

JONAS CARLOS ULLER

A INFLUÊNCIA DA INDUTÂNCIA NA GEOMETRIA DO  
CORDÃO DE SOLDA NO PROCESSO MIG/MAG.

JARAGUÁ DO SUL, 2013.



**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA  
E TECNOLOGIA DE SANTA CATARINA  
CAMPUS JARAGUA DO SUL - GERALDO WERNINGHAUS  
CURSO SUPERIOR DE TECNOLOGIA EM FABRICAÇÃO  
MÉCANICA**

**JONAS CARLOS ULLER**

**A INFLUÊNCIA DA INDUTÂNCIA NA GEOMETRIA DO  
CORDÃO DE SOLDA NO PROCESSO MIG/MAG.**

Trabalho de conclusão de curso  
submetido ao Instituto federal  
de Educação, Ciência e  
Tecnologia de Santa Catarina  
como parte dos requisitos de  
obtenção do título de  
Tecnólogo em Fabricação  
Mecânica.

Professor orientador: Ivan Luiz  
Hubert, Esp.

**JARAGUÁ DO SUL, 2013.**

U41i

Uller, Jonas Carlos

A influência da indutância na geometria do cordão de solda no processo MIG/MAG /Jonas Carlos Uller ; orientador Ivan Luiz Hubert. – Jaraguá do Sul : IFSC, 2013.

86 f. : il.

Trabalho de Conclusão de Curso (tecnólogo) – Instituto Federal de Santa Catarina. Tecnólogo em Fabricação Mecânica.

Inclui bibliografia.

1. Processos de soldagem. 2. MIG/MAG. 3. Indutância. 4. Transferência por curto circuito. 5. Ensaios. I. Hubert, Ivan Luiz. II. Instituto Federal de Santa Catarina. III. Título.

CDD 671.52

# A INFLUÊNCIA DA INDUTÂNCIA NA GEOMETRIA DO CORDÃO DE SOLDA NO PROCESSO MIG/MAG.

JONAS CARLOS ULLER

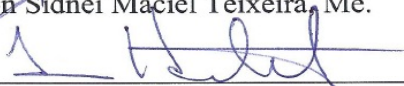
Este trabalho foi julgado adequado para obtenção do Título de Tecnólogo em Fabricação Mecânica e aprovado na sua forma final pela banca examinadora do curso Tecnólogo em Fabricação Mecânica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina.

Jaraguá do Sul, 10 de dezembro de 2013.

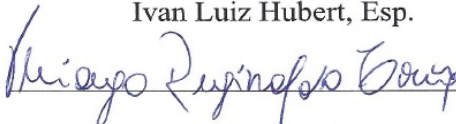
## **Banca Examinadora:**



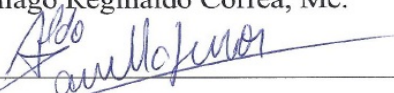
Edson Sidnei Maciel Teixeira, Me.



Ivan Luiz Hubert, Esp.



Thiago Reginaldo Correa, Me.



Aldo Zanella Júnior, Esp.



Este trabalho é dedicado ao meu pai Rosalino e a minha mãe Rosita, que mostraram a mim como dar os primeiros passos.

Para minha irmã Josiane e para meu irmão Julian, que surgiram para me ensinar que a vida se divide.

E para minha esposa Charlene, que pegou carona comigo e me mostrou que a viagem pode ser mais divertida.

Amo Vocês.





## AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço a Deus por todas as alegrias, pela saúde e pela força que me concedeu, para que conseguisse chegar até aqui.

A minha esposa Charlene pelo companheirismo, paciência e apoio em todos os momentos.

A minha família pela compreensão em todos os momentos que faltei para que fosse possível a realização deste projeto.

A todos os docentes e servidores que contribuíram direta ou indiretamente para a concretização deste trabalho, obrigado pela dedicação.

Em especial à:

- Professor Ivan Luiz Hubert;
- Professor Edson S. M. Teixeira;
- Professor Aldo Zanella Júnior;
- Professor Gerson Ulbricht;
- Professor Alexandre Galiotto;
- Professora Renata Heis;
- Técnico de laboratório Adriano.

As empresas HAME, SUMIG e SENAI Jaraguá do Sul por ceder suas instalações e matérias, sem os quais seria impossível a realização deste trabalho.

Aos meus amigos Amarildo Paiva e Renato Longui pelo incondicional apoio.

Aos amigos de curso meu muito obrigado por toda a colaboração.

Aos amigos de trabalho Mario Cleiton Stephani, Elvis Euzébio Cascaes, Angélica da Rosa pelos riquíssimos diálogos.

A todos que de uma maneira ou outra me auxiliaram na conclusão deste desafio, meus sinceros agradecimentos.



“O amor é a força mais abstrata e também a mais potente que há no mundo”  
(MAHATMA GANDHI, 1869-1948)



## RESUMO

A aplicabilidade dos processos de soldagem é industrialmente reconhecida e isto deve-se em grande parte a sua versatilidade. Largamente difundido em soldagem de produção e manutenção encontra-se o processo de soldagem MIG/MAG. A crescente demanda da soldagem de produção tem subsidiado o desenvolvimento de fontes de soldagem cada vez mais avançadas, no entanto, na maioria das vezes os operadores, por falta de domínio tecnológico, não conseguem extrair todos os recursos que a fonte de soldagem pode oferecer. Entre os parâmetros que as fontes atuais permitem ajustar encontra-se a indutância, que tem influência direta no modo de transferência de metal, contudo, a ação deste parâmetro na soldagem ainda é um fator pouco conhecido e de definições discrepantes. Este estudo se propõe a caracterizar a ação deste parâmetro na soldagem MIG/MAG, mais precisamente acometendo o modo de transferência de metal por curto circuito, amplamente utilizado quando procura-se obter baixo aporte calorífico na soldagem. Ensaios foram estabelecidos para avaliar a repercussão da variação positiva e negativa da indutância no perfil geométrico do cordão de solda e os resultados demonstraram comportamentos divergentes.

**Palavras-chave:** Processos de Soldagem, MIG/MAG, Indutância, Transferência por Curto Circuito, Ensaios.



## ABSTRACT

The applicability of welding processes is industrially known and this is due in large part to its versatility in widespread production and maintenance welding is the process of MIG / MAG welding. The increasing demand of production welding has subsidized the development of welding supplies increasingly technological, however, in most cases the operators lack of technological expertise cannot extract all the resources that the welding source can offer. Among the parameters that the current sources allow the adjustment is the inductance, this has a direct influence on the metal transfer mode, and however, the action of this parameter in welding is still a factor nebulous and conflicting definition. This study aims to characterize the action of this parameter in MIG / MAG, specifically affecting the mode of metal transfer by short circuit widely used when looking to get the low heat input welding. Trials were established to evaluate the effects of positive and negative variation of inductance geometric profile of the weld and the results showed divergent behaviors.

**Keywords:** Welding Processes, MIG / MAG, Inductance, Transfer Short Circuit, Testing.





## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Método de soldagem segundo a patente de Bernardos. ....	31
Figura 2 - Histórico da Soldagem.....	32
Figura 3- Esquemático do processo MIG/MAG .....	35
Figura 4 - Vantagens, limitações e aplicações.....	36
Figura 5 - Transferência de metal por curto circuito. ....	37
Figura 6 - Transferência de metal globular .....	38
Figura 7 - Transferência de metal por aerossol .....	39
Figura 8 - Classificação do arame eletrodo .....	41
Figura 9 - Influência da corrente na soldagem MIG/MAG .....	43
Figura 10 - Efeito da velocidade de soldagem no processo MIG/MAG	44
Figura 11 - Extensão do eletrodo .....	44
Figura 12 - Relação entre corrente e extensão do eletrodo.....	45
Figura 13 - Esquemático da fonte de soldagem.....	46
Figura 14 - Esquemático do ensaio de líquido penetrante.....	52
Figura 15 - Macrografia .....	53
Figura 16 – Comp. química e propriedades mecânicas do aço A36.....	54
Figura 17 - Arame eletrodo ER 70S-6.....	55
Figura 18 - Influência do gás de proteção na soldagem .....	56
Figura 19 - Fonte de soldagem SIGMA .....	57

Figura 20 - Dispositivo mecanizado de avanço contínuo.....	58
Figura 21 - Sistema de fixação da tocha de soldagem .....	59
Figura 22 - Programa de soldagem .....	59
Figura 23 - Corrente e Indutância .....	60
Figura 24 - Corrente e indutância.....	60
Figura 25 - Corrente e Indutância .....	61
Figura 26 - Vazão de gás.....	61
Figura 27 - Alimentação do arame.....	61
Figura 28 - Pré-ensaio de Líquido Penetrante.....	62
Figura 29 - Execução da soldagem .....	63
Figura 30 - Corpo de prova soldado.....	63
Figura 31 - Ensaio visual .....	64
Figura 32 - Corte a Eletro fio.....	65
Figura 33 - Mensuração de imagem no programa Klonk.....	66
Figura 34 - Ensaio de Líquido Penetrante.....	66
Figura 35 - Incidência de respingos .....	67
Figura 36 - Ensaio de L. P. revelado.....	68
Figura 37 - Amostra revelada.....	68
Figura 38 - Hipóteses testadas ANOVA .....	69
Figura 39 - Largura do cordão de solda .....	69
Figura 40 – ANOVA - Largura do cordão de solda.....	70

Figura 41 - Teste de Tukey-Kramer - Largura .....	70
Figura 42 - Altura do cordão de solda.....	71
Figura 43 - ANOVA - Altura do cordão de solda .....	71
Figura 44 - Teste de Tukey-Kramer - Altura.....	71
Figura 45 - Penetração do cordão de solda.....	72
Figura 46 - ANOVA - Penetração do cordão de solda.....	72
Figura 47 - Teste de Tukey-Kramer – Penetração.....	73
Figura 48 - Área total do cordão de solda .....	73
Figura 49 - ANOVA - Área total do cordão.....	73
Figura 50 - Teste de Tukey-Kramer - Área total.....	74
Figura 51 - Área de penetração do cordão .....	74
Figura 52 - ANOVA - Área de penetração do cordão de solda.....	75
Figura 53 - Teste de Tukey-Kramer - Área de penetração do cordão ...	75
Figura 54 - Sobre material de solda.....	75
Figura 55 - ANOVA - sobre material.....	76
Figura 56 - Teste de Tukey-Kramer - Sobre material .....	76
Figura 58 - Comparativo entre as amostras.....	77



## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

MIG – Metal Inerte Gás

MAG – Metal Ativo Gás

AWS – American Welding Society

GMAW – Gas Metal Arc Welding

TIG – Tungstênio Inerte Gás

MMA – Manual Metal Arc

CC + – Corrente Contínua Polo Positivo

CC -- – Corrente Contínua Polo Negativo

V – Volts

LP – Líquido Penetrante

ZTA – Zona Termicamente Afetada

ASTM – American Society for Testing and Materials

ANOVA – Análise de Variância



# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>29</b>
<b>1.1</b>	<b>JUSTIFICATIVA</b> .....	<b>29</b>
<b>1.2</b>	<b>DEFINIÇÃO DO PROBLEMA</b> .....	<b>29</b>
<b>1.3</b>	<b>OBJETIVO GERAL</b> .....	<b>29</b>
<b>1.4</b>	<b>OBJETIVOS ESPECÍFICOS</b> .....	<b>30</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO DA LITERATURA</b> .....	<b>30</b>
<b>2.1</b>	<b>HISTÓRICO DA SOLDAGEM</b> .....	<b>30</b>
2.1.1	Definição de Soldagem.....	33
2.1.2	O Arco Elétrico Aplicado a Soldagem .....	33
2.1.3	Processos de Soldagem MIG/MAG.....	34
2.1.4	Vantagens, limitações e aplicações principais do processo MIG/MAG. ....	36
2.1.5	Transferência de Metal .....	37
2.1.6	Consumíveis do Processo MIG/MAG. ....	39
2.1.7	Principais variáveis do processo MIG/MAG.....	42
<b>2.2</b>	<b>FONTES DE SOLDAGEM</b> .....	<b>45</b>
2.2.1	Requisitos básicos das fontes de soldagem.....	46
2.2.2	Definição de Indutância.....	47
2.2.3	Indutância no Processo de Soldagem.....	48
<b>2.3</b>	<b>ENSAIOS MECÂNICOS</b> .....	<b>48</b>
2.3.1	Ensaio Mecânicos Não Destrutivos .....	49
2.3.2	Ensaio Visual.....	51
2.3.3	Líquido Penetrante (LP) .....	52
2.3.4	Macrografia .....	53
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>54</b>
<b>3.1</b>	<b>MATERIAIS UTILIZADOS</b> .....	<b>54</b>
3.1.1	Metal de Base .....	54
3.1.2	Metal de Adição.....	55
3.1.3	Gás de Proteção .....	56
<b>3.2</b>	<b>EQUIPAMENTO E DISPOSITIVO DE SOLDAGEM</b> .....	<b>57</b>
3.2.1	Fonte de Soldagem e Sistema de Alimentação de Arame.....	57
3.2.2	Sistema de Soldagem Mecanizado .....	58

3.2.3	Principais Parâmetros .....	59
<b>4</b>	<b>CONDUÇÃO DOS EXPERIMENTOS .....</b>	<b>62</b>
<b>4.1</b>	<b>ENSAIO DE SOLDAGEM .....</b>	<b>62</b>
4.1.1	Visual .....	64
4.1.2	Preparação das Amostras.....	64
4.1.3	Líquido Penetrante .....	66
<b>5</b>	<b>APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS .....</b>	<b>67</b>
5.1.1	Largura do cordão de solda. ....	69
5.1.2	Altura do cordão de solda.....	70
5.1.3	Penetração do cordão de solda .....	72
5.1.4	Área total do cordão de solda .....	73
5.1.5	Área de penetração do cordão .....	74
5.1.6	Sobre Material de Solda .....	75
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>78</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>79</b>
	<b>ANEXOS.....</b>	<b>83</b>
	<b>ANEXO A – CERTIFICADO DA MATÉRIA PRIMA .....</b>	<b>85</b>



# 1 INTRODUÇÃO

Os avanços tecnológicos oriundos da insaciável busca humana por conforto ou facilidade têm subsidiado grandes transformações em nossa sociedade, contudo, é difícil desenvolver habilidades com a mesma rapidez com que os equipamentos são lançados. Mediante a isto, é inesperado que consigamos extrair todos os recursos que os equipamentos poderiam nos fornecer.

Nos últimos anos, alavancadas pelo avanço tecnológico, as fontes de soldagem sofreram uma grande transformação, oferecendo parâmetros e ajustes nunca antes observados ou apenas superficialmente abordados.

A soldagem MIG/MAG é mundialmente difundida, e isso deve-se em parte à relativa facilidade de operação que o processo requer.

## 1.1 Justificativa

Com a evolução das fontes de soldagem foi possível fracionar os valores da indutância dos equipamentos de soldagem; assim é possível distinguir e mensurar as diferenças no cordão de solda atribuídas pela indutância.

Em sua grande maioria, os soldadores desconhecem os recursos oferecidos pelo equipamento de soldagem, tão pouco a influência destes recursos sobre os aspectos do cordão de solda. Este estudo pretende preencher esta lacuna sanando as dúvidas deste contexto.

## 1.2 Definição do Problema

Qual é a influência do efeito indutivo na geometria do cordão de solda na soldagem pelo processo MIG/MAG?

Pressuposto a esta pergunta, procurou-se estruturar este estudo de maneira que ao final deste fosse possível respondê-la, embasado em um método de avaliação científica, de maneira sensata e ponderada a fim de garantir a integridade do estudo e a veracidade dos fatos.

## 1.3 Objetivo Geral

Expor e caracterizar os cenários obtidos com a variação de indutância no processo MIG/MAG.

## **1.4 Objetivos Específicos**

Caracterizar a geometria do cordão de solda através da variação dos valores de indutância da fonte de soldagem.

Avaliar se a variação da indutância é um gerador de descontinuidades no cordão de solda.

## **2 REVISÃO DA LITERATURA**

### **2.1 Histórico da Soldagem**

Os moldes atuais tomados pelos processos de soldagem sofreram grandes alterações nos últimos 100 anos, contudo a técnica de soldagem por forjamento e a brasagem foram empregadas em larga escala na antiguidade e na idade média, no intuito de fabricar armas e outros objetos cortantes.

Devido ao pouco domínio das técnicas de beneficiamento do ferro e o alto custo do aço, a soldagem obteve uma grande importância na tecnologia metalúrgica durante este período.

Este cenário modificou-se a partir do momento em que o homem obteve controle do beneficiamento de grandes quantidades de ferro fundido em estado líquido, isto se deve ao fato dos avanços tecnológicos no campo da mecânica e o desenvolvimento do alto forno.

Assim a fundição passou a ter um papel de destaque entre os processos de fabricação e, enquanto isso o processo de soldagem por forjamento perdeu espaço para outros métodos de união, especialmente para a parafusagem e rebitagem.

Conforme Marques; Modenesi; Bracarense (2005), a soldagem passou a ter maior importância devido às experiências de Humphrey Davy com o arco elétrico no início do século XIX, da descoberta do acetileno por Edmund Davy e aos avanços no desenvolvimento de fontes geradoras de energia elétrica.

As técnicas de beneficiamento do ferro avançavam velozmente e fazia-se necessário desenvolver uma técnica de união de materiais que acompanhasse esse crescimento. Assim em 1885 surgiu a primeira patente de um processo de soldagem, adquirida na Inglaterra por Nikolas Bernardos e Stanislav Olszewsky. Conforme a Figura 1, o

processo foi baseado em um arco elétrico estabelecido entre um eletrodo de carvão e o metal de base (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2005).

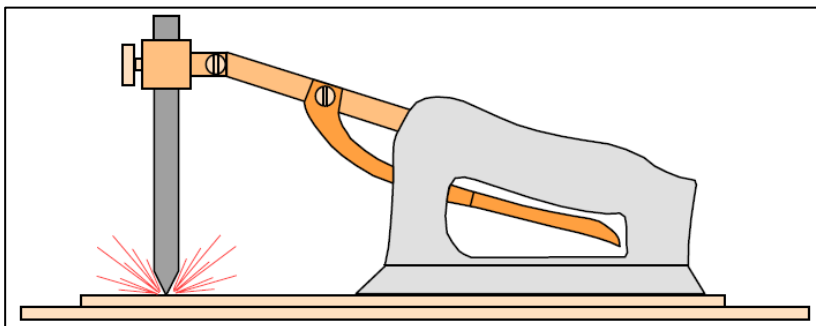


Figura 1 - Método de soldagem segundo a patente de Bernardos.

Fonte: Marques; Modenesi; Bracarense (2005)

Ainda no século XIX, por volta de 1890 foi desenvolvida a soldagem a arco elétrico com eletrodo nu, este foi desenvolvido simultaneamente pelo russo Slavianoff e pelo americano Coffin. E ainda nesse período surgiram os processos de soldagem por aluminotermia, por pressão e a gás (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2005).

Somente em 1905, com o desenvolvimento do primeiro eletrodo revestido por Kjellberg (Suécia), o processo de soldagem por eletrodo revestido começou a tomar os moldes atuais e devido ao desenvolvimento da tecnologia este processo tornou-se mundialmente difundido (QUITES, 2002).

Atualmente a soldagem é o método mais significativo para união permanente de materiais, tendo mais de 50 processos de soldagem diferenciados em utilização no mercado e isto deve-se em grande parte ao avanço dos meios tecnológicos. Algumas datas importantes no campo da soldagem podem ser observadas na Figura 2.

<b>Epoca</b>	<b>Inventor</b>	<b>Invenção</b>
2000 a 2500 atrás	Egípcios	Soldagem de Ouro por pressão – Solda forçada
200 a 300 AD	Romanos	Pilares de Ferro soldados por força
Aproximadamente 1830	Humphrey Davis	Arco Elétrico com baterias de armazenamento
1877/1903		Soldagem e corte a gás Soldagem a arco elétrico com eletrodos de grafita Soldagem a arco elétrico com eletrodos metálicos
1885	Bernardos Olszewski	Patente da primeira pinça para eletrodos
1892	Coffin	Patente do primeiro eletrodo metálico
1900	Stricohmeyer	Patente do primeiro eletrodo revestido
1885/1900	Elihu Thompsom	Primeira companhia de soldagem: solda-ponto, soldagem por projeção, soldagem tipo costura e soldagem tipo <i>flash</i>
1903	Goldschmidt	Solda Thermit
1907/1914	Kjellberg	Recobrimento por gotejamento ( <i>dip coating</i> )
1918		Cobertura de gases para soldagem de aços: H <sub>2</sub> , gás de carvão, O <sub>2</sub>
1919		Fundação da AWS ( <i>American Welding Society</i> )
1920	General Electric	Primeira máquina automática de soldagem Primeira classificação dos eletrodos (uma vez a cada seis anos)
1930	Alexandre e Langmuir Hobart	Recobrimento de eletrodos por extrusão. Arco elétrico envolto em H <sub>2</sub> . Eletrodos de Carbono e Tungstênio envoltos em Ar e He.
1941	Northrop & Dow Chemical	Arco elétrico envolto em Hélio ( <i>Heliarc</i> ) - GTAW
1948	H. Kennedy	Processo de alimentação contínua de eletrodo imerso em He e Ar
1950	Reino Unido	MIG – GMAW Processo de alimentação contínua de malha de arame para recobrimento de cerâmica
1953	Rússia	Soldagem imersa em CO <sub>2</sub>
1957	Bernard	Processo de soldagem com arame tubular no qual o revestimento é interno ao arame.
1959	Lincoln Electric Co.  Hopkins	Processo de arame tubular auto-recobridor – FCAW Refinamento por eletro-escória Soldagem por eletro-escória
1950/1960		Soldagem por feixe de elétrons
1960/1965	PSU/IE	Soldagem por feixe LASER

Figura 2 - Histórico da Soldagem

Fonte: Marques; Modenesi; Bracarense (2005)

Muitos processos de soldagem são originários da necessidade militar em prol das guerras, no entanto a soldagem vem acompanhando a evolução dos materiais há muitas décadas, para cada material ou

compósito que é desenvolvido, faz-se necessário também desenvolver um método ou consumível para soldá-lo.

### 2.1.1 Definição de Soldagem

No campo da soldagem existem grandes controvérsias quanto a definição de soldagem e isto deve-se em grande parte aos inúmeros processos de soldagem catalogados. A soldagem é um processo de fabricação de relativa facilidade de operação, motivo pelo qual difundiu-se mundialmente e a partir das necessidades humanas foram-se desenvolvendo derivações destes processos.

Segundo AWS (American Welding Society, 2001),

Soldagem é o processo de união de materiais usado para obter a coalescência localizada de metais e não metais, produzida por aquecimento até uma temperatura adequada, com ou sem a utilização de pressão e/ou material de adição.

Pode-se acrescentar a esta definição o conceito de soldagem segundo Quites (2002), este expressa que soldagem é a operação que visa obter a união de duas ou mais peças assegurando na junta soldada a continuidade das características físicas, químicas e metalúrgicas.

No entanto é preciso dizer que todas as definições de soldagem tem coerência, pois visam à integridade da soldagem independentemente do método ou processo utilizado. Quites (2002) acrescenta que o fator que caracteriza um processo de união como soldagem é a capacidade de manufaturar juntas sem descontinuidades.

### 2.1.2 O Arco Elétrico Aplicado a Soldagem

O arco elétrico é o responsável pelos grandes avanços obtidos no campo da soldagem, motivo pelo qual atualmente a soldagem a arco elétrico é o processo mais significativo e industrialmente reconhecido, sendo este aplicável à soldagem de produção ou manutenção de praticamente todos os metais comercialmente conhecidos.

Esta larga aplicabilidade deve-se em parte principalmente a dois fatores, a alta concentração calorífica do arco elétrico, que oportuniza

temperaturas elevadas em um espaço reduzido, bem como a característica que o arco possui de subsistir em variadas atmosferas gasosas, possibilitando o uso de inúmeras combinações inertes ou ativas (QUITES, 2002).

Pode-se acrescentar a estes fatos o conceito segundo Marques; Modenesi; Bracarense (2005), que relata as ótimas características proporcionadas pelo arco elétrico tais como a concentração apropriada de energia para a coalescência do metal de base, a facilidade operacional, o custo relativamente baixo do equipamento e um grau de riscos ocupacionais aceitáveis.

Conforme Scotti (2008), entre o metal de base e a extremidade do eletrodo para soldagem, encontra-se uma faixa chamada de plasmática, onde movimenta-se uma enorme quantidade de corrente e esta por sua vez produz uma grandiosa intensidade de luz e calor. Essa faixa denomina-se arco elétrico.

Marques; Modenesi; Bracarense (2005) descrevem que o arco elétrico baseia-se em uma descarga elétrica, nutrida por um gás ionizado, a temperatura elevada, denominado plasma, sendo este capaz de fornecer energia térmica necessária para a fusão de materiais.

Os avanços empreendidos nos processos de soldagem a arco elétrico são atribuídos Humphrey Davy, o primeiro pesquisador que observara o arco elétrico sob circunstâncias controladas ainda no século XIX.

### 2.1.3 Processos de Soldagem MIG/MAG

A descrição do processo de soldagem a arco elétrico GMAW (Gas Metal Arc Welding), popularmente denominado soldagem MIG/MAG (MIG – Metal Inerte Gás e MAG – Metal Ativo Gás), é expresso como um arco elétrico formado entre um eletrodo nu, consumível, alimentado continuamente, e o metal de base (ESAB, 2005).

O calor fornecido pelo arco funde constantemente o eletrodo que alimenta permanentemente a poça de fusão. A poça de fusão é protegida dos efeitos atmosféricos por um fluxo gasoso que poderá ser ativo ou inerte, puro ou ligado (ESAB, 2005).

Em conformidade com Quites (2002), este processo foi desenvolvido com o intuito de combinar a suavidade do arco e a ausência de escória do processo de soldagem TIG (Tungstênio Inerte Gás), com a alta taxa de deposição de material que poderia ser obtida com o uso de elevadas densidades de corrente elétrica.

O processo TIG surgiu para suprir as necessidades armamentistas da segunda guerra mundial, que demandavam de um processo de soldagem capaz de unir com integridade metais leves e duráveis como o alumínio e o magnésio (QUITES, 2002).

A soldagem MIG/MAG, em sua essência, revela-se como um processo semiautomático onde a alimentação do eletrodo se dá de forma mecanizada de maneira que o soldador é o responsável pela estabilização, manutenção e interrupção da soldagem (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2005).

A principal caracterização da soldagem MIG/MAG está atrelada a ampla faixa de espessuras de metal de base que o processo engloba e a tolerável soldabilidade perante metais ferrosos e não ferrosos. O processo MAG é estritamente aplicado a materiais ferrosos, à medida que o processo MIG apresenta-se mais versátil podendo ser aplicado à soldagem de materiais ferrosos e não ferrosos como o cobre, alumínio, magnésio, níquel e suas ligas (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2005).

Pode-se entender melhor a esquemática do processo MIG/MAG observando a Figura 3.

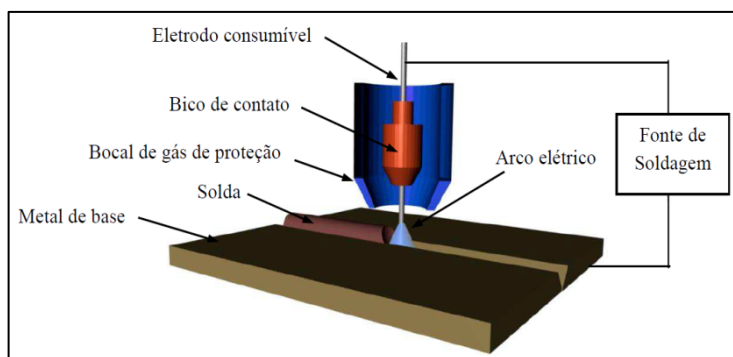


Figura 3- Esquemático do processo MIG/MAG  
Fonte: Fischer (2011)

#### 2.1.4 Vantagens, limitações e aplicações principais do processo MIG/MAG.

O processo de soldagem MIG/MAG tem sido aplicado à manufatura e manutenção de equipamentos e componentes metálicos, na restauração de elementos de máquina fadigados e no revestimento de superfícies metálicas com ligas especiais.

Conforme Marques; Modenesi; Bracarense (2005), as principais vantagens do processo MIG/MAG são: ampla versatilidade quanto a espessuras e tipo de metal de base aplicável e ausência da escória. Com isso, ganha-se tempo de produção e a facilidade de operação por se tratar de um processo semiautomático, acarretando menor habilidade do soldador.

Contudo, algumas limitações devem ser observadas: a relativa sensibilidade do arco elétrico, elevada difusão de luz e calor, necessita de rigorosa ajustagem dos parâmetros de soldagem e complexa inter-relação dos parâmetros de soldagem (QUITES, 2002). A Figura 4 traz mais alguns exemplos.

Vantagens e limitações	Aplicações
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Processo com eletrodo contínuo.</li> <li>• Permite soldagem em qualquer posição.</li> <li>• Elevada taxa de deposição de metal.</li> <li>• Elevada penetração.</li> <li>• Pode soldar diferentes ligas metálicas.</li> <li>• Exige pouca limpeza após soldagem.</li> <li>• Equipamento relativamente caro e complexo.</li> <li>• Pode apresentar dificuldade para soldar juntas de acesso restrito.</li> <li>• Proteção do arco é sensível a correntes de ar.</li> <li>• Pode gerar elevada quantidade de respingos.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Soldagem de ligas ferrosas e não ferrosas.</li> <li>• Soldagem de carrocerias e estruturas de veículos.</li> <li>• Soldagem de tubulações, etc.</li> </ul>

Figura 4 - Vantagens, limitações e aplicações.

Fonte: Marques; Modenesi; Bracarense (2005)



## 2.1.5 Transferência de Metal

A transferência de metal no processo MIG/MAG expressa a maneira com que o eletrodo consumível é transferido para a poça de fusão. A maneira como se procede esta transferência é muito relevante, pois afeta características significativas do processo.

Quites (2002) cita que a influência da transferência de metal é determinante para a integridade da junta soldada, à medida que afeta diretamente a geometria do cordão, a estabilidade do arco, o nível de respingos, posição de soldagem e na proteção da poça de fusão.

Essencialmente três técnicas distintas de transferência de metal são associadas ao processo MIG/MAG: transferência por curto-circuito, transferência globular e a transferência por aerossol. Os fatores determinantes para o tipo de transferência de metal obtida são o diâmetro do eletrodo, a corrente de soldagem, as características da fonte, a extensão do arco e o gás de proteção (ESAB, 2005).

### 2.1.5.1 Transferência de Metal por Curto-Circuito

Este modo de transferência ocorre quando o eletrodo consumível toca a poça de fusão estabelecendo um curto-circuito e o evento se renova a cada novo toque. Neste modo o eletrodo entra em contato com a poça cerca de 20 a 200 vezes por segundo (ESAB, 2005).

A fusão inicia-se globalmente, e a gota vai aumentando de tamanho até tocar a poça de fusão, produzindo um curto-circuito. A Figura 5 ilustra a transferência de metal por curto-circuito.

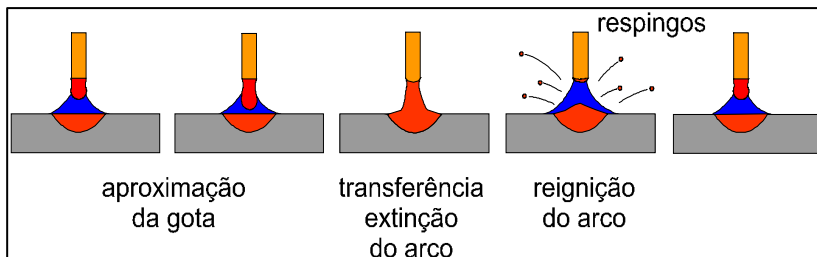


Figura 5 - Transferência de metal por curto circuito.

Fonte: Sumig (2009)

Nesta técnica aplicam-se basicamente eletrodos com diâmetro entre 0.8mm a 1.2mm, baixa tensão e corrente de soldagem e obtém-se uma poça de fusão discreta e de solidificação rápida. Usualmente utilizada para unir materiais de pequena espessura sem restrição de posição de soldagem assim como em aplicações onde é requisitado um nível mínimo de distorção (MARQUES, MODENESI E BRACARENSE, 2005).

### 2.1.5.2 Transferência de Metal Globular

Este tipo de transferência é atingido quando os valores de tensão e corrente de soldagem são sobrepostos além dos recomendados na técnica por curto-circuito. O tamanho médio das gotas metálicas é em geral maior que o próprio diâmetro do eletrodo.

A gota metálica sofre influência gravitacional, assim a transferência apresenta-se imprevisível e caótico o que caracteriza um nível de respingos relativamente demasiado (MARQUES, MODENESI E BRACARENSE, 2005).

A Figura 6 ilustra a transferência de metal globular.

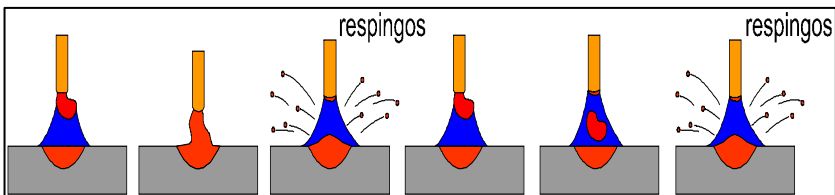


Figura 6 - Transferência de metal globular

Fonte: Sumig (2009)

### 2.1.5.3 Transferência de Metal por Aerosol

Neste modo de transferência metálica as gotas são pequenas e numerosas e tem-se a impressão semelhante a uma pulverização de metal, este fenômeno ocorre quando aplica-se elevados níveis de tensão e corrente.

A Figura 7 ilustra uma transferência típica do arco em aerossol, as gotas tem o diâmetro menor que o eletrodo desta maneira proporcionando uma boa estabilidade ao arco. Essa técnica de soldagem é caracterizada pela escassez de curto-circuito, baixíssimo nível de respingos e elevadas taxas de deposição do metal de solda (ESAB, 2005).

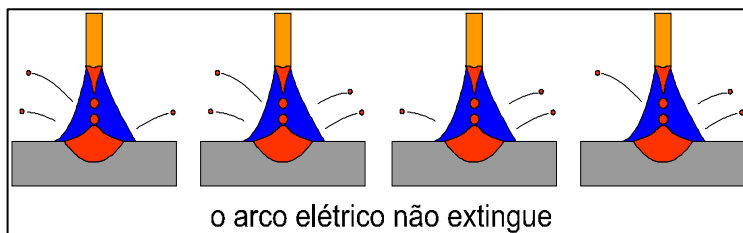


Figura 7 - Transferência de metal por aerossol  
Fonte: Sumig (2009)

Essa técnica de soldagem é comumente empregada na união de materiais com espessura acima de 2,4mm, no entanto, se o gás de proteção comportar mais de 15% de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), não acontecerá a transição de transferência globular para transferência por aerossol, devido a característica do gás de proteção (ESAB, 2005).

### 2.1.6 Consumíveis do Processo MIG/MAG.

Consumíveis para soldagem são todos os materiais empregados na deposição ou proteção da solda. Os principais consumíveis aplicados ao processo MIG/MAG são o arame eletrodo e o gás de proteção (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2005).

Encontram-se disponíveis inúmeras variações destes consumíveis e estes são selecionados de acordo com cada especificidade. Para cada nova liga metálica desenvolvida também faz-se necessário desenvolver ou adequar um consumível para soldá-lo.

### 2.1.6.1 Eletrodo de Soldagem

O eletrodo para soldagem pelo processo MIG/MAG é popularmente conhecido como arame-eletrodo ou somente arame, isso deve-se ao processo de manufatura ao qual é submetido, pelo qual obtém-se um formato cilíndrico com pequeno diâmetro e grande extensão.

Usualmente comercializado em bobinas ou carretéis de 15 Kg ou 18 Kg. Para operações robotizadas a fim de evitar a constante parada para a troca dos carretéis, foram desenvolvidos tambores ou barricas que comportam 200 ou 475 Kg de arame (QUITES, 2002).

Os arames são manufaturados com diâmetros diferenciados, sendo que os mais comercializados são com espessuras de 0,8; 0,9; 1,0 e 1,2mm . Um revestimento a base de cobre é aplicado sobre os arames de aço, isto é feito por meio químico ou deposição eletrolítica. A justificativa para tal revestimento é a proteção à corrosão e o ganho significativo de contato elétrico (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2005).

Considerável fator na soldagem MIG/MAG é a escolha correta do arame de solda, este em combinação com o gás de proteção, produzirá um depósito químico que determinará as propriedades mecânicas e físicas da solda. São enunciados cinco fatores que devem ser observados na seleção do arame-eletrodo para a soldagem MIG/MAG:

- A composição química do metal de base;
- As propriedades mecânicas do metal de base;
- O gás de proteção empregado;
- O grau de solitação da junta;
- O tipo de projeto de junta (ESAB, 2005).

No entanto, com o propósito de simplificar a seleção do arame-eletrodo, a AWS a partir dos conhecimentos adquiridos no campo da soldagem industrial desenvolveu e fabricou arames que oportunizassem os melhores resultados com materiais de base específicos. Embora as especificações não abranjam todo o meio industrial, grande parte dos arames seguem os padrões AWS. A Figura 8 demonstra a classificação do arame-eletrodo em conformidade com a AWS.

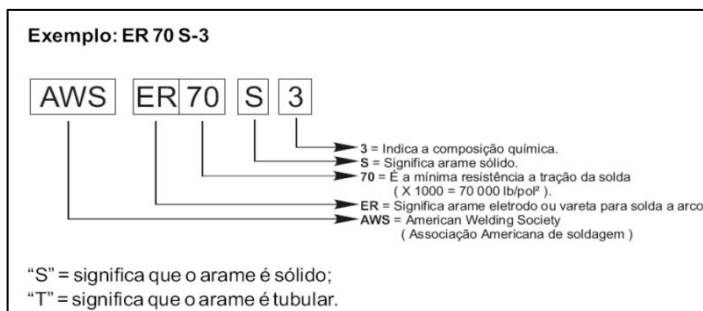


Figura 8 - Classificação do arame eletrodo

Fonte: Senai (2008)

### 2.1.6.2 Gases de Proteção

A mistura gasosa ou gás de proteção caracteriza-se como uma variável muito importante na soldagem MIG/MAG, uma vez que tem influência direta sob as características de ionização, formação e estabilização do arco elétrico além de proteger a poça de fusão dos efeitos do ar atmosférico.

A fim de garantir essas características, três gases são frequentemente aplicados: argônio (Ar), hélio (He) e dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). Contudo, pequenas quantias de oxigênio (O<sub>2</sub>), nitrogênio (N<sub>2</sub>) e hidrogênio (H<sub>2</sub>) mostraram-se vantajosas em algumas aplicações (ESAB, 2005).

Segundo Marques; Modenesi; Bracarense (2005),

Os gases utilizados na soldagem MIG/MAG podem ser inertes ou ativos ou, ainda, mistura destes. O tipo de gás influencia as características do arco e a transferência de metal, a penetração, a largura e o formato do cordão de solda, a velocidade máxima de soldagem, a tendência a aparecimento de mordeduras e o custo de operação.

Os gases inertes em forma pura tem aplicabilidade direcionada a soldagem de metais não ferrosos, principalmente os mais reativos como o titânio, o magnésio e o alumínio. Na soldagem de metais ferrosos, pequenas porções de gases ativos são adicionadas melhorando assim a

estabilidade e sensibilidade do arco e a transferência metálica (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2005).

Assim como os arames seguem padrões pré-determinados, os gases também são padronizados, seguindo especificações de mercado que foram desenvolvidas e testadas para a maioria dos aços comercialmente conhecidos. Todavia, isso não impossibilita o desenvolvimento de uma mistura específica, podendo este ser um composto binário, ternário ou quantos forem necessários para atender a especificidade do metal de base.

### 2.1.7 Principais variáveis do processo MIG/MAG

O apropriado aproveitamento do processo MIG/MAG está vinculado à compreensão da parametrização do equipamento e da técnica de soldagem, que tem influência direta sobre a estabilidade do arco elétrico e a qualidade do material depositado.

De acordo com Esab (2005), podem-se evidenciar quatro parâmetros como sendo os mais significativos na soldagem MIG/MAG: corrente de soldagem; tensão de soldagem; velocidade de soldagem e extensão do eletrodo. Estes parâmetros influenciarão de maneira significativa as características do cordão de solda.

#### 2.1.7.1 Corrente de Soldagem

A fonte de soldagem opera em corrente contínua (CC +), essencialmente com o arame ligado ao polo positivo, essa configuração é denominada como polaridade reversa. A intensidade da corrente tem influência sobre o consumo do eletrodo, na penetração, no reforço e na largura do cordão (QUITES, 2002). A influência da corrente pode ser melhor observada na Figura 9.

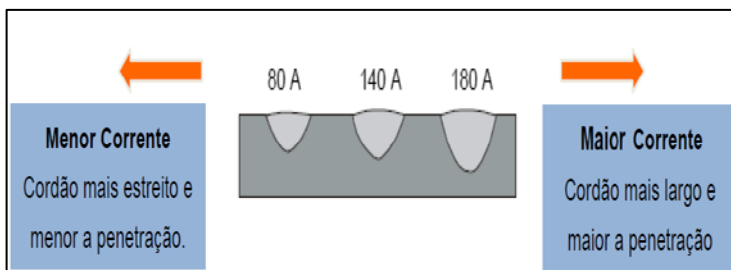


Figura 9 - Influência da corrente na soldagem MIG/MAG

Fonte: Senai (2004)

A corrente de soldagem tem ligação direta com a velocidade de alimentação do arame (desde que seja constante a extensão do eletrodo), assim, quando aumenta-se a velocidade de alimentação de arame, a corrente de soldagem também aumenta e vice versa (ESAB, 2005).

A soldagem em corrente contínua (CC -), com o arame ligado ao polo negativo não tem grande aplicação industrial, devido ao baixo índice de penetração do material (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2005).

#### 2.1.7.2 Tensão de Soldagem

A tensão de soldagem influencia diretamente na energia necessária para a fusão dos materiais a serem soldados, a geometria do cordão, na altura do arco e no modo de transferência de metal. Níveis de tensões baixos tem-se a transferência de material por curto circuito e consequentemente maior instabilidade do arco e em elevadas tensões tem-se a transferência por aerossol, resultando em um cordão mais largo (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2005).

#### 2.1.7.3 Velocidade de Soldagem

Velocidade de soldagem é a razão entre o trajeto percorrido pelo arco ao longo de metal de base e o tempo gasto para percorrê-lo. Tem influência sobre a energia de soldagem, portanto, a quantia de calor que está sendo cedido ao metal de base (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2005).

Segundo Quites (2002), baixas velocidades elevam o custo da soldagem e podem acarretar alterações metalúrgicas devido à elevada

concentração calorífica. De maneira oposta, altas velocidades podem ocasionar atenuação da penetração, largura e reforço do cordão bem como a manifestação de mordeduras e até falta de fusão. A Figura 10 ilustra as principais alterações decorrentes da variação da velocidade de soldagem.

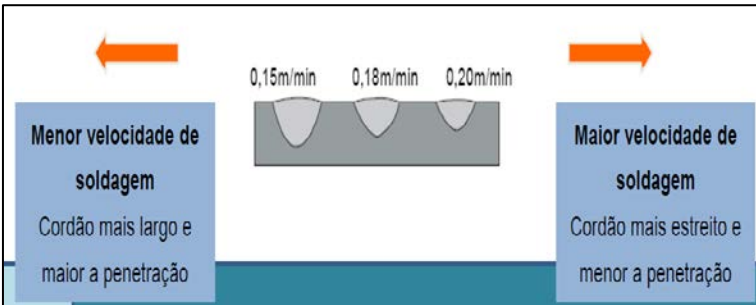


Figura 10 - Efeito da velocidade de soldagem no processo MIG/MAG  
Fonte: Senai (2004)

#### 2.1.7.4 Extensão do Eletrodo

Trata-se da distância entre a peça e o bico de contato (extensão do eletrodo) influencia a corrente necessária para fundir o arame para uma respectiva velocidade de alimentação de arame (ESAB, 2005).

A Figura 11 demonstra esta característica.

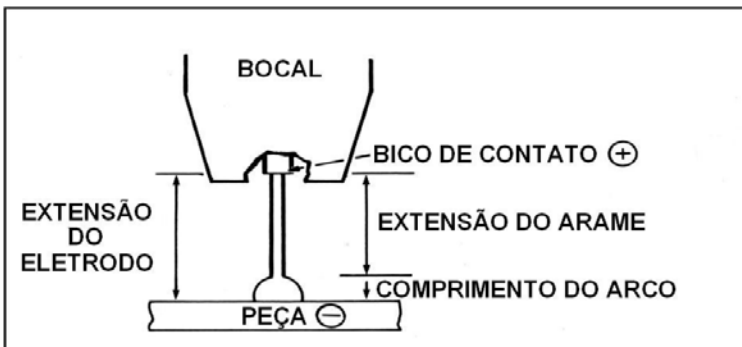


Figura 11 - Extensão do eletrodo  
Fonte: Esab (2005)



Faz-se necessário controlar a extensão do eletrodo, pois grandes extensões podem originar um excesso de metal de solda depositado com baixo potencial calorífico, causando baixa penetração, geometria desfavorável, afetando a integridade do cordão. Adicionalmente, a medida que a extensão do eletrodo cresce, a instabilidade de arco também cresce proporcionalmente (ESAB, 2005). O gráfico da Figura 12 demonstra a razão entre corrente e extensão de eletrodo.

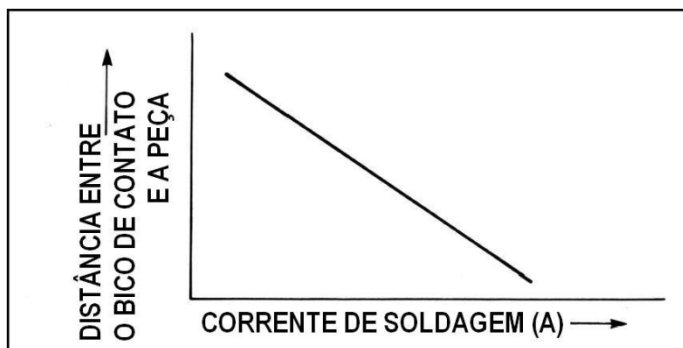


Figura 12 - Relação entre corrente e extensão do eletrodo

Fonte: Esab (2005)

## 2.2 Fontes de Soldagem

É necessário uma fonte de energia para obter o arco elétrico, denominada vulgarmente como máquina de solda ou tecnicamente como fonte de soldagem. Estas fontes oportunizam a obtenção do arco elétrico em tensões baixas e correntes altas (MODENESI, 2009).

Segundo Okimoto (2005), estas fontes proporcionam uma ampla faixa aplicável de processos de soldagem como, por exemplo, no processo eletrodo revestido, arco submerso, TIG, MIG/MAG, eletroescória e plasma.

Independente da alimentação, a tensão de saída da fonte deverá permanecer entre valores de (10 a 50 V) e a corrente poderá ser alternada ou contínua. Isto pode ser melhor observado na Figura 13 que ilustra de forma esquemática uma fonte de soldagem.

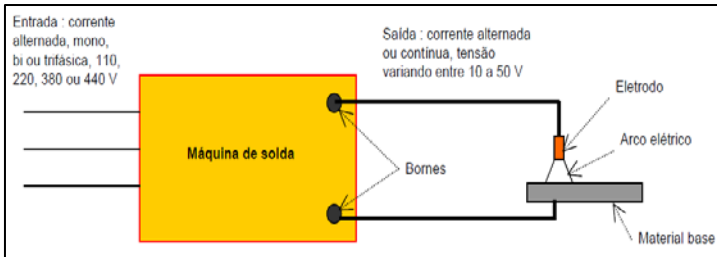


Figura 13 - Esquemático da fonte de soldagem  
Fonte: Okimoto (2005)

O processo MIG/MAG requer corrente contínua para a soldagem. Para atender a esta exigência foram desenvolvidas fontes de energia denominadas fontes retificadoras. Estas retificam a corrente através de tiristores e diodos, o que eleva o custo do equipamento devido à relativa complexidade (Okimoto, 2005).

Segundo Jordão (2002), um arco elétrico é caracterizado por propriedades atípicas daquelas encontradas em uma modesta resistência ôhmica; a característica volt-Ampère apresentada pela resistência ôhmica tem comportamento linear, enquanto o arco elétrico evidencia-se num perfil curvo-descendente.

Assim sendo, para obter-se estabilidade de arco, a fonte de energia deve gerar uma tensão acentuadamente decrescente perante aos aumentos da corrente, na relação necessária para que a interseção destes pontos estabeleça um arco estável (JORDÃO, 2002).

Os grandes avanços observados nas fontes de soldagem datam dos anos 60, quando obteve-se maior controle da técnica de desenvolvimento dos componentes eletrônicos e novamente alavancada nos anos 80 pelos avanços da informática. A fusão destas tecnologias tornaram as fontes de soldagem mais dinâmicas otimizando o processo.

### 2.2.1 Requisitos básicos das fontes de soldagem

Conforme Marques; Modenesi; Bracarense (2005), necessariamente a fonte de soldagem deverá atender a três requisitos básicos:

- Produzir saídas de tensão e corrente com características adequadas e valores desejados para o processo de soldagem;
- Permitir o ajuste funcional destes valores de tensão e/ou corrente para aplicações específicas;
- Variar a tensão e corrente no decorrer da operação de acordo com as especificidades do processo de soldagem.

Contudo, o projeto da fonte necessita atender outros requisitos tais como:

- Estar em conformidade com as normas e códigos vigentes associados com a segurança e funcionalidade;
- Apresentar durabilidade e resistência em ambientes fabris, com relativa praticidade de instalação e operação;
- Interface ou saída para futuros sistemas de automação.

### 2.2.2 Definição de Indutância

Indutância é a propriedade que o circuito elétrico apresenta de resistir à variação da corrente. Tem influência direta sobre o aumento ou diminuição da corrente (SOUZA, et al, 2011).

Uma corrente invariável produz um campo magnético estático. De maneira oposta, uma corrente oscilante produz um campo magnético variante, a qual, por sua vez, induz uma força eletromotriz em um condutor que esteja inserido no campo magnético (KOSOW,2005).

A grandeza da força eletromotriz induzida é equivalente à taxa de variação da corrente elétrica. A razão existente entre o valor da força eletromotriz induzida e a taxa de oscilação da corrente causadora da indução, é denominada indutância (KOSOW,2005).

Sempre que houver oscilações de corrente em um circuito elétrico ocorrer fenômenos de indução magnética. O campo magnético oscilará proporcionalmente a oscilação da corrente do circuito.

A unidade de indutância magnética é o Henry, nomeado em honra ao físico americano Joseph Henry, o primeiro a reconhecer o fenômeno da indutância ainda no século XIX. Um Henry é equivalente a um volt dividido por um Amper por segundo. A indutância é a grandeza física associada aos indutores, é simbolizada pela letra L, e representada graficamente por um fio helicoidal.

### 2.2.3 Indutância no Processo de Soldagem

Conforme Souza et al (2011), a indutância administra a taxa de variação da corrente, tendo influência direta sobre a estabilidade de transferência metálica por curto circuito. O efeito indutivo é o motivador da inconstância na transferência de metal, no destacamento da gota metálica e na manifestação de respingos.

O destacamento da gota poderá ser mais ou menos abrupto, isto depende do valor da corrente naquele instante, e esta tem correlação direta com a indutância. Baixa indutância ocasiona um arco curto e agressivo, volume acentuado de respingos e limitado à soldagem de arame de diâmetro até 1.2 mm em baixas correntes (SCOTTI , 2008).

Diversamente, alta indutância concede um arco mais suave com a poça de fusão mais tranquila, maior aporte térmico, contudo sua aplicabilidade restringe-se a arames com diâmetro superior a 1.2mm. A influência da indutância prevalece na transferência por curto circuito e globular, tendo desempenho mais discreto na transferência por aerossol (SCOTTI , 2008).

Segundo Scotti (2008), uma boa fonte de soldagem deve permitir o ajuste da indutância conforme necessário para uma dada combinação de parâmetros. Em relação a indutância, pode-se evidenciar a diferença entre fontes convencionais e eletrônicas.

Normalmente nas fontes convencionais os valores de indutância estão pré-definidos e uma vez alterados abrangem todos os parâmetros pertinentes. Contrariamente, as fontes eletrônicas ajustam a indutância por um controle de corrente, isso permite um aumento da indutância no momento da transferência e a mantenha baixa quando aumenta-se a corrente propositalmente.

## 2.3 Ensaios Mecânicos

No desenvolvimento de um projeto ou componente mecânico faz-se necessário o conhecimento das propriedades, características e comportamento dos materiais utilizados. A fim de revelar tais características os materiais são submetidos a ensaios normalizados. A normalização é imprescindível para que usuários e fornecedores estejam alinhados (GARCIA; SPIM; SANTOS, 2000).

Podem ser citadas duas finalidades mais significativas para a realização de ensaios:

- Possibilitar a obtenção de informações básicas dos materiais;
- Parametrização de informações no desenvolvimento de novos materiais (GARCIA; SPIM; SANTOS, 2000).

Em conformidade com Garcia, Spim, Santos (2000), os ensaios de materiais podem ser classificados em dois grupos.

Quanto à integridade dimensional e geométrica da peça:

- Ensaio destrutivo ou não destrutivo;
- Quanto à velocidade da aplicação da carga:
- Ensaio com velocidade estática, dinâmica ou carga constante.

A seleção do ensaio mecânico mais conveniente para cada material dependerá da finalidade, dos esforços submetidos e das propriedades mecânicas que deseja-se mensurar. De modo geral, os materiais são especificados, e nestas especificações constam os ensaios requeridos para avaliar se o material atende ou não a proposta do projeto (SOUZA, 1982).

### 2.3.1 Ensaios Mecânicos Não Destrutivos

Durante o período de vida útil de uma máquina ou equipamento, é comum a prática de inspeção a fim de caracterizar potenciais descontinuidades. Nessa situação deve-se recorrer aos ensaios não destrutivos, visto que o componente a ser testado deverá retornar ao ciclo normal de trabalho após o ensaio (GARCIA; SPIM; SANTOS, 2000).

De acordo com Garcia; Spim; Santos (2000), é possível obter através destes ensaios dados qualitativos e quantitativos referente à integridade do componente ensaiado, permitindo desta maneira que o profissional responsável substitua o componente antes da sua inutilização completa.

Segundo Modenesi (2001), ensaios não destrutivos são ensaios realizados em componentes ou produtos semiacabados ou acabados, com a finalidade de averiguar a presença de descontinuidades. Este

método de ensaio permite a utilização posterior do componente ou produto ensaiado, uma vez que o ensaio não o danifica.

Garcia; Spim; Santos (2000), acrescentam que este método de ensaio não deixa vestígios de seu uso sobre o componente ensaiado.

Conforme Santos (1999), são utilizados ensaios não destrutivos a fim de determinar características, dimensões, propriedades ou comportamento de peças ou equipamentos.

Algumas vantagens e desvantagens dos ensaios não destrutivos são enunciadas abaixo conforme Garcia; Spim; Santos (2000).

#### ➤ Vantagens

- Os ensaios são efetuados diretamente nos componentes, eliminando assim a dúvida quanto a este;
- Permite inspecionar 100% do componente ou da estrutura a que ele pertence;
- É possível avaliar simultaneamente várias regiões críticas do componente;
- Permite a repetição do ensaio no mesmo componente;
- Componentes de alto custo de produção podem ser ensaiados sem que sejam danificados;
- Geralmente requer pouquíssima ou nenhuma preparação dos componentes e são mais rápidos e mais baratos que os ensaios destrutivos.

#### ➤ Desvantagens

- O resultado do ensaio é fruto de uma medição indireta das suas propriedades;
- Comumente qualitativas e pouquíssimas vezes quantitativas;
- Faz-se necessária experiência prévia para a correta interpretação dos resultados diagnosticados.

Os resultados obtidos pelos ensaios não destrutivos devem ser correlacionados com as condições de trabalho do componente ensaiado, a fim de mensurar o tempo de vida útil restante e a necessidade de substituição.

Em conformidade com Garcia; Spim; Santos (2000), alguns fatores devem ser observados quanto à seleção do ensaio e a técnica examinadora. Estes são:

- Características do componente referente à sua composição e propriedades;
- Processos de fabricação aplicados ao componente;
- Geometria do componente;
- Defeitos esperados (internos, sub-superficiais, superficiais, tamanho e localização dos defeitos);
- Estágio de eminência do defeito.

É necessário comparar os custos dos ensaios não destrutivos com a economia trazida pelos mesmos aos custos de produção. A utilização destes ensaios nas indústrias mecânica e metalúrgica tem sido estudada do ponto de vista técnico, com a finalidade de selecionar a técnica e o método corretos otimizando o fator econômico (GARCIA; SPIM; SANTOS, 2000).

### 2.3.2 Ensaio Visual

Segundo Modenesi (2001), o ensaio visual ou inspeção visual é o ensaio não destrutivo mais simples e mais utilizado. Este precede qualquer outro ensaio. É aplicada a inspeção de superfícies a fim de mensurar a geometria e a presença de descontinuidades ou defeitos.

Garcia; Spim; Santos (2000) acrescentam que além de mais utilizado, este método é o mais antigo dentre os ensaios não destrutivos e consiste em observar visualmente o componente ou peça. Se for possível visualizar um defeito a olho nu, antes do próximo processo a fabricação será interrompida.

A avaliação de um componente sempre terá início por uma inspeção visual. Esta pode ser executada a olho nu ou com auxílio de dispositivos tais como telescópio, microscópio, entre outros e poderá ser utilizada isoladamente ou em conjunto com outros métodos (SANTOS, 1999).

### 2.3.3 Líquido Penetrante (LP)

O método de inspeção por líquidos penetrantes utiliza um líquido corante capaz de caracterizar através da sua cor ou fluorescência a presença de falhas superficiais. A técnica baseia-se na absorção do líquido penetrante por capilaridade, pelas falhas do material (HALMSHAW, 1991).

Este método de ensaio não destrutivo, conforme Modenesi (2001), é empregado para evidenciar as descontinuidades superficiais do material, consiste na penetração de um líquido adequado e que posteriormente é removido. Pela aplicação de uma substância absorvedora (revelador) na superfície ensaiada, revela-se as possíveis descontinuidades.

A Figura 14 demonstra os princípios básicos da inspeção com líquidos penetrantes: (a) – peça com trinca superficial; (b) – aplicação do líquido penetrante; (c) – penetração; (d) – remoção do excesso de líquido; (e) – aplicação do revelador; (f) – formação da indicação de trinca.

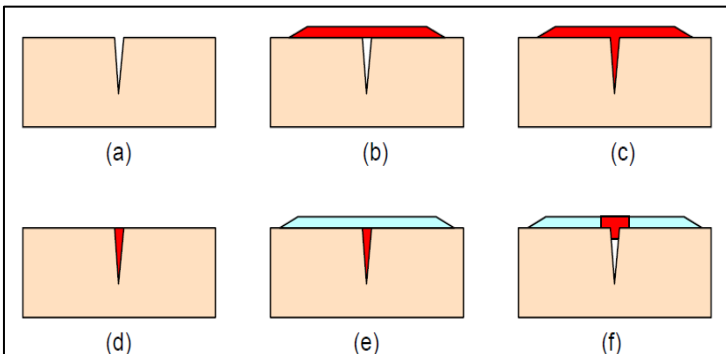


Figura 14 - Esquemático do ensaio de líquido penetrante

Fonte: Senai (2008)

Segundo Garcia; Spim; Santos (2000), este ensaio é dedicado à constatação da presença de descontinuidades superficiais não visíveis a olho nu.

Este é um método barato, simples e rápido, pode ser utilizado em peças de variados tamanhos e geometrias, pode ser empregado em uma



peça única ou um conjunto de peças e suscetibilidade para constatar trincas finas. Contudo o método não é aplicável a descontinuidades internas, o resultado do ensaio pode sofrer influência da rugosidade, da limpeza superficial e alguns materiais podem reagir com o líquido penetrante (MODENESI, 2001).

### 2.3.4 Macrografia

A macrografia consiste na avaliação do aspecto de uma amostra metálica, a partir de uma seção plana perfeitamente polida, geralmente agredida por um reativo pertinente. O aspecto revelado denomina-se macroestrutura. Este ensaio é feito a olho nu ou com o auxílio de uma lupa (COLPAERT, 2008).

No campo da soldagem emprega-se o ensaio macrográfico para evidenciar as características do cordão de solda, tais como o perfil geométrico, disposição dos cordões de solda, a existência ou não de defeitos ou descontinuidades de soldagem e a zona termicamente afetada (ZTA).

As características de uma amostra macrografica são evidenciadas na Figura 15.



Figura 15 - Macrografia  
Fonte: Colpaert (2008)

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 Materiais Utilizados

Este tópico apresentará os materiais, métodos e equipamentos aplicados no desenvolvimento deste trabalho. Todos os testes foram realizados sob condições controladas, minimizando as possíveis variações, garantindo assim, a confiabilidade e veracidade dos resultados.

##### 3.1.1 Metal de Base

Para os ensaios selecionou-se uma chapa de aço carbono denominada A 36, conforme a norma americana ASTM.

Este aço é caracterizado pela versatilidade, tendo aplicações estruturais e comuns (GERDAU, 2013). Largamente empregado em serralherias, estruturas metálicas, máquinas, passarelas, implementos rodoferroviários e implementos agrícolas. Dentre os principais produtos produzidos a partir deste aço pode-se destacar as cantoneiras; barras chatas, quadradas e redondas e perfis tipo T, I e U (GERDAU, 2013).

A seleção deste material deu-se devido a larga aplicabilidade do mesmo no meio industrial. A Figura 16 mostra a composição e as propriedades deste material.

ASTM A - 36 (2005)						
Composição Química (A)						
Especif.	Faixa de Espessura	C <sub>MAX</sub>	Mn <sub>MAX</sub>	Si <sub>MAX</sub>	P <sub>MAX</sub>	S <sub>MAX</sub>
A 36	e ≤ 20	0.25		0.40	0.040	0.050
	20 < e ≤ 40	0.25	0.80 a 1.20	0.40		
	40 < e ≤ 65	0.26		0.15 a 0.40		
	65 < e ≤ 100	0.27	0.85 a 1.20			
	e > 100	0.29				
Propriedades Mecânicas						
			Alongamento (%)			
Especif.	LE (MPa)	LR (MPa)	Base 50 mm	Base 200 mm		
A36	≥ 250	400 a 550	23	18		

Figura 16 – Comp. química e propriedades mecânicas do aço A36

Fonte: Frefer metal Plus (2011)

### 3.1.2 Metal de Adição

Visto que um importante fator a se considerar na soldagem MIG/MAG é a correta seleção do arame de solda (ESAB, 2005), procurou-se selecionar um arame que apresente compatibilidade química, física e metalúrgica semelhante ao do metal de base designado. O arame selecionado atende a norma AWS, de especificação ER 70S-6, conforme evidencia a Figura 17.

Este tipo de catálogo é oferecido pelos fornecedores e fabricantes de consumíveis de soldagem com a finalidade de facilitar a seleção. O catálogo traz informações pertinentes à classificação do consumível, composição química, aplicação, propriedades mecânicas e parametrização.

O grande conhecimento da soldagem industrial fez com que a AWS simplificasse a seleção dos consumíveis. Desenvolveu-se e fabricaram-se arames que apresentassem os melhores resultados para cada metal de base de acordo com sua especificidade (ESAB, 2005).

ARAME SÓLIDO OK	COMPOSIÇÃO DO ARAME (%)	APLICAÇÕES	PROPRIEDADES MECÂNICAS TÍPICAS	POSICÕES SOLDAGEM	DIÂM. (mm)	TENSÃO	FAIXA DE CORRENTE	DEPOS. (Kg/h)	GÁS DE PROTEÇÃO TIPO DE CORRENTE
<b>Autrod 12.51</b> AWS / ASME SFA 5.18 ER70S-6  EN 440 G3Si1	C 0,08	Arame sólido cobreado manganês-silício destinado à soldagem MIG/MAG dos aços não ligados, como por exemplo, os aços de construção em geral com uma tensão de ruptura mínima de 485 MPa. O OK Autrod 12.51 solda utilizando as misturas Ar + 20-25% CO <sub>2</sub> ou CO <sub>2</sub> puro como gases de proteção.  <b>Homologações:</b> ABS, DNV, FBTS	Ar + 20% CO <sub>2</sub> L.R. 560 MPa		0,8	18 - 24 V	60 - 200 A	0,8 - 3,0	Ar + 20 - 25% CO <sub>2</sub>
	Si 0,90		L.E. 470 MPa		0,9	18 - 26 V	70 - 250 A	0,9 - 3,6	ou
	Mn 1,50		A 25% CHV (-29°C) 70J		1,0	18 - 32 V	80 - 300 A	1,0 - 5,6	100% CO <sub>2</sub>
					1,2	18 - 34 V	120 - 380 A	1,3 - 8,0	CC+
					1,6	28 - 38 V	225 - 550 A	2,0 - 11,4	

Figura 17 - Arame eletrodo ER 70S-6  
Fonte: Catálogo de sólidos Esab (2005)

### 3.1.3 Gás de Proteção

É pertinente que o gás de proteção apresente compatibilidade química e física com o metal de base e arame eletrodo. O gás de proteção caracteriza o modo de transferência de metal e a profundidade de penetração do cordão de solda (ESAB, 2005).

A seleção do gás de proteção é um fator importante a se considerar uma vez que atua diretamente sobre os parâmetros que este estudo se propõe a avaliar, tais como: transferência de metal, índice de respingos, penetração, geometria do cordão.

Optou-se então por selecionar uma mistura binária de gases compreendida por 80% de Ar (argônio) e 20% de CO<sub>2</sub> (dióxido de carbono), comercialmente denominada Star Gold Plus. Esta escolha justifica-se pela versatilidade da mistura, alta eficiência, excelente penetração, excelente acabamento visual, aplicado a chapas de qualquer espessura e de uso geral (WHITE MARTINS, 2011).

Outro motivo por esta mistura ser largamente aplicada é pelo baixo percentual de CO<sub>2</sub>, até 20%, o que de acordo com Esab (2005), é favorável, pois é possível atingir a transferência de metal por spray.

Percentuais maiores que 20% não permitem a obtenção deste tipo de transferência. A Figura 18 caracteriza a ação de cada gás no processo de soldagem.

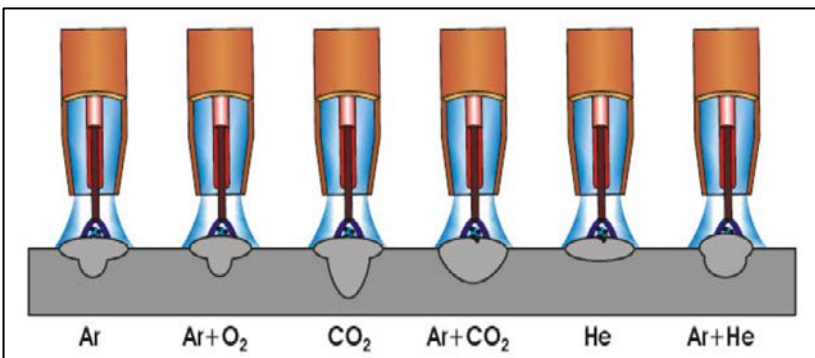


Figura 18 - Influência do gás de proteção na soldagem

Fonte: Senai (2008)

## 3.2 Equipamento e Dispositivo de Soldagem

Este item demonstra os equipamentos e dispositivos utilizados para a realização dos ensaios propostos, visando garantir continuamente a integridade e autenticidade dos resultados.

### 3.2.1 Fonte de Soldagem e Sistema de Alimentação de Arame

A fonte de soldagem utilizada para este experimento é comercialmente conhecida como SIGMA 500 da marca SUMIG. Trata-se de uma fonte de soldagem multiprocesso (MIG/MAG, TIG, MMA, Goivagem) desenvolvido visando os inúmeros avanços eletroeletrônicos aplicados aos processos de soldagem.

Optou-se por este equipamento devido aos inúmeros recursos oferecidos pelo mesmo, dentre estes, pode-se destacar o controle de variação positiva e negativa da indutância, fundamental para a realização deste estudo. A Figura 19 demonstra algumas características da fonte de soldagem utilizada.



Figura 19 - Fonte de soldagem SIGMA  
Fonte: Sumig (2009)

### 3.2.2 Sistema de Soldagem Mecanizado

Na soldagem MIG/MAG manual, a extensão do eletrodo é controlada diretamente pelo soldador, desta maneira a experiência e a habilidade deste são refletidas no cordão de solda. A fim de obter um cordão de solda aceitável é importante a manutenção da extensão do eletrodo de modo contínuo e homogêneo (Barbosa, 2009).

Alterações nas condições de soldagem são comumente oriundas das distintas experiências e habilidades dos soldadores (ESAB, 2005).

Visto isto, optou-se por eliminar a variável soldador e fazer uso de um dispositivo mecanizado de soldagem que garantisse um avanço contínuo e homogêneo. O dispositivo foi disponibilizado pela metalúrgica HAME, que manufacturou o mesmo, para atender requisitos de fabricação de seus produtos. O dispositivo pode ser melhor observado na Figura 20.



Figura 20 - Dispositivo mecanizado de avanço contínuo

Fonte: O autor (2013)

O dispositivo em questão proporcionou um avanço contínuo e homogêneo, com uma extensão de eletrodo fixa, possibilitando desta maneira a eliminação da variável soldador do processo. A Figura 21 demonstra de que maneira foi estabelecida a fixação da tocha de soldagem.

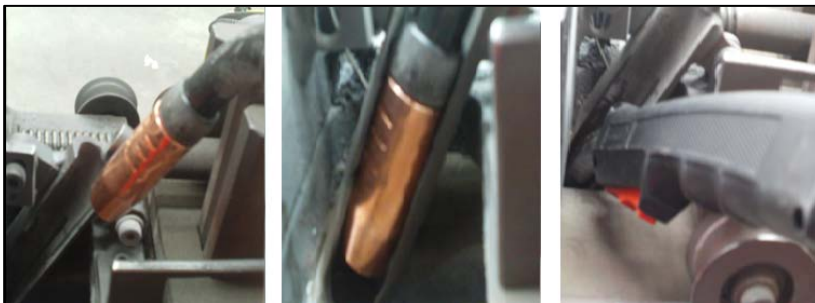


Figura 21 - Sistema de fixação da tocha de soldagem  
Fonte: O autor (2013)

Para a execução do experimento a velocidade de avanço do dispositivo foi ajustada em 0,45 metros por minuto, a essa velocidade o arco elétrico demonstrou-se mais estável.

### 3.2.3 Principais Parâmetros

Levando em consideração os materiais e métodos definidos anteriormente, faz-se necessário neste momento o ajuste dos parâmetros de soldagem. As ilustrações a seguir proporcionarão uma melhor compreensão da definição dos parâmetros.

Inicialmente é necessário informar para a fonte de soldagem em qual programa esta deve operar, para isto deve-se observar o manual do equipamento e selecionar o programa que compreende o arame 1,2mm e mistura de gás selecionado. O programa adequado é o 112 conforme demonstrado pela Figura 22.

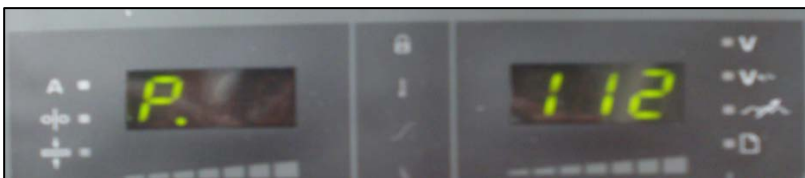


Figura 22 - Programa de soldagem  
Fonte: O autor (2013)

Conforme catálogo de consumíveis apresentado anteriormente, para o arame e o gás selecionados para este processo de soldagem a corrente de soldagem recomendada pode variar de 120 a 380 A.

A influência da indutância é mais expressiva no modo de transferência de metal por curto circuito. Assim, para todos os corpos de prova, será utilizada uma corrente de soldagem de 180 amperes.

A indutância será ajustada em menos três, zero e mais três, contudo, estes são valores percentuais. Este valor não é expressado em Henry, uma vez que estes valores são um segredo industrial e podem variar de acordo com o projeto da fonte de soldagem.

Portanto, a indutância foi ajustada em menos três para atender o requisito de soldagem do primeiro corpo de prova, conforme demonstrado na Figura 23.



Figura 23 - Corrente e Indutância

Fonte: O autor (2013)

Para atender os requisitos de soldagem do segundo corpo de prova, foi necessário alterar o valor de indutância para zero, conforme demonstra a Figura 24.

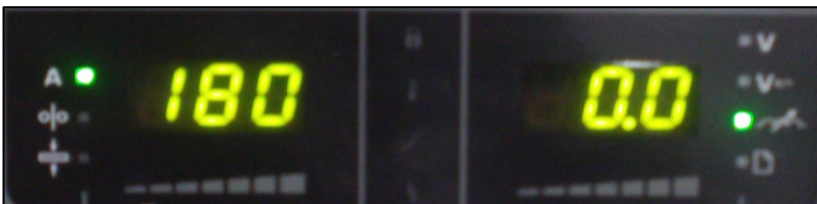


Figura 24 - Corrente e indutância

Fonte: O autor (2013)

Para a soldagem do terceiro corpo de prova, também foi necessário alterar apenas o valor de indutância, conforme ilustra a Figura 25



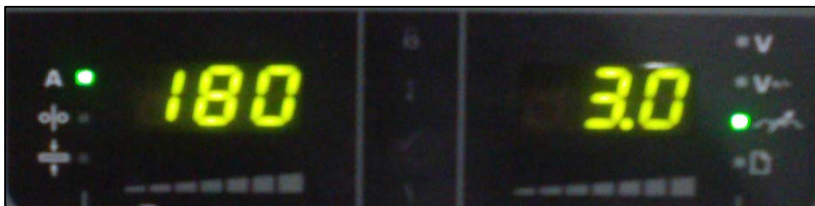


Figura 25 - Corrente e Indutância

Fonte: O autor (2013)

Esta fonte de soldagem tem a característica de auto ajuste de vazão de gás de acordo com os parâmetros selecionados. A Figura 26 demonstra uma vazão de gás de 10,3 litros por minuto, seleção feita pelo próprio equipamento.

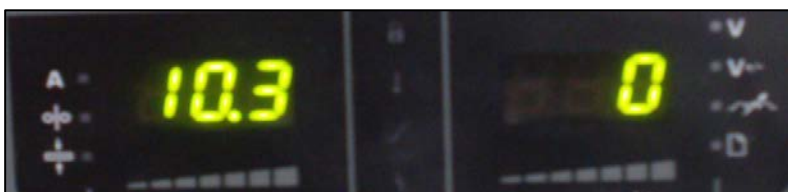


Figura 26 - Vazão de gás

Fonte: O autor (2013)

A velocidade de alimentação de arame utilizada foi 6,1 metros por minuto. Este parâmetro também é ajustado pelo equipamento conforme mostra a Figura 27.

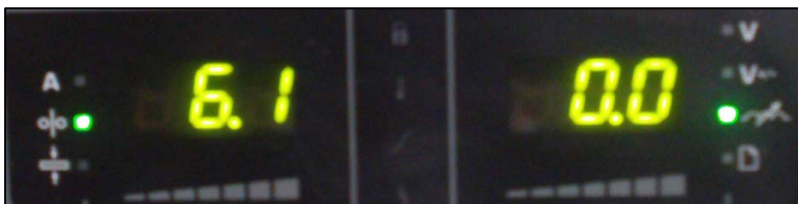


Figura 27 - Alimentação do arame

Fonte: O autor (2013)

## 4 CONDUÇÃO DOS EXPERIMENTOS

A partir deste momento onde os materiais, métodos, dispositivos e parâmetros encontram-se devidamente definidos e alinhados, é que foi possível conduzir os experimentos. Neste capítulo são enunciados os caminhos percorridos para a execução dos experimentos.

### 4.1 Ensaio de Soldagem

Os corpos de prova utilizados para a realização dos ensaios de soldagem foram retirados de uma chapa de aço carbono A 36, que possui certificado de qualidade conforme anexo A. Os corpos de prova possuem as seguintes dimensões: 400 mm X 80 mm X 6 mm .

Estes foram limpos a fim de remover qualquer resíduo de óleo ou graxas e posteriormente submetidos a um ensaio de líquido penetrante conforme Figura 28, a procura de qualquer descontinuidade existente no material.



Figura 28 - Pré-ensaio de Líquido Penetrante  
Fonte: O autor (2013)

Com todas as variáveis ajustadas e controladas pode-se dar início ao processo de soldagem. O primeiro corpo de prova foi fixado no dispositivo e a indutância da fonte de soldagem foi ajustada em menos três (negativa), assim efetuou-se a soldagem.

Em seguida o segundo corpo de prova foi fixado, mantiveram-se todos os parâmetros ajustados, com exceção do ajuste de indutância que foi alterado para zero, deste modo efetuou-se a soldagem.

Do mesmo modo, procedeu-se com o terceiro corpo de prova, tendo como única diferença em relação aos outros o ajuste indutivo, que

para este foi ajustado em três (positiva). A Figura 29 evidência como o terceiro corpo de prova foi soldado.



Figura 29 - Execução da soldagem  
Fonte: O autor (2013)

Imediatamente após a soldagem, os grampos que faziam a fixação mecânica do corpo de prova foram removidos, isso para evitar qualquer interferência em uma possível deformação. A Figura 30 demonstra os corpos de prova já soldados.



Figura 30 - Corpo de prova soldado  
Fonte: O autor (2013)

#### 4.1.1 Visual

É pertinente que qualquer ensaio destrutivo ou não destrutivo seja precedido de um exame visual, com o intuito de caracterizar e avaliar a aprovação ou rejeição das amostras para os ensaios subseqüentes com a finalidade de reduzir os custos.

Na realização deste experimento também procedeu-se desta forma, com o auxílio de uma fonte de luz e em alguns momentos o uso de uma lente de aumento, os corpos de prova foram explorados em busca de qualquer descontinuidades no cordão de solda. A Figura 31 demonstra o ensaio visual.



Figura 31 - Ensaio visual  
Fonte: O autor (2013)

#### 4.1.2 Preparação das Amostras

A fim de reduzir o tempo de preparação das amostras utilizou-se o processo de corte por eletro-erosão a fio. Esta escolha atribui-se ao notável acabamento, moderado perfil de rugosidade alcançado e a menor dissipação térmica se comparado a outros processos de corte. Este processo está sendo demonstrado na Figura 32.

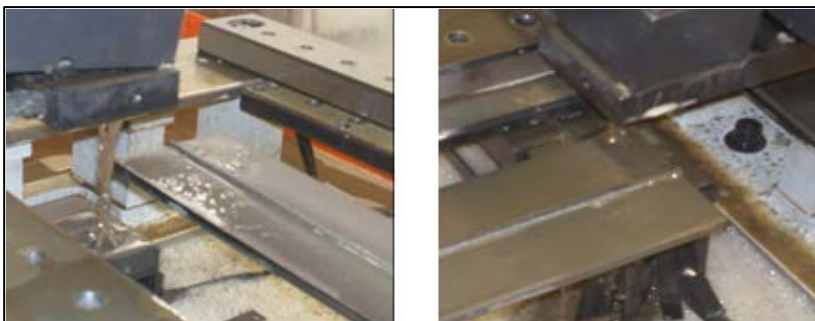


Figura 32 - Corte a Eletro fio

Fonte: O autor (2013)

Aplicou-se o método de avaliação estatístico denominado ANOVA (análise de variância), para determinar a existência de diferenças significativas entre as amostras. Conforme Levine *et al* 2008, análise de variância trata-se de uma avaliação estatística frequentemente utilizada por analistas, que visa fundamentar a presença de discrepâncias significativas entre as médias oriundas de grupos diferentes. Para a ANOVA foi utilizado nível de significância de 5% o que garante um nível de confiança de 95% para o teste.

Este teste evidenciará se as médias aritméticas das amostras diferem entre si. Contudo, faz-se necessário outro teste complementar para avaliar as diferenças entre amostras. Aplica-se então o método de comparação múltipla denominado Tukey-Kramer, que possibilita a comparação simultânea entre todos os pares de grupos amostrais (LEVINE *et al*, 2008).

Fez-se necessário aprontar 20 amostras para o ensaio de macrografia de cada corpo de prova, e mais uma amostra para o ensaio de líquido penetrante. As amostras com propósito macrográfico sofreram a preparação da superfície através de lixamento para o refino do aspecto geométrico a fim de serem acometidas por um revelador.

Para revelar a estrutura macrográfica fez-se uso de Nital 2%. Este é definido como uma solução aquosa com no máximo 20% de ácido nítrico diluído em álcool e devidamente enfraquecido pela reação com o cobre, que denomina-se reação nitrato cúprico. Após as amostras sofrerem o ataque do revelador, estas foram registradas para posterior mensuração.

Com o propósito de mensurar as amostras sujeitas ao revelador, foi necessário utilizar um *software* de medição denominado *Klonk Image Measurement*, no qual as imagens feitas das amostras previamente atacadas foram importadas para o *software* sendo assim a mensuração está sendo exibida na Figura 33.

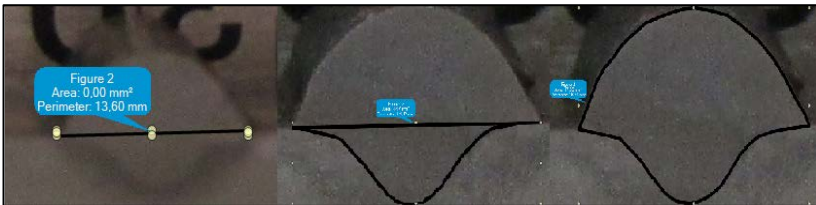


Figura 33 - Mensuração de imagem no programa Klonk  
Fonte: O autor (2013)

#### 4.1.3 Líquido Penetrante

O ensaio de líquido penetrante foi executado conforme esquemático da Figura 14. Uma amostra foi retirada de cada corpo de prova, portanto três amostras foram submetidas ao ensaio conforme Figura 34.

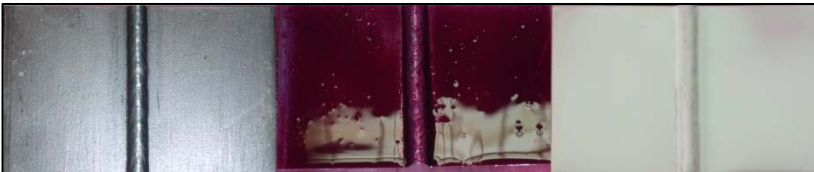


Figura 34 - Ensaio de Líquido Penetrante  
Fonte: O autor (2013)

## 5 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

Na execução do exame visual observou-se a presença de mais respingos no corpo de prova com indutância negativa menos três, e à medida que a indutância foi levada a valores positivos, o índice de respingos apresentou-se em quantidade menos expressiva, como pode ser observado na Figura 35.

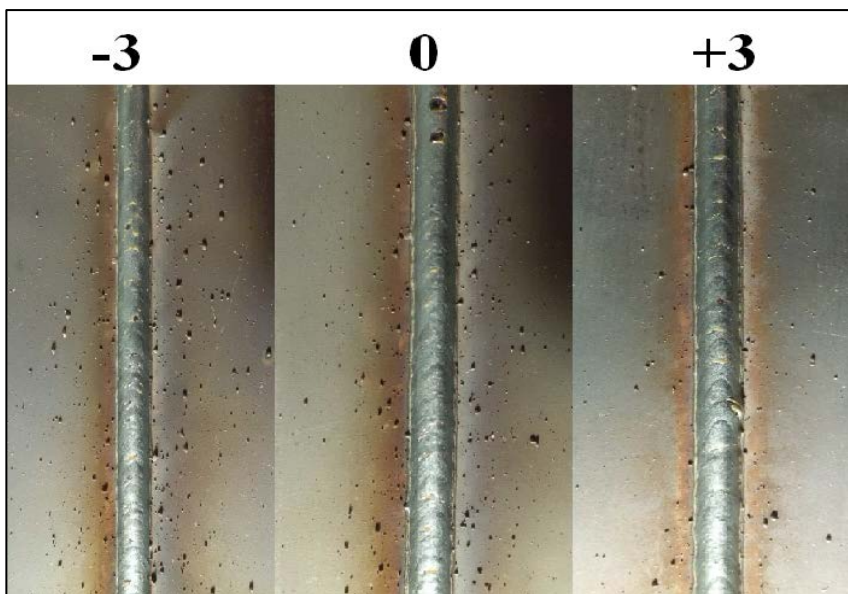


Figura 35 - Incidência de respingos  
Fonte: O autor (2013)

Observou-se também a semelhança do perfil geométrico do cordão de solda dos três corpos de prova e a ausência de mordeduras, trincas ou outras discontinuidades macrográficas.

Ainda no intuito de constatar discontinuidades superficiais, realizou-se o ensaio de líquido penetrante. Este identificou conforme a Figura 36 a ausência de discontinuidades superficiais no cordão de solda, pressupõe-se então, que o processo de soldagem proporcionou um depósito de material íntegro e de qualidade.





Figura 36 - Ensaio de L. P. revelado

Fonte: O autor (2013)

O perfil geométrico do cordão de solda evidenciou-se após a realização do ataque químico, mediante a isto foi possível à mensuração das amostras. A Figura 37 caracteriza as disparidades entre as amostras.

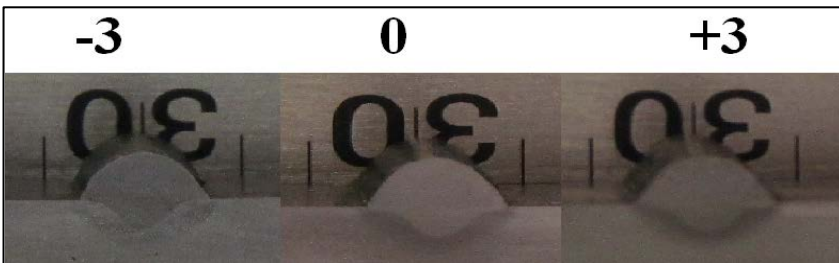


Figura 37 - Amostra revelada

Fonte: O autor (2013)

Constatou-se que apesar de haver semelhança superficial entre os cordões, houve uma considerável disparidade entre as amostras no que diz respeito ao perfil de penetração. Se compararmos a amostra -3 ou a amostra +3 com a amostra 0, a disparidade apresenta-se mais suave, no entanto, quando comparamos os extremos -3 e +3 a diferença é evidente até mesmo sem o auxílio de recursos tecnológicos.

Para verificar se houve diferença entre os 3 níveis de indutância, foi realizado o teste de análise de variância (ANOVA). Para todas as análises realizadas utilizando ANOVA foram testadas as seguintes hipóteses, conforme Figura 38:



$$H_0: \mu_{+3} = \mu_0 = \mu_{-3}$$

$$H_1: \text{ pelo menos uma das médias difere das demais}$$

Figura 38 - Hipóteses testadas ANOVA

Fonte: LEVINE *et al* (2008).

A seguir são apresentados os testes entre os diferentes níveis de indutância para cada uma das características a serem avaliadas.

### 5.1.1 Largura do cordão de solda.

A fim de mensurar a largura do cordão de solda, mediu-se a distância entre as extremidades do cordão, conforme Figura 39.

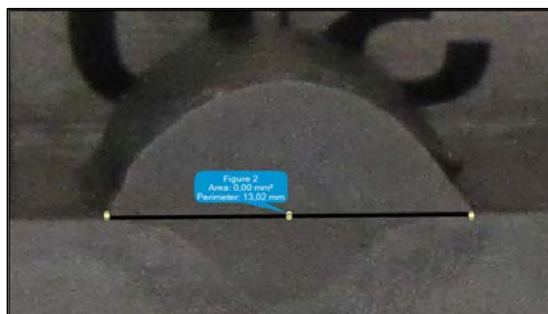


Figura 39 - Largura do cordão de solda

Fonte: O autor (2013)

Para um nível de confiança de 95% (0,95), e portanto, um nível de significância de 5% (0,05), dizemos que se o valor P calculado pela ANOVA for inferior a 0,05 o teste rejeita  $H_0$ , ou seja, neste caso pelo menos uma das médias difere das demais. Todas as amostras foram submetidas a esse método de avaliação. A Figura 40 apresenta a ANOVA que representa a largura do cordão de solda.

ANOVA				F calculado		F tabelado
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,72542	2	0,36271	14,2167978	0,00000980	3,15884272
Dentro dos grupos	1,45424	57	0,02551			
Total	2,17966	59				

Figura 40 – ANOVA - Largura do cordão de solda  
Fonte: O autor (2013)

Pode-se notar pela ANOVA, valor-p < 0,05. Desta forma, rejeita-se  $H_0$ , ou seja, há pelo menos uma média diferente das demais. A seguir, a Figura 41 demonstra a comparação entre os grupos.

Level	N	Mean	StDev	-----+-----+-----+-----+-----			
Indutância mais 3	20	13,104	0,176			(-----*-----)	
Indutância menos 3	20	12,845	0,187	(-----*-----)			
Indutância zero	20	13,038	0,104		(-----*-----)		
				-----+-----+-----+-----+-----			
				12,84	12,96	13,08	13,20

Figura 41 - Teste de Tukey-Kramer - Largura  
Fonte: O autor (2013)

### 5.1.2 Altura do cordão de solda

A altura do cordão de solda foi mensurada tomando como referência o ponto mais elevado e o ponto mais inferior do cordão de solda, conforme a Figura 42.

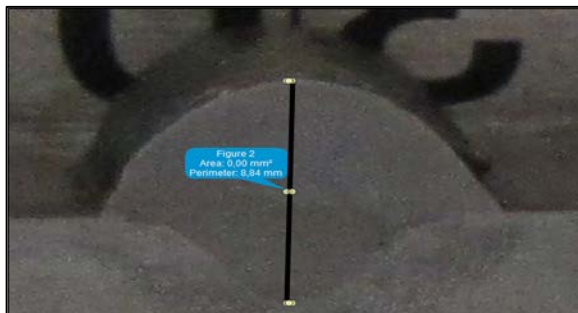


Figura 42 - Altura do cordão de solda

Fonte: O autor (2013)

Nota-se pela ANOVA, valor-p < 0,05. Desta forma, há pelo menos uma média diferente das demais. A seguir, a Figura 43 demonstra esta afirmação.

ANOVA				F calculado		F tabelado
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	12,3042	2	6,15211	915,026981	4,8148E-44	3,15884272
Dentro dos grupos	0,38323	57	0,00672			
Total	12,6875	59				

Figura 43 - ANOVA - Altura do cordão de solda

Fonte: O autor (2013)

O teste de Tukey-Kramer evidencia que existe diferença significativa entre os grupos analisados, conforme Figura 44. Todos os grupos diferem entre si, isto significa que para cada nível de indutância ajustado, o depósito de material foi diferenciado.

Level	N	Mean	StDev	-----+-----+-----+-----+			
Indutância mais 3	20	9,2240	0,0885			(* -)	
Indutância menos 3	20	8,1910	0,0673 (*)				
Indutância zero	20	9,0575	0,0883			(*)	
				8,40	8,70	9,00	9,30

Figura 44 - Teste de Tukey-Kramer - Altura

Fonte: O autor (2013)

### 5.1.3 Penetração do cordão de solda

Para mensurar a penetração do cordão de solda, uma linha neutra foi traçada, e tomou-se como referência o ponto mais inferior do cordão de solda. Conforme a Figura 45 evidencia.

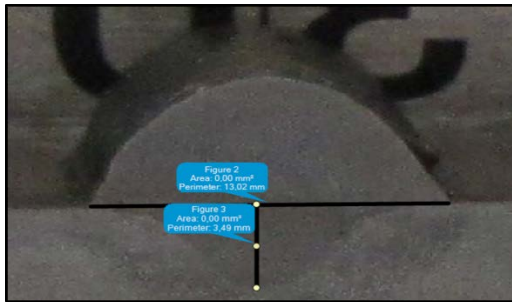


Figura 45 - Penetração do cordão de solda  
Fonte: O autor (2013)

Assim como as análises anteriores, nota-se  $\text{valor-p} < 0,05$ . Desta forma, há pelo menos uma média diferente das demais. A seguir, a Figura 46 comprova esta afirmação.

ANOVA				F calculado		F tabelado
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	3,19579	2	1,5979	545,55265	6,8E-38	3,15884272
Dentro dos grupos	0,16695	57	0,00293			
Total	3,36274	59				

Figura 46 - ANOVA - Penetração do cordão de solda  
Fonte: O autor (2013)

O teste de Tukey-Kramer novamente evidencia que existe diferença significativa entre os grupos analisados, como pode ser visto na Figura 47.

Level	N	Mean	StDev	-----+-----+-----+-----+-----
Indutância mais 3	20	3,7045	0,0682	(-*)
Indutância menos 3	20	3,1400	0,0548	(*-) (---)
Indutância zero	20	3,4485	0,0338	(-*)
				-----+-----+-----+-----+-----
				3,20 3,36 3,52 3,68

Figura 47 - Teste de Tukey-Kramer – Penetração

Fonte: O autor (2013)

#### 5.1.4 Área total do cordão de solda

A área total do cordão de solda foi mensurada tendo como referência toda a abrangência da seção transversal do cordão. Conforme Figura 48.

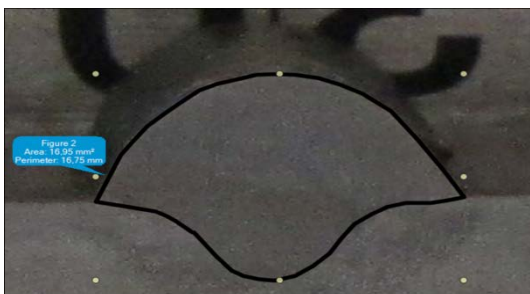


Figura 48 - Área total do cordão de solda

Fonte: O autor (2013)

Do mesmo modo, a Figura 49 demonstra que o valor-p < 0,05, desta forma, há pelo menos uma média diferente das demais. Pode-se deduzir então que a Indutância tem reflexo sobre a área total do cordão de solda.

ANOVA				F calculado		F tabelado
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	46,7514	2	23,3757	343,46553	1,6E-32	3,15884272
Dentro dos grupos	3,87933	57	0,06806			
Total	50,6308	59				

Figura 49 - ANOVA - Área total do cordão

Fonte: O autor (2013)

O teste de Tukey-Kramer mostra-nos que existe diferença significativa entre os grupos analisados, certificando deste modo a ANOVA anterior, conforme Figura 50.

Level	N	Mean	StDev	-----+-----+-----+-----+			
Indutância mais 3	20	19,125	0,418				(-*)
Indutância menos 3	20	16,982	0,085	(-*)			
Indutância zero	20	17,811	0,150		(-*)		
				-----+-----+-----+-----+			
				17,40	18,00	18,60	19,20

Figura 50 - Teste de Tukey-Kramer - Área total

Fonte: O autor (2013)

### 5.1.5 Área de penetração do cordão

Para mensurar a área de penetração do cordão de solda foi traçada uma linha neutra, e medida toda a área de abrangência do cordão abaixo desta. Conforme Figura 51.

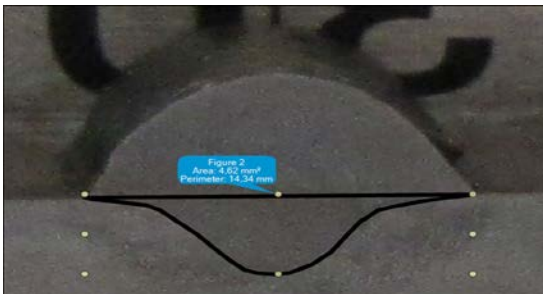


Figura 51 - Área de penetração do cordão

Fonte: O autor (2013)

Assim como nas demais, a ANOVA revelou valor-p < 0,05. Desta forma, há pelo menos uma média diferente das demais. Conforme pode ser observado na Figura 52.

ANOVA				F calculado		F tabelado
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	27,8367	2	13,9184	6113,47804	3,1E-67	3,15884272
Dentro dos grupos	0,12977	57	0,00228			
Total	27,9665	59				

Figura 52 - ANOVA - Área de penetração do cordão de solda  
Fonte: O autor (2013)

O teste de Tukey-Kramer evidencia que existe diferença significativa entre os grupos analisados. Conforme Figura 53, todos os grupos diferem entre si.

Level	N	Mean	StDev	+-----+-----+-----+-----+			
Indutância mais 3	20	6,1230	0,0661			*)	
Indutância menos 3	20	4,4605	0,0330	*)			
Indutância zero	20	5,4135	0,0370		*)		
				+-----+-----+-----+-----+			
				4,50	5,00	5,50	6,00

Figura 53 - Teste de Tukey-Kramer - Área de penetração do cordão  
Fonte: O autor (2013)

### 5.1.6 Sobre Material de Solda

Com o intuito de mensurar o sobre material do cordão solda, utilizou-se da mesma linha neutra como referência e mediu-se o ponto mais elevado do cordão. Conforme a Figura 54.

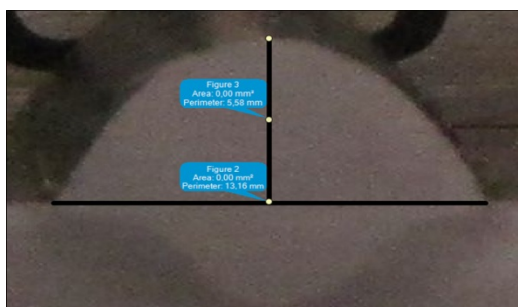


Figura 54 - Sobre material de solda  
Fonte: O autor (2013)

A ANOVA evidenciou valor-p < 0,05. Desta forma, há pelo menos uma média diferente das demais. Este fato pode ser observado na Figura 55.

ANOVA				F calculado		F tabelado
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	3,59244	2	1,79622	302,32725	4,5E-31	3,15884272
Dentro dos grupos	0,33865	57	0,00594			
Total	3,9311	59				

Figura 55 - ANOVA - sobre material  
Fonte: O autor (2013)

O teste de Tukey-Kramer demonstra que existe diferença significativa entre os grupos analisados. Conforme a Figura 56, todos os grupos diferem entre si.

Level	N	Mean	StDev	-----+-----+-----+-----+-----
Indutância mais 3	20	5,5195	0,0957	(--*)
Indutância menos 3	20	5,0510	0,0554	(-*)
Indutância zero	20	5,6090	0,0748	(--*)
				-----+-----+-----+-----+-----
				5,12      5,28      5,44      5,60

Figura 56 - Teste de Tukey-Kramer - Sobre material  
Fonte: O autor (2013)

A ANOVA e Tukey-Kramer revelaram-se testes apropriados para determinar o nível de significância da indutância sobre os parâmetros avaliados, este fato foi confirmado pelo resultado dos testes precedentes.

Realizada a análise de todos os testes pode-se observar na Figura 57, que a indutância tem influência sobre todos os parâmetros que este estudo propõe, e que a metodologia proposta por este estudo era coerente.



	Indutância					
	-3		0		3	
Geometria do Cordão						
Largura	DS	*	DNS	#	DNS	#
Altura	DS	*	DS	**	DS	***
Sobre material	DS	*	DS	***	DS	**
Penetração	DS	*	DS	**	DS	***
Área total	DS	*	DS	**	DS	***
Área de penetração	DS	*	DS	**	DS	***
Descontinuidades						
Poros	NA		NA		NA	
Trincas	NA		NA		NA	
Mordeduras	NA		NA		NA	
Respingos	DS	***	DS	**	DS	*
<u>Legenda:</u>						
	DNS	Diferença Não Significativa			*	Baixo
	DS	Diferença Significativa			**	Médio
	NA	Não Apresentou			***	Alto
	A	Apresentou			#	Igual

Figura 57 - Comparativo entre as amostras  
Fonte: O autor (2013)

## 6 CONCLUSÃO

Pretendeu-se com este estudo, evidenciar as disparidades entre os diferentes níveis de indutância, com propósito de orientar e preparar os profissionais do campo da soldagem.

É possível constatar ao final das análises que a indutância promove alterações significativas no cordão de soldagem.

A partir do nível de indutância zero até o três positivo, houve uma breve exceção quanto à largura do cordão, onde a indutância se mostrou menos influente. Contudo, os outros parâmetros como altura, penetração, sobre material, área total e área de penetração do cordão de solda, sofreram influência significativa da indutância.

Observou-se também a maior incidência de respingos no cordão de solda à medida que a indutância era levada a valores negativos. Isso deu-se devido a influência da indutância sobre o modo de transferência de metal por curto circuito, mais precisamente a sua ação sobre o destacamento da gota de metal transferido.

Da mesma forma, quando a indutância se encontrava na faixa negativa, observou-se um notável decréscimo na geometria do cordão, contraposto de um evidente aumento na incidência de respingos. Presume-se então, que o decréscimo de material na geometria do cordão converteu-se em respingos.

Constatou-se que na faixa de indutância estudada, com exceção dos respingos, não houveram quaisquer outras descontinuidades que viessem a prejudicar a integridade da soldagem. Assim, pressupõe-se que a indutância não pode ser considerado um gerador ou facilitador de defeitos no cordão de solda.

Deste modo, pode-se concluir que a indutância oferece vantagens ao soldador, desde que este tenha ciência e controle sobre os parâmetros envolvidos na soldagem. Desta forma é provável que obtenha-se um depósito de solda íntegro e de qualidade.

## REFERÊNCIAS

AWS - American Welding Society. **Welding Handbook - Welding Science and Technology**. 9. ed. [S.l.]: AWS, v. 1, 2001.

BARBOSA, R. P. **Processos de Fabricação: Soldagem e Fundição**. Centro Universitário do Leste de Minas de Gerais. Minas Gerais, p. 145. 2009.

COLPAERT, H. **Metalografia dos Produtos Siderúrgicos Comuns**. 4 edição. ed. São Paulo: Edgar Blucher, 2008.

ESAB. **Catálogo de Sólidos**. ESAB. São Paulo , p. 32. 2008.

FISCHER, A. **Estudo da Influência dos Parâmetros no Processo de Soldagem GMAW - Arco Pulsado**. UFMG. Belo Horizonte, p. 170. 2011.

GARCIA, A.; SPIM, J. A.; SANTOS, C. A. D. **Ensaio dos Materiais**. Rio de Janeiro: LTC, 2000.

GERDAU. **O Profissional do Aço**. Disponível em: <[https://www.profissionaldoaco.com.br/destaques\\_in.asp?id\\_destaque=140](https://www.profissionaldoaco.com.br/destaques_in.asp?id_destaque=140)>. Acesso em: 07 out. 2013.

HALMSHAW, R. **Non Destructive Testing**. 2. ed. [S.l.]: Edward Arnold, 1991.

JORDÃO, R. G. **Transformadores**. 1 edição. ed. São Paulo: Edgar Blucher, 2002.

KLONK, I. M. **imagemasurement**. Disponível em: <<http://www.imagemasurement.com/>>. Acesso em: 23 out. 2013.

KOSOW, I. L. **Máquinas Elétricas e transformadores**. 15 edição. ed. São Paulo: Globo, 2005.

LEVINE, D. M. et al. **Estatísticas Teoria e Aplicações**. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

MARQUES, P. V.; MODENESI, J.; BRACARENSE, A. Q. **Soldagem Fundamentos e Tecnologia**. 3. ed. Belo Horizonte: UFMG, 2005.

MARTINS, W. **Gases especiais e equipamentos**. WHITE MARTINS. São Paulo, p. 86. 2010.

MODENESI, P. J. Descontinuidades e Inspeção em Juntas Soldadas. **Soldagem**, Belo Horizonte, novembro 2001.

MODENESI, P. J. **Fontes de Energia para a Soldagem a Arco**. UFMG. Belo Horizonte, p. 37. 2009.

NORMAS, R. C. N. 0. Florianópolis: [s.n.], 2011.

OKIMOTO, P. C. **Introdução ao Arco Elétrico**. UFPR. Curitiba, p. 12. 2005.

OLIVEIRA, J. C. D.; COGO, J. R.; ABREU, J. P. G. D. **Transformadores Teoria e Ensaios**. 2 edição. ed. Itajubá: Edgar Blucher, 1984.

PLUS, F. M. **Manual Técnico de limitações**. Klockner e Co. [S.l.], p. 36. 2011.

QUITES, A. M. **Introdução à Soldagem a Arco Voltaico**. 1. ed. [S.l.]: SOLDASOFT, 2002.

SANTOS, J. F. O. **Ensaios não Destrutivos**. Instituto do Emprego e Formação Profissional. Lisboa, p. 154. 1999.

SCOTTI, A.; PONOMAREV, V. **Soldagem MIG/MAG**. 1. ed. [S.l.]: Artliber, 2008.

Soldagem MIG/MAG. ESAB. Rio de Janeiro, p. 133. 2005.

SOLDAGEM MIG/MAG. SENAI. Sergipe, p. 94. 2008.

SOLDAGEM TIG. SENAI. Varginha, p. 29. 2004.

SOUZA, D. et al. **Influência da Tensão de Soldagem e do Gás de Proteção sobre a Correlação entre Indutância e Regularidade da Transferência Metálica na Soldagem MIG/MAG por Curto-Circuito**. UFU. Uberlândia, p. 9. 2011.

SOUZA, S. A. D. **ensaios mecânicos de materiais metálicos**. 5 edição. ed. são paulo: edgar blucher, 1982.

SUMIG. **Manual de instruções SIGMA 500**. SUMIG. Caxias do Sul, p. 16. 2009.





## **ANEXOS**





## ANEXO A – Certificado da matéria prima

		<b>CERTIFICADO DE QUALIDADE</b>		Rua Daniópolis, 122, 1º Andar - Vila Prudente - São Paulo - SP - CEP: 03125 - 100 Tel.: (011) 2066 - 3369 FAX: (011) 2066 - 3388 Web site: <a href="http://www.frefermetals.com.br">http://www.frefermetals.com.br</a>		
<b>CLIENTE:</b>		<b>P.L.:</b> 8435/NF.11.028		<b>CERTIFICADON</b> 0846		
<b>ESPECIFICAÇÃO</b>		<b>DIMENSÕES</b>		<b>VOLUME / LOTE</b>		
<b>PRODUTO</b>		<b>EMBUITAMENTO</b>		<b>DUREZA</b>		
<b>LE.(Mpa)</b>		<b>LE/ILR. (%)</b>		<b>DOBRA 180°</b>		
<b>LR.(Mpa)</b>		<b>Alongamento %</b>		<b>REV. MÉDIO (g/m<sup>2</sup>)</b>		
<b>S</b>		<b>Cr</b>				
<b>P</b>		<b>Ni</b>				
<b>Mn</b>		<b>Cu</b>				
<b>C</b>		<b>Si</b>				
		<b>Al</b>				
		<b>Fe</b>				
		<b>Nb</b>				
		<b>Mo</b>				
01	507	488	92,7	+	131206003463	F845430102
02	--	--	--	--	6,30X1500X3,000	1H4N1006B
03	280	445	23,5	--	2,00X1200X3,000	3WE12650
04	--	--	--	--	44,50X2500X3,000	
05	--	--	--	--		
06	--	--	--	--		
07	--	--	--	--		
08	--	--	--	--		
<b>PROPRIEDADES MECÂNICAS</b>						
<b>COMPOSIÇÃO QUÍMICA (%) - Dados extraídos do Certificado de Usina</b>						
01	0,14	0,03	0,013	0,010	0,004	0,031
02	0,08	0,21	0,011	0,010	0,005	0,039
03	0,20	0,93	0,019	0,019	0,24	
04	--	--	--	--	--	
05	--	--	--	--	--	
06	--	--	--	--	--	
07	--	--	--	--	--	
08	--	--	--	--	--	
<b>OBS:</b>						
 <b>WALDIR RODRIGUES MATOS</b> <b>GARANTIA DA QUALIDADE</b>						

