

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
Escola de Engenharia

Departamento de Metalurgia

**SOLDAGEM À ARCO ASSISTIDA POR PRÉ-AQUECIMENTO INDUTIVO  
LOCALIZADO**

**William Todendi Dutra**

**Trabalho de Diplomação**

**Orientador: Professor Dr. Ivan Guerra Machado**

**Porto Alegre  
2015**

Dedico este trabalho primeiramente aos meus pais e depois a todos que vão em busca de seus sonhos, que não se lamentam e sim vão atrás de soluções.

“O cientista não é o homem que fornece as verdadeiras respostas; é quem faz as verdadeiras perguntas”. (Claude Lévi-Strauss)

## AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer ao professor Ivan por ter proporcionado a oportunidade de realizar este trabalho no laboratório que coordena, bem como suprir com todo apoio técnico necessário à realização do mesmo.

Aos colegas do LS&TC que me ensinaram muito, e também aprenderam comigo em um trabalho mútuo de aprendizado e companheirismo, e também aos colegas da UFRGS com quem muito aprendi.

Não poderia deixar de lembrar da UFRGS em si, a qual proporcionou a mim o ensino superior de excelência, ao Departamento de Metalurgia e todo seu colegiado altamente capacitado e à todos os demais departamentos da Escola de Engenharia bem como dos institutos de Matemática, Física e Química que foram essenciais à minha formação.

Um especial agradecimento ao pessoal da Inductotherm, Sr. Sérgio Spoltti por ceder um pouco de seu tempo para resolver problemas com equipamento, bem como do técnico Robson por realizar o try-out comigo.

Para minha namorada Franciele Hasnam pela ajuda nos detalhes finais da realização deste.

## SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	VII
LISTA DE TABELAS.....	VIII
LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS.....	IX
RESUMO.....	X
ABSTRACT.....	XI
1. INTRODUÇÃO E OBJETIVOS.....	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	2
2.1 AQUECIMENTO POR INDUÇÃO ELETROMAGNÉTICA.....	2
2.1.1 CAMPO ELETROMAGNÉTICO.....	2
2.1.2 LEI DE FARADAY-NEUMANN-LENZ.....	2
2.1.3 TRANSFORMADOR.....	3
2.1.4 CORRENTES DE FOUCAULT E EFEITO JOULE.....	3
2.1.5 SISTEMA DE AQUECIMENTO POR INDUÇÃO.....	4
2.2 SOLDAGEM TIG: PROCESSO E PARÂMETROS.....	6
2.3 SOLDAGEM MIG/MAG: PROCESSO E PARÂMETROS.....	10
2.4 PROCESSOS DE SOLDAGEM HÍBRIDO.....	13
2.4.1 DESCRIÇÃO DO PROCESSO.....	13
2.4.2 VANTAGENS E DESVANTAGENS EM SISTEMAS HÍBRIDOS DE SOLDAGEM.....	14
2.4.3 SISTEMA HÍBRIDO DE SOLDAGEM A ARCO ASSISTIDO POR AQUECIMENTO INDUTIVO.....	15
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	17
3.1 MATERIAL UTILIZADO.....	17
3.2 PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA PARA SOLDAGEM.....	18
3.3 EQUIPAMENTOS UTILIZADOS.....	18
3.4 MATRIZ DE EXPERIMENTOS.....	22
3.5 PREPARAÇÃO DAS ANÁLISES.....	24
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	26
4.1 COMPARAÇÃO TIG vs TIG+INDUÇÃO EM AÇO ASTM A36.....	26
4.2 COMPARAÇÃO MIG vs HÍBRIDO (MIG+INDUÇÃO) EM	

AÇO SAE 5160.....	27
4.2.1 INSPEÇÃO VISUAL E MACROGRÁFICA.....	28
4.2.2 PERFIS DE DUREZA E MICROGRAFIAS.....	33
5. CONCLUSÕES.....	38
6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	39
7. BIBLIOGRAFIA UTILIZADA.....	40

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 diagrama de um sistema de aquecimento indutivo.....	6
Figura 2.2 Equipamento para soldagem TIG [Marques et al., 2009].....	7
Figura 2.3 Equipamento de soldagem MIG/MAG [Marques et al., 2009].....	11
Figura 2.4 esquema de soldagem híbrida em tandem.....	18
Figura 3.1 fonte IMC DIGIPLUS A7 450.....	18
Figura 3.2 painel do equipamento de aquecimento indutivo.....	19
Figura 3.3 sistema de movimentação dos corpos de prova Tartilope V4.....	20
Figura 3.4 Montagem do sistema híbrido em tandem.....	21
Figura 3.5 desenho esquemático da montagem em tandem do sistema híbrido TIG/indução e seus principais parâmetros de montagem.....	21
Figura 3.6 fluxograma de preparação das amostras para análise.....	25
Figura 4.1 mostrando a macrografia dos corpos de prova H2 (à esquerda) e T2 (à direita).....	26
Figura 4.2 visão geral do cordão de solda do experimento JH1 mostrando início do fenômeno de <i>humping</i> .....	27
Figura 4.3 Experimento M1 mostrando uma trinca na região marginal direita do cordão de solda (referente à direção de soldagem, de baixo para cima na imagem).....	29
Figura 4.4 Experimento M2 mostrando a trinca na região marginal direita da solda (referente à direção de soldagem, lado superior da imagem).....	29
Figura 4.5 Experimento M3 mostrando uma trinca na região marginal direita do cordão de solda (referente à direção da soldagem, lado superior na imagem).....	29
Figura 4.6 Visão geral do experimento Mi1, não evidenciando trincas aparentes.....	30
Figura 4.7 Visão geral do experimento Mi2 evidenciando trinca longitudinal no começo do cordão de solda.....	30
Figura 4.8 Região inicial do cordão do experimento Mi2i apresentando trinca longitudinal semelhante ao da Figura 4.7.....	30
Figura 4.9 Visão geral do experimento Mi3, não apresentando nenhuma trinca aparente...31	
Figura 4.10 Amostras M1, M2 e M3 cortadas e evidenciando trincas.....	31
Figura 4.11 Desenho esquemático das dimensões avaliadas: W - largura, R - reforço e P – penetração.....	32
Figura 4.12 Corpo de prova M3 mostrando a trinca da fratura inicial (à direita) e a trinca detectada na macrografia (indicado pela seta).....	32

Figura 4.13 Trinca detectada no corpo de prova M3 durante a macrografia, apresenta mesma origem e caminho que a trinca inicial surgida no lado oposto do cordão.....	33
Figura 4.14 Perfil de durezas para as amostras M1 e Mi1.....	34
Figura 4.15 Perfis de dureza para as amostras M3 e Mi3.....	34
Figura 4.16 Perfis de dureza comparativo das amostras M2, Mi2 e Mi2i.....	35
Figura 4.17 Zona Afetada pelo Calor da amostra M2 mostrando microestrutura 100% martensítica.....	35
Figura 4.18 Zona Afetada pelo Calor da amostra Mi2 mostrando a formação de martensita e bainita superior.....	36
Figura 4.19 Zona afetada pelo calor do experimento Mi2i mostrando microestrutura de martensita revenida.....	36
Figura 4.20 Máxima dureza vs Energia do processo de soldagem.....	37

## LISTA DE TABELAS

TABELA 3.1 - Composição química do aço estrutural ASTM A36 e do aço mola SAE 5160.....	17
TABELA 3.2 - Composição química do arame ER70S-G utilizado na soldagem MIG.....	19
TABELA 3.3 - Parâmetros de montagem em tandem do sistema híbrido TIG/indução.....	22
TABELA 3.4 - Matriz de experimentos <i>bead-on-plate</i> em aço ASTM A36: codificação e parâmetros.....	23
TABELA 3.5 - Matriz de experimentos de juntas soldadas em aço ASTM A36: codificação e parâmetros.....	24
TABELA 3.6 - Matriz de experimentos das juntas soldadas em aço SAE 5160: codificação e parâmetros.....	24
TABELA 4.1 - Análise dimensional e comparativo dos cordões de solda.....	32



## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

$C_{eq}$  - carbono equivalente

ASTM – ASTM International

SAE – Society of Automotive Engineers

$E$  – campo elétrico

$\varepsilon$  ou FEM – força eletromotriz

$\varphi_B$  – campo magnético

$N$  – número de espiras

$I$  – corrente elétrica

$R$  – resistência elétrica

$t$  – tempo

$\delta$  – profundidade de penetração

$\mu_r$  – permeabilidade relativa

$f$  – frequência medida em Hertz (Hz)

$\rho$  – resistividade ôhmica

$W$  – medida de potência

$U$  – tensão elétrica

## RESUMO

Este trabalho tem por objetivo estudar os efeitos metalúrgicos causados pela utilização de um sistema híbrido de soldagem à arco assistido por um pré-aquecimento indutivo localizado na região da junta a ser soldada. O trabalho se desenvolveu em duas etapas: primeiramente avaliar os efeitos de processo na soldagem de juntas em aço ASTM A36 com o sistema de aquecimento indutivo formando um processo híbrido, com a montagem em tandem, junto a uma tocha de soldagem TIG. Em segunda etapa, os testes realizados visaram avaliar os efeitos metalúrgicos sobre a geometria da solda, o perfil de durezas e microestrutura formada, através da soldagem de juntas pelo processo MIG em comparação com o sistema híbrido (MIG+Indução), sobre um aço SAE 5160. Todas as juntas dos sistemas híbridos mostraram penetração maior devido ao pré-aquecimento indutivo auxiliar o metal base a elevar a temperatura próxima ao ponto de fusão. As soldas feitas no aço SAE 5160 realizados pelo método convencional MIG apresentaram trincas, já as realizadas pelo sistema híbrido não apresentaram nenhum tipo de falha. A avaliação do perfil de microdurezas mostrou um gradiente muito maior desta propriedade no processo convencional para as 3 velocidades de soldagem utilizada, porém é importante notar que para a velocidade mais alta, o sistema híbrido aparentou uma tendência de se igualar ao sistema convencional quanto às geometrias e durezas medidas. Por último, foi avaliado a utilização de um pós-aquecimento indutivo em uma amostra de soldagem do sistema híbrido, a de velocidade intermediária, a qual mostrou uma queda significativa de dureza em relação as outras de mesma velocidade de processo.

## ABSTRACT

This work aims to study the metallurgical effects caused by using a hybrid arc welding system assisted by an inductive pre-heating located in the region of the joint to be welded. The work took place in two stages: first to analyze the effects of the process by welding joints in ASTM A36 steel with a induction heating system forming a hybrid process, in a tandem assembly with the TIG welding torch. In the second stage the tests were intended to evaluate the metallurgical effects on weld geometry, the hardness profile and the formed microstructure, by welding the joints with MIG compared with the hybrid system (MIG+induction) on an SAE 5160 steel. All joints welded with the hybrid system showed greater penetration due to inductive pre-heating at the base metal, which helps to raise the temperature near its melting point. Welds made in SAE 5160 steel by the conventional method MIG showed some cracks, however, those carried out by the hybrid system did not show any failure. The evaluation of the microhardness profile showed a much larger gradient of this property in the conventional process for the 3 speeds used for welding, but it is important to note that at the highest speed, the hybrid system appeared a tendency to equate the conventional system in the geometries and hardness measurements. Lastly it was evaluated using the inductive post-heating in a welding sample of the hybrid system, the intermediate rate, which showed a significant decrease in hardness compared with the same other process speed.

## 1. INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

Em face de um mundo mais globalizado e competitivo, cada vez os desenvolvimentos no âmbito acadêmico e industrial focam na otimização dos processos de fabricação, seja motivado pela escassez de recurso ou pela diminuição dos custos de produção. A necessidade de se produzir mais em menos tempo, desde a primeira metade do século XX, faz com que novos processos de fabricação sejam investigados, e novas tecnologias sejam desenvolvidas.

Dentre as etapas dos processos de fabricação mecânica, se destaca a união de materiais por meio de soldagem, um tipo de conexão (geralmente entre peças metálicas ferrosas) permanente, baseada na ação de forças em escala atômica.

Processos de soldagem como o TIG (Tungsten Inert Gas) e MIG (Metal Inert Gas) são de grande importância em setores onde a qualidade da junta soldada seja alta, quase livre de defeitos (no caso do primeiro) e a alta taxa de produtividade (no caso do segundo) sejam requisitos básicos.

Uma vez que o processo de soldagem se baseia na fusão do material base por meio de um arco elétrico, o presente trabalho propõe a utilização de um sistema de indução eletromagnética como assistente no aquecimento localizado da junta entre as duas peças precedendo o arco elétrico e assim auxiliando alcançar temperaturas próximas à de fusão do material, bem como diminuir os gradientes de temperatura ao longo da peça. Sistemas de aquecimento indutivo já vêm sendo utilizados nos setores de fundição e tratamento térmico há muitas décadas. As máquinas que exercem esta função aliam boa precisão de controle dos complexos circuitos eletrônicos, com eficiência energética, grande segurança e estabilidade de operação.

Baseados nestes processos e sistemas, o trabalho busca investigar as propriedades metalúrgicas de um “Sistema Híbrido de Soldagem a Arco [Jerald Jones, 2015] assistido por pré-aquecimento indutivo localizado”, analisando a morfologia do cordão de solda (geometria da zona fundida e termicamente afetada), a penetração da solda e o perfil de durezas quando necessário.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Aquecimento por Indução Eletromagnética

#### 2.1.1 Campo Eletromagnético

É um campo de influência magnética surgida de correntes elétricas ou de materiais magnéticos (relacionados ao *momentum* magnético de partículas elementares, o *spin*).

Em sistemas elétricos surge da variação da corrente elétrica (observada por Oersted e descrita por Biot-Savart) em um condutor, portanto existem apenas na comutação de uma corrente contínua ou na existência de uma corrente alternada.

#### 2.1.2 Lei de Faraday-Neumann-Lenz

Também chamada Lei da Indução Eletromagnética, é a lei que explica a interação entre campo magnético e elétrico.

É uma das quatro equações de Maxwell que regem o eletromagnetismo clássico e é composta pela união de diversos princípios. Primeiramente, em 1831, Michael Faraday, em sua Lei de Faraday, disse que “*a corrente elétrica induzida em um circuito fechado por um campo magnético é proporcional ao número de linhas do fluxo que atravessa a área envolvida do circuito, por unidade de tempo*”. Já em 1845, Franz Ernst Neumann à transcreveu na forma matemática a força eletromotriz igualando com o negativo (contribuição de Lenz) da variação do fluxo magnético no tempo:

$$\mathcal{E} = -\frac{\Delta\Phi_B}{\Delta t}$$

Onde o fluxo  $\Phi_B$  pode ser definido, dentro da área  $\Sigma$  que está sofrendo a interação, como:

$$\Phi_B = \iint_{\Sigma(t)} \mathbf{B}(\mathbf{r}, t) \cdot d\mathbf{A} ,$$

Usando a definição da FEM, aplicando o diferencial e escrevendo na forma integral do teorema de Kelvin-Stokes :

$$\oint_{\partial\Sigma} \mathbf{E} \cdot d\boldsymbol{\ell} = - \int_{\Sigma} \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \cdot d\mathbf{A}$$

Sendo E o campo elétrico induzido,  $d\boldsymbol{\ell}$  é um elemento infinitesimal do circuito.

A contribuição de Heinrich Lenz se dá por que segundo ele “*o sentido da corrente é o oposto da variação do campo magnético que a gera*”. Isso significa que a indução sempre se dá com o intuito de manter o campo com a mesma direção e magnitude. Caso o campo magnético aumente, surge uma corrente que gera um campo contrário, tentando impedir esse aumento. Se o campo diminui um efeito inverso acontece.

### 2.1.3 Transformador

Inventado em 1831 por Michael Faraday, são dispositivos que funcionam de acordo com a Lei da Indução Eletromagnética, consistem de duas ou mais bobinas (enrolamentos de fio, geralmente de cobre esmaltado) e um núcleo para condução do campo magnético.

Baseado no princípio de Biot-Savart de que uma corrente elétrica produz um campo magnético e na lei de indução de Faraday-Neumann-Lenz de que um campo magnético variável dentro de uma bobina induz uma tensão elétrica nas extremidades da mesma e que a tensão na mesma é diretamente proporcional à taxa com que varia o fluxo magnético no circuito.

Ou seja, na bobina primária é gerada uma corrente elétrica que gera um campo magnético, o qual é conduzido pelo núcleo do transformador e permeia a segunda bobina que acaba por ter uma corrente induzida em seu enrolamento porém no sentido contrário da primeira.

Para uma tensão ou FEM  $\mathcal{E}_1$  na bobina 1 e  $\mathcal{E}_2$  na bobina 2, assim como  $N_1$  e  $N_2$  espiras nas respectivas bobinas, e o fluxo é igual para as duas, logo:

$$\mathcal{E}_1 = -N_1 \frac{d\Phi_B}{dt}$$

$$\mathcal{E}_2 = -N_2 \frac{d\Phi_B}{dt} = N_2 \frac{\mathcal{E}_1}{N_1}$$

Assim a razão entre espiras e tensão, nas bobinas será:

$$\frac{\mathcal{E}_2}{\mathcal{E}_1} = \frac{N_2}{N_1}$$

#### 2.1.4 Correntes de Foucault e Efeito Joule

Também conhecidas como correntes parasitas, são as correntes induzidas em um material metálico relativamente grande quando submetido a um campo magnético variável. Em alguns casos as correntes de Foucault geram calor no condutor através da dissipação por efeito Joule, ou efeito térmico, devido à resistência interna da peça. O efeito pode ser descrito por:

$$Q = I^2 \cdot R \cdot t$$

onde:

- $Q$  é o calor gerado por uma corrente constante percorrendo uma determinada resistência elétrica por determinado tempo.
- $I$  é a corrente elétrica que percorre o condutor com determinada resistência  $R$ .
- $R$  é a resistência elétrica do condutor.
- $t$  é a duração ou espaço de tempo em que a corrente elétrica percorreu ao condutor.

#### 2.1.5 Sistema de Aquecimento por Indução

Na indústria, os princípios básicos de aquecimento por indução são conhecidos e aplicados desde 1920. Durante a Segunda Guerra Mundial, a tecnologia desenvolveu-se rapidamente para atender as necessidades urgentes da guerra, para um processo rápido e confiável de endurecer peças metálicas de motores (aquecimento para tratamento térmico).

Mais recentemente, o foco em técnicas de manufatura enxutas e a ênfase na melhoria do controle de qualidade levaram a uma redescoberta da tecnologia de indução, juntamente com o desenvolvimento de controle preciso e de componentes de estado sólido nos geradores de potência.

As taxas de produção podem ser maximizadas, pois a indução funciona rapidamente, e o calor é desenvolvido diretamente e instantaneamente no interior da peça, chegando em casos extremos à temperaturas de 1000°C em tempo menor que 1 segundo.

A eficiência desse tipo de sistema também pode chegar nos modernos conversores aos 90%.

Em geral os benefícios do uso do aquecimento indutivo são:

- Elevadas densidades de potência, o que torna rápido o aquecimento;
- Possibilidade de aquecer regiões selecionadas e determinadas de um componente;
- Preciso controle de temperatura;

Os sistemas consistem basicamente de um oscilador eletrônico de frequência controlável, pois existe um efeito película, ou *skin effect* em inglês, onde as correntes de Foucault circulam pela periferia do condutor e quanto maior a frequência de oscilação do campo magnético mais superficial é a circulação da corrente e portanto mais superficial é o aquecimento, podendo assim focalizar os efeitos de temperatura em uma região mais restrita ou mais global apenas com alteração da frequência de oscilação do circuito. Definindo pela equação:

$$\delta = \sqrt{\frac{500 \rho}{\mu r f}}$$

Sendo:

$\delta$  = Profundidade de penetração, em (metro);

$\rho$  = Resistividade ôhmica do material, em (Ohm.metro);

$\mu r$  = Permeabilidade relativa do material, adimensional;

$f$  = Frequência nominal do Gerador de Indução, em (Hertz).

A energia gerada por unidade de volume da peça a ser aquecida é diretamente proporcional à frequência de ressonância do circuito, à permeabilidade magnética do material e ao quadrado da intensidade do campo magnético na superfície da peça. A potência também depende das dimensões da peça em relação à profundidade de penetração da corrente induzida. Este fator fornece a extensão da faixa das frequências de funcionamento que serão usadas para cada processo industrial que utilize aquecimento por indução.

Acoplado a isso, um transformador de potência é responsável por dar carga ao sistema e controlar a intensidade do campo eletro-magnético.

Uma bobina especialmente desenhada para aquecimento da região desejada faz o papel final do sistema, tendo ela a função de enrolamento primário de um transformador enquanto a peça a ser aquecida funciona como secundário.

Elementos auxiliares são necessários para fazerem correções de casamento da indutância do sistema bobina/peça, de otimização dos fatores de potência reduzindo assim perdas, e também de segurança no isolamento da saída do gerador. A figura 2.1 mostra o esquema de um sistema de indução.

A bobina é confeccionada geralmente em cobre por ser um bom condutor elétrico e térmico, sendo utilizado um tubo de cobre para permitir que água circule em seu interior ajudando na refrigeração e mantendo seu fator de qualidade, assim garantindo a máxima transferência de energia.



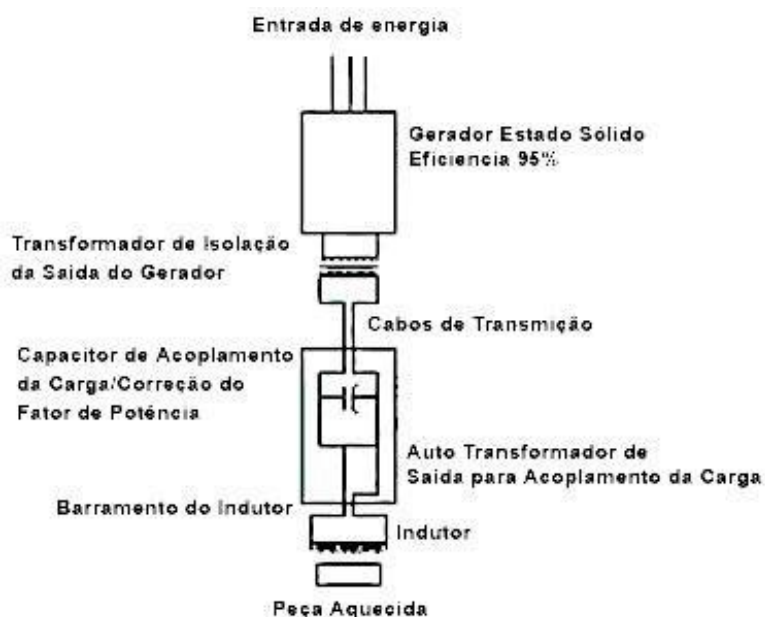


Figura 2.1 diagrama de um sistema de aquecimento indutivo.

Além dos efeitos causados pelo efeito Joule relacionado às correntes de Foucault, existe ainda uma parcela de aquecimento por efeito de histerese. Essa acontece quando da inversão dos domínios magnéticos do metal pela ação da inversão da polaridade do campo magnético gerado na bobina de indução que reagem a fim de manter o sistema em equilíbrio, porém gerando um tipo de fricção atômica interna que faz com que seja gerado calor, elevando a temperatura da peça. No aquecimento de aços este efeito tem pouca importância pois ao chegar na temperatura Curie, o aço se torna paramagnético, então o aquecimento por histerese se torna praticamente nulo.

Quando se geram correntes de Foucault o aço passa a se comportar como uma resistência elétrica e o calor gerado é proporcional à  $R \cdot I^2$ , sendo R a resistência total do circuito e I a intensidade de corrente. Quanto mais alta a temperatura, menor será o efeito de aquecimento por correntes de Foucault.

## 2.2 Soldagem TIG: Processo e Parâmetros

O processo de soldagem TIG (tungsten inert gas) ou GTAW (gas-shielded tungsten arc welding) consiste na união de peças metálicas através de seu aquecimento e fusão por meio da ação de um arco elétrico estabelecido entre o eletrodo de tungstênio não consumível e as peças a unir. A proteção da poça de fusão e do arco elétrico é feita através de uma atmosfera de gás inerte ou mistura de gases inertes. A soldagem pode ser feita com metal de adição direto na poça de fusão, ou sem, no caso de um processo autógeno.

O modo de operação mais usual é o manual. A automatização do processo não apresenta dificuldades, o que permite obter um sistema de soldagem TIG com operação semiautomática ou automática.

O equipamento utilizado na soldagem TIG consiste basicamente de uma fonte de energia elétrica, normalmente um transformador retificado, uma tocha de soldagem refrigerada a ar ou água, um cilindro de armazenamento do gás de proteção e o sistema de abertura do arco que pode ser por alta frequência ou sistema *lift arc*. A figura 2.2 mostra esquematicamente uma representação de um equipamento típico do processo de soldagem TIG.

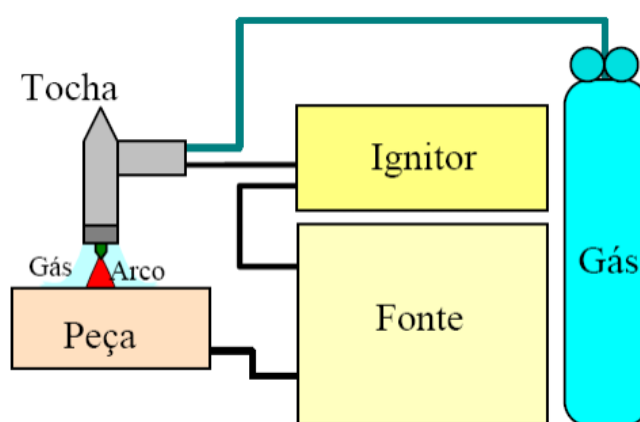


Figura 2.2 Equipamento para soldagem TIG [Marques et al., 2009]

A proteção gasosa, no processo TIG ocorre através de um fluxo de gás inerte, que parte do bocal da tocha, circundando o eletrodo de tungstênio, em direção à poça de fusão. Em alguns casos especiais, gases não inertes podem ser utilizados em pequena quantidade, misturados com o gás inerte [Kou, 2002]. O gás além de proteger a poça de fusão de contaminação pelo ar atmosférico, protege também o eletrodo não consumível, pois apesar de o tungstênio fundir à altas temperaturas, a sua oxidação ocorrer em temperaturas bem mais baixas. Durante a operação, o eletrodo deve se manter na cor prateada, do contrário, há fuga de gás no sistema, o gás é impuro, ou o restante de gás que permanece no bocal não se mantém ali até que o eletrodo esfrie [Machado, 1996].

Uma das principais características desse processo é o controle da energia transferida para a peça. Ocorre por meio de um controle independente que o operador tem da fonte de calor e do metal de adição, o que torna o processo adequado para soldagem de peças de pequena espessura. A ausência de escória durante o processo de soldagem permite uma visão clara da poça fundida para o soldador, e não há presença de fumos que sejam nocivos. O arco elétrico se mostra bastante estável, concentrado e suave, adequado para produzir soldas com boa qualidade e acabamento, se os parâmetros forem bem

selecionados. Além disso, mesmo na soldagem com metal de adição, o arco elétrico não gera salpicos, pois não há transferência de metal já que o calor da poça de fusão é que funde o metal.

A desvantagem desse processo reside na baixa taxa de deposição, que implica numa operação mais demorada, se comparada com outros processos de soldagem. Sua operação também depende da destreza do operador do que outros processos de soldagem a arco. Não é um processo adequado para ambientes turbulentos, com correntes de ar e ventos, pois estes podem interferir na proteção gasosa da poça de fusão e do eletrodo. Devido ao alto custo, somente é empregada em soldagens especiais, de metais não ferrosos e de aços inoxidáveis, na soldagem de peças de pequena espessura ( 1 a 2 mm) e no passe de raiz na soldagem de tubulações e dutos.

A fonte de energia é do tipo corrente constante ou tombante, onde uma grande variação na distância do eletrodo até a peça causa uma pequena variação na corrente de soldagem, comum em processos manuais. O mais comum é a utilização de polaridade direta, ou seja, utilizando corrente contínua com o eletrodo na polaridade negativa, onde a penetração é mais profunda, devido ao calor estar concentrado, em sua maioria, na peça o que reduz a necessidade de refrigeração da tocha, e a largura do cordão é reduzida.

Há basicamente três modos de abertura do arco, a utilização de uma fonte de alta frequência que cria um arco piloto com a finalidade de quebrar o comportamento dielétrico do ar, um segundo método tal qual a abertura de arco em processos de soldagem por eletrodo revestido onde o eletrodo é “riscado” na peça, mas que pode provocar inclusões de tungstênio no metal de solda, diminuindo assim a tenacidade da junta e o reduzindo a vida útil do eletrodo. Um terceiro método, utilizado em fontes mais modernas e chamado de *lift arc* consiste em encostar o eletrodo na peça e quando este é afastado (interrompe-se o contato) o sistema eletrônico enxerga a mudança em frações de segundo e o arco se inicia. Assim não se corre o risco de inclusões de tungstênio na peça ou de desgaste do eletrodo já que a corrente só se estabelece depois de desfeito o contato entre os dois.

A corrente de soldagem é um dos principais parâmetros, com a maior influência na penetração do cordão de solda. Quanto mais intensa a corrente de soldagem, maior a penetração. Porém na soldagem manual, quanto maior a corrente maior a dificuldade em controlá-la, requerendo uma maior velocidade de soldagem. Operações com altas correntes são mais adequadas em sistemas mecanizados, semiautomáticos ou automáticos. Correntes muito baixas, por outro lado, podem causar falta de fusão e baixa penetração, além de

dificultar a operação quando se tem metal de adição. Uma alternativa para soldagem com baixa corrente reside na utilização de baixas velocidades de soldagem [Pritchard, 2001].

Como mencionado anteriormente, a polaridade do sistema de soldagem tem influência tanto na penetração quanto na distribuição de calor entre eletrodo e peça. Na soldagem de aços carbono, a operação mais utilizada é a com corrente contínua com o eletrodo no pólo negativo. Assim a distribuição de calor fica em torno de 30% no eletrodo e 70% na peça a ser soldada, o que resulta na maior penetração entre as três possibilidades de polarização (eletrodo positivo, eletrodo negativo e corrente alternada). Na polarização negativa, a poça de fusão é funda e estreita, o que limita a aplicação em peças muito finas. Ao contrário das outras duas, a polarização com eletrodo negativo não produz a limpeza dos óxidos superficiais da poça de fusão. Com o eletrodo na polaridade positiva, o calor gerado fica em torno de 70% no eletrodo e 30% na peça, nesta formatação, a poça de fusão é rasa e larga, obtendo-se a menor penetração dentre as três. Apresenta remoção eficiente de óxidos superficiais da poça de fusão, pela ação da oscilação de pontos catódicos. Na última das possíveis polarizações, em corrente alternada, a distribuição de calor é mais homogênea entre eletrodo e peça, estando em 50% a distribuição para cada, e a remoção dos óxidos é excelente. É indicada para soldagem de metais reativos tais qual titânio, cobre e alumínio.

A velocidade de soldagem é um fator importante no aporte térmico, sendo preferível que esta seja o maior possível assim reduzindo a chance de distorção nas juntas [Pritchard, 2001], ou seja, quanto mais rápido a tocha passar pela junta, menor é a energia fornecida àquela porção de metal. Para um mesmo aporte, uma elevação na velocidade também requer uma elevação na corrente.

O comprimento do arco deve ser o menor possível para que este esteja o mais concentrado possível, porém se a distância for muito pequena, poderá haver contaminação da poça por meio do contato do eletrodo com a peça. Se a distância for muito grande o arco será distribuído sobre uma área muito grande, o que dificulta a fusão em vista que a intensidade de corrente decresce com o aumento de área de atuação do arco. Uma distancia maior entre eletrodo e peça também reduz a qualidade da proteção gasosa, permitindo que ar atmosférico entre em contato com a poça de fusão, contaminando-a [Pritchard, 2001].

O diâmetro do eletrodo não consumível e sua composição também são fatores operacionais que devem ser escolhidos de acordo com os metais a serem unidos. É fácil pensar que para maiores intensidades de corrente são necessário eletrodos de maior diâmetro, para que possam suportar esse maior aporte. O eletrodo de tungstênio puro é

utilizado em processo com corrente alternada, tal qual o eletrodo dopado com óxido de zircônio, estes formam pontas esféricas devido ao aquecimento da extremidade proporcionado pelo arco elétrico que dali se manifesta. Para corrente contínua são utilizados os eletrodos dopados com óxido de tório, lantânio, ou cério, pois estes não formam uma semiesfera na ponta do eletrodo devido ao aquecimento e mantem seu formato. A ponta do eletrodo deve ser apontada, quanto mais agudo o ângulo maior será a penetração e menor a largura do cordão de solda. Este afunilamento do extremo do eletrodo deve ser feito de modo que as ranhuras da ponta sejam longitudinais em relação ao seu corpo. O ângulo da ponta do eletrodo tem relação com a penetração do cordão de solda. Quanto mais agudo o ângulo, maior será a penetração e menor a largura do cordão. A proteção gasosa é de suma importância para o processo, ela é quem protege a poça de fusão e o arco de oxidarem. O tipo de gás tem influência na geometria do cordão de solda, na transferência de calor, na estabilidade do arco elétrico e na velocidade de soldagem.

A vazão com que o gás deixa o bocal que envolve o eletrodo não consumível também é bastante importante, não pode ser tão baixa que deixe de cumprir a função de criar a atmosfera de proteção envolta da poça e eletrodo, e também não pode ser exagerado, que possa gerar um fluxo turbulento e carregar ar atmosférico para poça e eletrodo e os contaminar, ou ainda que seja excessivo que aumente os custos de soldagem. A determinação de uma vazão de gás laminar depende do tipo de gás de proteção, da distância do bocal à peça, do tipo de junta, da geometria do bocal, da intensidade de corrente, da existência ou não de deslocamento de ar, da inclinação da tocha, do comprimento do arco elétrico, do tipo de metal de base, da velocidade e posição de soldagem [Machado, 1996].

### 2.3 Soldagem MIG/MAG: Processo e Parâmetros

Os processos de soldagem MIG (metal inert gas) e MAG (metal active gas), conhecidos também por GMAW (gas-shielded metal arc welding), são caracterizados por serem sistemas de soldagem pela ação de um arco elétrico entre um arame nu, consumível, que é alimentado pela tocha em direção à peça a ser soldada. A proteção gasosa, com finalidade de não permitir a contaminação da poça de fusão e proteger o arco, ocorre pela inserção de um gás ou mistura de gases inertes ou ativos. Denomina-se MIG quando o processo de soldagem é feito com a proteção de um gás inerte ou mistura rica em gases inertes, e MAG quando o gás é ativo ou a mistura é rica em gases ativos.

O modo de operação é considerado semiautomático já que a alimentação do metal de adição possui controle automático, mas o posicionamento, o início e término da soldagem, bem como a movimentação da tocha ao longo da junta soldada, são de controle exclusivo do soldador. O processo pode ter a movimentação da tocha mecanizada ao longo da junta, porém o posicionamento, início e interrupção do processo ficam a cargo do operador da soldagem.

O equipamento para soldagem se constitui basicamente numa fonte de energia, geralmente um transformador retificado, um mecanismo de alimentação do arame-eletrodo, tocha de soldagem e cilindro de gás de proteção.

A Figura 2.3 mostra um esquema simples do equipamento de soldagem MIG/MAG.

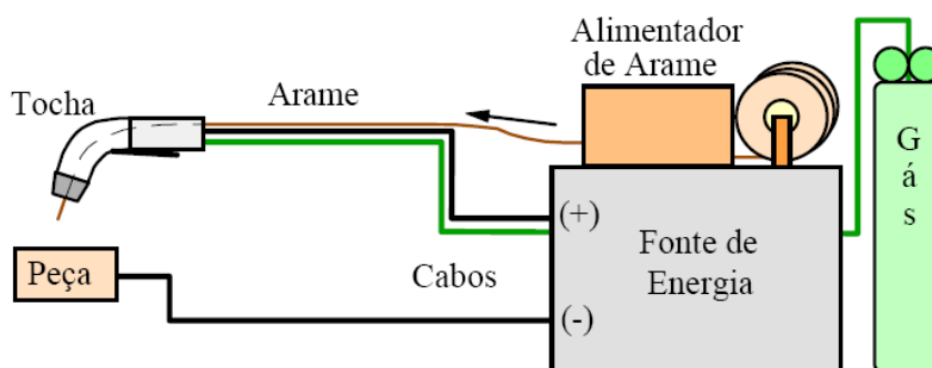


Figura 2.3 Equipamento de soldagem MIG/MAG [Marques et al., 2009].

Este processo tem como vantagens a alta taxa de deposição, alto rendimento, formação de pouca ou nenhuma escória, boa penetração, facilidade de operação e automatização.

A fonte tem curva característica do tipo tensão plana ou constante, em que a taxa de alimentação do arame é constante durante o processo. Se a distância do bico de contato com a peça varia, ocorrem também variações na corrente, de forma que se a distância diminui a corrente aumenta de forma a aumentar a taxa de fusão do arame-eletrodo, e quando a distância aumenta, a corrente diminui assim como a taxa de fusão do arame.

A polaridade inversa ou em corrente contínua com eletrodo positivo é a mais utilizada no processo de soldagem MIG/MAG. Polaridade direta ou corrente contínua com eletrodo negativo é utilizada para trabalhos de revestimento, pois a taxa de deposição é maior, entretanto a penetração é reduzida e o arco elétrico apresenta menor estabilidade. Corrente alternada pode ser utilizada, mas a estabilidade do arco elétrico não é boa.

Os parâmetros de soldagem tem grande influência sobre as características geométricas do cordão de solda, suas propriedades mecânicas, defeitos operacionais e de processo, qualidade da junta, produtividade e custos [Karadeniz et al., 2005]. Os parâmetros de processo são classificados como variáveis ajustáveis primárias, como corrente, tensão e velocidade de soldagem, variáveis ajustáveis secundárias que englobam a tensão do arame-eletrodo após o bico de contato ou *stickout* e o ângulo da tocha. Ainda existem as variáveis pré-selecionadas, que vão depender exclusivamente do metal base, do tipo de consumíveis e da junta a ser soldada. Estas variáveis não podem ser mudadas durante a operação e compreendem o tipo do gás de proteção e a vazão do mesmo, e o diâmetro do arame-eletrodo a ser utilizado.

Arame-eletrodo de maior espessura suportam maiores correntes, e portanto devem ser utilizados para metais base de maior espessura, mas também são utilizados em juntas que requerem maior taxa de deposição e maior penetração. Tão logo, a decisão sobre a espessura do arame-eletrodo vai depender da espessura do metal base, da penetração desejada, da taxa de deposição necessária, da posição de soldagem e geometria do cordão de solda.

O gás de proteção, ou a mistura de gases, tem influência no modo de transferência do metal do arame-eletrodo até a peça, nas propriedades mecânicas e metalúrgicas da junta soldada, na geometria e aparência da junta. Influencia também a estabilidade do arco, na determinação da máxima velocidade de operação de soldagem, na tendência ao aparecimento de mordeduras, e no custo de operação. A vazão do gás deve ser laminar, de forma a isolar o arco elétrico e a poça de fusão de contaminação do ar atmosférico. Se a vazão for baixa haverá contaminação, se for excessiva com baixa velocidade de deslocamento da solda o fluxo se torna turbulento e pode haver arraste de ar atmosférico para a poça. Um ângulo de tocha excessivo também pode induzir a entrada de ar sob o arco, não sendo recomendado que o mesmo exceda em torno de 25° [Machado, 1996]. O argônio é o gás inerte mais utilizado, enquanto que o dióxido de carbono é o mais utilizado como gás ativo, e combinações dos dois podem ser utilizados para chegar a determinadas geometrias de cordão de solda.

A tensão é um importante parâmetro pois determina a largura do cordão de solda e no modo de transferência do metal. Geralmente é estabelecido na própria máquina, no caso de fontes com curva característica do tipo tensão constante, é definida em função da intensidade de corrente, pelo tipo de arame-eletrodo, do gás de proteção e da geometria de cordão de solda que se deseja. Ajuste de tensões muito baixas podem causar porosidades, e

deixam o cordão mais convexo. Tensões muito altas podem provocar salpicos, mordeduras e também porosidades, resultado de um arco elétrico grande, deixam o cordão mais largo e achatado.

A velocidade de soldagem influencia na taxa de deposição e na geometria do cordão. São utilizadas altas velocidades quando e necessária alta produção, porém podem ocorrer defeitos como trinca por solidificação. Somente variando a velocidade, com os demais parâmetros fixos, a peça ou estrutura soldada apresenta menor deformação, menor área afetada termicamente e grãos mais refinados no metal de solda.

## 2.4 Processos de Soldagem Híbridos

### 2.4.1 Descrição de Processo

Define-se soldagem híbrida como o acoplamento de dois tipos de soldagem em um único processo. Neste caso, os dois processos empregados agem simultaneamente em uma mesma zona e um apresenta mútua influência sobre o outro. Esta combinação resulta em inerentes características e recursos, aumentando as áreas de aplicação do processo de soldagem (RAYES; WALZ; SEPOLD, 2004). Campana et al. (2007), destacam que a soldagem híbrida consiste em duas diferentes tecnologias de soldagem acopladas juntas.

Desde a década de 70, vem se estudando métodos de se aliarem processos de soldagem de forma que sejam combinadas as características de ambos, sendo o projeto de uma nova tocha de soldagem, combinando as características dos processos de soldagem Plasma e MIG/MAG a pioneira nessa área [Messler Jr., 2004], embora propostas sejam feitas desde o final da década de 50 por D. M. Yenni. O foco destes estudos se dá no aumento da produtividade da soldagem.

Os processos de soldagem a arco elétrico podem ser separados em dois grandes grupos: os processos que utilizam eletrodos não consumíveis ou permanentes, como TIG ou plasma, e os processos que utilizam eletrodos consumíveis, como os processos MIG/MAG, arame tubular, arco submerso e eletrodo revestido.

Os processos com eletrodo permanente permitem uma maior independência da taxa de fusão do material de adição em relação à potência do arco. A soldagem pode ser realizada até sem material de adição para determinados materiais e tipos de junta, ou com alimentação manual ou automática de material em forma de varetas ou de arame, com velocidade que pode variar desde valores iguais à zero até um limite superior, determinado pela potência do arco. Esta propriedade permite ao processo de soldagem maior atuação na



geometria da solda, caracterizada principalmente pela penetração, largura do cordão e ângulo de molhamento. Entretanto, estes processos têm a tendência de apresentar menor taxa de produção [Oliveira, 2006].

Um histórico do desenvolvimento de novos processos de soldagem híbridos [Messler Jr., 2004] é apresentado a seguir:

- processo de soldagem híbrido Plasma-MIG, em 1972;13
- processo de soldagem híbrido por duplo feixe de elétrons, em 1978;
- processo de soldagem híbrido LASER-TIG, em 1979;
- processo de soldagem híbrido por duplo feixe de LASER, em 1987;
- processo de soldagem híbrido por feixe de LASER assistido por TIG ou MIG/MAG, em 1988;
- processo de soldagem híbrido LASER-MIG, em 1991;
- processo de soldagem híbrido Plasma-LASER, em 1998;
- processo de soldagem híbrido LASER-TIG, com LASER tipo gás, de baixa potência, utilizando dióxido de carbono como meio ativo, em 2001;
- processo de soldagem híbrido com soldagem por fricção FSW assistido por feixe de LASER, em 2002.

#### 2.4.2 Vantagens e Desvantagens em Sistemas Híbridos de Soldagem

Sistemas híbridos de soldagem buscam sempre aliar as vantagens dos processos de soldagem envolvidos, ou então utilizar um processo auxiliar, não necessariamente de soldagem, que venha a melhorar alguma característica do processo principal, e.g. aquecimento indutivo auxiliando na elevação da temperatura da zona que será fundida pelo processo TIG.

De acordo com Nielsen (2011), as vantagens da utilização de sistemas híbridos de soldagem residem na possibilidade de: aumento da penetração da solda, aumento da velocidade de soldagem, redução das taxas de calor (estreita zona termicamente afetada) e melhor energia acoplada ao sistema.

Nielsen ainda aborda que processos híbridos são de principal interesse em casos onde haja limitação das tolerâncias de determinado projeto ou produto, sendo que as mesmas não podem ser alcançadas utilizando-se apenas um processo.

As maiores desvantagens desses sistemas consistem no custo de operação, na complexidade de operação i.e. sincronização dos processos e suas muitas variáveis. Ao se adicionar processos ao sistema, conseqüentemente se aumentam os parâmetros de configuração tal qual a distância entre os elementos (tochas, indutores, etc.), a relação entre as potências e as demais influências que os parâmetros possam ter entre si (Nielsen, 2011).

#### 2.4.3 Sistema Híbrido de Soldagem a Arco Assistido por Aquecimento Indutivo

Com a função de auxiliar a fusão do material base, um sistema indutivo composto por um indutor de forma propícia à aplicação, um concentrador de campo magnético para focar as linhas de indução sobre a pequena área em que se deseja soldar. Jones (2015), cita que a estratégia de usar um sistema híbrido visa reduzir, ou até eliminar distorções de soldagem e incrementar consideravelmente a produtividade.

Operando logo à frente do arco, o indutor aquece a superfície do metal próximo à temperatura de fusão do mesmo, como mostra a figura 2.4. Em sistemas com metal de adição, o calor é primariamente utilizado para fundir o arame. Esse processo pode ser chamado também de HiDep (high deposition arc welding) por causa da alta deposição de metal influenciada pela assistência da indução na fusão do metal. Este novo processo opera em velocidades de duas a quatro vezes mais rápidas do que soldagens convencionais. Devido aos efeitos quanto à penetração, auxiliando a fusão, a soldagem à topo é facilitada e não são necessárias preparações (como a usinagem de chanfro) nas peças a serem unidas, mesmo em peças espessas (Jones, 2015).



Figura 2.4 esquema da soldagem híbrida em tandem

Por definição da norma AWS D1.1/D1.1M:2004 – Structural Welding Code – Steel – o termo “tandem” refere-se ao arranjo geométrico de elementos, em que a linha entre eles é paralela à direção de soldagem [AWS, 2004]. Esse arranjo é comum em processos de

soldagem que requerem alta produtividade e velocidade de soldagem, exigindo um alto grau de mecanização ou até mesmo automatização.

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

Os equipamentos utilizados nos processos experimentais foram disponibilizados pelo Laboratório de Soldagem & Técnicas Conexas (LS&TC) e pelo Laboratório de Transformação Mecânica (LdTM) da UFRGS. A preparação dos dispositivos, a soldagem e análises dos corpos de provas foram todas executadas no LS&TC, que disponibilizou todos equipamentos e suprimentos necessários à execução do trabalho. A assistência técnica para o equipamento de indução foi gentilmente cedida pela Inductotherm Corp.

#### 3.1 Material Utilizado

Na realização deste trabalho foram utilizados o aço estrutural ao carbono ASTM A36 e o aço SAE 5160, ambos na espessura de 4,76 mm. A caracterização dos aços foi feita através de análise química por espectrografia de emissão óptica junto ao Laboratório de Metalurgia Física (LAMEF) da UFRGS, em temperatura ambiente de 21 °C e umidade relativa do ar de 51%. A composição química é dada na tabela 3.1

Tabela 3.1 – Composição química do aço estrutural ao carbono ASTM A36 e do aço mola SAE 5160

Elemento (% em massa)	C	Mn	P	S	Cr
ASTM A36	0,102	0,46	0,0171	0,009	--
SAE 5160	0,59	0,81	0,026	0,0358	0,793

O aço estrutural ASTM A36 é largamente utilizado em estruturas metálicas, possui boa soldabilidade e baixa resistência mecânica. Sua escolha foi feita visando explorar as variáveis do equipamento sem concentrar os esforços de estudo em problemas do processo de soldagem do aço, e baseado no artigo de Jerald Jones e sua utilização no estudo de redução das distorções em juntas soldadas utilizando o sistema híbrido proposto.

Com o objetivo de avaliar as propriedades metalúrgicas causadas pela introdução de um pré-aquecimento, foi proposto a utilização de um aço de boa temperabilidade. O aço escolhido pelo autor foi o SAE 5160 pela experiência com o mesmo em processos de têmpera e revenimento (principalmente em atividades de cutelaria). Este aço apresenta alta

temperabilidade e boa ductilidade, amplamente utilizado na fabricação de eixos automotivos, molas planas e lâminas de corte. Na condição temperada pode alcançar durezas de 63HRc, mantendo sua dureza após o revenimento.

### 3.2 Preparação dos Corpos de Prova para Soldagem

Como a proposta do sistema auxiliar de pré-aquecimento é aumentar a penetração e eliminar etapas de usinagem de chanfro (que facilitam a total penetração de metal de solda em toda espessura das chapas), a única preparação necessária foi o corte das chapas utilizando métodos por plasma ou oxi-acetileno. Em seguida o fresamento das arestas para eliminar irregularidades e permitir uma distância de raiz nula, e o lixamento da superfície para eliminação do óxido superficial.

As dimensões dos corpos de prova foram tais que propiciassem uma boa dissipação do calor de acordo com a teoria, de forma a não saturar e alterar as propriedades do metal quanto à extração de calor do cordão e assim alterar os dados retirados do metal de solda e ZAC.

### 3.3 Equipamentos Utilizados

Para a soldagem foi utilizada uma fonte da marca IMC modelo DIGIPlus A7 450 com capacidade de 450A de corrente, que pode ser vista na figura 3.1.



Figura 3.1 Fonte IMC DIGIPlus A7 450 utilizada

O eletrodo do processo TIG utilizado possuía diâmetro de 2,4 mm, composto de tungstênio com 2% de tório, argônio como gás de proteção e o modo de ignição do arco foi o de alta frequência. No processo MIG foi utilizado arame de 1,2mm de diâmetro e classe AWS A 5.18 tipo ER70S-G, e sua composição química pode ser vista na Tabela 3.2. A velocidade alimentação do arame foi de 4m/min e tensão de 22V.

Tabela 3.2 - Composição química do arame ER70S-G utilizado na soldagem MIG [Fonte: Comercial GERDAU]

Elementos	C	Si	Mn	S	P	Cu	Ni	Cr	Mo	V
mínimo	0,06	0,8	1,4	-	-	-	-	-	-	-
máximo	0,15	1,15	1,85	0,035	0,025	0,5*	0,15	0,15	0,15	0,03

\* O limite máximo de cobre inclui o residual existente no aço, mais o revestimento de proteção anticorrosiva

O gás de proteção utilizado foi o C25, uma mistura composta de 75% de argônio e 25% de dióxido de carbono, caracterizando-o como um gás inerte. A vazão foi de 15L/min.

Para o aquecimento da região a ser soldada foi utilizado o equipamento de marca Inductoheat modelo LEPEL PN 13190388 com capacidade de 15 kW, e frequência máxima de operação de 200 kHz. O painel do equipamento pode ser visto na figura 3.2.

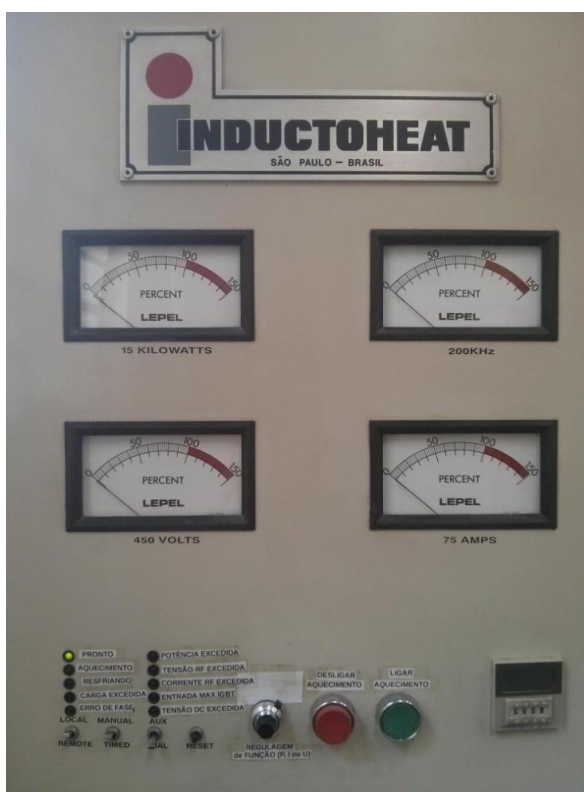


Figura 3.2 Painel do equipamento de aquecimento indutivo

O indutor foi desenvolvido pelo autor de modo a suprir as necessidades do experimento, que seriam de aquecer uma faixa estreita do metal base de modo a ter a menor área afetada termicamente possível (não confundir com a zona termicamente afetada da solda), e de aquecer o máximo esta área, i.e., atingir a maior temperatura possível durante a passagem do corpo de prova. Usou-se de concentradores de campo magnético retirados de circuitos eletrônicos, os populares ferrites, de modo a obter as duas características de aquecer ao máximo no pequeno espaço de tempo de passagem da peça (sem que o indutor ficasse exageradamente grande) e também de forma a concentrar o aquecimento na pequena área.

Como a movimentação do sistema de aquecimento foi impossibilitada pelas suas proporções, foi desenvolvido um modo de movimentar os corpos de prova a serem soldados de modo que tanto o indutor quanto a tocha de soldagem foram mantidas paradas e o metal base é que foi movido. Para isso foi utilizado um sistema de movimentação robótica automatizada marca SPS modelo Tartilope V4 adaptado à movimentação dos corpos de prova a serem soldados. Esse sistema é desenvolvido à movimentar nas 3 dimensões cartesianas e também na angulação da tocha, porém no caso deste trabalho apenas a movimentação no eixo X, ao longo de um trilho previamente alinhado e nivelado, foi utilizada. A figura 3.3 mostra o sistema montado sobre o trilho, com a base metálica para o contato elétrico do sistema de soldagem e o isolamento térmico e elétrico para proteção do Tartilope.



Figura 3.3 Sistema de movimentação dos corpos de prova Tartilope V4.

A montagem do sistema híbrido se dá em tandem, com o indutor à frente da tocha como mostrado na Figura 3.4, o indutor à direita (concentrador de fluxo representado pela caixa preta) e tocha TIG à esquerda. A direção de soldagem é da esquerda para direita. Isto permite que haja um aquecimento indutivo antes do próprio arco elétrico fazer seus efeitos

de aquecimento e fusão do material, facilitando o processo já que boa parte da energia do arco elétrico pode ser utilizada para aumentar a penetração da solda no material base.

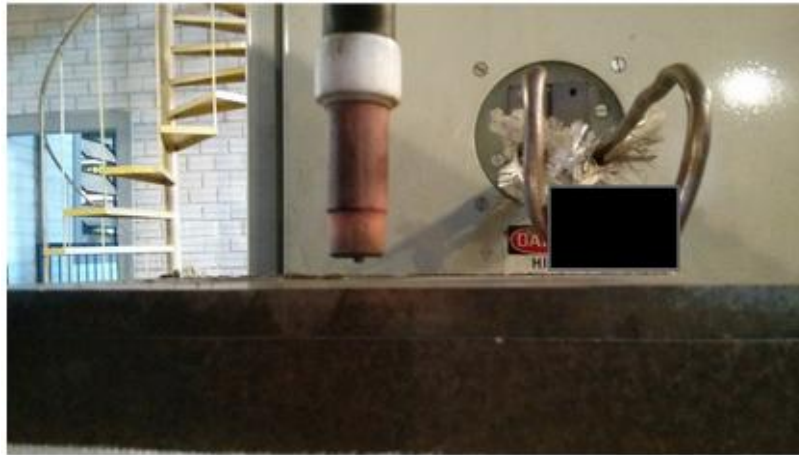


Figura 3.4 Montagem do sistema híbrido.

São vários os parâmetros da montagem. A figura esquemática 3.5 mostra a nomenclatura utilizada para os principais pontos de checagem que influenciam nos resultados finais. As siglas referem-se à:

- dep = distância eletrodo peça
- dip = distância indutor peça
- dti = distância tocha indutor
- li = largura do indutor (não é variável no sistema)

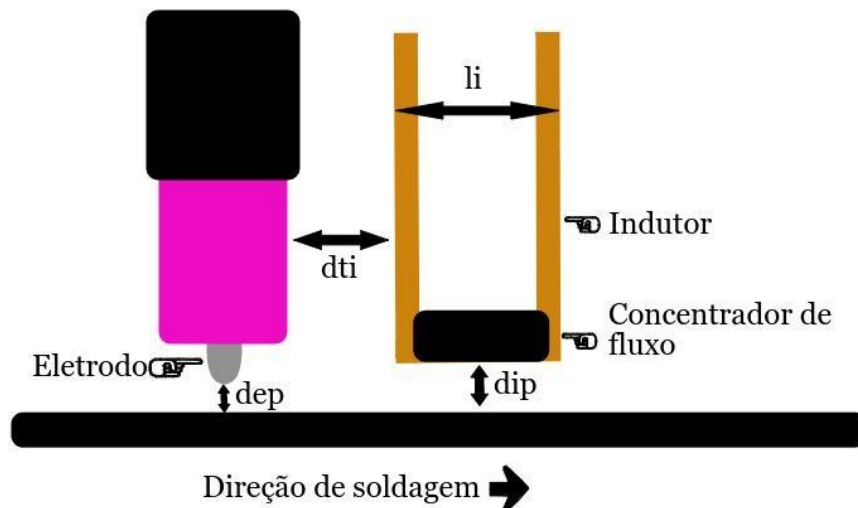


Figura 3.5 Desenho esquemático da montagem em tandem do sistema híbrido TIG/Indução e seus principais parâmetros de montagem.

A Tabela 3.3 mostra os valores desses parâmetros que foram adquiridos através de experiência anterior.



Tabela 3.3 - Parâmetros de montagem em tandem do sistema híbrido TIG/Indução.

Parâmetro	dep	dip	dti	li
Valor (mm)	2	2,5	20	30

No caso da montagem do sistema com processo MAG a única variável que muda é a DEP já que não temos um eletrodo, mas um arame que vai sendo alimentado. A variável de montagem então é a DBCP - Distância Bico de Contato Peça, que no sistema em estudo foi mantida em 15mm.

### 3.4 Matriz de Experimentos

Foi proposta uma matriz de experimentos, da Tabela 3.4, comparativa das variáveis de velocidade, que acarreta numa mudança da energia de soldagem da junta, e da variável que seria a utilização ou não do sistema de pré-aquecimento indutivo o qual é o foco de estudo do trabalho, podendo assim comparar os efeitos da utilização do sistema híbrido em questão e analisar seu comportamento para diferentes energias.

Foram feitos passes do tipo *bead-on-plate*, com processo TIG, apenas indução e híbrido (TIG+indução) *somente no aço ASTM A36*. Juntas soldadas nos aços ASTM A36 e SAE 5160 conforme as tabelas a seguir, sendo que para o aço SAE 5160, o processo de soldagem utilizado acoplado ao sistema indutivo foi MAG

Tabela 3.4 Matriz de experimentos *bead-on-plate* ASTM A36: codificação e parâmetros.

Processo	Código	velocidade (mm/s)	Energia (kJ/mm)
Indução	I1	3	4,5
	I2	4,5	3
	I3	6	2,3
TIG	T1	3	0,9
	T2	4,5	0,6
	T3	6	0,4
Híbrida: TIG + Indução	H1	3	5,4 - perdas
	H2	4,5	3,6 - perdas
	H3	6	2,6 - perdas

As energias listadas na Tabela 3.4 foram calculadas segundo a fórmula

$$E = (\eta * U * i) \div v$$

Onde:

- E é a energia de soldagem (em kJ/mm);
- $\eta$  é o rendimento térmico do processo;
- U é a tensão (em volts);
- i é a corrente elétrica;
- v é a velocidade de soldagem;

Os rendimentos térmicos foram considerados iguais a 1, pois não há como ter uma estimativa boa, embora seja comum para o processo MIG considerar um rendimento de 0,8, e para TIG um rendimento de 0,4. Para o sistema indutivo também foi considerado eficiência 100% e levando em conta os marcadores do painel da máquina que indicavam 13,5kW de potência (U\*i) na regulagem selecionada.

Não foram quantizadas as perdas pontuais devido ao tempo de deslocamento da região entre o indutor e a tocha, ou seja, a dissipação da energia introduzida pela indução a um ponto e que se espalha no espaço de tempo em que este ponto vai de encontro à tocha de soldagem (seja TIG ou MIG). Este parâmetro é desprezado na análise somente porque não foi possível quantificá-lo, porém é citado pois pode ser fruto de estudo, principalmente na variação do parâmetro 'dti' de montagem do sistema.

A Tabela 3.5 exibe os dados dos experimentos de juntas em aço ASTM A36.

Tabela 3.5 - Matriz de experimentos de juntas soldadas em aço ASTM A36: codificação e parâmetros.

Processo	Código	Velocidade (mm/s)	Energia (kJ/mm)
TIG	JT1	3	0,9
	JT2	4,5	0,6
	JT3	6	0,4
Híbrida: TIG + Indução	JH1	3	5,4 - perdas
	JH2	4,5	3,4 - perdas
	JH3	6	2,6 - perdas

Para o aço SAE 5160 foram feitos os experimentos segundo a Tabela 3.6, afim de comparar a soldagem de juntas apenas com o sistema convencional nas 3 diferentes energias, com o sistema híbrido (MIG + Indução) também nas 3 energias. Como experimento adicional se propôs fazer um ‘passe’ da junta soldada com o sistema híbrido de energia intermediária, novamente no sistema de indução, afim de se avaliar os efeitos metalúrgico de pós-aquecimento da junta soldada.

Tabela 3.6 - Matriz de experimentos das juntas soldadas em aço SAE 5160: codificação e parâmetros.

Processo	Código	Velocidade (mm/s)	Energia (kJ/mm)
MIG	M1	3	1,2
	M2	4,5	0,8
	M3	6	0,6
Híbrido: MIG + Indução	Mi1	3	5,5 - perdas
	Mi2	4,5	3,8 - perdas
	Mi3	6	2,9 - perdas
Híbrido com pós- aquecimento	Mi2i	4,5	3,8* - perdas

\*O pós-aquecimento não entra no cálculo pois não afeta a penetração

### 3.5 Preparação das análises

A preparação das amostras para as análises segue a rota descrita no fluxograma da Figura 3.6, onde é feita uma breve inspeção visual da solda com a finalidade de verificar a estabilidade do cordão de solda e certificar que houve estabilização do processo, no caso do aço SAE 5160 a inspeção visual pode ser utilizada para a verificação do surgimento de trincas de solidificação. A seguir são feitos cortes transversais à direção de soldagem, em região representativa do cordão de solda, i.e., em área que aparente com boa parte do resto do cordão de solda. É feito o lixamento metalográfico padrão, seguindo as lixas comerciais de 100 grãos/cm<sup>2</sup> até a lixa de 600grãos/cm<sup>2</sup>, alternando a direção de lixamento em 90° entre lixas. Após o lixamento a amostra é limpa e seca com a utilização de álcool 99,3° e soprador térmico, então as amostras são atacadas com uma solução de 2% de ácido nítrico e 98% de álcool em volume (reagente Nital 2%). São feitas macrografias em lupa marca Leica modelo EZ4 HD, com a finalidade de verificar e quantificar as geometrias dos cordões de solda utilizando o software ImageJ. Para a segunda etapa, apenas realizada no aço SAE 5160, foi necessário o lixamento até a lixa de 1200 grãos/cm<sup>2</sup> e posterior polimento com pasta de diamante 1µm, seguido de ataque com reagente Nital 2%. As análises foram feitas em microscópio Zeiss Axio Scope.A1 e adquiridas em software AxioVisio. O perfil de durezas foi feito com microdurômetro marca Insize modelo ISH-TDV2000 com padrão de escala HV0.5.

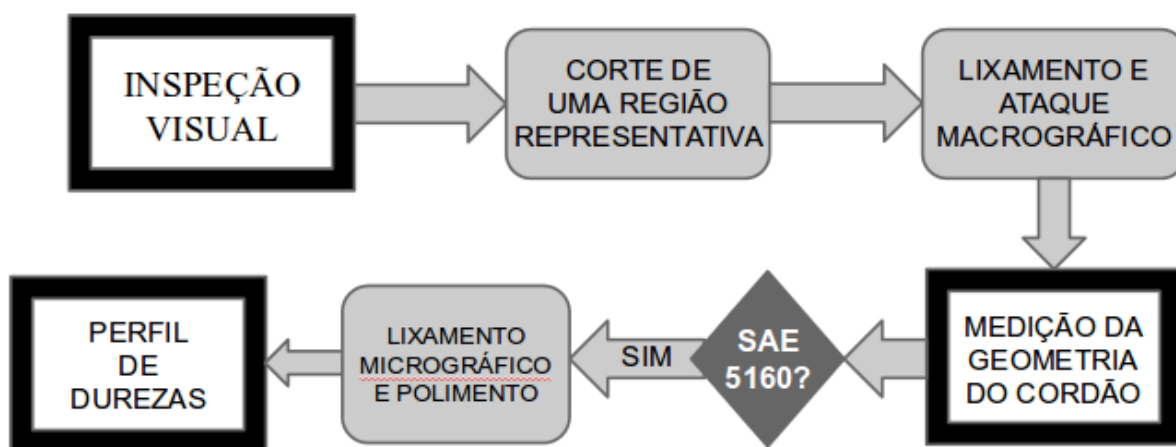


Figura 3.6 fluxograma de preparação das amostras para análise.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Como esperado e predito pela bibliografia consultada, os resultados aqui mostrados evidenciam as vantagens metalúrgicas das juntas soldadas pelo sistema híbrido proposto. Tanto na utilização do processo de soldagem TIG, quanto no processo MAG quando auxiliados pelo sistema de pré-aquecimento indutivo, e ainda mais quando se utiliza o sistema indutivo em um processo de pós-aquecimento, funcionando como tratamento térmico para alívio de tensões, são notórias as vantagens.

### 4.1 Comparação TIG vs TIG+Indução em aço ASTM A36

Os experimentos dos passes do tipo *bead-on-plate* mostram significativa diferença na penetração na comparação entre a solda TIG e a Híbrido (TIG+Indução). A Figura 4.1 mostra a comparação entre os experimentos T2 e H2. As penetrações mostraram valores iguais a 1,7mm e 3,6mm, respectivamente, mostrando que no sistema híbrido foi aproximadamente 2,2x maior que no sistema convencional TIG. Valores proporcionais que se repetiram para os outros experimentos em *bead-on-plate* nos comparativos entre as soldas com mesma velocidade de soldagem. É importante ressaltar que nos experimentos com baixa de soldagem, onde a penetração foi completa, deve ser desconsiderada a proporção entre as penetrações, em vista que o excesso de energia possivelmente permitiria uma profundidade de penetração ainda maior. Em vista desse detalhe, procurou-se fazer comparações mais minuciosas na condição intermediária de soldagem.

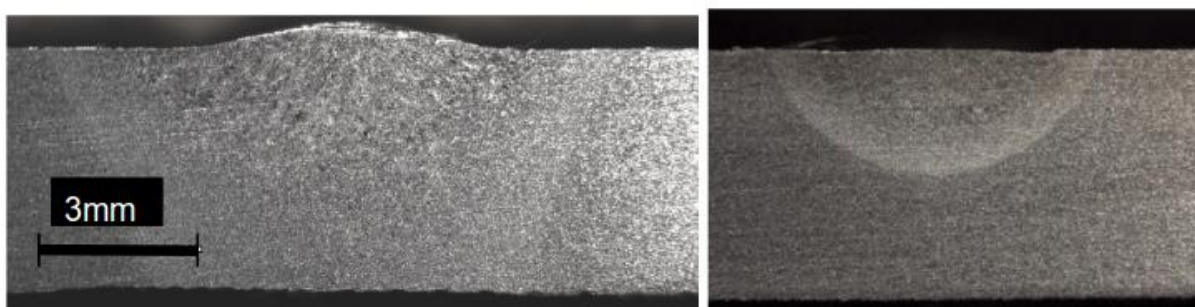


Figura 4.1 mostrando a macrografia dos corpos de prova H2 (à esquerda) e T2 (à direita)

Para os experimentos com juntas soldadas, a média na penetração foi de 2,5x. Pode-se detectar um princípio de um fenômeno chamado *humping*, comum em soldagens

autógenas, ou seja, sem metal de adição. Este fenômeno se caracteriza por descontinuidades, ou imperfeições no cordão de solda, com regiões de crateras e protuberâncias alternadas. É causada pela ação de pressão do arco sobre a poça líquida, fazendo com que o metal seja expulso da região sob o arco. Este efeito poderia ser evitado com a diminuição da corrente, pois ela que fornece grande energia ao arco. A Figura 4.2 mostra uma imagem geral do cordão de solda, onde é possível notar a uniformidade do efeito ao longo da extensão do cordão de solda.



Figura 4.2 visão geral do cordão de solda do experimento JH1 mostrando início do fenômeno de *humping*.

#### 4.2 Comparação MIG vs Híbrido (MIG+Indução) em aço SAE 5160

Como desafio maior do presente trabalho, a proposição de se tentar solda um aço de boa temperabilidade como o SAE 5160 foca nos principais problemas que podem ser enfrentados na hora de soldar este tipo de aço.

É de profundo conhecimento da academia que a soldabilidade de um aço é inversamente proporcional a sua temperabilidade, porém é importante ressaltar que isto não implica na impossibilidade de tal feito, mas pelo contrário, apenas lembra da necessidade de cuidados maiores durante o processamento da união soldada.

Um dos indicativos para um aço, de que se deve atentar na hora de fazer o estudo sobre os cuidados no processo de soldagem de um aço, leva em conta o carbono

equivalente do aço em questão. O qual é calculado a partir da quantidade de carbono e dos principais elementos de liga, seguindo a seguinte fórmula:

$$C_{eq} = \%C + \frac{\%Mn}{6} + \frac{\%Cr + \%Mo + \%V}{5} + \frac{\%N + \%Cu}{15}$$

A partir do cálculo, um aço de boa soldabilidade tem  $C_{eq} < 0,4$ , um aço de média soldabilidade  $0,4 < C_{eq} < 0,6$  e um aço de baixa soldabilidade  $C_{eq} > 0,6$ . Para a nossa remessa de aço SAE 5160, como visto na Tabela 3.1 da composição química, apresenta  $C_{eq} = 0,88$ , ou seja, um aço de baixa soldabilidade.

Como consequência dessa baixa soldabilidade, comumente se faz necessária a utilização de pré-aquecimento a base de maçaricos, os quais tem “péssimo” controle sobre a região afetada pelo calor da chama. No caso deste trabalho, o controle é preciso, localizado, automatizado e quase sem nenhum risco eminente ao operador.

#### 4.2.1 Inspeção Visual e Macrográfica

Foi feita a inspeção visual nas soldas para escolha da melhor região representativa do cordão, além disso, a inspeção para os experimentos M1, M2 e M3, aqueles realizados com o sistema convencional MIG, buscou identificar evidências de trincas de solidificação. Se faz necessário salientar que durante o resfriamento das peças recém soldadas, o autor pode ouvir o som de trincas sendo propagadas, por isso a justificativa de buscar identificar a presença das mesmas.

As figuras 4.3, 4.4 e 4.5 mostram respectivamente as trincas encontradas na margem das soldas M1, M2 e M3, provenientes do processo de solidificação. Estas trincas se originam pela alta fragilidade do metal solidificado rapidamente e que acaba sofrendo transformação de fase. Como o metal de solda possui baixa quantidade de carbono e elementos de liga, o mesmo apresenta boa tenacidade para absorver a energia de contração, e embora o metal transformado tenha alta resistência à tração, na região marginal do cordão de solda provavelmente enfrente um estado triaxial de tensões que resulta em um efeito de cisalhamento e fratura na região.



Figura 4.3 Experimento M1 mostrando uma trinca na região marginal direita do cordão de solda (referente à direção de soldagem, de baixo pra cima na imagem)

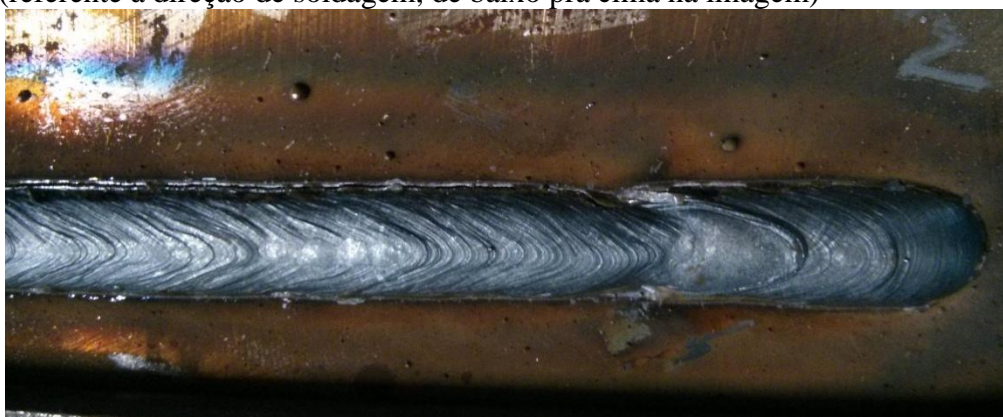


Figura 4.4 Experimento M2 mostrando a trinca na região marginal direita da solda (referente à direção de soldagem, lado superior da imagem).

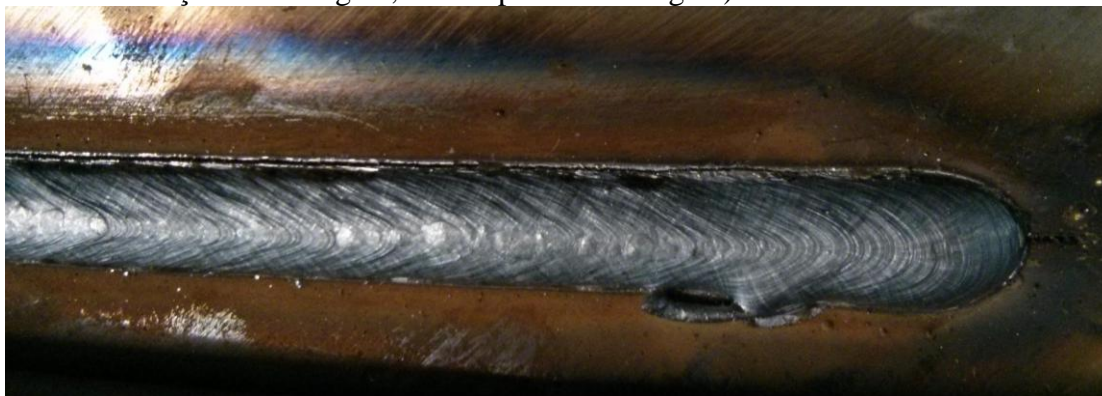


Figura 4.5 Experimento M3 mostrando uma trinca na região marginal direita do cordão de solda (referente à direção de soldagem, lado superior na imagem).



As soldas com o sistema híbrido não apresentaram trincas aparentes, na exceção da de energia intermediária, Mi2, que apresentou uma trinca longitudinal no meio do cordão e mesmo refeita uma réplica, que viraria Mi2i, houve o aparecimento da mesma trinca ao qual só pode ser denotado a um fenômeno desconhecido a ser investigado futuramente. A visão geral das soldas pode ser visto nas figuras 4.6, 4.7, 4.8 e 4.9.



Figura 4.6 Visão geral do experimento Mi1, não evidenciando trincas aparentes.



Figura 4.7 Visão geral do experimento Mi2 evidenciando trinca longitudinal no começo do cordão de solda.



Figura 4.8 Região inicial do cordão do experimento Mi2i apresentando trinca longitudinal semelhante ao da Figura 4.7



Figura 4.9 Visão geral do experimento Mi3, não apresentando nenhuma trinca aparente.

Após cortadas as amostras, pode se evidenciar a gravidade das trincas que propagaram de um lado ao outro do material conforme pode ser visto na Figura 4.10

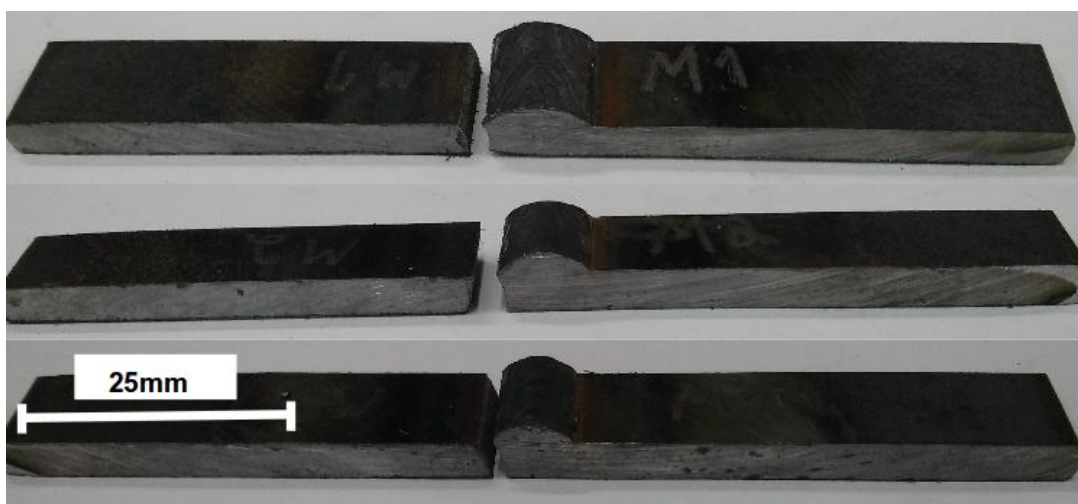


Figura 4.10 Amostras M1, M2 e M3 cortadas e evidenciando as trincas de solidificação.

As amostras então foram analisadas quanto a suas dimensões de largura e reforço do cordão de solda, e profundidade de penetração da solda conforme Tabela 4.1, sendo comparadas para cada velocidade a relação entre a penetração do sistema híbrido sobre a penetração do sistema convencional. É importante lembrar que profundidades de penetração iguais ou superiores a 4,76mm (igual à espessura da chapa) não deveriam ser levados em consideração no comparativo pois não se pode aferir se a penetração não seria maior e fica de sugestão para trabalhos futuros utilizar parâmetros intermediários a fim de ser possível fazer uma melhor avaliação. A Figura 4.11 mostra um desenho esquemático das dimensões avaliadas.

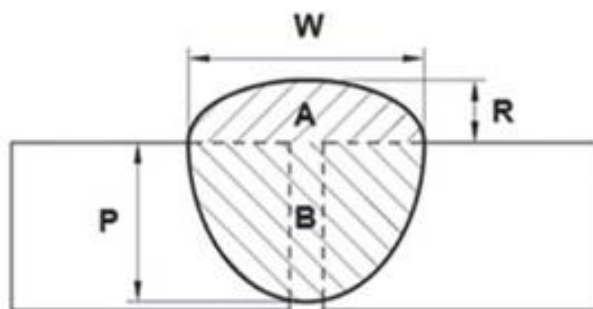


Figura 4.11 Desenho esquemático das dimensões avaliadas: W - largura, R - reforço e P - penetração.

Tabela 4.1 - Análise dimensional e comparativo dos cordões de solda

Código	largura (mm)	reforço (mm)	penetração(mm)	Comparativo de Penetração
M1	11,4	3,1	4,76	1
Mi1	14	1,4	4,76	
M2	9,53	2,3	2,8	1,7
Mi2	13	1,3	4,76	
M3	7,9	2,1	2,3	1,9
Mi3	9,9	1,4	4,36	

Durante as macrografias foi possível evidenciar no corpo de prova M3 uma nova trinca partindo da região marginal esquerda do cordão de solda (oposta a da fratura inicial). Esta nova trinca detectada pode ser conferida na Figura 4.12 conforme indicado pela seta.

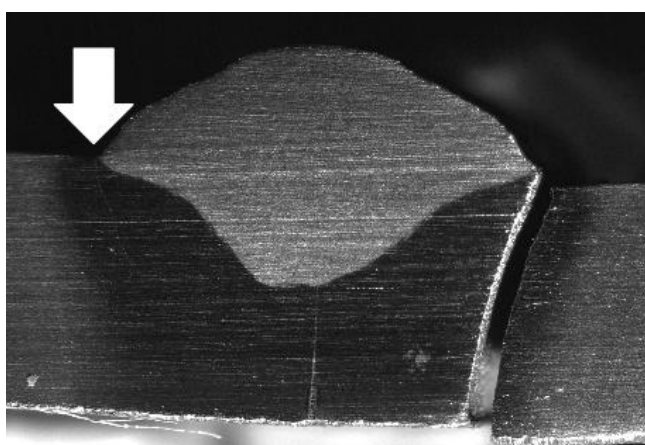


Figura 4.12 Corpo de prova M3 mostrando a trinca da fratura inicial (à direita) e a trinca detectada na macrografia (indicado pela seta)

Na Figura 4.13 é possível ver a trinca em detalhe, percebendo que ela se origina na mesma região e segue aparentemente o mesmo formato da trinca inicial.

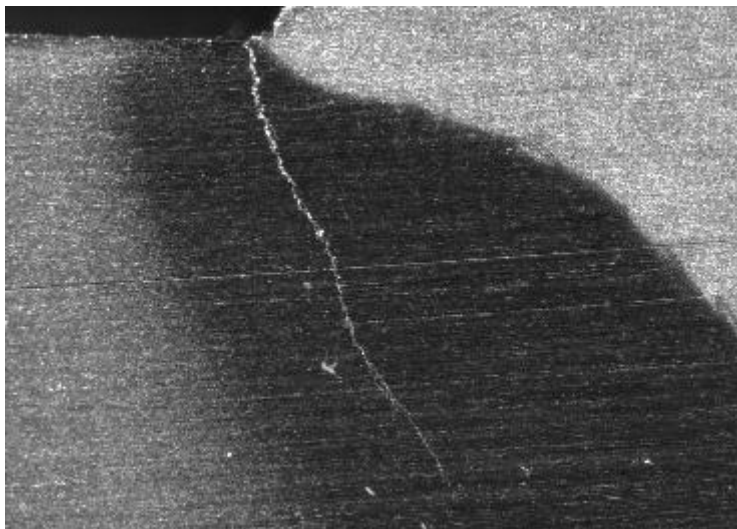


Figura 4.13 Trinca detectada no corpo de prova M3 durante a macrografia, apresenta mesma origem e caminho que a trinca inicial surgida no lado oposto do cordão.

#### 4.2.2 Perfis de dureza e Micrografias

Como proposta de analisar mais profundamente a relação entre a utilização ou não da indução como pré-aquecimento, e também da utilização de um pós-aquecimento para alívio de tensões, foi feito perfil de durezas de todas as amostras a aproximadamente 1mm abaixo da superfície superior das chapas soldadas.

A Figura 4.14 mostra os perfis de dureza dos corpos de prova M1 e Mi1. Podemos notar a grande diferença entre durezas, provenientes da região afetada pelo calor, na peça M1 a grande dureza denota em uma transformação martensítica quase 100%, chegando aos 800HV de dureza. O pré-aquecimento favoreceu na diminuição dos gradientes de temperatura na peça Mi1 o que diminuiu em muito a formação de martensita. Note que a curva M1 é interrompida por causa da trinca, também notar a largura dos patamares devido às dimensões dos cordões.

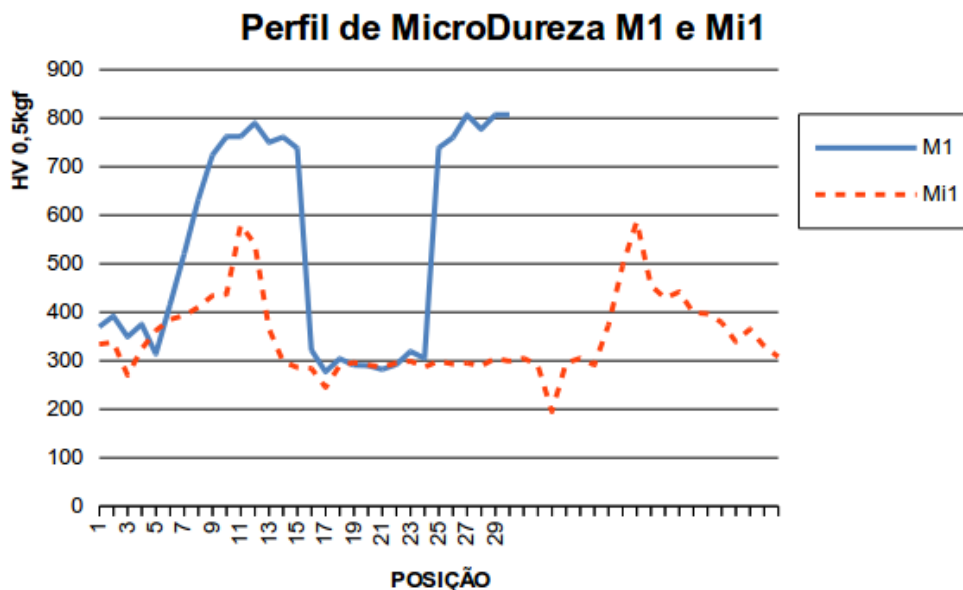


Figura 4.14 Perfil de durezas para as amostras M1 e Mi1

Na Figura 4.15 é mostrado os perfis de dureza das amostras M3 e Mi3. Não há muita diferença entre os perfis de dureza, só é notado que a amostra com indução apresenta uma largura maior de picos mas com uma média levemente menor. que o sistema convencional.

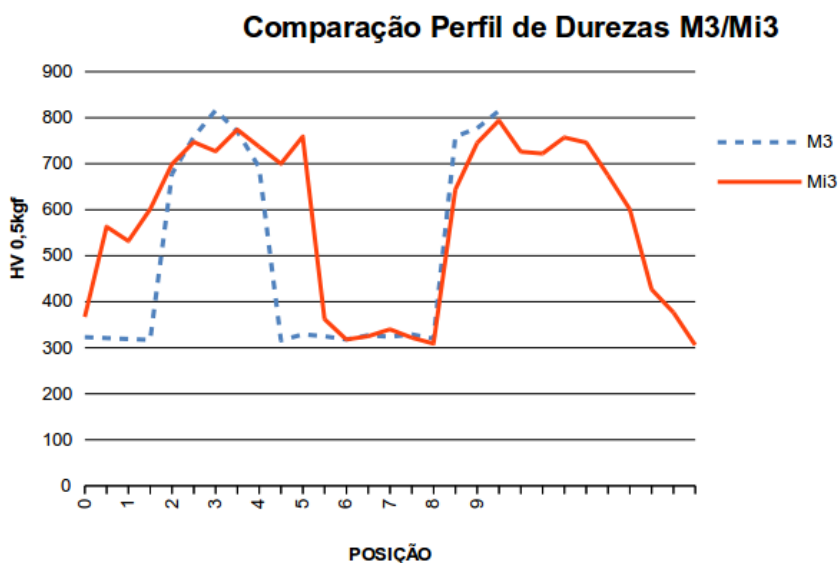


Figura 4.15 Perfis de dureza para as amostras M3 e Mi3

Foi feita uma análise mais minuciosa nos experimentos de velocidade intermediária, realizando assim a validação microestrutural com os resultados encontrados no perfil de microdurezas. A Figura 4.16 apresenta o perfil de dureza das 3 amostras soldadas com velocidade de 4,5mm/s: M2, Mi2 e Mi2i. A dureza máxima do sistema convencional, assim como as outras amostras somente soldadas com processo MIG, atingiu os patamares de máxima dureza possível para este aço, ou seja, a taxa de resfriamento da região alcançou a formação de 100% de martensita como é possível ver na Figura 4.17

mostrando a micrografia da zona afetada pelo calor constituída de 100% martensita. Os valores de microdureza atingidas na amostra Mi2 são bastante semelhantes da amostra Mi1 o que condiz com a literatura deste aço reduzindo os picos de dureza levemente, a Figura 4.18 mostra a micrografia desta região que aparentemente apresenta formação de martensita e bainita superior. Já na amostra onde foi executado um novo passe somente com a indução a maior dureza teve uma redução bárbara em relação aos demais experimentos, pode ser visto na Figura 4.19 a formação de martensita revenida.

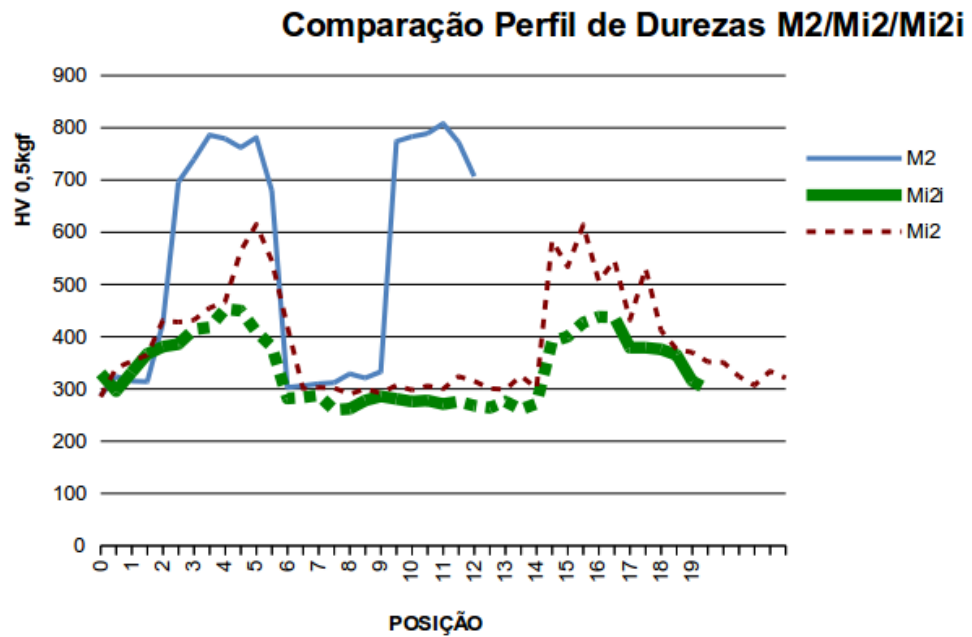


Figura 4.16 Perfil de durezas comparativo das amostras M2, Mi2 e Mi2i

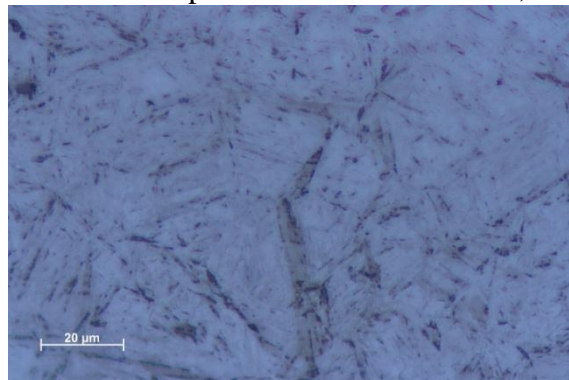


Figura 4.17 Zona Afetada pelo Calor da amostra M2 mostrando microestrutura 100% martensítica. Reagente Nital 2%.

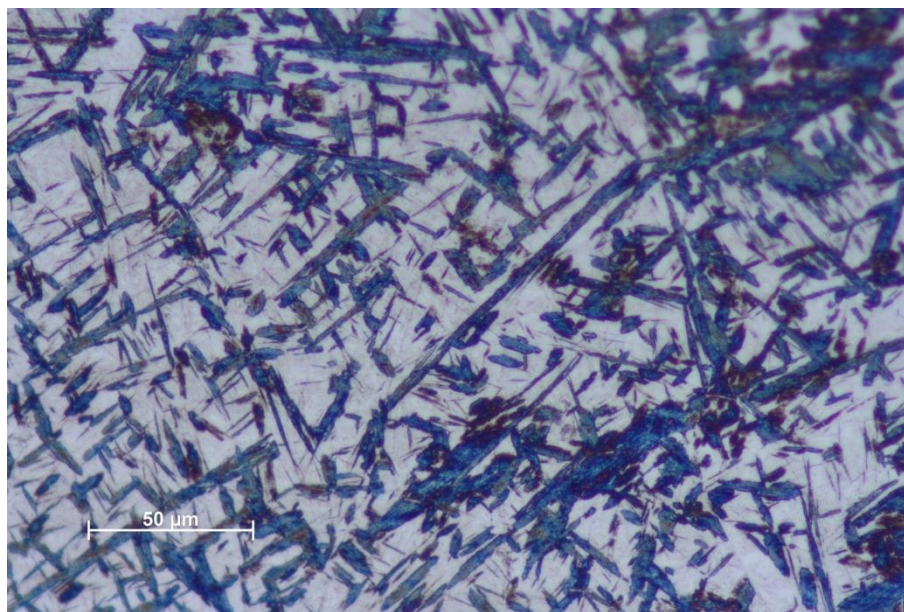


Figura 4.18 Zona Afetada pelo Calor da amostra Mi2 mostrando a formação de martensita e bainita superior. Reagente Nital 2%.

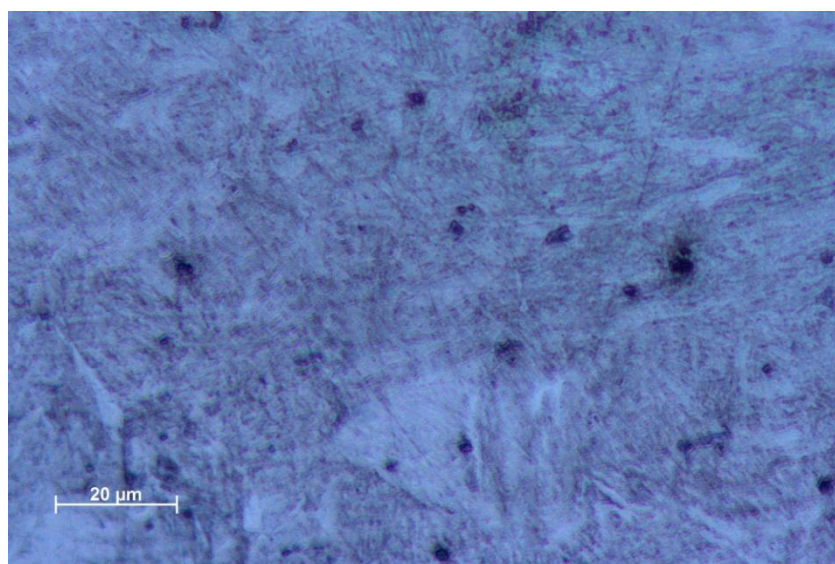


Figura 4.19 Zona Afetada pelo calor do experimento Mi2i mostrando microestrutura de martensita revenida. Reagente Nital 2%.

É possível traçar uma curva da máxima dureza encontrada pela energia do processo de soldagem empregado a fim de avaliar a tendência de encontro dos processos. Este gráfico é mostrado na Figura 4.20. Nota-se que para menores energias de soldagem, ou seja, para maiores velocidades de processo, as máximas durezas encontradas na junta soldada tendem a se igualar. Para o processo de pós-aquecimento não é possível avaliar nenhuma tendência pois temos apenas um ponto na curva, porém é interessante notar o ponto de partida de máxima dureza está bem abaixo dos demais e iniciando com energia

intermediária, em trabalhos futuros a avaliação do comportamento desse método de processamento (aquecimento indutivo pré e pós processo de soldagem MIG) é interessante em vias de se obter o modo de comportamento das durezas e outras propriedades mecânicas das juntas soldadas (não avaliadas neste trabalho).

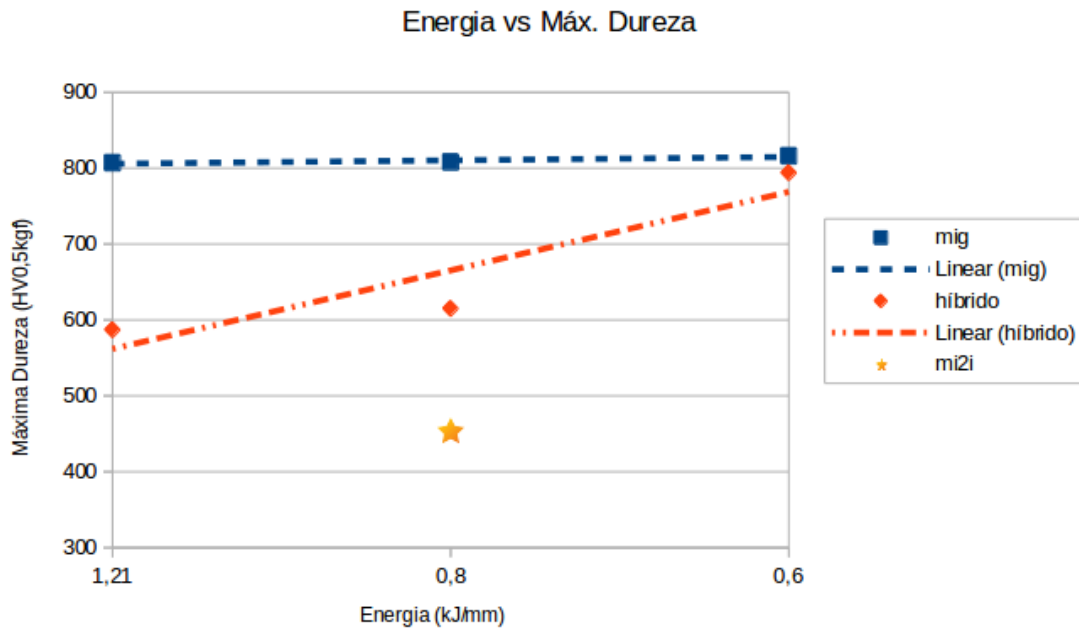


Figura 4.20 Máxima dureza vs Energia do processo de soldagem.



## 5. CONCLUSÕES

A realização deste trabalho permitiu validar positivamente os resultados esperados, dando uma ideia quantitativa dos efeitos da utilização de um sistema de aquecimento indutivo como equipamento auxiliar no processo de soldagem.

Os efeitos de penetração em juntas soldadas foram aproximadamente duas vezes maiores com o sistema híbrido em comparação com o sistema convencional, tanto na soldagem do aço estrutural ASTM A36 quanto para o aço SAE 5160.

Também os perfis de dureza realizado nos experimentos com o aço SAE 5160, mostraram considerável redução nos gradientes desta propriedade, o que nos denota uma possível melhoria no desempenho mecânico da junta, fato este que é imprescindível na construção de equipamentos, utilizando esse método de conexão permanente.

A mudança na geometria do cordão de solda é um fato a ser considerado, pois reforços excessivos nos cordões podem levar à queda de desempenho da junta ao gerar estados triaxiais de tensão, bem como é fator relevante economicamente, em vista que o metal ali depositado não desempenha nenhum fator positivo na resistência da solda (apesar do que o nome sugere), muito pelo contrário, pode ter efeitos negativos.

Portanto, em primeiro momento a utilização de um sistema híbrido de soldagem, com a utilização de um pré-aquecimento indutivo localizado, mostra vantagens tanto nos fatores de processo, como a melhora na penetração e redução e estabilização do reforço, quanto nos fatores metalúrgicos pela redução no gradiente de durezas ao longo da junta soldada. Porém é imperativo realizar mais estudos, pois são muitas as variáveis presentes no sistema que podem ser fatores decisivos na avaliação da adoção ou não desta tecnologia no uso industrial.

## 6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

São sugestões para trabalhos futuros:

- Estudo sobre a influência da distância tocha indutor, parâmetro não variado no estudo e que pode ter influência na penetração e nos perfis de dureza.
- Utilização de um sistema composto por dois indutores fazendo o pré e pós aquecimento indutivo em apenas uma etapa.
- A continuidade dos estudos para o processo de soldagem TIG e MIG em comparação com o sistema Híbrido, através de ensaios de tração, fadiga, tenacidade à fratura e dobramento.
- A variação das espessuras de chapa para a verificação da influência dos modos de resfriamento 2D e 3D nos resultados de penetração.

## 7. BIBLIOGRAFIA UTILIZADA

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 87/2000**: Aços Carbono e Ligados para Construção Mecânica-Designação e Composição Química. Rio de Janeiro: ABNT, 2000.

**AWS A5.18-05** Specification for Carbon Steel Electrodes and Rods for Gas Shielded Arc Welding. American Welding Society, 2005.

**AWS D1.1/D1.1M:2004** Structural Welding Code – Steel. American Welding Society, 2004.

Jones, J. **Hybrid Induction Arc Welding Reduces Weld Distortion And Boosts Productivity**. Advanced Materials and Processes, p. 34 - 37, Jan, 2015.

Kou, S. **Welding metallurgy – second edition**. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 2002.

Machado, I. G. **Soldagem e técnicas conexas: processos**. Porto Alegre: editado pelo autor, 1996.

Marques, P. V. et al. **Soldagem: fundamentos e tecnologia – 3a edição atualizada**. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2009.

Pritchard, D. **Soldering, Brazing & Welding – A Manual of Techniques**. Crowood Press, 2001.

Wainer, E.; Brandi, S. D. M.; Mello, F. D. H. **Soldagem Processos e Metalurgia**. 3a Edição, Edgard Blücher Ltda., 1992.