

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Renan Rakoski Zientarski

**ANÁLISE DE INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE SOLDAGEM A  
ARCO ELÉTRICO COM ATMOSFERA DE PROTEÇÃO GASOSA  
(GMAW) NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E  
MICROESTRUTURAIS DO AÇO ASTM A36**

Santa Maria, RS  
2019

**Renan Rakoski Zientarski**

**ANÁLISE DE INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE SOLDAGEM A  
ARCO ELÉTRICO COM ATMOSFERA DE PROTEÇÃO GASOSA  
(GMAW) NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E  
MICROESTRUTURAIS DO AÇO ASTM A36**

Trabalho de conclusão de curso, apresentado ao Curso de Engenharia Mecânica, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Engenheiro Mecânico**.

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Aparecido Buenos

Santa Maria, RS  
2019

**Renan Rakoski Zientarski**

**ANÁLISE DE INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE SOLDAGEM A  
ARCO ELÉTRICO COM ATMOSFERA DE PROTEÇÃO GASOSA  
(GMAW) NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E  
MICROESTRUTURAIS DO AÇO ASTM A36**

Trabalho de conclusão de curso, apresentado ao Curso de Engenharia Mecânica, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Engenheiro Mecânico**.

**Aprovado em 19 de julho de 2019:**

---

**Prof. Alexandre Aparecido Buenos, Dr. Eng. (DEM/UFSM)**  
(Presidente/Orientador)

---

**Prof. Inácio da Fontoura Limberger, Dr. Eng. (DEM/UFSM)**

---

**Profa. Natália de Freitas Daudt, Dr. Eng. (DEM/UFSM)**

Santa Maria, RS  
2019

## RESUMO

# ANÁLISE DE INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE SOLDAGEM A ARCO ELÉTRICO COM ATMOSFERA DE PROTEÇÃO GASOSA (GMAW) NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E MICROESTRUTURAIS DO AÇO ASTM A36

AUTOR: Renan Rakoski Zientarski

ORIENTADOR: Alexandre Aparecido Buenos

Estruturas e construções metálicas são largamente utilizadas em obras de construção civil, naval e plantas industriais. Estas podem ser construídas utilizando uniões parafusadas ou soldadas dependendo de cada situação. As estruturas soldadas, normalmente apresentam menor custo em relação as parafusadas, no entanto, a soldagem nem sempre é realizada por operadores treinados ou até mesmo monitorada em termos de propriedades mecânicas dos cordões de solda. Sabe-se que variações na regulagem dos parâmetros de soldagem podem afetar consideravelmente as propriedades mecânicas e microestruturais de um cordão de solda. Este trabalho propõe-se a analisar a influência dos parâmetros de soldagem a arco elétrico, com atmosfera de proteção gasosa (GMAW), nas propriedades mecânicas e microestruturais do aço ASTM A36, onde as características observadas são a microestrutura e dureza do material. Para isso, foram fabricados corpos de prova do aço ASTM A36 e, posteriormente, estes foram soldados com a utilização de diferentes combinações dos parâmetros de soldagem principais, tais como tensão de soldagem, velocidade de alimentação de arame e velocidade de avanço da solda. Também foi realizada uma revisão bibliográfica com os conceitos básicos e trabalhos relacionados com tema. O resultado deste trabalho é a definição quantitativa da influência dos parâmetros de soldagem GMAW na microdureza e uma análise qualitativa sobre a influência na microestrutura do material em estudo, permitindo definir os parâmetros ótimos para obtenção de um determinado cordão de solda, possibilitando a localização da faixa ideal de operação para este processo com o aço ASTM A36.

**Palavras-chave:** Dureza. Parâmetros de soldagem. Análise microestrutural. Parâmetros ótimos de soldagem.

## ABSTRACT

# ANALYSIS OF WELDING PARAMETERS TO GAS PROTECTION ATMOSPHERE (GMAW) ON MECHANICAL AND MICROSTRUCTURAL PROPERTIES OF ASTM A36 STEEL

AUTHOR: Renan Rakoski Zientarski  
ADVISOR: Alexandre Aparecido Buenos

Metallic structures and constructions are widely used in civil construction and industrial plants. These can be constructed using bolted or welded joints. In welded structures, these being more common, usually presenting lower cost in comparison to screw joints, welding is not always performed by trained operators or even monitored in terms of the mechanical properties of the weld beads. It is known that changes in the regulation of the welding parameters can considerably affect the mechanical and microstructural properties of a weld bead. This work proposes to analyze the influence of the welding parameters such as the electric arc, with gas-protective atmosphere (GMAW), in the mechanical and microstructural properties of ASTM A36 steel., where the observed characteristics are microstructure and hardness of material. The observed characteristics are the microstructure and hardness of the material. For this, ASTM A36 steel specimens where be fabricated and later welded using different combinations of the main welding parameters, such as welding voltage, wire feed speed and welding speed. A bibliographic review was also be made with the basic concepts and works related to the theme. The result of this work is the quantitative definition of the influence of the GMAW welding parameters on the microhardness and microstructure of the material under study, allowing to define the optimal parameters to obtain the optimal range of operation.

**Keywords:** Welding ASTM A36. Welding Parameters. Microstructural analysis. Optimization of the welding point.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema representativo do processo de soldagem GMAW. ....	15
Figura 2 - Modos de transferência metálica em função da corrente (A) e tensão (V). ....	16
Figura 3 - Representação esquemática do modo de transferência metálica. ....	17
Figura 4. Gráficos típicos para transferência metálica por curto-circuito. ....	17
Figura 5. Gráfico típico de uma transferência metálica por pulverização. ....	18
Figura 6 - Representação de trincas de solidificação. ....	20
Figura 7 - Representação esquemática de mordedura no processo de soldagem. ....	21
Figura 8 - Representação de falta de penetração em uma junta soldada. ....	21
Figura 9 - Regiões da junta soldada. ....	22
Figura 10 - Microestruturas presentes em uma região de solidificação. ....	24
Figura 11 - Composição Química do Aço ASTM A36. ....	26
Figura 12 - Representação do funcionamento de um durômetro Vickers. ....	28
Figura 13 - Fluxograma das atividades desenvolvidas no trabalho. ....	29
Figura 14 - Modelo digital do corpo de prova de teste utilizado no experimento. ....	32
Figura 15. Configuração do modelo de corpo de prova. ....	32
Figura 16. Centro de usinagem, marca Romi, modelo D600. ....	35
Figura 17. Serra de fita, marca Franho, modelo FM500. ....	35
Figura 18 - Equipamento de Soldagem, marca IMC, modelo DigiPlus A7. ....	36
Figura 19. Tartilope de solda da marca White Martins, modelo MC 46. ....	37
Figura 20 - Representação do layout e posição de soldagem. ....	37
Figura 21 - Placa de aço ASTM A36 após processo de soldagem. ....	39
Figura 22 - Bancada de lixamento manual (a) e amostras (b). ....	40
Figura 23 - Politriz rotativa da marca Teclago, modelo PLO2 E. ....	40
Figura 24 - Exemplo de amostra polida e pronta para os ensaios (CP19). ....	41
Figura 25 - Microdurômetro da marca Shimadzu, modelo HVM, utilizado nos ensaios. ....	41
Figura 26 - Imagem microscópica (400x) da endentação utilizada para aferir a microdureza do material. ....	42
Figura 27. Posição dos pontos na amostra. ....	42
Figura 28 – Microscópio, marca Olympus, modelo BX60M. ....	43
Figura 29. Perfil de microdureza Vickers para o material de base. ....	45
Figura 30. Perfil de microdureza para CP01 (curto-circuito). ....	46

Figura 31. Perfil de microdureza para CP06 (curto-circuito).....	46
Figura 32. Perfil de microdureza para CP12 (pulverização).....	47
Figura 33. Perfil de microdureza para CP17 (pulverização).....	47
Figura 34. Gráfico da aquisição dos parâmetros para curto-circuito durante o processo de soldagem.....	48
Figura 35. Gráfico da aquisição dos parâmetros para pulverização durante o processo de soldagem.....	49
Figura 36. Superfície de resposta de U X VA na microdureza do ponto central. ....	50
Figura 37. Gráfico de contorno de U x VA na microdureza do ponto central. ....	51
Figura 38. Superfície de resposta de U X VS na microdureza do ponto central. ....	51
Figura 39. Gráfico de contorno de U x VS na microdureza do ponto central.....	52
Figura 40. Superfície de resposta de VS X VA na microdureza do ponto central. ....	52
Figura 41. Gráfico de contorno de VS x VA na microdureza do ponto central. ....	53
Figura 42. Superfície de resposta de U X VA na microdureza na região da ZTA. ....	53
Figura 43. Gráfico de contorno de U X VA na microdureza na região da ZTA. ....	54
Figura 44. Superfície de resposta de U X VS na microdureza na região da ZTA.....	54
Figura 45. Gráfico de contorno de U X VS na microdureza na região da ZTA.....	55
Figura 46. Superfície de resposta de VA x VS na microdureza na região da ZTA.....	55
Figura 47. Gráfico de contorno de VA x VS na microdureza na região da ZTA.....	56
Figura 48. Microestrutura região de transição ZF-ZTA para o CP06. Ataque: Nital 3%.....	57
Figura 49. Microestrutura região de transição ZF-ZTA para o CP01. Ataque: Nital 3%.....	57
Figura 50. Microestrutura região de transição ZF-ZTA para o CP17. Ataque: Nital 3%.....	58

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Faixas de utilização de cada parâmetro de soldagem.....	30
Tabela 2. Propriedades mecânicas do material.....	33
Tabela 3. Composição química do arame de solda utilizado. ....	33
Tabela 4. Definição da sigla do metal de adição. ....	34
Tabela 5 - Distribuição dos parâmetros nos corpos de prova.....	38
Tabela 6. Valores fixos de parâmetros de utilizados na soldagem. ....	38
Tabela 7. Resultados e valores médios obtidos nos ensaios.....	444
Tabela 8. Amostras selecionadas para análise do perfil de microdureza.....	455



**LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

AF	Ferrita Acicular
ASME	<i>American Society of Mechanical Engineers</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
AWS	<i>American Welding Society</i>
CAD	Desenho assistido por computador
CP	Corpo de prova
CT	Centro de Tecnologia
DBCP	Distância de contato bico-peça
FP(G)	Ferrita primária de contorno de grão
FP(I)	Ferrita idiomórfica
GMAW	<i>Gas Metal Arc Welding</i>
H	Aporte térmico
I	Corrente elétrica
LE	Limite de escoamento
LR	Limite de resistência
MAG	<i>Metal Active Gas</i>
MB	Material de base
MIG	<i>Metal Inert Gas</i>
TIG	<i>Tungsten Inert Gas</i>
V	Tensão de soldagem
VA	Velocidade de alimentação de arame
VS	Velocidade de soldagem
ZAC	Zona afetada pelo calor
ZF	Zona fundida
ZTA	Zona termicamente afetada

## SUMÁRIO

<b>RESUMO .....</b>	<b>4</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>5</b>
<b>LISTA DE FIGURAS .....</b>	<b>6</b>
<b>LISTA DE TABELAS .....</b>	<b>8</b>
<b>LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS .....</b>	<b>10</b>
<b>SUMÁRIO.....</b>	<b>11</b>
<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>12</b>
1.1 OBJETIVO GERAL .....	12
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	13
1.3 JUSTIFICATIVA DO TRABALHO .....	13
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>14</b>
2.1 PROCESSO DE SOLDAGEM .....	14
<b>2.1.1 Processo de soldagem GMAW.....</b>	<b>15</b>
<b>2.1.2 Variáveis do processo de soldagem GMAW .....</b>	<b>18</b>
<b>2.1.3 Falhas e discontinuidades na região soldada.....</b>	<b>20</b>
<b>2.1.4 Regiões de uma junta soldada .....</b>	<b>22</b>
<b>2.1.5 Microestruturas das regiões soldadas .....</b>	<b>23</b>
<b>2.1.6 Aporte térmico .....</b>	<b>24</b>
2.2 AÇOS ESTRUTURAIS .....	25
<b>2.2.1 Soldabilidade do aço ASTM A36.....</b>	<b>26</b>
<b>2.2.2 Regiões de Granulação do aço ASTM A36 .....</b>	<b>26</b>
2.3 ANÁLISE DE MICRODUREZA VICKERS .....	27
<b>3 MATERIAS E MÉTODOS .....</b>	<b>29</b>
3.1 PLANEJAMENTO SEQUENCIAL.....	29
3.2 CORPOS DE PROVA .....	31
<b>3.2.1 Material de Base .....</b>	<b>33</b>
<b>3.2.2 Material de Adição.....</b>	<b>33</b>
<b>3.2.3 Fabricação.....</b>	<b>34</b>
3.3 EQUIPAMENTO DE SOLDAGEM .....	36
3.4 PREPARO DAS AMOSTRAS PARA OS ENSAIOS .....	39
3.5 EQUIPAMENTO DE MEDIÇÃO DE MICRODUREZA .....	41
3.6 EQUIPAMENTO DE ANÁLISE MICROESTRUTURAL .....	43
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>44</b>
4.1 RESULTADO DA ANÁLISE DE MICRODUREZA .....	44
4.2 RESULTADOS DA ANÁLISE DO MODO DE TRANSFERÊNCIA METÁLICA ....	48
4.3 INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE SOLDAGEM NA MICRODUREZA.....	50
<b>4.3.1 Influência dos parâmetros de soldagem na microdureza da ZF .....</b>	<b>50</b>
<b>4.3.2 Influência dos parâmetros de soldagem na microdureza da ZTA .....</b>	<b>53</b>
4.4 RESULTADOS DA ANÁLISE DA MICROESTRUTURA.....	56
<b>5 CONCLUSÃO.....</b>	<b>59</b>
5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	59
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>61</b>

# 1 INTRODUÇÃO

Soldagem é um dos principais processos de união permanente entre materiais, e é utilizado intensivamente em praticamente todos os setores da indústria, por apresentar fácil execução, baixo custo e confiabilidade. Devido à utilização de estruturas metálicas na construção mecânica, civil e naval, tem ocorrido a necessidade do aprimoramento do processo de soldagem, bem como a diminuição do risco de acidentes em regiões soldadas, tendo em vista que é considerada a região mais suscetível a falhas na estrutura. Além de que a utilização de menores fatores de segurança busca-se a

A zona soldada em um metal é caracterizada pelo alto gradiente térmico presente na região de solidificação, que tem por consequência o aparecimento de regiões de elevada dureza, zonas de elevadas tensões residuais e distorções no material que são considerados os principais agente causadores de falhas prematuras em peças soldadas. Deste modo, a análise das microestruturas formadas na zona fundida de uma união soldada e a análise das suas propriedades mecânicas torna-se importante.

A seguir, será apresentada a estrutura deste trabalho, no capítulo 1 é apresentado a justificativa para este trabalho, tais como os objetivos delimitados para o mesmo. O capítulo 2 apresenta a revisão bibliográfica, com os principais conceitos de soldagem e microestruturas, assim como a descrição de autores recentes, que relacionam a formação de pontos de elevada dureza aos principais parâmetros de soldagem.

Os capítulos 3, 4 e 5 apresentam, respectivamente, os materiais, métodos, resultados e conclusões obtidas no presente trabalho, bem como um fechamento com os pontos mais importantes a serem observados neste.

Ao final são apresentadas as referências bibliográficas, apêndices e anexos que permitem identificar materiais utilizados para elaboração do trabalho, bem como obter informações adicionais relacionados com o conteúdo do trabalho.

## 1.1 OBJETIVO GERAL

Este trabalho tem como objetivo principal analisar o efeito da variação dos parâmetros de soldagem sobre o perfil de dureza e microestrutura no cordão de uniões soldadas de chapas de aço ASTM A36, sendo estas geradas pelo processo de soldagem GMAW (*Gas Metal Arc Welding*) utilizando parâmetros de soldagem variados, tais como intensidade da corrente, tensão, velocidade de solda e velocidade de alimentação de arame.

## 1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Este projeto tem como objetivos específicos:

- a) Definir variáveis dos parâmetros de soldagem fixas e ajustáveis a serem utilizados no processo de soldagem GMAW;
- b) Definir a quantidade de corpos de prova e combinações das variáveis dos parâmetros de soldagem ajustáveis para cada corpo de prova;
- c) Confeccionar corpos de prova de aço ASTM A36 com cordões de solda gerados pelo processo GMAW utilizando variáveis dos parâmetros de soldagem fixas e ajustáveis;
- d) Analisar a dureza nas poças de fusão dos corpos de prova;
- e) Analisar a formação de trincas internas nas poças de fusão dos corpos de prova;

## 1.3 JUSTIFICATIVA DO TRABALHO

Este trabalho justifica-se devido ao fato de pontos de elevada dureza ou com regiões microestruturais específicas representarem proeminentes causas em acidentes e falhas em materiais, sendo necessária uma investigação mais profunda das suas origem e agravantes. A análise no material em questão, aço ASTM A36 (estrutural), este material foi escolhido devido a ser um aço-carbono largamente utilizado para construção civil e estruturas metálicas, bem como o processo de soldagem GMAW ser um dos processos mais economicamente viáveis e, também largamente utilizado na área de construção civil, mecânica entre outras.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 PROCESSO DE SOLDAGEM

A soldagem é definida como o processo de união permanente entre duas partes metálicas, usando uma fonte de calor, assegurando na junta soldada a continuidade das características físicas, químicas e metalúrgicas do material. (MODENESI, 2011). Atualmente, o processo de soldagem é amplamente utilizado em indústrias automotivas, navais, aeronáuticas e na construção civil. Desta maneira é praticamente impossível a obtenção de um equipamento ou sistema sem a presença de união soldada. Um dos principais fatores para utilização da soldagem é o menor custo em relação aos outros métodos de fixação e por apresentar boa resistência aos componentes. (LANCASTER, 2003).

Com o objetivo de padronização deste trabalho, serão adotadas as seguintes terminologias: soldagem é um processo que visa obter a união de peças metálicas; cordão de solda ou solda é o resultado da soldagem; metal de base é o material das peças que estão sendo soldados; metal de adição é o material adicionado que forma a solda; junta é a região onde as peças serão unidas por soldagem, junta soldada é a região soldada compreendendo o metal de base e o cordão de solda, e chanfro é o espaço para conter o cordão de solda. (WAINER, 1992).

De acordo Houldcroft (1980) cada processo de soldagem deve preencher os seguintes requisitos:

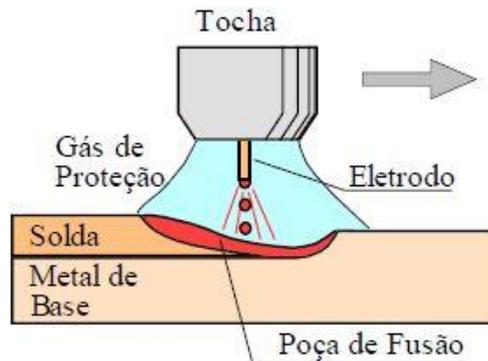
- Gerar uma quantidade de energia capaz de unir dois materiais similares ou não;
- Remover contaminações das superfícies a serem unidas;
- Evitar que o ar atmosférico contamine a região durante a soldagem;
- Propiciar o controle da transformação de fase, para que a solda alcance as propriedades desejadas.

Entre os principais processos de soldagem se destacam o processo com eletrodo revestido, plasma, fricção, TIG e GMAW (com gases de proteção ativos ou inertes). Este último será apresentado em maiores detalhes a seguir, isso porque o mesmo será empregado na confecção dos cordões de solda que foram utilizados neste trabalho.

### 2.1.1 Processo de soldagem GMAW

O processo de soldagem a arco elétrico utilizando gás de proteção é conhecido internacionalmente pela sigla em inglês GMAW (*Gas Metal Arc Welding*), também conhecido como processo MIG (*Metal Inert Gas*) ou MAG (*Metal Active as*). O processo GMAW tem como princípio de funcionamento um arco elétrico mantido entre o eletrodo consumível e a peça a soldar, este arco é a fonte responsável pelo calor e por fundir o arame consumível à medida que é alimentado na poça de fusão (Figura 1). Para garantir a proteção a zona de soldagem, é utilizado um gás inerte, ativo ou mistura entre ambos. (MODENESI, 2011)

Figura 1 - Esquema representativo do processo de soldagem GMAW.



Fonte: Modenesi (2011).

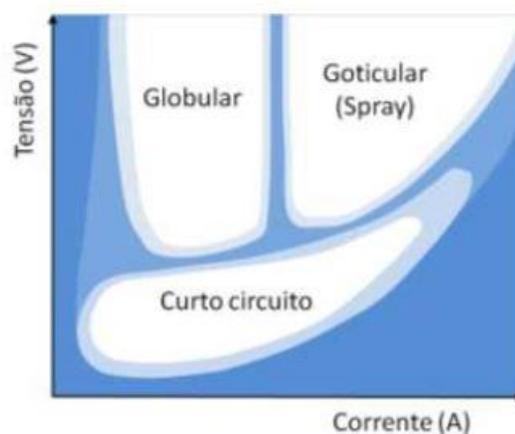
Dentre as principais características deste processo, destacam-se a alimentação contínua do eletrodo e elevadas taxas de deposição de metal de adição, devido à alta densidade de corrente na ponta do arame. Por se tratar de um processo com ausência de escória, a poça de fusão apresenta elevada velocidade de resfriamento, o que facilita a formação de discontinuidades e falhas na região soldada. (MAIA, 2015)

A transferência metálica neste processo pode ocorrer de 3 maneiras distintas, que são definidas por Modenesi (2011) como:

- a) *Transferência Globular* – Ocorre quando há baixas densidades de corrente, pois a gota se forma na ponta do eletrodo e possui diâmetro maior que ele, resultando em falta de penetração, falta de fusão e necessidade de cordão de solda de reforço.
- b) *Transferência por curto-circuito* – Ocorre para valores mais baixos de tensão, assim a gota é puxada para a poça de fusão, ocasionando uma quantidade de calor menor. Sendo recomendada para soldar chapas finas.
- c) *Transferência por pulverização* – Ocorre para elevadas densidades de corrente e tensão, ocorre principalmente quando se usa argônio como gás de proteção. A gota formada na ponta do eletrodo possui diâmetro muito pequeno. Neste processo ocorre grande transferência de calor para o metal-base.

A Figura 2 apresenta de forma esquemática a relação entre a tensão de soldagem (V) e a corrente (A) para diferentes formas de transferência de material em um processo convencional de soldagem.

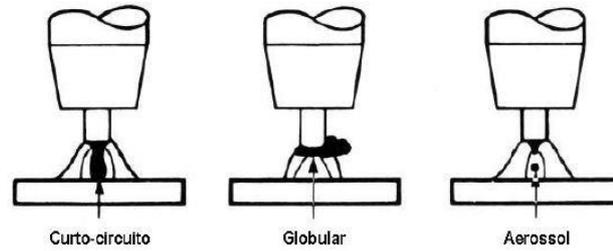
Figura 2 - Modos de transferência metálica em função da corrente (A) e tensão (V).



Fonte: Modenesi (2011).

De acordo com Fortes (Figura 3) que apresentou uma representação esquemática do modo de transferência metálica, onde pode-se observar o comportamento físico do metal de adição durante o processo de soldagem com diferentes modos de transferência metálica.

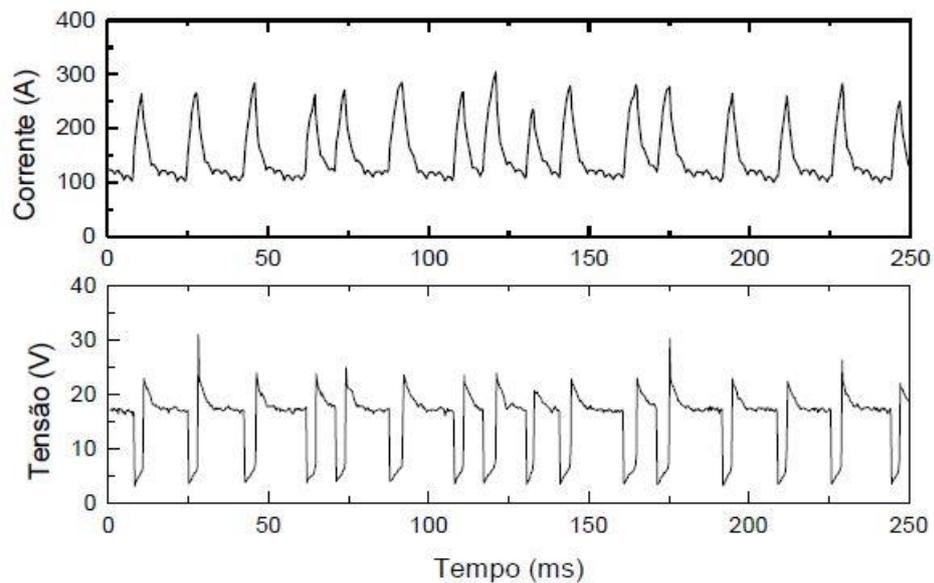
Figura 3 - Representação esquemática do modo de transferência metálica.



Fonte: Fortes (2005).

Do ponto de vista de parâmetros físicos da soldagem, o modo de transferência pode ser observado através da análise temporal do sinal de tensão de soldagem (V) e corrente elétrica da soldagem (A). De acordo com Modenesi (2011), durante o curto-circuito a corrente tende a se elevar muito rapidamente e aumentando a transferência de metal pelo efeito Joule. Eventualmente o curto acaba se rompendo momentaneamente e se reestabelecendo, sendo muito notável em um gráfico de corrente (A) X tempo (s), conforme pode ser observado na Figura 4. Deste modo, durante o período em que o arco está operando, a corrente varia de um pico elevado até seu regime inicial, de maneira cíclica.

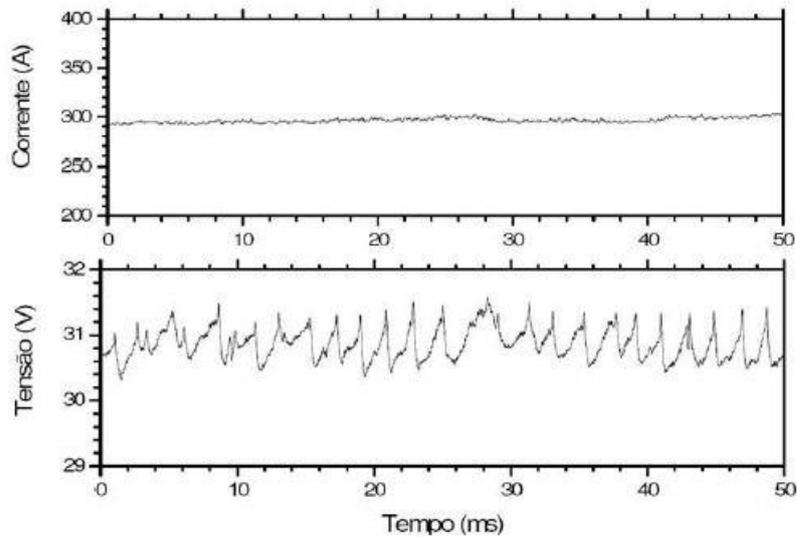
Figura 4. Gráficos típicos para transferência metálica por curto-circuito.



Fonte: Modenesi (2011).

Em contrapartida, o modo de transferência por pulverização (spray) ocorre usualmente de forma muito estável, com poucas alterações na forma do arco elétrico. (MODENESI, 2011). A partir dessa estabilidade do arco elétrico o gráfico indicador deste modo de transferência se comporta de maneira uniforme (Figura 5).

Figura 5. Gráfico típico de uma transferência metálica por pulverização.



Fonte: Modenesi (2011).

### 2.1.2 Variáveis do processo de soldagem GMAW

O processo padrão de soldagem MAG possui variáveis fixas e ajustáveis, de acordo com cada material utilizado para a solda.

Segundo Wainer (1992), de modo geral, os parâmetros fixos são:

- Intervalo de corrente (A) utilizado para cada bitola do eletrodo e material empregado.
- Espessura do metal de base.
- Penetração desejada.
- Taxa de deposição.
- Geometria do cordão e posição de soldagem.
- Distância de contato bico-peça (DBCP).

Além disso, Wainer (1992) define os principais parâmetros ajustáveis do processo como sendo:

- a) *Intensidade da Corrente*: É o parâmetro mais influente sobre a taxa de deposição, modo de transferência, penetração e repouso. Em fontes de potência com característica de tensão constante, a intensidade é regulada a partir da velocidade de alimentação.
- b) *Tensão*: Principal parâmetro para regular a largura do cordão de solda. Para máquinas que utilizam corrente constante, o aumento da tensão acarreta no aumento da largura do cordão. Pode-se determinar a tensão de solda a partir do comprimento do arco elétrico.
- c) *Velocidade de soldagem*: O controle da velocidade de soldagem é de fundamental importância para o controle de possíveis defeitos no material soldado, pois com o aumento da velocidade ocasiona menor distorção no material, ZTA (Zona Termicamente Afetada) mais estreita e uma microestrutura mais refinada.

As amostras chanfradas em “V” não são indicadas para minimizar as distorções geradas na junta durante a soldagem. A variação dos parâmetros e das condições de soldagem do processo GMAW afetam a distribuição de calor na poça de fusão e possuem influência direta na microestrutura e nas propriedades mecânicas do cordão. (CORRÊA, 2017)

Portanto, segundo Oliveira (2010) a utilização de um método de controle da energia de soldagem, que afeta diretamente o fluxo de calor na junta, é possível devido ao ajuste da tensão, corrente e velocidade de soldagem.

O processo de soldagem com a utilização de gases inertes (MIG) ou ativos (MAG) possui algumas limitações quando comparado a outros processos convencionais de soldagem, como elevada velocidade de resfriamento (devido à ausência de escória) e apresenta maior sensibilidade à variação dos parâmetros elétricos. (MOREIRA, 2008).

O gás comercialmente utilizado neste processo, conhecido como ATAL, é uma mistura entre gases inertes e ativos (geralmente 75% Argônio e 25% CO<sub>2</sub>), resultando em um processo misto de soldagem GMAW. Segundo Tenga (2002), não é recomendado o uso do Argônio (inerte) na sua forma pura na soldagem de aços devido ao arco elétrico não apresentar boa estabilidade, resultando em variações na taxa de deposição. Conforme De Melo (2012), o aumento da concentração de CO<sub>2</sub> resulta na redução na condutividade do arco e no aumento da corrente de transição.

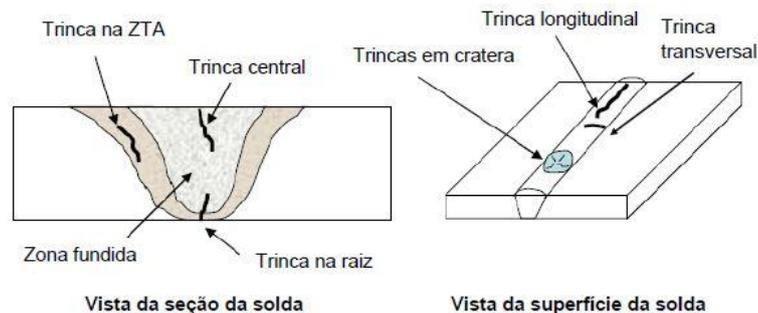
Os arames de solda utilizados no processo possuem em sua composição elementos desoxidantes para evitar a formação de CO e CO<sub>2</sub> (inclusões não metálicas) dentro do cordão de solda. (MOREIRA, 2008).

### 2.1.3 Falhas e discontinuidades na região soldada

#### a) Trincas de Solidificação:

De acordo com Wainer (1992), trincas de solidificação surgem enquanto a temperatura da solda ainda está elevada, portanto está diretamente relacionada a seu processo de solidificação. (Figura 6). O crescimento da trinca ocorre devidos às tensões de resfriamento e, portanto, é produto de uma baixa solubilidade dos elementos de liga nas suas respectivas fases de solidificação. O crescimento de grão atua eliminando impurezas e direcionando elas ao centro da solda. Conforme esse mecanismo de crescimento da trinca, elas tendem a ser longitudinais e se formar na linha de fusão com direção de crescimento radial para o centro do cordão de solda.

Figura 6 - Representação de trincas de solidificação.



Fonte: Wainer (1992).

#### b) Trincamento a frio induzido pelo hidrogênio:

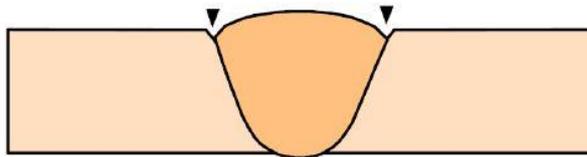
As trincas induzidas por hidrogênio ocorrem próximas a temperatura ambiente e, portanto, são consideradas a “frio”. A trinca é caracterizada por se localizar próxima a ZTA e pela absorção do hidrogênio na poça de fusão e pela umidade absorvida pelo revestimento dos eletrodos. (AWS, 2003)

Segundo Thewlis (2004) o trincamento a frio induzido pelo hidrogênio é uma discontinuidade que ocorre algum tempo após a soldagem, de modo a se tornar um fator crítico para os elementos soldados pois, diferentemente do processo de trinca por solidificação, sua identificação depende de processos de inspeção especiais e que o aparecimento dessas trincas podem demorar e possuir tamanhos muito inferiores ao detectáveis pelos métodos convencionais de inspeção.

c) Mordedura:

A mordedura em uma soldagem é caracterizada pelas reentrâncias agudas formadas pela ação da fonte de calor entre o passe de solda e o material de base, conforme pode ser observado na Figura 7. Quando formada superficialmente a mordedura forma uma redução na espessura do material e atua como um concentrador de tensão nessas cavidades. As principais causas da mordedura em um processo de soldagem são pela manipulação inadequada do eletrodo, comprimento excessivo do arco elétrico ou aporte térmico muito elevado na região. (MODENESI, 2011).

Figura 7 - Representação esquemática de mordedura no processo de soldagem.

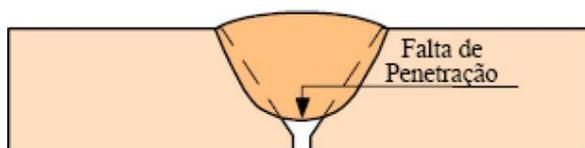


Fonte: Modenesi (2011)

d) Falta de Penetração:

A falta de penetração refere-se à falha devido à falta de fusão e o não enchimento completo da raiz da junta soldada, conforme apresentado na Figura 8. A causa da falta de penetração é multifatorial, podendo-se destacar o projeto inadequado da junta (ângulo de chanfro ou abertura de raiz pequena) ou o uso de um aporte térmico muito reduzido para a solda como principais causadores. (MODENESI, 2011).

Figura 8 - Representação de falta de penetração em uma junta soldada.



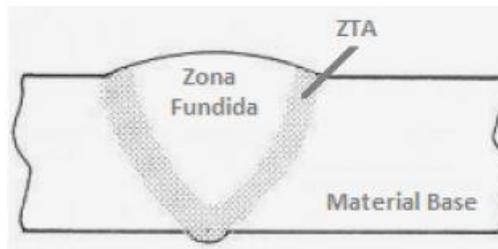
Fonte: Modenesi (2011)

De acordo com Wainer (1992), a falta de penetração causa uma redução da seção útil da solda além de ser um concentrador de tensão para o material.

### 2.1.4 Regiões de uma junta soldada

A curva de resfriamento temperatura x tempo caracteriza o ciclo térmico da soldagem. Esta caracterização, segundo (WAINER, 1992) permite definir três regiões básicas na microestrutura da região soldada: ZF (zona fundida), ZTA (zona termicamente afetada) e MB (material de base). As três regiões podem ser observadas conforme o esquema da Figura 9.

Figura 9 - Regiões da junta soldada.



Fonte: Wainer (1992).

A ZF é caracterizada pelo crescimento competitivo dos grãos, pois durante a solidificação os grãos tendem a crescer no sentido do gradiente térmico máximo. Este crescimento competitivo deve-se ao fato de crescerem mais facilmente em determinadas direções cristalinas, desta maneira os grãos melhor orientados em direção ao gradiente térmico possuem facilidade de crescimento bloqueando os demais (DAVIES, 1975)

Segundo Thewlis (2004) a microestrutura da ZF geralmente apresenta grãos grosseiros e colunares de austenita em aços de baixo carbono, podendo apresentar elevadas quantidades de inclusões não-metálicas. O aceleração do resfriamento facilita a formação de ferrita acicular a partir da austenita, desta forma a microestrutura final da zona fundida fica constituída de uma matriz ferrítica, com ferritas remanescentes de diferentes morfologias.

A ZTA também é conhecida como ZAC (zona afetada pelo calor), é a região onde não ocorreu a fusão da material base, porém, teve sua microestrutura e propriedades alteradas devido ao ciclo térmico da soldagem. Muitas vezes essas alterações nas propriedades levam a resultados indesejados (ANTUNES, 1995).

De acordo com Modenesi (2011), o aumento da energia de soldagem também aumenta a extensão da ZTA, pois a curva de repartição térmica torna-se mais aberta. Por outro lado, a velocidade de resfriamento é reduzida ocasionando um elevado tamanho de grão.

Devido ao elevado gradiente térmico, causando um campo de temperaturas instável, é inevitável que tensões residuais e distorções sejam induzidas durante processo devido à não-uniformidade da expansão e contração do material ao longo do condão de solda. (CHEN, CHEN, & AJITSHENOI, 2015).

### **2.1.5 Microestruturas das regiões soldadas**

De acordo com Callister (2005), todas as ligas de aço possuem microestruturas formadas a partir do resfriamento da liga. Para os aços de baixo teor de carbono, neste caso os aços estruturais, vale ressaltar que as principais microestruturas presentes no processo de solidificação são:

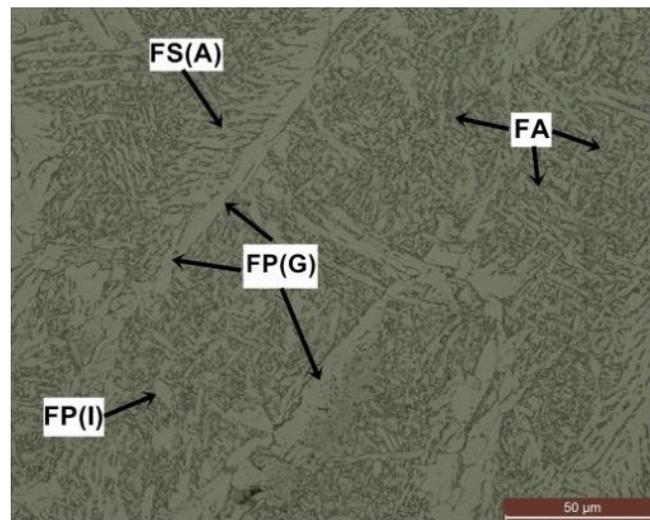
- a) Ferrita: Estrutura de forma cúbica de corpo centrado (CCC). Apresenta baixa solubilidade de carbono (0,0218% a 727°C). A ferrita é um dos constituintes mais moles e dúcteis dos aços.
- b) Cementita: É um dos constituintes onde ocorre a maior concentração de carbono no aço (6,67%), tornando-se assim um dos constituintes mais duros e frágeis do aço.
- c) Perlita: É um constituinte intermediário entre a ferrita e cementita. Cada grão de perlita possui característica de possuir lamelas alternadas de ferrita e cementita, podendo ser observado quando ocorre um resfriamento mais lento.
- d) Martensita: É uma solução sólida obtida por resfriamento muito rápido dos aços, ela possui forma de “agulhas” devido à deformação da sua rede cristalina. Não apresenta uma porcentagem constante de carbono na sua constituição, podendo apresentar um máximo de 0,8% de carbono na sua composição.
- e) Bainita: Assim como a martensita, é obtida a partir do resfriamento rápido da estrutura, porém a bainita apresenta a transformação interrompida de lamelas de cementita.
- f) Austenita: É um dos constituintes mais dúcteis dos aços. Podendo apresentar de 0% a 2,11% de carbono na sua estrutura cristalina cúbica de face centrada (CFC).

Dentre os principais tipos de microestruturas, em um aço estrutural soldado destacam-se, segundo Thewlis (2004), os variados tipos de Ferrita, combinados de ferrita-carbonetos (FCP) e martensita (M). Os variados tipos de ferrita apresentados pela literatura são descritos a seguir:

- Ferrita Primária de Contorno de Grão – FP (G): Consiste no primeiro produto a se constituir na transformação da austenita, formando-se a proporções de resfriamento muito prolongadas.
- Ferrita Poligonal Intragranular – FP(I): Apresenta-se na forma de grãos, normalmente poligonais, e nucleia quase que unicamente no interior dos grãos austeníticos.
- Ferrita Acicular – AF: Apresenta-se na forma de grãos finos de ferrita não paralelas, nucleadas a partir do interior do grão da austenita.
- Ferrita com Segunda Fase Alinhada – FS(A): É formada por grãos grosseiros e paralelos que crescem ao longo de um plano, formando linhas de ferrita paralelas.

Segundo (TRINDADE, 2017), a solidificação da zona fundida (ZF) e ZTA apresenta as seguintes microestruturas conforme mostrado na Figura 10.

Figura 10 - Microestruturas presentes em uma região de solidificação.



Fonte: Trindade (2017).

### 2.1.6 Aporte térmico

Segundo Lancaster (2003) em um processo de soldagem por arco elétrico, o aporte térmico é definido como o calor cedido a junta a ser soldada por unidade de comprimento. Sendo determinado pela Equação 1:

Equação 1. Equação para determinação do aporte térmico.

$$H = \left( \frac{V \cdot I}{v} \right) \eta$$

Fonte: Lancaster (2003).

Onde:

H é o aporte térmico equivalente (J/mm);

V é a tensão de soldagem aplicada (V);

I é a corrente elétrica (A);

v é a velocidade de soldagem empregada (mm/s);

$\eta$  é a eficiência térmica de soldagem para o processo utilizado (%).

A eficiência térmica de soldagem está diretamente ligada a natureza do material de base utilizado, do tipo da fonte de calor e dos parâmetros de soldagem utilizados. Para o processo GMAW convencional esta eficiência tem valores entre 70% e 85% (AWS, 2003).

Deste modo, com uma interpretação simples da equação do aporte térmico de soldagem, para o processo e parâmetros utilizados podemos correlacionar que o aumento da corrente ou tensão de soldagem equivalem a um aumento da energia cedida a junta soldada, assim como o aumento da velocidade de soldagem acarreta em uma diminuição do aporte térmico (OLIVEIRA & SILVA, 2010).

## 2.2 AÇOS ESTRUTURAIS

Aços estruturais são aqueles que possuem grande utilidade na construção mecânica, civil e naval. Geralmente apresentam elevadas tensões de escoamento, alta tenacidade, boa soldabilidade e microestruturas homogêneas. Normalmente são aços de baixa liga, ou seja, baixa concentração de carbono (WAINER, 1992).

Entre os aços estruturais, destaca-se o uso do aço ASTM A36, que é um aço carbono estrutural de grãos finos, com estrutura ferrítica-perlítica de baixo carbono, que apresenta boa soldabilidade e quando ligado ao manganês, proporciona aumento da tenacidade.

De acordo com a fabricante brasileira de aços, Usiminas, o aço ASTM-A36 possui a seguinte composição e características dispostas na Figura 11 .

Figura 11 - Composição Química do Aço ASTM A36.

Especificação	Faixa de Espessura(mm)	Composição Química (% em massa)						Limite de escoamento (MPa)	Limite de Resistência (MPa)	Alongamento Mínimo (%)
		C	Si	Mn	P	S	Outros			
ASTM A36	6,00 < E < 38,10	0,25 máx	0,40 máx	0,80 máx	0,040 máx	0,050máx	(1)	250 min.	400 ~ 550	18

Fonte: USIMINAS (2018).

### 2.2.1 Soldabilidade do aço ASTM A36

A soldabilidade de um aço estrutural é definida pela AWS (2003) como a possibilidade de um material ser soldado nas exigências de fabricação impostas por um projeto estrutural específico, de maneira a qual o material possa se comportar adequadamente e uniformemente para as solicitações as quais serão submetidas.

A maioria das ligas metálicas são soldáveis, no entanto, algumas apresentam dificuldades de acordo com o processo de soldagem utilizado. Desta maneira, a melhor maneira de determinar a soldabilidade de um material é a partir da inspeção visual do processo utilizado, de qual o procedimento empregado e sua aplicação. (MODENESI, 2011)

A influência da composição dos aços foi estudada por Moreira (2008) e define os aços com percentuais de carbono de até 0,15% como de excelentes soldabilidades, esta característica é determinada devido a serem materiais pouco temperáveis. Aços com percentuais de carbono entre 0,15 % e 0,30% também apresentam uma boa soldabilidade, no entanto, são materiais mais suscetíveis de sofrer endurecimento e encruamento superficial.

Deste modo, o aço estrutural ASTM A36 é considerado de boa soldabilidade quando considerados todos parâmetros de projeto (continuidade da junta soldada e solubilidade) e soldagem adequados (TRINDADE, 2017).

### 2.2.2 Regiões de Granulação do aço ASTM A36

De acordo com Davies (1975), as principais microestruturas presentes no aço ASTM-A36 laminado a quente em chapas são separadas em regiões, sendo elas:

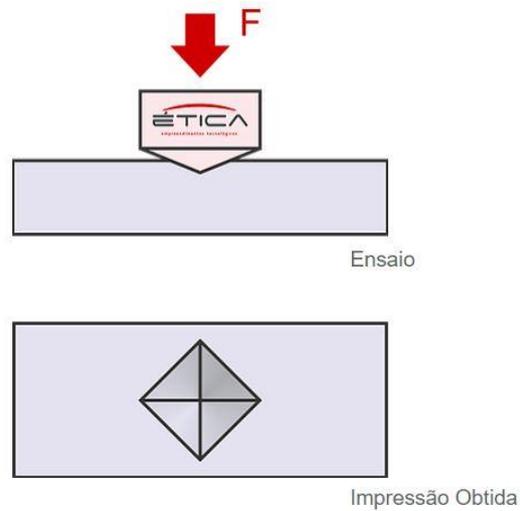
- a) Região de granulação grosseira: Uma região de crescimento de grão, corresponde a porções de metal base aquecido acima de sua temperatura de crescimento de grão (em geral, em torno de 1200°C), tendo uma microestrutura caracterizada pelo seu elevado tamanho de grão.

- b) Região de Normalização: Região que se situa mais afastada da linha de fusão que a região de granulação grosseira, sendo submetida durante a soldagem, a temperaturas de pico que ficam entre 1200°C e a linha A3 do diagrama ferro-carbono. Esta região é caracterizada por uma estrutura de granulação fina, similar à dos aços normalizados. Esta região não é considerada problemática para a este tipo de aço, pois não envolve processos de revenimento e tempera posteriores.
- c) Região Intercrítica: Região em que o material é aquecido, durante a soldagem, entre as linhas A3 e A1 (Diagrama Fe-C) e sofre uma transformação parcial, isto é, apenas parte de sua estrutura é transformada em austenita, que se decompõe em seguida durante o resfriamento. Em um aço com uma estrutura de ferrita e perlita antes da soldagem, as regiões perlíticas (com cerca de 0,8% de 29 carbono) e uma quantidade variável da ferrita junto à perlita se transformam em austenita durante a soldagem. No resfriamento, estas regiões que se apresentam com um teor de carbono maior do que teor médio do aço, podem se transformar em martensita se a velocidade de resfriamento for suficientemente elevada.
- d) Região Subcrítica: Região que apresenta pequenas alterações micro estruturais visíveis ao microscópio ótico neste aço devido a condição de laminação a quente e posterior normalização. Ocorre uma ligeira formação de perlita.

### 2.3 ANÁLISE DE MICRODUREZA VICKERS

O ensaio de dureza Vickers, de acordo com a Norma (ASME E384, 2011) consiste em forçar, através da aplicação de uma carga pré-estabelecida, um penetrador de diamante com formato de pirâmide de dimensões conhecidas, sobre a superfície do corpo de prova a ser ensaiado conforme apresentado na Figura 12.

Figura 12 - Representação do funcionamento de um durômetro Vickers.



Fonte: Ética equipamentos de precisão (2019).

A dureza do material é obtida correlacionando, através de cálculos, a carga que foi aplicada, com a área da impressão obtida. Quanto mais duro o material, menor a penetração será obtida para uma mesma força, e, portanto, menor a área da impressão.

### 3 MATERIAS E MÉTODOS

Este capítulo apresenta um planejamento sequencial da execução das atividades do trabalho, como a definição dos corpos de prova e equipamentos utilizados na fabricação e ensaios realizados.

#### 3.1 PLANEJAMENTO SEQUENCIAL

O seguinte trabalho apresenta um planejamento de execução conforme o fluxograma apresentado na Figura 13. Ele apresenta de maneira simplificada as etapas que serão descritas posteriormente.

Figura 13 - Fluxograma das atividades desenvolvidas no trabalho.



Fonte: Autor (2019)

A partir do fluxograma apresentado, são detalhadas as características de cada etapa do processo:

1. Determinação do material dos corpos de prova (CPs): O material utilizado para os ensaios é de grande importância para a relevância do trabalho e seus resultados, portanto, optou-se por utilizar um aço ASTM-A36 que tem larga utilização estrutural, sendo de suma importância a análise do seu comportamento sob determinadas condições de soldagem.
2. Preparação de CPs de pré-teste: A utilização de CPs de pré-teste fez-se necessária devido a preparação da junta de soldagem, assim como a faixa de utilização dos parâmetros que seriam utilizados para proporcionar uma boa soldabilidade do

material. Os CPs de pré-teste foram fabricados em tamanho menor do que os CPs utilizados nos ensaios.

3. Montagem e preparação do layout de soldagem: Uma das etapas principais no processo foi a preparação dos equipamentos de solda utilizados, assim como a seleção do tipo de arame, do gás (comercialmente mais utilizado para este processo) e da tocha utilizados.
4. Determinação dos parâmetros geométricos e de soldagem: A partir da utilização de CPs de pré-teste foi possível determinar qual a geometria ideal para a realização da soldagem, assim como a faixa de variação dos parâmetros de tensão, velocidade de soldagem e de alimentação utilizados para cada CP. A Tabela 1 apresenta as faixas de utilização de cada parâmetro de soldagem.

Tabela 1 - Faixas de utilização de cada parâmetro de soldagem.

	<b>Tensão (V)</b>	<b>Alimentação de Arame (m/in)</b>	<b>Velocidade de Soldagem (cm/min)</b>
Faixa de utilização	17 - 33	4 - 10	15 - 45

Fonte: Autor (2019).

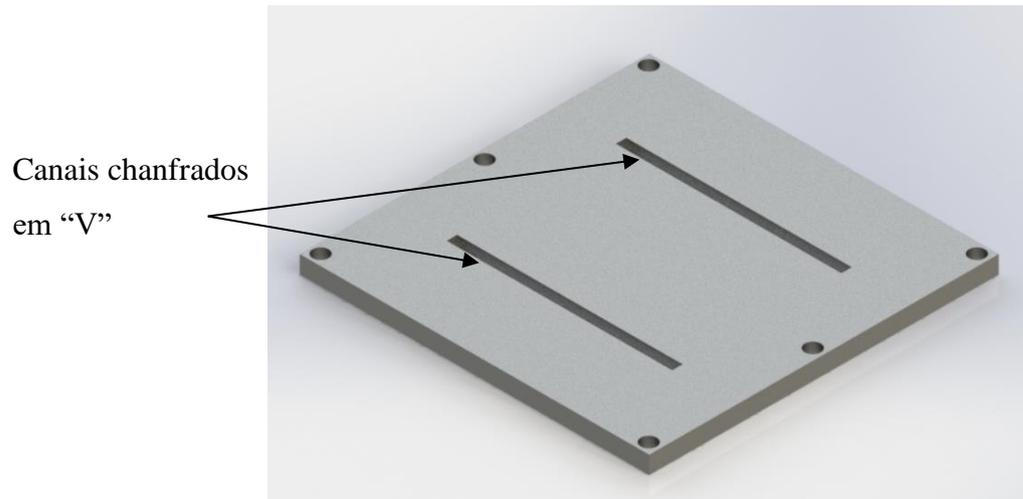
5. Fabricação e preparação dos CPs de teste: Após a determinação dos parâmetros utilizados, foram preparados os CPs de teste utilizados no ensaio. Desta maneira, foi possível evitar o desperdício de material.
6. Realização do processo de soldagem: Após a preparação dos CPs de teste, com os parâmetros de soldagem já determinados e o layout já preparado, foi possível realizar os testes em todos os CPs, de acordo com a variação dos parâmetros analisados.
7. Corte das amostras: O corte das amostras foi realizado utilizando uma serra-fita, que é um equipamento automatizado utilizado para cortar materiais de diversas dimensões e espessuras garantindo qualidade e precisão no corte.

8. Preparo das amostras para ensaio de microdureza: O preparo das amostras para o ensaio de microdureza consiste no processo de lixamento completo da amostra, conforme será apresentado posteriormente e polimento das mesmas, de modo a garantir uma superfície sem asperezas e irregularidades.
9. Preparo das amostras para metalografia: Assim como o preparo das amostras para o ensaio de microdureza, o ensaio metalográfico exige um alto acabamento superficial para garantir o melhor resultado e visualização com a utilização dos aparelhos microscópicos.
10. Análise e discussão dos resultados obtidos: Após a realização dos ensaios de microdureza e metalografia. e a sua consequente obtenção de dados, esta etapa objetivou os pós tratamentos e a interpretação dos resultados obtidos.

### 3.2 CORPOS DE PROVA

Os modelos de corpos de prova (CPs) de pré-teste utilizados para determinação dos parâmetros de soldagem, assim como sua faixa de operação, possuem tamanho reduzido com relação aos CPs de teste utilizados no experimento. A Figura 14 apresenta um desenho utilizando um software de CAD (desenho assistido por computador) do modelo final de CP para posterior soldagem e ensaio de microdureza e microestrutura. Além disso, os CPs foram elaborados de forma que possuíssem dimensões suficientes para permitir uma posterior análise de tensões residuais utilizando um dispositivo de análise por ultrassom que emprega ondas longitudinais criticamente refratadas (Ondas  $L_{cr}$ ). Este modelo de CP possui dimensões de 5/8" X 310 mm X 310 mm (espessura X largura X comprimento) e dois canais chanfrados em "V" com ângulo de 60° e profundidade de 10 mm. Dois canais permitiram produzir dois cordões com parâmetros de soldagem diferentes por CP, aproveitando melhor cada CP.

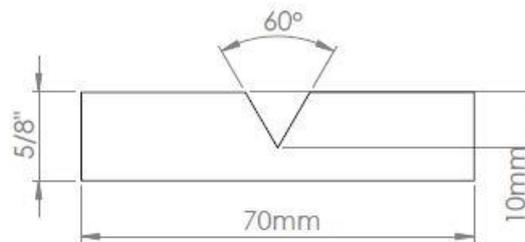
Figura 14 - Modelo digital do corpo de prova de teste utilizado no experimento.



Fonte: Autor (2019).

As dimensões e determinações utilizadas nas amostras para avaliação das características do cordão de solda estão apresentadas na Figura 15.

Figura 15. Configuração do modelo de corpo de prova.



Fonte: Autor (2019).

A Figura 15 mostra a face frontal das amostras, sendo que cada uma delas possui espessura de 5/8".

### 3.2.1 Material de Base

Conforme já apresentado no capítulo 2.2 o aço ASTM-A36 é um material largamente utilizado na indústria, principalmente para fabricação de estruturas, e devido a esta utilização é de necessária importância a análise das suas propriedades na união do mesmo utilizando o processo de soldagem.

Tabela 2. Propriedades mecânicas do aço ASTM A36.

<b>PROPRIEDADES</b>	<b>ABREVIACÃO</b>	<b>UNIDADE</b>	<b>VALOR</b>
<b>Limite de escoamento</b>	LE	MPa	250
<b>Limite de ruptura</b>	LR	MPa	400 - 550
<b>Alongamento</b>	-	%	23

Fonte: Adaptado da norma ASTM A36 (2008).

Entre as propriedades do aço ASTM A36, a Tabela 2 apresenta característica mecânicas de resistência deste material.

### 3.2.2 Material de Adição

Como material de adição para realização dos ensaios foi utilizado o arame de solda classificado com o nome AWS ER70S-6 com diâmetro nominal de 1,2mm. Tabela 3 apresenta a composição química deste arame.

Tabela 3. Composição química do arame de solda utilizado.

<b>Classificação</b>	<b>%C</b>	<b>%Mn</b>	<b>%Si</b>	<b>%P</b>	<b>%S</b>
ER70S-6	0,06 à 0,15	1,40 à 1,85	0,80 à 1,15	< 0,025	< 0,035

Fonte: Adaptado de Scotti (2008).

Entre suas principais características se destacam a elevada taxa de penetração, baixo índice de respingo e menor presença de porosidade. Sobre a sua nomenclatura podemos analisar suas características conforme a Tabela 4.

Tabela 4. Definição da sigla do metal de adição.

<b>ER70S-6</b>	<b>DEFINIÇÃO</b>
<b>E</b>	Indica ser um eletrodo para soldagem a arco elétrico
<b>R</b>	Pode ou não ser utilizado na forma de vareta
<b>70</b>	Resistência mínima a tração do metal depositado em Kpsi
<b>S</b>	Representa que o arame se apresenta na forma maciça
<b>6</b>	Composição química nominal do arame

Fonte: Adaptado de Scotti (2008).

### 3.2.3 Fabricação

O processo de fabricação dos CPs teve apoio de NAFA-CT, que realizou a preparação dos canais chanfrados nos CPs conforme apresentado no Capítulo 3.2. Para usinagem das peças foi utilizado um centro de usinagem, marca ROMI, modelo D600 Figura 16. Deste modo, foi possível realizar a usinagem correta das placas de aço ASTM A36 utilizadas neste projeto.

Figura 16. Centro de usinagem, marca Romi, modelo D600.



Fonte: Autor (2019).

A geometria do canal usinado foi possível ser realizada a partir da utilização de uma fresa tipo rabo de andorinha com ângulo de  $60^\circ$ .

Para o corte dos CPs foi utilizada uma serra de fita, marca Franho, modelo FM500 (Figura 17).

Figura 17. Serra de fita, marca Franho, modelo FM500.



Fonte: Autor (2019).

### 3.3 EQUIPAMENTO DE SOLDAGEM

Os equipamentos de soldagem utilizados são uma fonte multiprocessos, da marca IMC, modelo DigiPlus A7, conforme mostrada na Figura 18. Este equipamento possui suporte para diversos tipos de soldagem, com alimentador de arame de solda automático e arrefecimento da tocha de soldagem. Este equipamento também conta com um módulo de aquisição de dados em tempo real fornecido pela empresa IMC, o qual é capaz de analisar dados como corrente, tensão e velocidade de alimentação de arame média durante o processo.

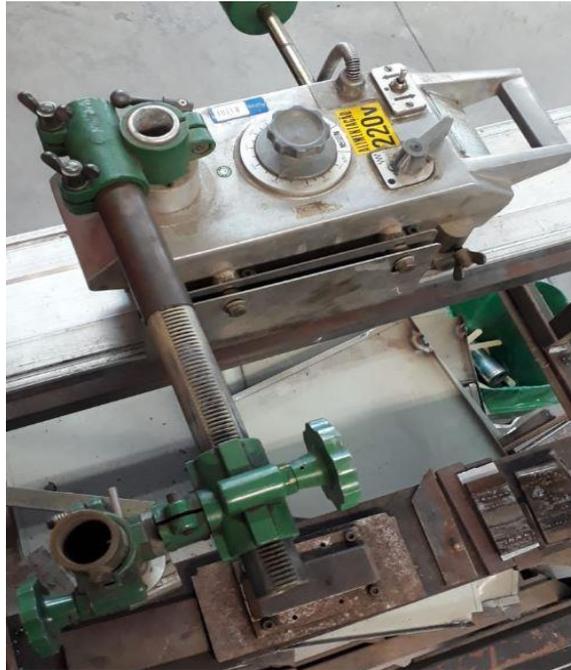
Figura 18 - Equipamento de Soldagem, marca IMC, modelo DigiPlus A7.



Fonte: Autor (2019).

O layout montado de soldagem também consta com uma mesa horizontal com um trilho que suporta um tartilope de solda, também conhecida como tartaruga, marca White Martins, modelo MC46, com avanço automático e controle de velocidade (Figura 19).

Figura 19. Tartilope de solda da marca White Martins, modelo MC 46.



Fonte: Autor (2019).

O layout de posição da tartaruga com os CPs pode ser observado na Figura 20.

Figura 20 - Representação do layout e posição de soldagem.



Fonte: Autor (2019).

A soldagem dos 18 CPs selecionados seguiu a distribuição entre os parâmetros selecionados apresentado na Tabela 5, observando uma distribuição da energia de soldagem empregada em cada um, assim como o modo de transferência metálica empregado em cada um.

Tabela 5 - Distribuição dos parâmetros nos corpos de prova.

<b>Corpo de Prova</b>	<b>Tensão de Soldagem (V)</b>	<b>Velocidade do Arame (m/min)</b>	<b>Velocidade de Soldagem (cm/min)</b>
1	17	4	15
2	17	5	30
3	17	6	45
4	21	4	15
5	21	5	30
6	21	7	45
7	24	5	15
8	24	6	30
9	24	7	45
10	27	7	15
11	27	8	30
12	27	9	45
13	30	8	15
14	30	9	30
15	30	10	45
16	33	8	15
17	33	9	30
18	33	10	45

Fonte: Autor (2019).

Os parâmetros de soldagem definidos como fixos neste estudo, estão descritos na Tabela 6. São eles a velocidade de vazão de gás ATAL25, distância de contato bico-peça (DBCP), tipo de polaridade de soldagem (direta) e diâmetro do arame de solda (1,6mm).

Tabela 6. Valores fixos de parâmetros de utilizados na soldagem.

<b>Vazão de gás (l/min)</b>	<b>DBCP (mm)</b>	<b>Polaridade</b>	<b>Diâmetro do eletrodo (mm)</b>
12	16	direta	1,6

Fonte: Autor (2019).

### 3.4 PREPARO DAS AMOSTRAS PARA OS ENSAIOS

Após a realização do processo de soldagem nos CPs, o material ficou configurado conforme mostrado na Figura 21. Possuindo um tamanho superior ao suportado pelo equipamento de análise de microdureza e para análise microestrutural.

Figura 21 - Placa de aço ASTM A36 após processo de soldagem.



Fonte: Autor (2019).

Por se tratar de uma amostra grande, ao qual poderá ser submetida em um trabalho posterior, mostrou-se necessário o corte em amostras menores para se realizar os ensaios de microdureza e metalografia.

Após o corte das amostras em tamanho de 15,875mm X 20 mm X 70mm (espessura X largura X comprimento), o passo seguinte é o início do preparo para os ensaios. Primeiramente foi executado o processo de lixamento com lixas d'água de granulação progressiva de: 80, 120, 240, 400, 600, 1200. Este processo de lixamento foi feito manualmente utilizando uma bancada de lixamento da marca Struers, Lunn Minor, conforme a Figura 22 continuamente molhada com água para facilitar o processo de lixamento.

Figura 22 - Bancada de lixamento manual (a) e amostras (b).



Fonte: Autor (2019).

Após o processo de lixamento a etapa seguinte é o polimento, que foi realizado com a utilização de uma politriz e lixadeira da marca Teclago, modelo PLO2 E, conforme pode ser observado na Figura 23. Para o polimento foram utilizados pano de feltro e alumina em suspensão com granulometria média de 1  $\mu\text{m}$  (mícron).

Figura 23 - Politriz rotativa da marca Teclago, modelo PLO2 E.



Fonte: Autor (2019).

O resultado final do lixamento e polimento das amostras nos proporcionou um material de aspecto espelhado e com acabamento fino, conforme pode ser observado na Figura 24.

Figura 24 - Exemplo de amostra polida e pronta para os ensaios (CP19).



Fonte: Autor (2019).

### 3.5 EQUIPAMENTO DE MEDIÇÃO DE MICRODUREZA

Após o preparo de todas amostras com o acabamento superficial espelhado, o procedimento de análise e avaliação da microdureza do perfil soldado deu-se com a utilização do microdurômetro Vickers HMV (Figura 25) da marca Shimadzu, modelo HMV, disponível no Laboratório de Metalurgia Física da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM).

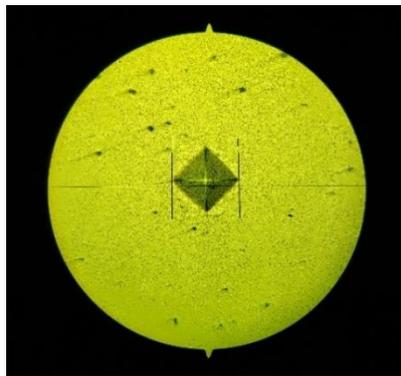
Figura 25 - Microdurômetro da marca Shimadzu, modelo HMV, utilizado nos ensaios.



Fonte: Autor (2019).

A utilização deste equipamento é sequencial e baseia-se em uma microindentação de uma ponta diamantada piramidal sobre a superfície polida do material utilizando os parâmetros de carga de 9.807 N (HV1) aplicada por um período de 10s. Conforme as recomendações de ensaio baseadas na norma ASME E384 para realização de ensaios de microdureza em materiais metálicos. A Figura 26 apresenta a endentação medida sobre a superfície polida da peça.

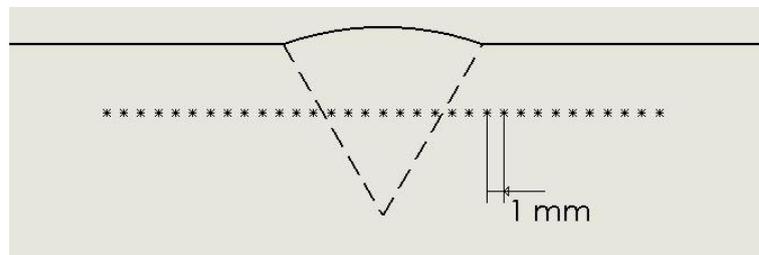
Figura 26 - Imagem microscópica (400x) da endentação utilizada para aferir a microdureza do material.



Fonte: Autor (2019).

O ensaio de microdureza baseou-se na varredura de 35 pontos na superfície polida distanciados de 1mm entre cada ponto e 5mm da superfície da peça, conforme mostrado na Figura 27.

Figura 27. Posição dos pontos na amostra.



Fonte: Autor (2019).

### 3.6 EQUIPAMENTO DE ANÁLISE MICROESTRUTURAL

Para a revelação da microestrutura presente na região polida da amostra soldada é necessário a utilização de um ataque químico de uma solução ácida conhecida como Nital 3%, onde sua composição é de 97% de álcool etílico e 3% de Ácido Nítrico.

O preparo é realizado a partir do banho de 20s da amostra no Nital 3% e após sua retirada é realizada a limpeza com água corrente e secagem da superfície atacada quimicamente.

Após a realização deste procedimento em todas as amostras, elas foram levadas para análise em um microscópio da marca Olympus, modelo BX60M, com aumento regulável entre 50x e 1000x (lente ocular com aumento de 10x e lente objetiva com tamanho variável entre 5 e 100 vezes), conforme pode ser observada na Figura 28.

Figura 28 – Microscópio, marca Olympus, modelo BX60M.



Fonte: Autor (2019).

Para dispositivo de aquisição de imagens do microscópio foi utilizado uma câmera digital da marca Canon, devido a indisponibilidade do dispositivo do próprio equipamento.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são abordados e discutidos os resultados obtidos nos ensaios de microdureza, dados do processo de soldagem e as microestruturas presentes na região do cordão de solda.

### 4.1 RESULTADO DA ANÁLISE DE MICRODUREZA

Um resultado importante é a variação da microdureza Vickers na superfície de transição entre a zona fundida (ZF) do metal e sua zona termicamente afetada (ZTA). Esta variação deve ser sutil, sem crescimentos abruptos da microdureza em regiões (principalmente na ZTA) que podem resultar em pontos concentradores de tensão e indutores de fragilidades no cordão de solda.

A Tabela 7 apresenta os valores médios para a largura da ZTA e a microdureza média na superfície, assim como seus valores máximos e mínimos.

Tabela 7. Resultados e valores médios obtidos nos ensaios.

Corpo de Prova	Largura da ZTA (mm)	Transferência	Microdureza máxima (Vickers)	Microdureza mínima (Vickers)	Microdureza média (Vickers)	Aporte Térmico (kJ/mm)
1	1,9		245	203	223	14,0
2	1,3		256	210	230	9,0
3	1,5		268	212	223	6,0
4	2,0		254	208	229	17,0
5	1,4	Curto-circuito (CC)	247	212	227	11,0
6	1,2		263	219	233	6,0
7	2,4		249	209	237	19,0
8	1,5		239	206	229	12,0
9	1,8		256	225	232	7,0
10	2,8		248	208	232	22,0
11	1,8		266	226	240	14,0
12	1,7		269	215	234	7,0
13	3,2		245	221	233	26,0
14	1,6	Pulverização (Spray)	252	212	232	12,0
15	1,7		254	210	231	9,0
16	3,5		247	210	238	26,0
17	2,1		250	214	241	14,0
18	2,4		247	213	234	9,0

A partir da Tabela 7 podemos analisar alguns resultados obtidos a partir de diferentes aspectos, se considerarmos o tipo de transferência metálica verifica-se um acréscimo de 1,9% na microdureza média das amostras. No entanto, considerando os valores máximos obtidos de microdureza, nota-se um equilíbrio entre os valores obtidos, desta maneira não sendo possível concluir-se sobre a interferência desta avaliação sobre a resistência do material.

Observando as espessuras médias da zona termicamente afetada e considerando o aporte térmico empregado a junta soldada é possível observar uma correlação entre elevados aportes térmicos e uma pequena redução no valor máximo de microdureza obtida.

Para avaliação do perfil longitudinal de microdureza na superfície do material foram selecionadas amostras de modo que fosse representadas as variações, tais como elevados e pequenos aportes térmicos para ambos modos de transferência. A Tabela 8 apresenta a relação dos CPs selecionados para esta análise.

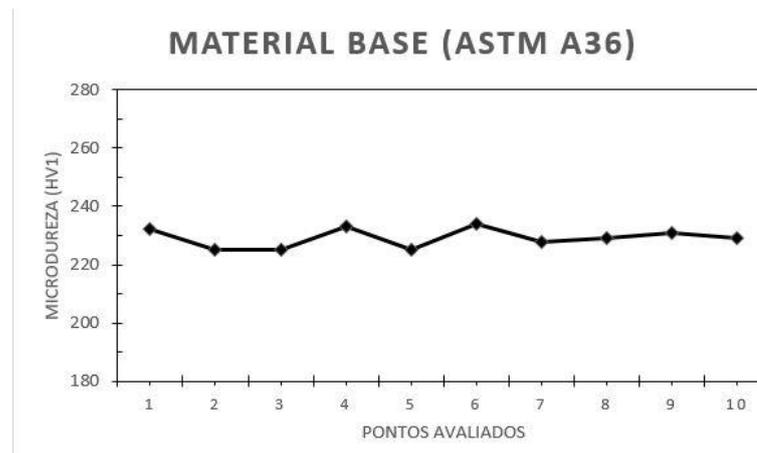
Tabela 8. Amostras selecionadas para análise do perfil de microdureza.

CP	Modo de Transferência	Largura da ZTA (mm)	Aporte Térmico(kJ/mm)
1 (a)	CC	1,9	14,0
6 (b)	CC	1,2	6,0
12 (c)	Spray	1,7	7,0
17 (d)	Spray	2,1	14,0

Fonte: Autor (2019).

A análise do perfil de microdureza leva em consideração a análise realizada no perfil do material de base (ASTM A36), sem realização do processo de soldagem, tais como indicado na Figura 29.

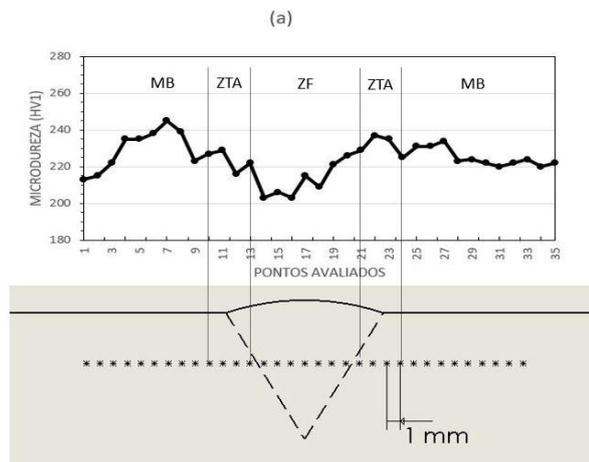
Figura 29. Perfil de microdureza Vickers para a região central do material de base.



Fonte: Autor (2019).

As figuras a seguir, mostram o perfil de microdureza para os corpos de prova CP01 (Figura 30) e CP06 (Figura 31), ambos com um modo de transferência metálica por curto-circuito e com Tensão (V) de 17V para 21V, respectivamente. E uma alteração da velocidade de soldagem (cm/min) de 15cm/min para 45 cm/min. Tais alterações provocaram uma redução no aporte térmico de 14 kJ/mm para 6 kJ/mm.

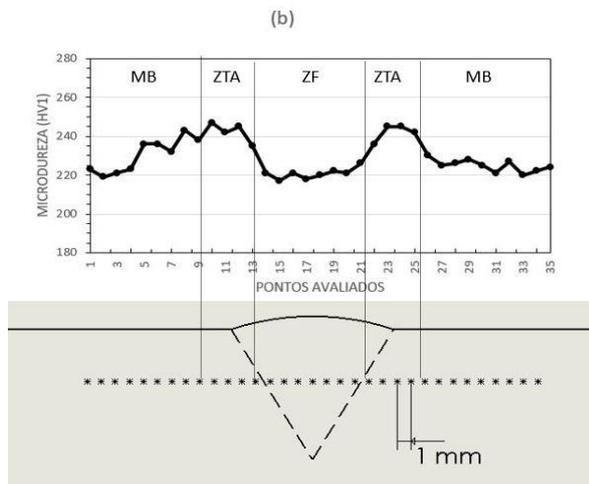
Figura 30. Perfil de microdureza para CP01 (curto-circuito).



Fonte: Autor (2019).

Pode-se notar a partir da Figura 31, que fica evidente um aumento da dureza nas regiões de localização da zona termicamente afetada (ZTA) entre os pontos 21 e 25 pois é considerado o ponto 17 como sendo o ponto central da raiz da solda. Este é um perfil esperado pois a bibliografia existente referência um aumento de dureza nesta região. (DE MELO & COSTA, 2012).

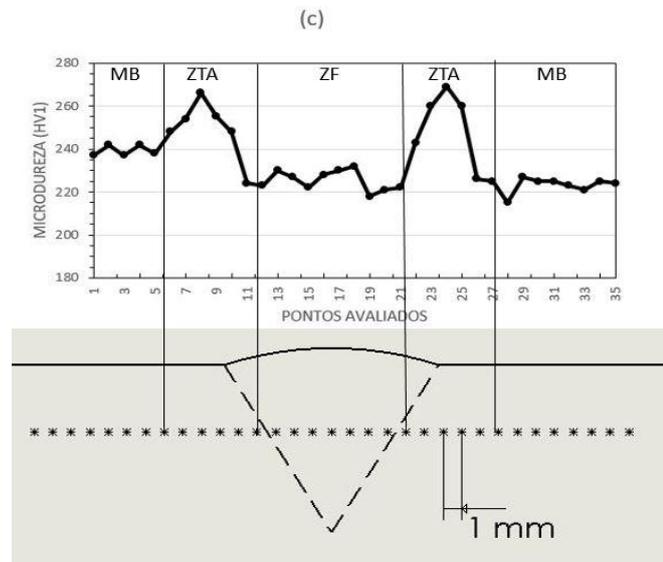
Figura 31. Perfil de microdureza para CP06 (curto-circuito).



Fonte: Autor (2019).

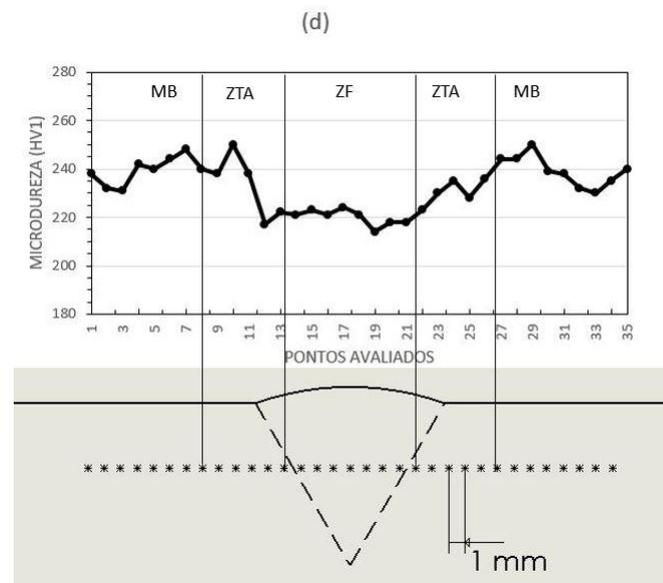
Para os modos de transferência por pulverização (spray), CP12 (Figura 32) e CP17 (Figura 33), o perfil de microdureza teve o mesmo comportamento do modo de curto-circuito. Com a elevação da tensão de 27V para 33V e a redução da velocidade de soldagem de 45 cm/min para 30 cm/min, acarretou uma elevação no aporte térmico da junta soldada de 7 kJ/mm para 14 kJ/mm.

Figura 32. Perfil de microdureza para CP12 (pulverização).



Fonte: Autor (2019).

Figura 33. Perfil de microdureza para CP17 (pulverização).



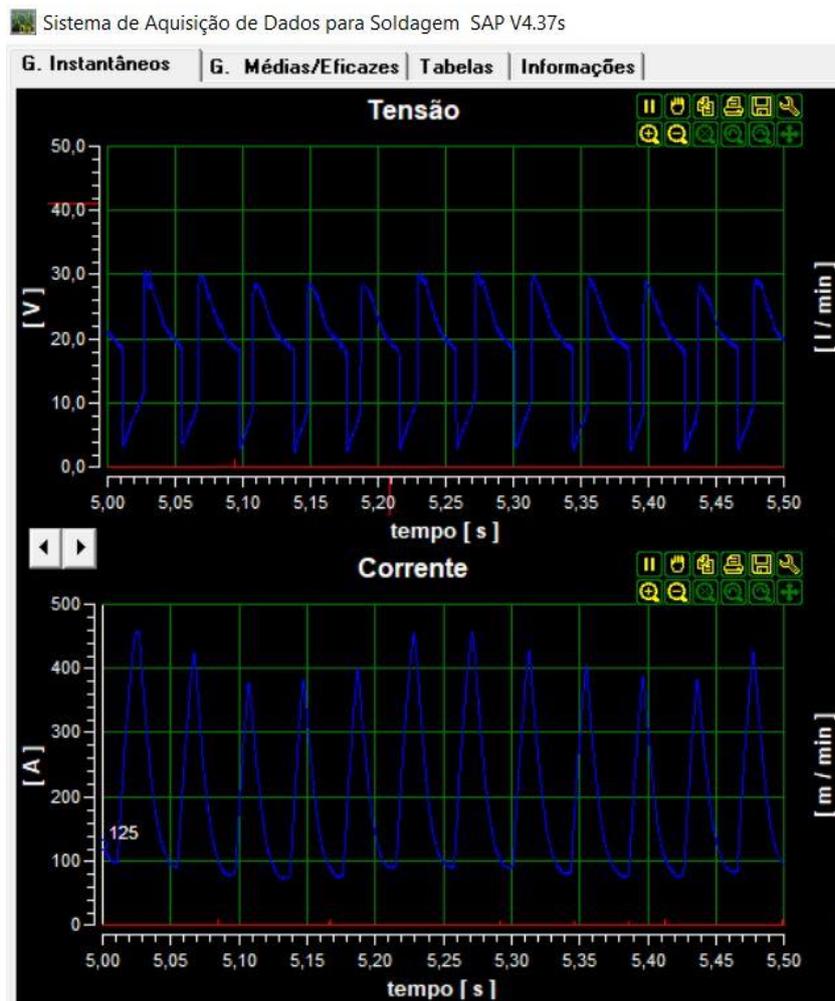
Fonte: Autor (2019).

## 4.2 RESULTADOS DA ANÁLISE DO MODO DE TRANSFERÊNCIA METÁLICA

Os experimentos de soldagem foram feitos utilizando uma fonte da marca IMC e, paralelamente, utilizou-se o módulo de aquisição SAP V4.37 (Sistema de aquisição de dados para soldagem) de para monitoramento de variáveis em tempo real do processo de soldagem.

A partir disso, de modo a validar o modo de transferência metálica apresentada nos resultados anteriores foram selecionados aleatoriamente pontos desta análise para as seguintes amostras: CP01 e CP17. A Figura 34 representa o modo de transferência metálica de curto-circuito. O resultado obtido apresenta o mesmo comportamento referenciado por Modenesi (2011).

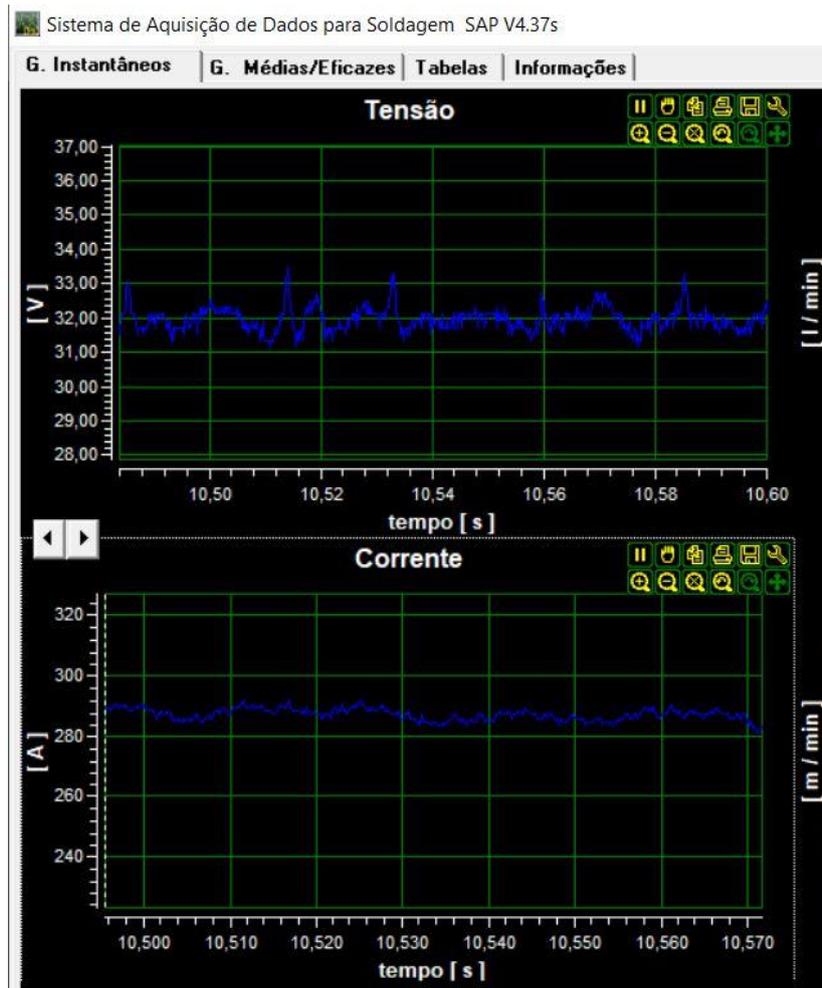
Figura 34. Gráfico da aquisição dos parâmetros para curto-circuito durante o processo de soldagem.



Fonte: Autor (2019).

A Figura 35 apresenta o gráfico obtido de maneira similar ao anterior caracterizando o modo de transferência por pulverização durante a realização do processo de soldagem do CP17.

Figura 35. Gráfico da aquisição dos parâmetros para pulverização durante o processo de soldagem.



Fonte: Autor (2019).

A Figura 35 representa de maneira clara o modo de transferência por pulverização pois apresenta elevado grau de estabilidade e baixa variação nos valores da corrente elétrica. Por outro lado a Figura 34 exemplifica o caso onde a corrente elétrica se reduz a corrente básica em determinados momentos em que o arco elétrico é cessado, de tal maneira a promover o curto-circuito.

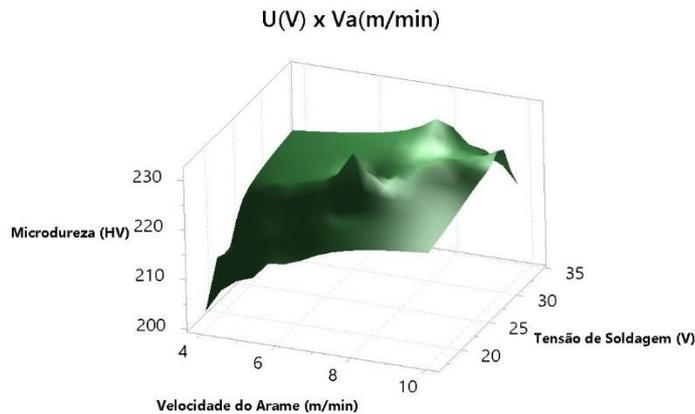
### 4.3 INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE SOLDAGEM NA MICRODUREZA

A análise dos resultados obtidos das microdurezas nos 18 CPs possibilitou a criação de gráficos de superfície de resposta e contorno para a variação da microdureza com a mudança dos parâmetros de soldagem utilizados. Para isso, foram analisadas duas regiões principais, a ZF e ZTA, conforme pode ser visto nas seções a seguir.

#### 4.3.1 Influência dos parâmetros de soldagem na microdureza da ZF

A análise realizada na região de zona fundida (ZF), ponto central do cordão de solda, apresenta a seguinte superfície de resposta (Figura 36) em relação entre a tensão (V) e a velocidade de alimentação de arame (VA) sobre a microdureza na região da ZF do cordão de solda.

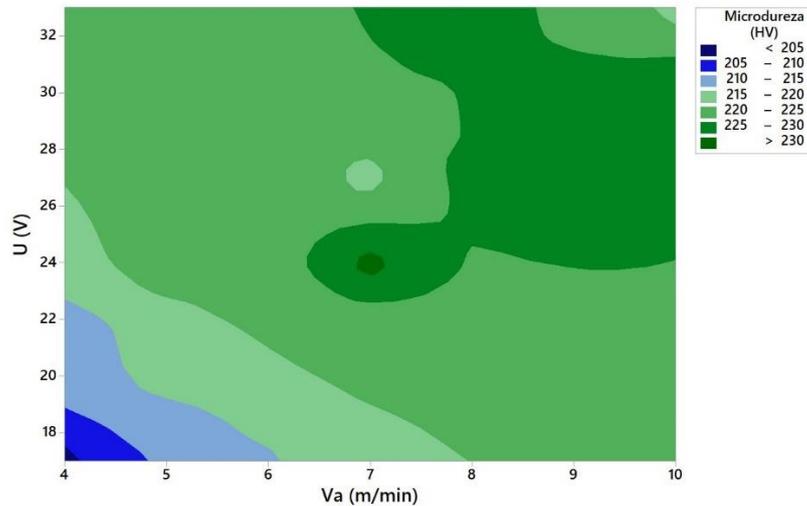
Figura 36. Superfície de resposta de V X VA na microdureza do ponto central.



Fonte: Autor (2019).

A Figura 37 representa o gráfico de contorno para as mesmas condições da Figura 36 e possibilita a visualização da tendência de aumento da microdureza com a elevação da tensão e da velocidade de alimentação de arame, justificando-se pela elevação do aporte térmico empregado no processo.

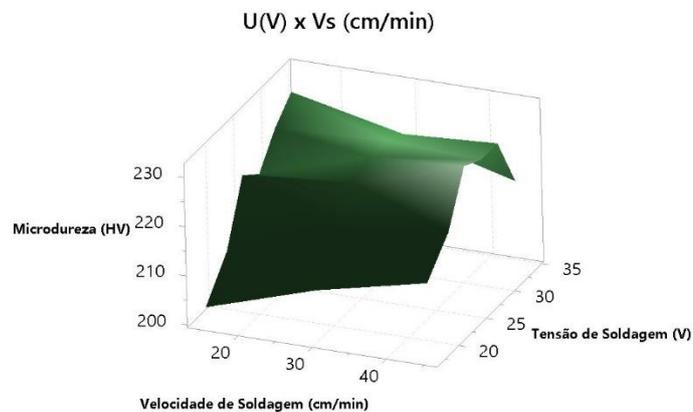
Figura 37. Gráfico de contorno de U x VA na microdureza do ponto central.



Fonte: Autor (2019).

Do mesmo modo, correlacionou-se os resultados obtidos entre tensão e velocidade de soldagem conforme a superfície da Figura 38.

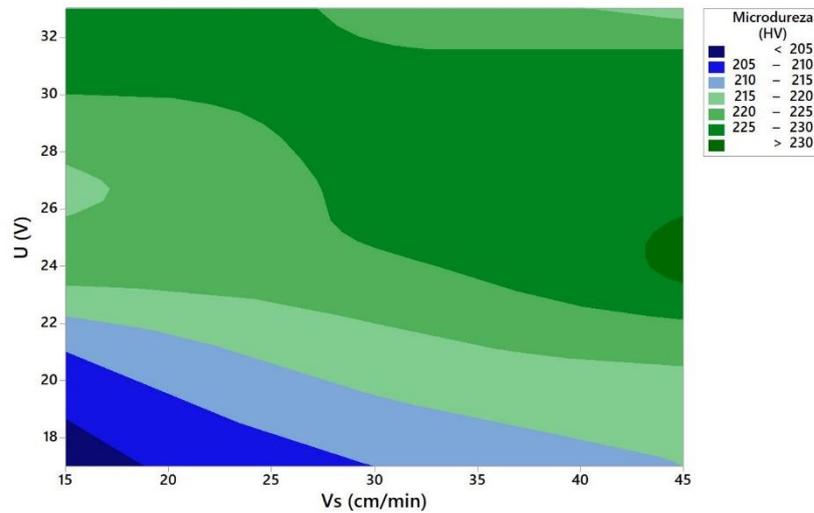
Figura 38. Superfície de resposta de U X VS na microdureza do ponto central.



Fonte: Autor (2019).

A Figura 39 apresenta o contorno para a situação onde estão confrontados os parâmetros de tensão e velocidade de soldagem, observa-se uma elevada dureza para regiões de elevada tensão, que de acordo com Lancaster (2003), justifica-se pelo elevado aporte térmico.

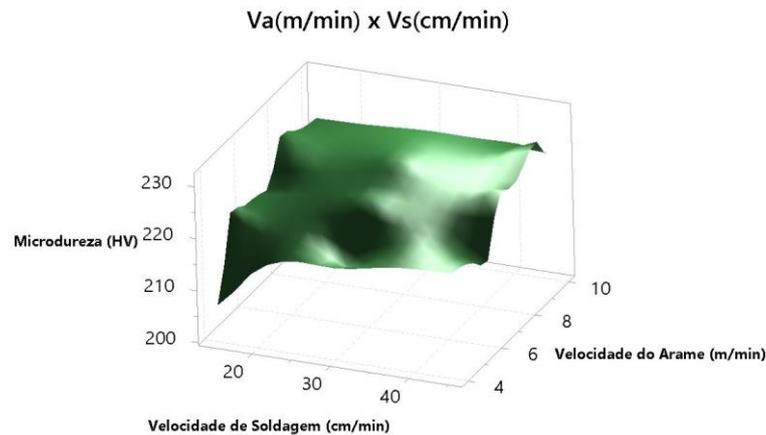
Figura 39. Gráfico de contorno de U x VS na microdureza do ponto central.



Fonte: Autor (2019).

Ao confrontarmos os parâmetros de velocidade de soldagem (VS) e velocidade de alimentação de arame (VA), mostrados na Figura 40, exibem uma região de reduzida dureza para velocidades de arame reduzidos.

Figura 40. Superfície de resposta de VS X VA na microdureza do ponto central.

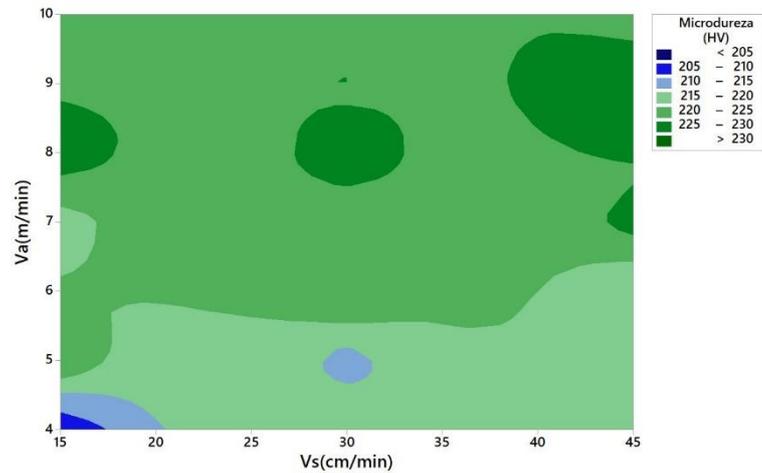


Fonte: Autor (2019).

A Figura 41 apresenta o gráfico de contorno para a relação entre os parâmetros de velocidade de soldagem e velocidade de alimentação de arame, e podemos concluir que a microdureza diminui com a diminuição da velocidade de alimentação de arame, tal elevação da dureza para regiões próximas ao limite superior de VA pode-se justificar por regiões onde

ocorre falta de fusão do material de adição, decorrente da elevada taxa de deposição de material de adição.

Figura 41. Gráfico de contorno de VS x VA na microdureza do ponto central.



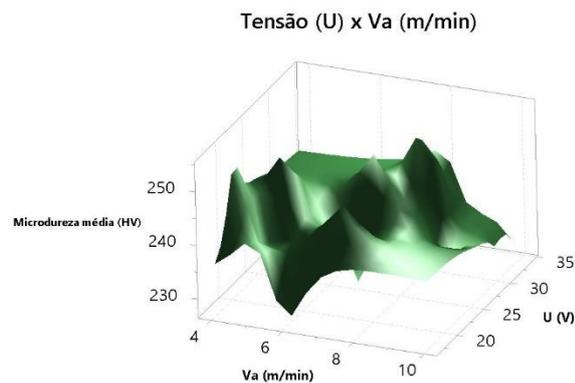
Fonte: Autor (2019).

#### 4.3.2 Influência dos parâmetros de soldagem na microdureza da ZTA

De modo similar ao realizado no ponto central da ZF, realizou-se um estudo dos resultados das influências dos parâmetros de soldagem sobre a microdureza na região da ZTA do material. Para este valor foi utilizado o valor médio entre os pontos 21 e 24 que correspondem a região da ZTA.

A superfície de resposta (Figura 42) apresenta a relação entre a tensão (U) e a velocidade de alimentação de arame (VA) sobre a microdureza na região da ZTA do cordão de solda.

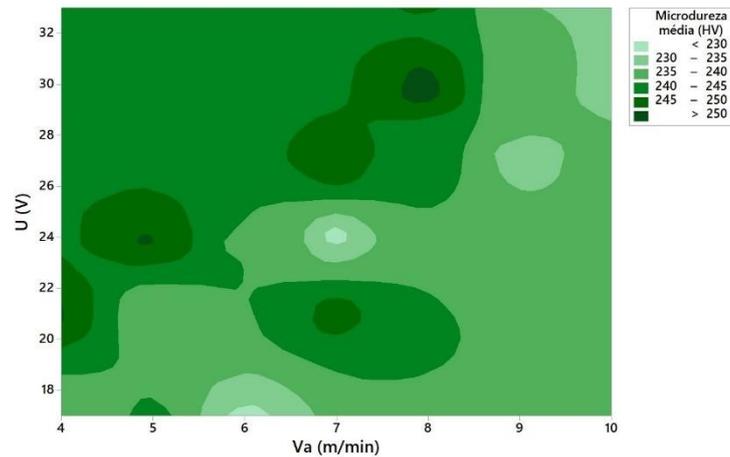
Figura 42. Superfície de resposta de U X VA na microdureza na região da ZTA.



Fonte: Autor (2019).

A Figura 43 apresenta o gráfico de contorno correlacionando a tensão com a velocidade de arame, e ao contrário do comportamento na ZF ocorre um aumento da microdureza com uma diminuição da velocidade de alimentação de arame.

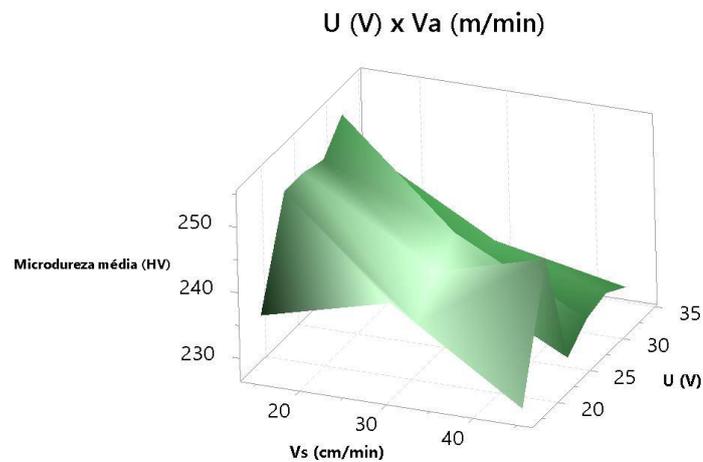
Figura 43. Gráfico de contorno de U X VA na microdureza na região da ZTA.



Fonte: Autor (2019).

Para uma análise da influência da velocidade de soldagem combinada com a tensão, observa-se conforme a Figura 44 que há uma tendência de elevação até uma velocidade de soldagem de 35 cm/min da microdureza com a diminuição da velocidade de soldagem.

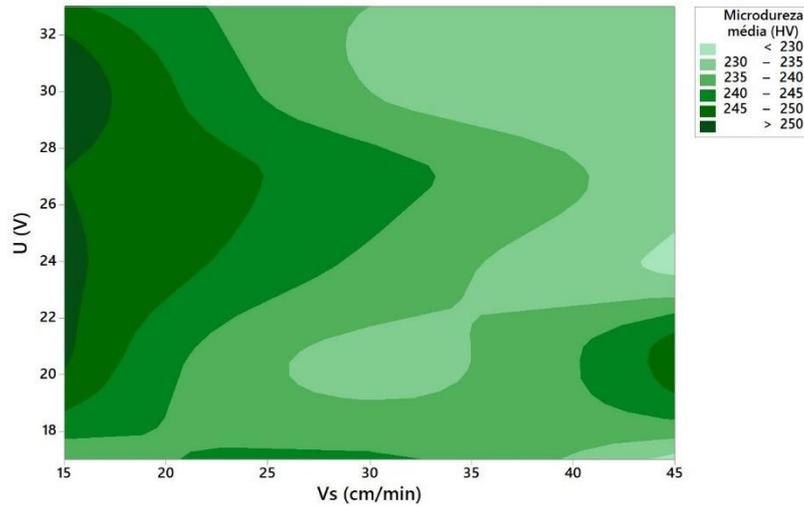
Figura 44. Superfície de resposta de U X VS na microdureza na região da ZTA.



Fonte: Autor (2019).

Como resultado da análise do gráfico de contorno (Figura 45) nota-se um aumento da microdureza observada com a redução de velocidade de soldagem e consequente aumento do aporte térmico empregado na junta soldada.

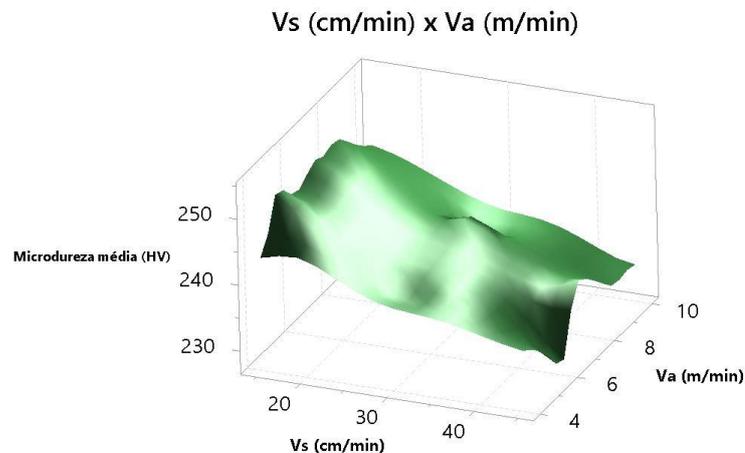
Figura 45. Gráfico de contorno de U X VS na microdureza na região da ZTA.



Fonte: Autor (2019).

A análise do resultado obtido para a ZTA considerando a influência de VA e VS aponta para um aumento da microdureza do material com a diminuição de ambos parâmetros conforme observado na Figura 46.

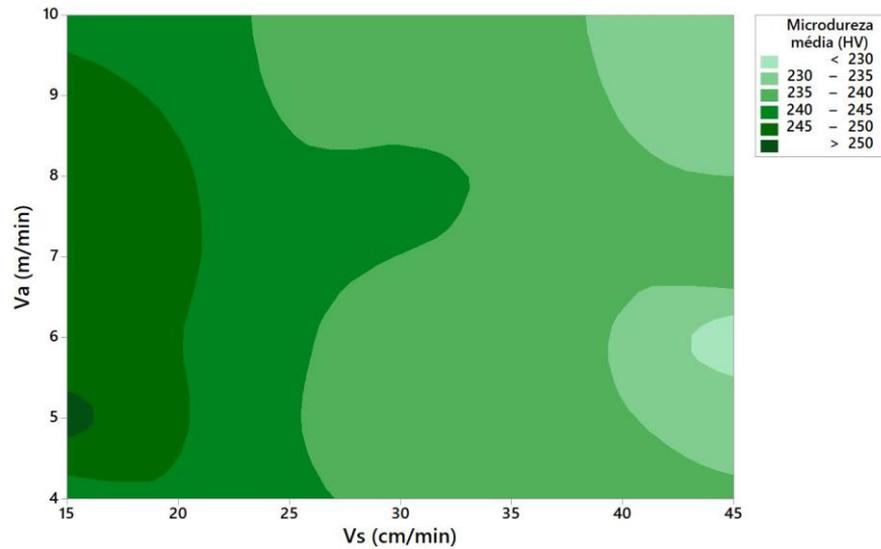
Figura 46. Superfície de resposta de VA x VS na microdureza na região da ZTA.



Fonte: Autor (2019).

O gráfico de contorno demonstra pouca influência na região de elevada dureza com a alteração dos parâmetros de soldagem VA e VS (Figura 47).

Figura 47. Gráfico de contorno de VA x VS na microdureza na região da ZTA.



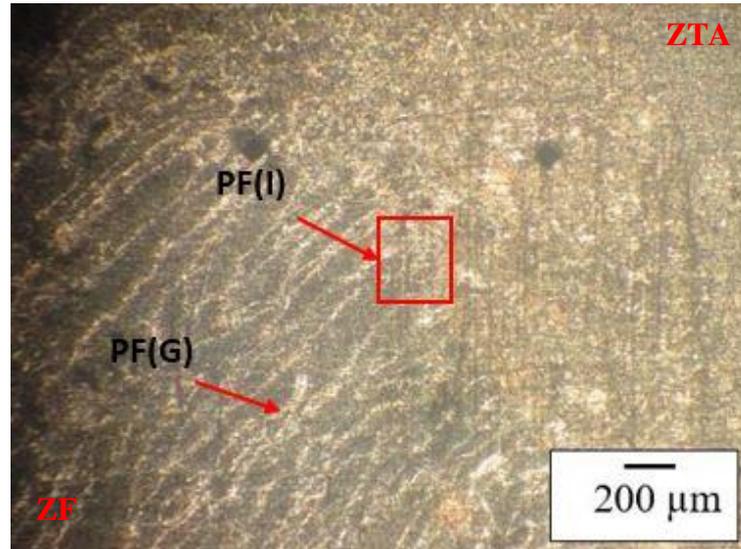
Fonte: Autor (2019).

#### 4.4 RESULTADOS DA ANÁLISE DA MICROESTRUTURA

Como resultado da análise da microestrutura foi observada a região de transição entre a ZF e ZTA para os mesmos CPs utilizados no perfil de microdureza apresentados anteriormente (CP01, CP06, CP12 e CP17).

Por se tratar de um aço de baixa liga e o metal de adição utilizado ser similar, a estrutura predominante é composta por ferrita primária de contorno de grão PF(G) e ferrita idiomórfica PF(I) na região de transição entre a ZF e ZTA (Figura 48).

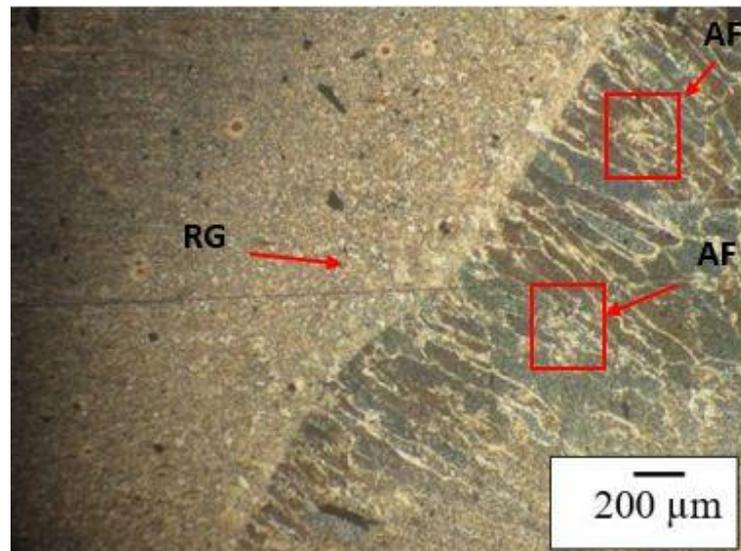
Figura 48. Microestrutura região de transição ZF-ZTA para o CP06. Ataque: Nital 3%.



Fonte: Autor (2019).

Ainda considerando uma análise dos pontos de soldagem com modo de transferência por curto-circuito, para a análise do CP01 (Figura 49) nota-se a formação de ferrita acicular (AF) na ZF e uma região de refino de grão (RG) na ZTA.

Figura 49. Microestrutura região de transição ZF-ZTA para o CP01. Ataque: Nital 3%.

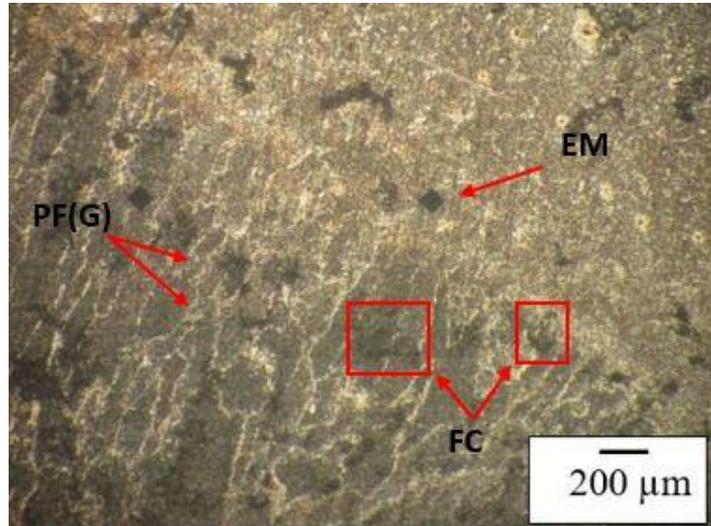


Fonte: Autor (2019).

A partir da elevação do aporte térmico da junta soldada, a taxa de resfriamento se reduz e há uma tendência da formação de agrupados de ferrita-carbonetos (FC) além da ferrita

primária de contorno de grão apresentada na Figura 50. Na microestrutura do CP17 observa-se a endentação (EM) do ensaio de microdureza.

Figura 50. Microestrutura região de transição ZF-ZTA para o CP17. Ataque: Nital 3%.



Fonte: Autor (2019).

## 5 CONCLUSÃO

Este trabalho se propôs a analisar condições largamente utilizadas pela indústria no processo de soldagem convencional utilizando o método GMAW, também conhecido como MAG e estudar os efeitos das variações de parâmetros de soldagem e seu aporte térmico nas condições de resistência e características do aço estrutural ASTM A36.

Dentre os parâmetros avaliados concluiu-se que a partir de uma análise microscópica das microestruturas formadas nesse processo de soldagem, a variação destes parâmetros influencia diretamente na formação de microestruturas diferentes da estrutura ferrítica na zona termicamente afetada.

Observou-se durante o processamento dos dados obtidos a partir dos ensaios que o modo de transferência por curto-circuito, o qual é caracterizado durante os resultados, apresenta um pequeno acréscimo (1,9%) de sua microdureza média quando comparado ao modo de transferência por pulverização.

Sobre a relação entre a tensão e a velocidade de alimentação de arame, conclui-se que o aumento da tensão e velocidade de alimentação de arame eleva a microdureza no ponto central do cordão de solda e diminui na região da zona termicamente afetada.

A partir dos resultados apresentados pode-se concluir um aumento da microdureza com a diminuição da velocidade de soldagem e aumento da tensão, justificado pelo fato de elevar o aporte térmico na região do cordão de solda.

Uma conclusão importante para este trabalho é que o aumento da largura da zona termicamente afetada (ZTA) está estritamente relacionada a elevação do aporte térmico empregado no cordão de solda. E considerando que as regiões de elevada dureza do material se localizam na ZTA há uma tendência de o material possuir uma faixa de transição atenuada entre valores diferentes de dureza nesta região.

### 5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestões para trabalhos futuros, estão a caracterização da zona termicamente afetada através do refinamento do intervalo de aquisição da microdureza, realizando uma análise aprofundada dos valores obtidos somente nesta região.

Além disso, é de grande importância a análise das tensões residuais geradas no processo de soldagem, bem como sua quantificação, de modo a ser possível evitar falhas devido a tensões internas residuais no material.

Outra sugestão seria aplicar esse estudo a outros materiais, tais como as ligas de alumínio ou aço inoxidável, podendo até mesmo variar o tipo de processo de soldagem utilizado.

## REFERÊNCIAS

- ANTUNES, A. E. (1995). Tensões Residuais na Soldagem, Aspectos Básicos. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences*, XVII(4), 394-403.
- ASME E384. (2011). *Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials: Annual Book of ASTM Standards*.
- AWS. (2003). *American Welding Society, Welding Handbook .Test Methods for Evaluation Welded Joints*. USA.
- CALLISTER, W. (2005). *Ciência e Engenharia de Materiais - Uma Introdução, 5th ed., John Wiley*.
- CHEN, Z., CHEN, Z., & AJITSHENOI, R. (2015). Influence of welding sequence on welding deformation and residual stress of a stiffened plate structure. *Ocean Engineering*, 271–280.
- CORRÊA, F. A. (2017). PROPRIEDADES MECÂNICAS E MICROESTRUTURAIS DE JUNTAS SOLDADAS DE AÇO CARBONO PELO PROCESSO HÍBRIDO LASER–GMAW. *Dissertação de Mestrado, CEFET - RJ*.
- DAVIES, G. J. (1975). Solidification Structures and Properties of Fusion Welds. *International metallurgical reviews*, 88-106.
- DE MELO, R. H., & COSTA, J. (2012). Efeito do processo de soldagem na microestrutura, microdureza e composição química de revestimentos de aço inoxidável aplicados por soldagem. *Revista Eletrônica de Materiais e Processos*, 192-204.
- HOULDCROFT, P. T. (1980). *Tecnología de los procesos de soldadura*.
- LANCASTER, J. (2003). *Handbook of Structural Welding, Abington Publishing, Cambridge, England*.
- MAIA, T. d. (2015). Análise das tensões residuais geradas nos processos de soldagem MIG/MAG e Plasma. *CEFET*.
- MASUBUCHI, K. (1980). *Analysis Of Welded Structures* (Vol. 33). London: Pergamon Press.
- MODENESI, P. J. (2011). *Soldagem: Fundamentos e Tecnologia* (3ª ed.). Belo Horizonte: UFMG.
- MOREIRA, A. F. (2008). Influência da atmosfera protetora no cordão de solda. *Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual Paulista*.

- OLIVEIRA, G. L., & SILVA. (Setembro de 2010). Avaliação do Efeito da Energia de Soldagem sobre as Tensões Residuais Resultantes em Juntas Soldadas com Multipasse. *Soldagem & Inspeção*, 15, 218-224.
- SCOTTI, A. (2008). *Soldagem MIG/MAG*. Artliber.
- TENGA, T.-L., & FUNGB, C.-H. (2002). Effect of weld geometry and residual stresses on fatigue in butt-welded joints. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*(79), 467-482.
- THEWLIS. (2004). *Materials perspective: Classification and quantification of microstructures in steels*.
- TRINDADE, V. (2017). Características Microestruturais e Mecânicas ao Longo da Seção Transversal de Juntas Soldadas em Multipasses pelo Processo GMAW de um Aço API 5L X65Q. *Soldagem & Inspeção*.
- USIMINAS. (2018). <https://www.usiminas.com>.
- WAINER, E. (1992). *Soldagem: Processos e Metalurgia*. Edgard Blucher.