: 680A / Tempo: 26ms / Lift: 0.6mm

Amostra 6 – Tração 5145N



Parâmetros de soldagem - Corrente: 820A / Tempo: 26ms / Lift: 0.6mm

Amostra 7 – Tração 6130N



Parâmetros de soldagem - Corrente: 820A / Tempo: 26ms / Lift: 1.2mm



Figura 41 – Imagens das fraturas obtidas após ensaio de tração referente a cada amostra

De acordo com as imagens da Figura 41, foi verificado que a Amostra 2 e a Amostra 4 apresentaram rompimento por adesão entre o Pino Tucker e Chapa, com resistência variando de 3523 à 3658N, respectivamente. Nestas amostras observa-se uma elevada presença de poros na superfície fraturada além da ausência de deformação do pino e da chapa após o rompimento. Por outro lado, as demais amostras apresentaram rompimento bem distinto, onde o material da Chapa aderiu ao Pino Tucker mesmo após extração. Essas amostras apresentam força de resistência à tração mais elevada quando comparado as Amostras 2 e 4, variando de 5145 à 6964N. Os elevados valores de resistência podem estar associados a uma melhor condição de fusão entre Pino Tucker e Chapa, indicado pelo “núcleo” que se observa após extração entre as partes. Nestas amostras, foi observado deformação dos pinos e da chapa no momento do fratura.

## 6. CONCLUSÃO

De acordo com as análises realizadas, foi verificado que:

- A distancia entre pino e chapa (lift), a corrente e o tempo de soldagem, são parâmetros utilizados durante o processo de soldagem de Pinos Tuckers (Stud Welding) que tem forte influência na qualidade do conjunto soldado, onde a seleção correta dos parâmetros resultam na redução de problemas inerentes ao processo;
- Dois perfis de dureza Vickers foram observados nas amostras analisadas. No primeiro perfil, as Amostras 3 e 5 apresentam uma área de ZTA mais extensa, chegando a atingir a base da chapa com dureza superior a 478HV. Essas duas amostras tiveram parâmetros de processo com maior aplicação de corrente (820A) e tempo (34ms). O segundo perfil de dureza foi característico para as demais amostras, onde a ZTA ficou distribuída entre 0,35 a 0,70mm de profundidade da chapa. Estes fenômenos estão diretamente relacionados com os diferentes parâmetros de processo utilizados na preparação das soldas, fazendo variar a extensão da Zona Termicamente Afetada (ZTA) e da Zona de Fusão (ZF);
- Aplicação de corrente mais baixa (680A) e menor tempo de soldagem (26ms) são parâmetros de processo responsáveis por produzir soldas com menor quantidade de poros. A interação entre esses parâmetros associados a menor distância entre o pino e a chapa (lift) reduzem drasticamente a porosidade na região de fusão da solda. A menor porosidade encontrada na região de fusão da solda é uma área de apenas 0,016mm<sup>2</sup>, com aplicação de corrente de 680A, tempo de 26ms e Lift de 0,6mm;
- A penetração da solda está fortemente associada a resistência do conjunto soldado durante solicitações mecânicas. Os valores de penetração podem ser atingidos com elevadas aplicações de corrente de soldagem e tempo. A distancia entre o pino e chapa (lift) no momento do processo também precisa ser programado no valor máximo. Os valores médios de penetração tem um acréscimo de aproximadamente 23% com os parâmetros de processo programados na máxima condição (corrente 820A, tempo 34ms, lift 1,2mm) quando comparado com os parâmetros na mínima (corrente 680A, tempo 28ms, lift 0,6mm);

- Em relação ao torque máximo necessário para fazer a junta soldada entrar em colapso, foi verificado que o tempo durante o processo de soldagem tem maior influência na resistência ao torque. Com tempo de 26ms as amostras suportaram torque médio de aproximadamente 15Nm para romper. Em contrapartida, tempo de 34ms faz o torque passar para 20Nm aproximadamente, indicando que houve maior fusão entre as partes soldadas. Comportamento semelhante foi observado em relação a variação de corrente. No caso do lift, percebe-se uma menor variação para aos valores médios de resistência ao torque quando comparado ao tempo e a corrente. Neste, houve uma variação de 17 para 18Nm com lift de 0.6 e 1.2mm, respectivamente. Em processos de torque para Pinos M6 soldados através da técnica de Stud Welding, é especificado torque médio de 8Nm;
- Os valores médios de resistência à tração são fortemente influenciados pelos parâmetros de processo analisados, onde a corrente de soldagem tem maior interferência na propriedade mecânica, seguida pelo tempo e lift. Corrente de 820A faz a solda atingir resistência média de aproximadamente 6300N durante ensaio de tração, enquanto o uso de baixa corrente reduz drasticamente esses valores, chegando a atingir aproximadamente 4500N com corrente de 680A. Este fenômeno está associando a elevada penetração obtida durante a fusão entre pino e chapa. O tempo de soldagem também é um fator que impacta na qualidade da solda, fazendo o valor médio de resistência à tração sair de 4800 para 6000N, em tempos de 26 e 34s, respectivamente.

## 7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASM INTERNATIONAL. *ASM Handbook Properties and Selection: Irons, Steels, and High Performance Alloys*– 1993. Estados Unidos da América (Ohio), 2017. 300 p.

ASM INTERNATIONAL. *ASM Handbook Metallographic and Microstructures* – 1992. Estados Unidos da América (Ohio), 2017. 1444 p.

ASM INTERNATIONAL. *ASM Handbook Welding Brazing and Soldering* – 1993. Estados Unidos da América (Ohio), 2017. 642 p.

BS EN 10263-2:2001, Steel rod, bars and wire for cold heading and cold extrusion – Part 2: Technical delivery conditions for steels not intended for heat treatment after cold working. Publication date: 15 August 2001, Edition: 2. Number of pages: 12.

CALLISTER, William D. Jr. *Ciências e Engenharia de Materiais: Uma Introdução*. 5. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora, 1999.

CHABERS, Harry. Principles and Practices of Stud Welding. PCI Journal, Ohio, 30 set. 2001 Disponível em: <<http://www.imcyc.com/biblioteca/ArquivosPDF/Soldadura/4%20Principles%20and%20practices%20of%20stud%20welding.pdf>>. Acesso em: 18 nov. 2017.

CHIAVERINI, Vicente. *Tecnologia Mecânica: processos de fabricação e tratamento*. 2. ed. São Paulo: MacGraw-Hill, 1986.

DIN EN 10083-3:2007-01, Steels for quenching and tempering –Part 3: Technical delivery conditions for alloy steels.

DUARTE, Ana Caroline Ribeiro. MENDES, Rachel Santos. FONTANA, Manuela. SILVA, Fabiane Roberta Freitas da. CASTRO, Gabriel Gonçalves Pessoa de. LINS, Jefferson Fabricio Cardoso.; Microstructural Evolution of a Pearlitic Steel Subjected to Thermomechanical Processing, *Materials Research*, 2018. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S1516-14392018005012101&script=sci\\_arttextsthtml](http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S1516-14392018005012101&script=sci_arttextsthtml)>. Acesso em: 30 mai. 2018.

EHLING, W.; CRETTEUR, A.; PIC, A.; VIERSTRAETE, R.; YIN, Q. Development of a laser decoating process for fully functional Al-Si coated press hardened steel laser welded blank solutions. IN: PROCEEDINGS OF THE FIFTH INTERNATIONAL WLT-CONFERENCE ON LASERS IN MANUFACTURING, 5., 2009, Munique. *Anais eletrônicos...* Munique: WLT, 2009. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/285914030\\_Development\\_of\\_a\\_laser\\_decoating\\_process\\_for\\_fully\\_functional\\_Al-Si\\_coated\\_press\\_hardened\\_steel\\_laser\\_welded\\_blank\\_solutions](https://www.researchgate.net/publication/285914030_Development_of_a_laser_decoating_process_for_fully_functional_Al-Si_coated_press_hardened_steel_laser_welded_blank_solutions)>. Acesso em 20 nov. 2017.

FURTADO, Anderson Elias. *Influência do processamento térmico sobre as propriedades mecânicas e microestruturais de um aço XC48 aplicado a componentes automotivos visando atendimento ao Projeto ULSAB*. 2006. 25 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade do Campos de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, São Paulo.

HUALLPA, Edgar Apaza. *Caracterização da transformação martensítica em temperaturas criogênicas*. 2011. 8 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.

ISO 6892-1:2016, Metallic materials -- Tensile testing -- Part 1: Method of test at room temperature. Publication date: 2016-07, Edition: 2. Number of pages: 79.

ISO 6507-1:2005, Metallic materials - Vickers hardness test. Part 1: Test method. Publication date: 2005-12, Edition: 3.

ISO 6508-1:2015, Metallic materials -- Rockwell hardness test -- Part 1: Test method. Publication date : 2015-03, Edition: 3.

JUNIOR, Hermano Nascimento. *Estudo da relação torque x força tensora e do coeficiente de atrito em parafusos revestidos isentos de cromo hexavalente*. 2003. 6 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais.

JÚNIOR, S.V.; CINTHO, O. M.; Técnicas metalográficas para caracterização microestrutural dos aços. In: Encontro de Engenharia e Tecnologia dos Campos Gerais, 2., 2008. Anais ... Campos Gerais, MG: Universidade Estadual de Ponta Grossa, 2008.

LONGHI, A.; BUTTON, S.T. Estampagem a quente de recortes de chapas de aços ao boro soldadas a laser. In: 7º CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO, 5., 2013, Itatiaia, Rio de Janeiro. *Anais eletrônicos...* Itatiaia: ABCM, 2013. Disponível em: < <http://www.swge.inf.br/siteCOBEF2013/anais/PDFS/COBEF2013-0251.PDF> >. Acesso em 25 mai. 2017.

MARQUES, Paulo Vilani; MODENESI, Paulo José; BRACANESE, Alexandre Queiroz. *Soldagem: Fundamentos e tecnologia*. 3. ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2009.

MODENESI, Paulo José; MARQUES, Paulo Vilani. *Soldagem I: Introdução aos Processo de Soldagem*. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2006.

MODENESI, Paulo José; MARQUES, Paulo Vilani; SANTOS, Dagoberto. *Introdução à metalurgia da soldagem*. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte. 2012.

MUNIZ, José Maria. *Fenômenos Tribológicos intrínsecos ao travamento de juntas de engenharia aparafusadas*. 14 f. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Automotiva) - Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.

NETO, André Olah. *Estudo do efeito da deformação plástica sobre a cinética de transformação de fase do aço 22MnB5 estampado à quente*. 2015. 43 f. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Centro de Ciências Tecnológicas, Universidade do Estado de Santa Catarina, Santa Catarina.

NISHIKAWA, W. The principle and application field of stud welding, *Journal of the Japan Welding Society*, Japão, 17 set. 2003. Disponível em: < <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1533/wint.2003.3170>>. Acesso em: 25 nov. 2017.

OKAMURA, Toshie; TANIGUCHI, Célio. *Engenharia de Soldagem e Aplicações*. Tradução em inglês do título da obra: *Welding Engineering and its Applications*. 1. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora, 1982.

OLIVEIRA, Natalino de Paula. Propriedades mecânicas de um aço de baixo carbono com estrutura ferrita acicular. 2007. 21 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, São Paulo.

PS50003/04 - 2018, Welding: fastener, drawn arc. Publication date: 27 May 2014, Edition: 3. Number of pages: 13.

RAMASAMY, S. Design of Experiments Study to Examine the Effect of Polarity on Stud Welding. *Welding Journal*, Ohio, fev. 2002. Disponível em <<http://files.aws.org/wj/supplement/02-2002-RAMASAMY-s.pdf>>. Acesso em: 18 nov. 2017.

SHIBATA, Akinobu; DAIDO, Shohei; TERADA, Daisuke; TSUJI, Nobuhiro. Microstructures of Pearlite and Martensite Transformed from Ultrafine-Grained Austenite Fabricated through Cyclic Heat Treatment in Medium Carbon Steels. *Materials Transactions*, Kioto, v. 54, n. 9, p.1570-1574, jun. 2013. Disponível em: <<https://www.jim.or.jp/journal/e/pdf3/54/09/1570.pdf>>. Acesso em 3 fev. 2018.

SHOUP, T. E. Stud Welding. In: REGISTER FOR THE TRB 97<sup>th</sup> ANNUAL MEETING, 11., 2017, Nova York. *Anais eletrônicos...* Nova York: Welding Research Concil, 2017. Disponível em: <<https://trid.trb.org/view.aspx?id=45707>>. Acesso em 01 dez. 2017.

SOUZA, Fabrício Brandão Pereira de. *Simulação Numérica do Processo de Estampagem a Quente do Aço USIBOR1500P*. 2013. 30f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas da Universidade Federal de Minas Gerais) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

TORIBIO, Jesús. GONZÁLEZ, Beatriz. MATOS, Juan-Carlos. AYASO, Francisco-Javier. Influence of Microstructure on Strength and Ductility in Fully Pearlitic Steels. *Metals*, Salamanca, 15dez. 2016. Disponível em: <<http://www.mdpi.com/2075-4701/6/12/318>>.

YASSUDA, Irineu dos Santos. *Estudo do comportamento de revestimentos superficiais em elementos roscados de fixação quando submetidos a torque*. 2006. 33 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Tecnologia Espaciais/Ciência e Tecnologia de Materiais e Sensores) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos.