

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas

Dissertação de Mestrado

**"EFEITO DA CONCENTRAÇÃO DO FLUXO NA SOLDAGEM ATIG DE AÇO  
INOXIDÁVEL AUSTENÍTICO"**

Autor: Pedro Colen Neto

Orientador: Prof. Paulo J. Modenesi

Junho/2012

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas

Pedro Colen Neto

"EFEITO DA CONCENTRAÇÃO DO FLUXO NA SOLDAGEM ATIG DE AÇO  
INOXIDÁVEL AUSTENÍTICO"

Dissertação de Mestrado apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia  
Metalúrgica e de Minas da Universidade Federal de Minas Gerais

Área de concentração: Metalurgia de Transformação

Orientador: Prof. Paulo J. Modenesi

Belo Horizonte

Escola de Engenharia da UFMG

2012

Dedico este trabalho aos meus pais José Pedro Dias Colen e Gema A. Rola Colen e ao meu filho Artur Bomtempo Colen por ser a constante inspiração e incentivo.

Agradeço a todos aqueles que, direta ou indiretamente, colaboraram na preparação deste trabalho e, em particular:

Ao professor Paulo José Modenesi pela seriedade, competência e profissionalismo demonstrados durante a orientação deste trabalho.

Ao laboratorista Eustáquio Roberto Apolinário e à aluna de iniciação científica, Kássia Batista Dias, do curso de Engenharia Metalúrgica da UFMG, pela colaboração na realização dos experimentos.

Aos meus pais José Pedro e Gema; minha irmã Cristina pelo incentivo e apoio. Esposa Cátia e meu filho Artur por ser a inspiração constante.

À Nívia B. Coelho pelo seu incentivo em tudo que fiz na vida. Sua presença esteve comigo também neste trabalho.

Aos colegas do IFMG – Campus Betim em especial André, Célio, Denise, Ezequiel, Flávio, Evanilton, Priscilla, Helbert e Vinícius pelas conversas, trocas de ideias e apoio durante o trabalho.

## Sumário

LISTA DE FIGURAS .....	vii
LISTA DE TABELA.....	x
LISTA DE NOTAÇÕES .....	xii
RESUMO .....	9
CAPITULO 1: INTRODUÇÃO .....	10
CAPITULO 2: OBJETIVOS .....	12
CAPITULO 3: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	13
3.1. Soldagem TIG.....	13
3.2. Soldagem a plasma .....	16
3.3. Soldagem ATIG.....	18
3.3.1. Fluxos para soldagem ATIG .....	21
3.3.2. Geometria do cordão de solda.....	22
3.3.3. Construção do arco.....	23
3.3.4. Influência da tensão superficial na poça de fusão.....	25
3.3.5. Rendimento teórico ou eficiência de fusão ( $\eta_f$ ) .....	30
CAPITULO 4: METODOLOGIA.....	31
4.1. Introdução.....	31

4.2. Equipamentos e materiais.....	32
4.2.1 Equipamentos.....	32
4.2.2 Materiais .....	36
4.3. Procedimento Experimental.....	37
4.3.1. Preparação do fluxo e dos corpos de prova.....	37
4.3.2. Procedimento de soldagem .....	38
4.3.3. Testes de soldagem.....	39
4.3.4. Análise macrográfica .....	41
CAPITULO 5: RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	45
5.1. Introdução.....	45
5.2. Efeito de diferentes densidades superficiais de fluxo ( $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ) com e sem componente oxidante ( $\text{KClO}_4$ ) – Bloco I.....	46
5.3. Efeito de diferentes densidades superficiais para o fluxo $\text{Cr}_2\text{O}_3$ simples – Bloco II .....	57
5.4. Efeito de diferentes densidades superficiais de dois fluxos combinados ( $\text{Cr}_2\text{O}_3$ e $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) – Bloco III .....	63
CAPITULO 6: CONCLUSÕES .....	68
CAPITULO 7: SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	69
CAPITULO 8: REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	70

**LISTA DE FIGURAS**

Figura 3.1	Soldagem TIG (esquemática)	13
Figura 3.2	Equipamento para soldagem TIG (esquemática)	15
Figura 3.3	Linha de tempo de surgimento dos processos de soldagem	16
Figura 3.4	Comparação entre os arcos nos processo TIG e Plasma	17
Figura 3.5	Diagrama esquemático da soldagem a plasma	18
Figura 3.6	Distribuição da densidade corrente para os processos TIG e ATIG.	19
Figura 3.7	Seções transversais dos cordões de solda em chapas de 5,0mm e 220 A (a) TIG convencional e (b – g) soldagem ATIG.	20
Figura 3.8	Aplicação na Soldagem ATIG	20
Figura 3.9	Soldagem ATIG	21
Figura 3.10	Mecanismo de constrição do arco com fluxo ativo	23
Figura 3.11	Mecanismo proposto para constrição do arco	24
Figura 3.12	Representação dos mecanismos propostos para o fluxo de metal líquido na poça de fusão	26
Figura 3.13	Representação esquemática das forças de Marangoni atuantes em uma poça de fusão	27
Figura 3.14	Mecanismo do Efeito Marangoni: (a) $\frac{\partial \sigma}{\partial T} < 0$ e (b) $\frac{\partial \sigma}{\partial T} > 0$	28
Figura 4.1	Representação esquemática da metodologia usada: (a) Blocos de testes.	31

## (b) Sequência de operações usuais em cada bloco

Figura 4.2	Fonte de energia transistorizada INVERSAL 300 da IMC	32
Figura 4.3	Medição das massas de fluxo	33
Figura 4.4	Materiais usados na preparação e aplicação dos fluxos	34
Figura 4.5	Dispositivo para corte da fita adesiva (dimensões em mm).	34
Figura 4.6	Corpo de prova (dimensões em mm)	36
Figura 4.7	Preparação do corpo de prova para a deposição da camada de fluxo	37
Figura 4.8	Corpo de prova com fluxo aplicado	38
Figura 4.9	Representação esquemática da montagem experimental	41
Figura 4.10	Representação dos corpos de provas cortados para análise macrográfica	42
Figura 4.11	Região fundida na raiz de um cordão ATIG delineada para a determinação de sua área. (a) desenho esquemático mostrando a área fundida na raiz e (b) foto da raiz do cordão.	43
Figura 4.12	Medição de Ferrita $\delta$ retida	43
Figura 5.1	Exemplo de corpo de prova após a soldagem	45
Figura 5.2	Variação de corrente (curva superior) e tensão durante um teste de soldagem (bloco I)	47
Figura 5.3	Seções transversais de cordões TIG e ATIG (bloco I)	50
Figura 5.4	Variação da largura da raiz da solda ATIG com fluxos de pureza IND com e sem adição de $KClO_4$ (bloco I).	55
Figura 5.5	Microestrutura das ZF de três amostras com diferentes densidades	56



	superficiais (bloco I)	
Figura 5.6	Varição da tensão ATIG e TIG em função da densidade superficial (bloco II)	58
Figura 5.7	Seções transversais de cordões TIG e ATIG (bloco II)	59
Figura 5.8	A área da seção transversal na soldagem TIG e ATIG em função da densidade superficial (bloco II)	61
Figura 5.9	Largura da Raiz (bloco II)	63
Figura 5.10	Tensão média em função da relação do $Al_2O_3$ e a quantidade de pó total (bloco III)	64
Figura 5.11	Seções transversais de cordões TIG e ATIG (bloco III)	65
Figura 5.12	Largura da Raiz (LR) em função da densidade superficial do $Cr_2O_3$	66

**LISTA DE TABELA**

Tabela IV.1	Composição química do AISI 304 – faixa de valores	36
Tabela IV.2	Condições de soldagem	38
Tabela IV.3	Sequência de corpos de prova com respectivos fluxos e dopantes (bloco I)	39
Tabela IV.4	Sequência de corpos de prova com respectivos fluxos (bloco II)	40
Tabela IV.5	Sequência de corpos de prova com respectivos fluxos (bloco III)	40
Tabela IV. 6	Corpos de prova selecionados para medição de Ferrita- $\delta$	44
Tabela V.1	Valores de tensão ( $\bar{U}$ ) e corrente ( $\bar{I}$ ) – (bloco I)	46
Tabela V.2	Valores médios e desvios padrões de $\Delta U$ (bloco I)	48
Tabela V.3	Valores médios ( $\bar{x}$ ) e desvios padrões ( $\bar{s}$ ) da largura do cordão (bloco I)	50
Tabela V.4	Valores da área da seção transversal e desvios padrões da zona fundida na soldagem ATIG (bloco I)	52
Tabela V.5	Valores médios e desvios padrões da área da seção transversal da zona fundida na soldagem ATIG (bloco I)	53
Tabela V.6	Valores das áreas fundidas e da Largura da Raiz (LR) – (bloco I)	54
Tabela V.7	Valores médios e desvios padrões da Largura da Raiz (LR) – (bloco I)	54

Tabela V.8	Valores médios e desvios padrões das porcentagens de ferrita $\delta$ (bloco I)	55
Tabela V.9	Valores de tensão ( $\bar{U}$ ) e corrente ( $\bar{I}$ ) – (bloco II)	57
Tabela V.10	Valores médios ( $\bar{x}$ ) e desvios padrões ( $\bar{s}$ ) da largura do cordão (bloco II)	60
Tabela V.11	Valores médios e desvios padrões das porcentagens de ferrita $\delta$ (bloco II)	62
Tabela V.12	Valores de tensão e corrente para os testes (bloco III)	63
Tabela V.13	Valores médios ( $\bar{x}$ ) e desvios padrões ( $\bar{s}$ ) da largura do cordão (bloco III)	66
Tabela V.14	Valores médios e desvios padrões das porcentagens de ferrita $\delta$ (bloco III)	67

## LISTA DE NOTAÇÕES

a	Difusividade térmica [ $m^2/s$ ]
A	Ampère
A	Arraste aerodinâmico
ATIG	Activated Tungsten Inert Gas – TIG com adição de fluxo
B	Convecção natural de calor
Conc.	Concentração
CP	Corpo de prova
$\Delta H_f$	calor latente de fusão [J/kg]
E	Efeito Eletromagnético
ESP	Fluxo considerado puríssimo
eV	Elétron-volt
GMAW	Gas Metal Arc Welding
GTAW	Gas Tungsten Arc Welding
$(H_{T \text{ Fusão}} - H_{T \text{ Inicial}})$	quantidade de energia necessária para aquecer o material do cordão desde a sua temperatura inicial até a sua temperatura de fusão [J/kg]
I	Corrente elétrica [A]
$\bar{I}$	Média da corrente elétrica [A]
IND	Fluxo industrial
L	Comprimento característico [m]
LR	Largura da raiz do cordão de solda
$M_a$	Número de Marangoni
$m_w$	massa do metal que foi fundido para formar o cordão de solda [kg]
P/L	Penetração/Largura

PAW	Plasma Arc Welding
$q$	Calor gerado pela fonte [J]
$\bar{s}$	Média do desvio padrão
$T$	Temperatura [°C]
$t$	Tempo [ms]
TIG	Tungsten Inert Gas
$U$	Tensão [V]
$\Delta U$	Variação de tensão [V]
$\bar{U}$	Média da tensão [V]
ZF	Zona fundida
ZTA	Zona Termicamente Afetada
$x$	Coordenada no plano da superfície do líquido [m]
$\bar{x}$	Média de medições lineares [mm]
$\gamma$	Tensão superficial [N/m]
$\eta$	Viscosidade dinâmica [N.s/m <sup>2</sup> ]

## RESUMO

A soldagem ATIG é uma variante simples do processo TIG convencional que permite aumentar a penetração da solda e, por exemplo, possibilitar a soldagem em um passe, com penetração total e sem abertura de chanfro, para juntas com espessura de 5 mm ou mais. Diferentes mecanismos foram propostos para explicar este efeito com destaque para o da contração do arco pela presença de íons negativos e o da alteração no movimento de metal líquido na poça de fusão associada a variações da tensão superficial com a temperatura. O presente trabalho foi dividido em três blocos de testes. Avalia-se, no primeiro bloco, o efeito na morfologia do cordão de solda da quantidade de um fluxo (óxido de cromo III,  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ), de seu grau de pureza e, também, da presença de um aditivo (um composto altamente oxidante) no formato do cordão. O segundo bloco de testes avaliou de forma mais detalhada e abrangente o efeito da densidade superficial do fluxo simples de  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ . Finalmente, o terceiro bloco de testes estudou o efeito da adição de alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), considerada como um componente relativamente inerte ou pouco ativo, ao fluxo de  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ . Os três blocos de testes consistiram na deposição de cordões sobre chapa de aço inoxidável austenítico ABNT 304 com 5 mm de espessura. Para todos os testes foram medidos os sinais elétricos (corrente e tensão) durante a soldagem e, em seções transversais dos cordões, a largura, a penetração e a área do cordão. Os resultados indicaram uma pequena variação na tensão de soldagem (aumento inferior a 1 V) na passagem da soldagem TIG para a ATIG. Como esperado, a concentração superficial de fluxo afetou a penetração da solda, sendo obtida penetração total nos testes com maior concentração de fluxo, independentemente de seu grau de pureza. Por outro lado, o aditivo mostrou um efeito contrário ao esperado reduzindo a penetração do cordão. O fluxo de  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  puro em maiores densidades superficiais apresentou aumento na penetração, já a mistura  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  e  $\text{Al}_2\text{O}_3$  causou uma redução na penetração. Os resultados obtidos são discutidos considerando os mecanismos propostos para o efeito ATIG.

---

## CAPITULO 1: INTRODUÇÃO

O processo de soldagem a arco com eletrodo de tungstênio, conhecido também como GTAW (Gas tungsten arc welding) – ou simplesmente TIG (Tungsten Inert Gas) – é um processo no qual a união é obtida pelo aquecimento dos materiais por um arco estabelecido entre um eletrodo não consumível de tungstênio e o material de base. Pode ser utilizado com ou sem material de adição. A proteção da região do arco e da zona da solda é feita por um gás inerte ou mistura de gases <sup>[1]</sup>. É um processo utilizado frequentemente em juntas cuja qualidade e estética do cordão são necessárias. Devido ao alto grau de proteção da poça de fusão por gás de proteção utilizado neste processo; aços inoxidáveis são amplamente soldados por GTAW <sup>[2]</sup>.

O processo é considerado indispensável em situações que exigem alta qualidade na solda produzida com equipamento de custo relativamente baixo; porém tem como desvantagem a capacidade de penetração relativamente baixa principalmente em operações de soldagem em um único passe <sup>[2]</sup>. Segundo Modenesi e colaboradores <sup>[3]</sup>, a espessura mais comum da junta a ser soldada em um único passe para este processo variaria entre 0,2 e 3,0mm.

O processo de soldagem a plasma (PAW – Plasma Arc Welding), baseado no processo GTAW, apresenta como diferença fundamental, a utilização de um bocal extra (bocal constritor) que causa a concentração (constricção) do arco elétrico. O PAW pode operar em modo “keyhole”. Nesta forma de operação, um furo que atravessa a junta em toda a sua espessura na poça de fusão é formado. Em torno deste furo, o metal líquido escoar e solidifica na parte posterior da poça de fusão. Soldas obtidas com esta forma de operação chegam a ter penetração total na espessura da junta de até 10 mm em um único passe <sup>[1,3]</sup>. Porém, de uma forma geral, a soldagem a plasma é muito mais complexa e possui custos iniciais e de operação maiores quando comparados aos do processo GTAW <sup>[2]</sup>.

O processo ATIG (Active Flux TIG Welding) é uma variante do processo convencional TIG. Foi desenvolvido no Paton Institute of Electric Welding no início da década de 1960 para soldagem de Titânio <sup>[4]</sup>. O equipamento utilizando é o mesmo do processo TIG convencional sem a necessidade de nenhum tipo de dispositivo especial. A

diferença encontra-se na adição de uma fina camada de um fluxo na superfície da junta antes da soldagem <sup>[5]</sup>.

Entre as diversas teorias desenvolvidas para explicar o aumento de penetração do processo ATIG, há duas mais citadas: (a) a constrição do arco a partir de reações entre este e o fluxo, causando um aumento na densidade de corrente no seu centro e (b) a inversão no sentido do movimento de convecção do metal líquido na poça de fusão em função de alterações no valor de tensão superficial do metal <sup>[5]</sup>.

Os fluxos utilizados no processo ATIG possuem formulações bastante amplas entre óxidos e halogênios <sup>[5]</sup>.

Os halogênios, fluoretos de cálcio, fluoretos de alumínio são atuantes na constrição de arco em ligas de titânio, promovendo maior penetração na soldagem <sup>[4]</sup>.

Diversos trabalhos <sup>[4, 9, 15, 23, 24]</sup> demonstraram a influência de fluxos compostos no aumento da penetração no cordão de solda.

Modenesi e colaboradores <sup>[3]</sup> já demonstraram a utilização de fluxos simples alcançam até 300% de acréscimo na penetração do ATIG comparado com o TIG convencional.

Este trabalho apresenta um estudo sobre o processo ATIG em aço inoxidável austenítico ABNT 304, visando identificar a influência da quantidade de fluxos simples aplicada no formato do cordão.



## **CAPITULO 2: OBJETIVOS**

Realizar um estudo do processo de soldagem ATIG em aço inoxidável austenítico com fluxos simples a base de  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ . Serão focados os efeitos na morfologia do cordão e nas características operacionais do processo de soldagem dos seguintes fatores principais:

- A quantidade aplicada deste fluxo sobre a peça medida pela sua densidade superficial ( $\text{g}/\text{m}^2$ );
- A adição ao  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  do perclorato de potássio ( $\text{KClO}_4$ ) como um componente altamente oxidante.
- A adição ao  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  do óxido de alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) como componente inerte.

## CAPITULO 3: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 3.1. Soldagem TIG

O processo TIG ou GTAW teve sua investigação inicial na década de 1920, utilizando hélio para proteção da poça de fusão e foi patenteado no fim da desta década. Sua utilização, porém, foi intensificada com o início da Segunda Grande Guerra aperfeiçoar a soldagem de materiais de fácil oxidação como o alumínio e o magnésio, em bancos de aviões. Atualmente além do alumínio e magnésio, o processo é amplamente utilizado para soldagem de ligas de titânio e aços inoxidáveis <sup>[2 e 6]</sup>.

O processo utiliza um eletrodo não consumível de tungstênio protegido por gases inertes, normalmente o argônio, o hélio, ou uma mistura desses gases fornecidos através da tocha de soldagem. O arco elétrico é produzido pela passagem da corrente elétrica através do gás de proteção ionizado <sup>[2]</sup>.

Na soldagem TIG, pode-se adicionar material ou não, quando não há adição de material, a soldagem é denominada “autógena” <sup>[2]</sup>. A soldagem autógena é adequada na união de tubulações bem como na união de chapas com tubos. Em componentes de pequena espessura permite a realização de soldas com um bom acabamento e um alto nível de qualidade através de ajustes nos parâmetros de soldagem <sup>[4]</sup>.

O eletrodo de tungstênio não participa da formação da solda, tendo função da manutenção do arco a elevadas temperaturas. A Figura 3.1 mostra um detalhe da tocha neste processo.

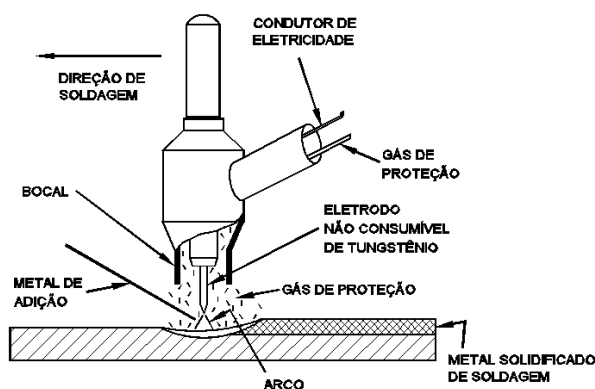


Figura 3.1 – Soldagem TIG (esquemática) <sup>[2]</sup>

---

O eletrodo de tungstênio tem comumente adicionadas a ele pequenas quantidades de óxidos de metais diferentes, particularmente de tório, cério ou tântalo. Os óxidos exercem a função de facilitar a emissão de elétrons pelo eletrodo [7].

O arco elétrico neste processo é bastante estável, suave produzindo soldas com boa apresentação e acabamento exigindo pouco ou até nenhuma limpeza pós-soldagem [1].

Das características mais importantes deste processo destaca-se o excelente controle da energia transferida para a peça permitindo a soldagem de materiais considerados de difícil soldabilidade com bons resultados. Ainda, se destaca a possibilidade de se soldar grande gama de tipo de materiais, com ampla faixa de espessuras, tendo fonte de calor concentrada minimizando distorções ao material soldado. Porém, possui, em geral, uma baixa taxa de deposição (que pode ser melhorada com técnicas especiais, por exemplo, o uso de arame quente) e um baixo rendimento produtivo devido à baixa penetração do processo e alto custo do equipamento quando comparado a outros processos convencionais [1, 6].

O equipamento utilizado para soldagem TIG é constituído de uma fonte de energia elétrica, um ignitor de alta frequência, uma fonte de gás de proteção e uma tocha de soldagem. A Figura 3.2 ilustra o equipamento básico do processo TIG.

O ignitor de alta frequência tem como função, gerar um sinal de alta frequência e alta tensão com valores aproximados de 5kHz e 3kV; promovendo a ionização da coluna de gás entre o eletrodo e a peça permitindo a abertura do arco elétrico dando início ao processo com baixos valores de tensão elétrica da fonte (entre 60 e 80V) [1]. Durante a soldagem com corrente contínua, o ignitor é mantido desligado após a abertura do arco. O arco elétrico pode ainda ser estabelecido através de outros métodos, como por exemplo, através de um arco piloto ou através do toque do eletrodo à peça.

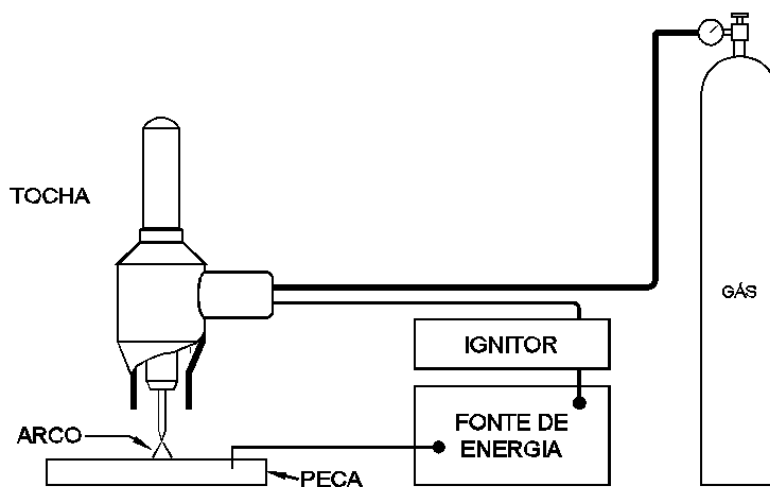


Figura 3.2 – Equipamento para soldagem TIG (esquemática). Baseado em <sup>[1 e 2]</sup>

Algumas das variáveis primárias do processo TIG são: tensão elétrica, corrente elétrica, velocidade de avanço e gás de proteção. A fonte de energia usada é do tipo corrente constante podendo ser contínua, alternada ou pulsada de acordo com a aplicação <sup>[1,2]</sup>.

O processo tem como principais vantagens quando comparado com outros processos de soldagem a arco: qualidade superior do cordão de solda, comumente livre de defeitos; possibilidade de uso de forma autógena (sem metal de adição) em velocidade alta; excelente controle para a execução do passe de raiz; bom controle das variáveis de soldagem; possibilidade de ser utilizado em uma grande variedade de metais <sup>[2]</sup>.

O processo tem como desvantagens a limitação da espessura dos materiais que podem ser soldados em um único passe, a elevada sensibilidade da geometria do cordão de solda às variações na composição química do metal base e a baixa produtividade <sup>[4]</sup>. O limite da espessura soldável sem preparação nos aços é cerca de 3mm com uma corrente de 150 a 200A. Aumentando a corrente, a poça de fusão tende a aumentar mais na largura com apenas um pequeno ganho na penetração.

Pode-se alcançar, com o uso de hélio no gás de proteção, uma ligeira melhoria na profundidade cordão de solda, normalmente de 1 a 2mm. O hélio possui maior potencial de ionização (25 eV) do que o argônio (16 eV) <sup>[4]</sup>. Em geral, um menor valor de potencial de ionização resulta em um maior grau de ionização a uma dada

temperatura traduzindo em uma melhor estabilidade, maior facilidade de abertura do arco e em menores tensões de operação para um dado comprimento do arco [7].

Uma mistura de 70% de hélio, 25% de argônio e 5% de hidrogênio foi usada com sucesso para aumentar a penetração sem aumentar excessivamente a largura do cordão de solda em aços inoxidáveis austeníticos [4].

### 3.2. Soldagem a plasma

No início do século XX, os desenvolvimentos que levaram ao processo de soldagem a plasma se iniciaram com os estudos de Schoenherr (1909) sobre a constrição do arco a plasma [8]. O surgimento do processo de soldagem a plasma, por sua vez, é comumente datado na década de 1950, sendo, portanto posterior ao desenvolvimento do processo TIG [2 e 8]. A Figura 3.3 mostra o desenvolvimento dos processos de soldagem ao longo do tempo.

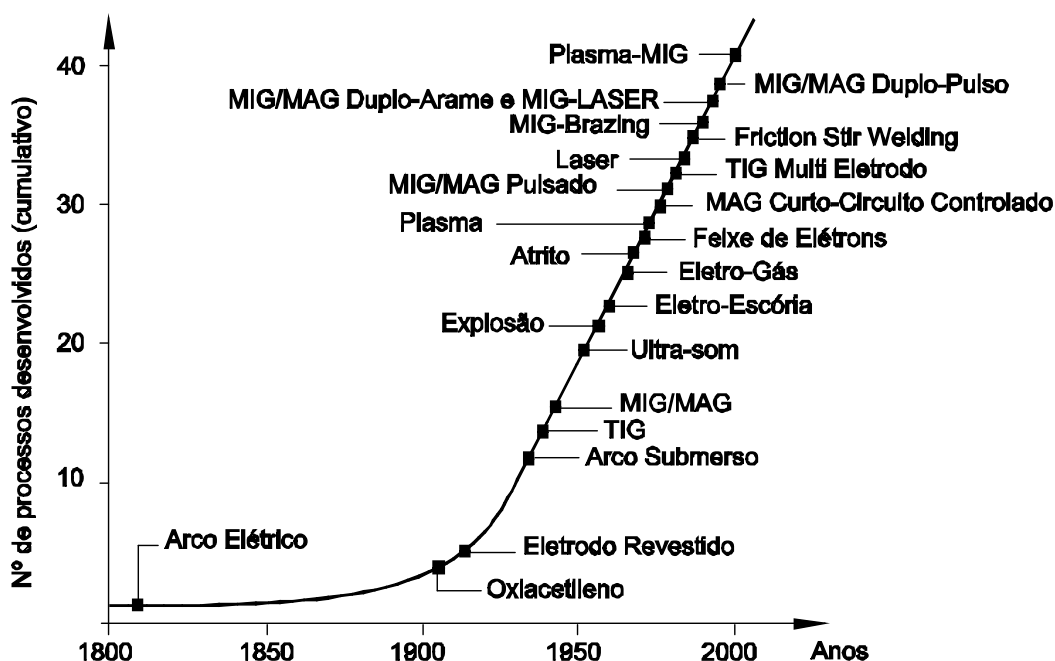


Figura 3.3 – Linha de tempo de surgimento dos processos de soldagem [8]

O processo de soldagem a plasma (Plasma Arc Welding – PAW) produz a coalescência do metal pelo aquecimento através de um arco constrição entre o eletrodo e a peça. [1, 2]

Assim como o TIG, o PAW utiliza um eletrodo não consumível, porém no processo a plasma há um bocal que limita o diâmetro e aumenta consideravelmente a intensidade da fonte de calor <sup>[1]</sup>. A tocha possui um bocal que cria uma câmara de gás ao redor do eletrodo. O aquecimento do gás o ioniza. Este gás ionizado é chamado de plasma, assim como no processo TIG. A diferença principal entre os dois processos encontra-se na constrição do arco ilustrada pela Figura 3.4, que mostra esquematicamente que o arco no processo de soldagem a plasma não é cônico como no processo TIG sendo menos sensível a variação de comprimento do arco <sup>[2]</sup>.

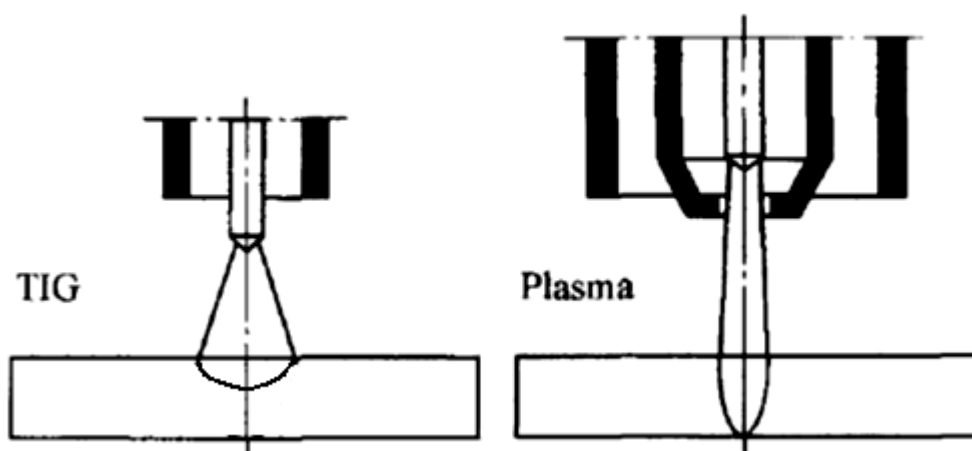


Figura 3.4 – Comparação entre os arcos nos processo TIG e Plasma. Baseado em <sup>[2]</sup>

O processo de soldagem a plasma pode ser considerado uma extensão do processo TIG que tem o arco com densidade de energia maior do que o deste processo. A constrição do arco é promovida pelo bocal constritor e resulta em um cordão de solda com maior penetração e menor largura quando comparado com o do processo TIG <sup>[1,2]</sup>.

O processo PAW possui boa aceitação nas indústrias aeroespacial e nuclear <sup>[2]</sup>. Este processo também está presente em indústrias cujas peças a serem soldadas são de aço inoxidável com espessura entre 3 e 8 mm <sup>[8]</sup>.

Como vantagem deste processo destaca-se: a possibilidade de soldar chapas de até 10 mm de espessura em um único passe o que possibilita o trabalho com a soldagem autógena em um maior número de casos do que seria possível no processo TIG <sup>[8]</sup>. Outra vantagem é a melhor estabilidade do arco, comparado com o processo TIG <sup>[2]</sup>.

Entre as limitações do processo destacam-se a pouca tolerância a desalinhamentos da junta (isto se dá pela pequena largura do arco elétrico devido à sua constrição), a exigência pela tocha do PAW de uma manipulação mais dificultosa quando comparada

à do TIG; o maior número de variáveis quando comparado com o processo TIG; maior volume de manutenção demandado pelo equipamento e finalmente o custo maior (comparado com o TIG) da tocha e demais equipamentos requeridos, sendo este considerado a maior limitação do processo [8].

O equipamento utilizado para soldagem plasma é constituído de uma fonte de energia elétrica associada um console de controle, uma fonte de gás protetor, uma tocha de soldagem onde é fixado o eletrodo de tungstênio e que conduz a corrente elétrica bem como a proteção gasosa, fonte de refrigeração da tocha, além de outros acessórios como temporizadores de fluxo de gás e controle remoto. A Figura 3.5 ilustra o equipamento básico para soldagem a plasma.

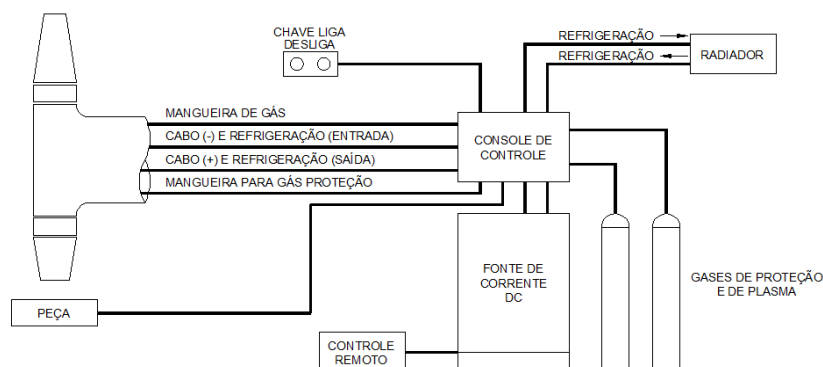


Figura 3.5 – Diagrama esquemático da soldagem a plasma. Baseado em [2].

### 3.3. Soldagem ATIG

O processo de soldagem ATIG (Active Flux Tungsten Inert Gas), também conhecido como TIG ativado, foi desenvolvido pelo Paton Institute of Electric Welding na antiga União Soviética, no início da década de 1960 para a soldagem de titânio [4]. Pode ser considerado como uma variante simples do processo TIG convencional, não requerendo nenhum equipamento especial [9].

No processo de soldagem ATIG, um fluxo é adicionado à peça a ser soldada sob a forma de uma fina camada. Este fluxo é composto de ingredientes ativos em forma de

pó que são misturados com acetona para fazer uma pasta a qual pode ser aplicada, por exemplo, como se fosse uma tinta, com pincel no componente que será soldado <sup>[4]</sup>.

Segundo Lucas & Howse <sup>[4]</sup> o efeito principal do fluxo responsável por alterar o formato do cordão seria uma constrição do arco. Segundo estes autores, particularmente em trabalhos com fluxos contendo elementos halogênicos, verifica-se, para o mesmo valor de corrente elétrica, uma visível constrição do arco no processo ATIG em comparação com o arco do processo TIG convencional. Os mesmos autores <sup>[4]</sup> associaram a constrição do arco ao aumento da densidade de corrente do anodo, aumentando a profundidade de penetração na poça de fusão em ligas de níquel e aço. A densidade da corrente no anodo seria aumentada de 1,5 a 2 vezes.

A Figura 3.6 ilustra a distribuição de densidade de corrente no anodo para os processos TIG convencional e para o ATIG. A comparação é feita entre dois aços no processo TIG sendo um dos aços que apresentam baixa penetração e outro “convencional”. O ATIG foi utilizado no aço de “baixa penetração” demonstrando uma densidade de corrente superior ao do aço convencional pelo processo TIG.

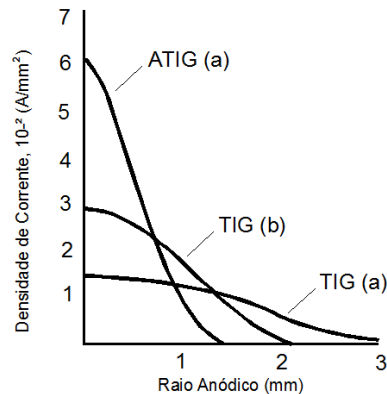


Figura 3.6 – Distribuição da densidade corrente para os processos TIG e ATIG. (a) um aço que apresenta baixa penetração e (b) um aço inoxidável austenítico convencional <sup>[4]</sup>

Segundo alguns autores <sup>[12]</sup>, a constrição do arco no ATIG seria responsável por um aumento na profundidade de penetração das soldas de 1,5 a 2,5 vezes em relação ao processo convencional TIG. Em chapas de aço inoxidável 304 já foram realizadas pesquisas <sup>[3 e 4]</sup> que demonstraram aumento de penetração de até 3,0mm maior que no processo convencional, mantendo o mesmo nível de corrente elétrica e aporte térmico como ilustra a Figura 3.7.



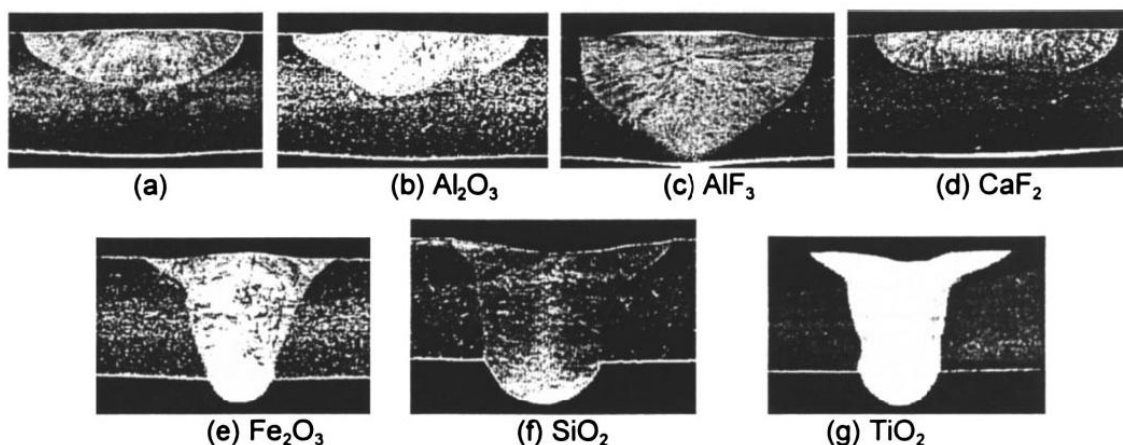


Figura 3.7 – Seções transversais dos cordões de solda em chapas de 5,0mm e 220A (a) TIG convencional e (b – g) soldagem ATIG. <sup>[3]</sup>

O fluxo aplicado no corpo de prova é formado por pós muito finos, principalmente, de óxidos e fluoretos e, frequentemente, usada em suspensão em acetona <sup>[3, 4 e 11]</sup>. Esta se evapora em poucos segundos após a aplicação do fluxo deixando aderida à peça uma fina camada. Frequentemente, em trabalhos de pesquisa <sup>[4, 11 e 12]</sup>, a aplicação do fluxo é feita com pincel (Figura 3.8), sendo indicadas espessuras de fluxo inferiores a 0,2mm.

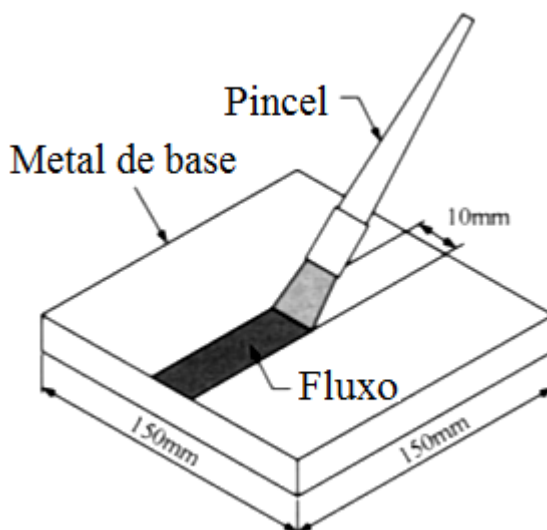


Figura 3.8 – Aplicação na Soldagem ATIG <sup>[12]</sup>.

O fluxo será parcialmente fundido e vaporizado durante a soldagem (Figura 3.9) pela ação do arco elétrico.

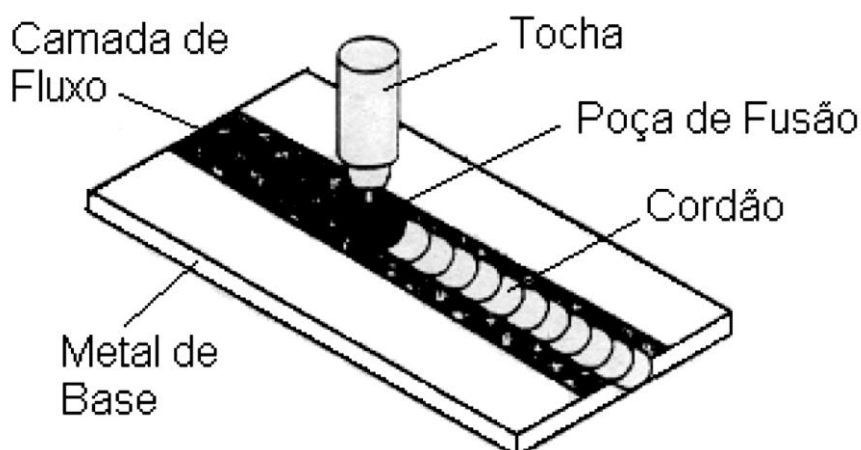


Figura 3.9 – Soldagem ATIG <sup>[4]</sup>.

A composição do gás de proteção utilizado no processo ATIG é comumente o argônio ou mistura de argônio com hélio. Segundo Lucas & Howse <sup>[4]</sup> utilizando-se 75% de hélio e 25% de argônio em um aço inoxidável consegue-se penetração total em corpo de prova de espessura de 6mm.

### 3.3.1. Fluxos para soldagem ATIG

O fluxo ativo formado de óxidos e/ou compostos halogênicos sob a forma de pó é, em geral, misturado com acetona a fim de formar uma espécie de pasta. Tal mistura é aplicada ao material a ser soldado e, durante a soldagem, o calor do arco funde e vaporiza parte do fluxo. Segundo resultados da literatura <sup>[3]</sup> pode-se atingir penetração de 6mm chegando a até 10mm em um único passe.

A falta de informações da composição do fluxo, em geral, não fornecidas pelo seu fabricante, dificulta a escolha do mesmo para a aplicação em diferentes tipos de materiais. Isso também dificulta a obtenção de dados qualitativos ou quantitativos a respeito do efeito dos fluxos sobre a composição química da solda, ou sobre suas propriedades mecânicas <sup>[5]</sup>.

Os óxidos utilizados em fluxos para soldagem ATIG podem ser de ferro, cromo, silício, titânio, manganês, níquel, cobalto, molibdênio e cálcio. Estes possibilitam melhorar a soldabilidade e aumentar a velocidade de soldagem em aços inoxidáveis <sup>[13]</sup>.

---

Modenesi e colaboradores <sup>[3]</sup> mostraram que fluxos simples formados de apenas um componente como  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{TiO}_2$  e  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  já são capazes de causar importantes acréscimo de penetração sem necessidade de mistura com outros óxidos.

A comparação entre fluxos compostos de  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  e  $\text{SiO}_2$  e fluxos simples como  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  e  $\text{SiO}_2$  mostrou variação na profundidade de penetração da soldagem com diferença de na faixa de 10% para o  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ , mostrando a eficiência de alguns fluxos simples <sup>[14]</sup>.

### 3.3.2. Geometria do cordão de solda

Diversos estudos <sup>[3, 4, 7, 10, 12]</sup> sugerem que a variação de composição química no metal ou no fluxo, além dos parâmetros de soldagem (velocidade de deslocamento, corrente e tensão) e outros detalhes operacionais podem causar significativas alterações no formato e na penetração do cordão de solda. O formato de cordão pode ser também influenciado pela condição de extração de calor no metal de base e pelo fluxo de metal líquido na poça de fusão.

É bem conhecido que o formato do cordão de solda está relacionado a um número grande de variáveis que apresentam uma complexa inter-relação em seus efeitos. Na soldagem ATIG, os estudos apontam para dois focos principais: o primeiro relacionado à constrição do arco elétrico e, o segundo, a variações na tensão superficial da poça de fusão. Por outro lado, existem indicações que o tipo de mecanismo causador do aumento de penetração depende da composição do fluxo, com a constrição do arco tendendo a ocorrer preferencialmente com fluxos a base de fluoretos e o efeito Marangoni (variação de tensão superficial) prevalecendo com fluxos a base de óxidos <sup>[18]</sup>.

### 3.3.3. Constrição do arco

Segundo algumas pesquisas realizadas [3, 4, 5, 15], os componentes do fluxo vaporizados pelo arco elétrico, no processo de soldagem ATIG, causariam uma ação de constrição neste, similar à causada pelo bocal constritor no processo de soldagem a plasma. A densidade de corrente e a força do arco atuando na poça de fusão seriam, desta forma, aumentados e, assim, a penetração ou a velocidade de soldagem também poderiam ser muito aumentadas em comparação com a soldagem TIG, considerando o mesmo nível da corrente. Os elementos eletronegativos (particularmente, flúor, cloro e oxigênio) causariam o efeito de constrição pela tendência a capturar elétrons livres nas camadas mais externas do arco, reduzindo, desta forma, a condutibilidade elétrica nestas regiões e aumentando a densidade de corrente nas regiões mais internas do arco. O resultado seria a constrição do arco, reduzindo o diâmetro da coluna. Esta constrição induziria um aumento na temperatura e na pressão do arco, aumentando a penetração da solda (Figura 3.10).

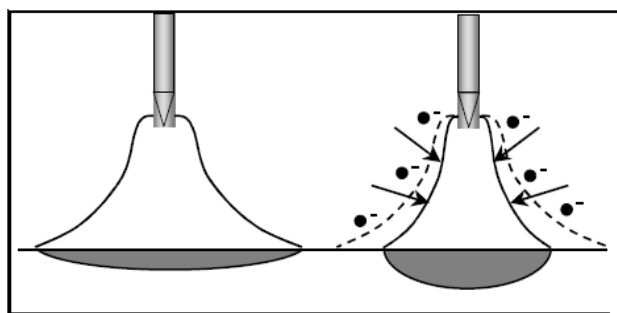


Figura 3.10 – Mecanismo de constrição do arco com fluxo ativo [16].

Com o aumento da densidade de corrente em sua região central e a redução do diâmetro da coluna de plasma (Figura 3.11), a energia transferida para o metal base seria aumentada. Como o grau de constrição do arco é determinado pela capacidade dos elementos do fluxo, que foram vaporizados no arco, de combinarem com os elétrons, elementos de maior eletronegatividade seriam mais eficazes para causar a constrição do arco. Por exemplo, quando um sal de flúor é dissociado, este elemento apresenta uma grande afinidade por elétrons causando uma forte constrição do arco.

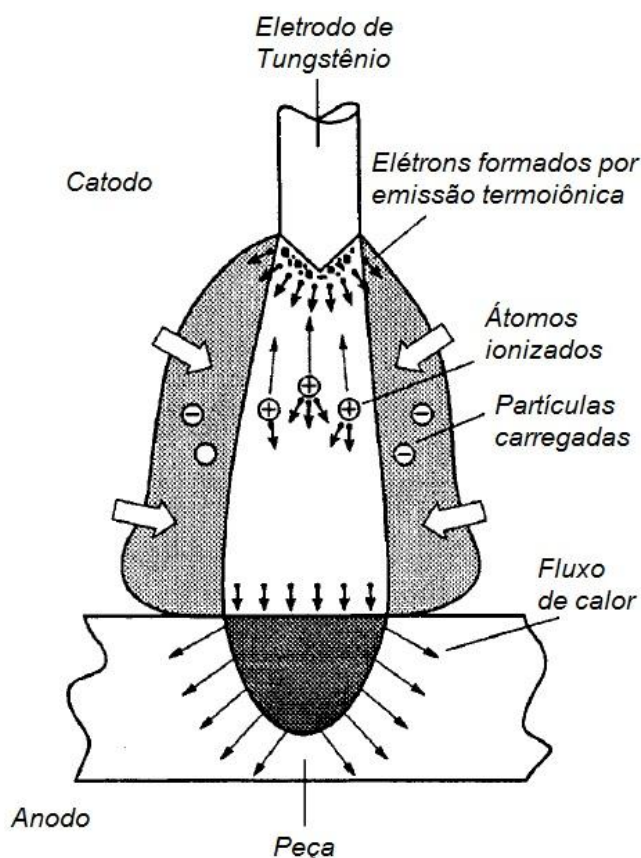


Figura 3.11 – Mecanismo proposto para constrição do arco<sup>[4, 17]</sup>

Os elementos de maior eletronegatividade devem ser mais eficazes para causar a constrição no arco, sendo assim, o oxigênio teria uma menor capacidade de causar a constrição do arco que os halogênios flúor e cloro. Porém, os óxidos metálicos mostram temperaturas de dissociação mais altas, em geral do que os sais halogênicos. Isto preveniria a liberação muito cedo do elemento eletronegativo e o que poderia melhorar sua eficácia na absorção de elétrons na região periférica do arco<sup>[4]</sup>.

### 3.3.4. Influência da tensão superficial na poça de fusão

Segundo outros autores <sup>[19, 20]</sup>, a penetração do cordão de solda seria aumentada pela ação de componentes do fluxo na poça de fusão no sentido de alterar a variação da tensão superficial do metal líquido com a temperatura. Neste caso, variações muito pequenas dos teores de elementos como oxigênio e enxofre teriam um efeito pronunciado na tensão superficial do metal líquido próximo de sua temperatura de fusão e causariam uma inversão na derivada da tensão superficial com a temperatura e, como consequência na direção do movimento de metal líquido na poça de fusão. Este parece ser atualmente, o mecanismo mais aceito para explicar o efeito ATIG e considera, entre outros possíveis efeitos, a transferência de pequenas quantidades de oxigênio do fluxo para a poça de fusão. Este mecanismo parece ser confirmado pela obtenção de um efeito similar na soldagem TIG com gases de proteção levemente oxidantes <sup>[19]</sup>.

Este mecanismo é embasado no trabalho de Carlo Giuseppe Matteo Marangoni <sup>[21]</sup> que, no final do século XIII, estudou a transferência de massa ao longo de uma interface entre um líquido de tensão superficial superior sobre o líquido circundante de com uma baixa tensão superficial e devido ao gradiente de tensão superficial.

O termo efeito Marangoni se refere a um número de fenômenos que resultam de gradientes de tensão superficial e consequentemente de pressão interfacial. Um fenômeno importante para a soldagem é a ocorrência de fluxos (isto é, movimento de fluidos) interfaciais espontâneos. Os gradientes de tensão superficial podem ser gerados por mudanças locais das variáveis que afetam o valor desta tensão, como concentração do soluto, temperatura e potencial elétrico interfacial <sup>[22]</sup>. No caso de processos de soldagem o que é considerado, como mais relevante, são os processos causados pela variação de temperatura na poça de fusão.

Assim, as variações na profundidade de penetração do cordão de solda resultariam de variações no padrão de movimento de metal líquido na poça de fusão afetando o transporte de calor na poça <sup>[24]</sup>.

O efeito Marangoni pode ser expresso pelo número adimensional ( $M_a$ ):

$$M_a = \frac{d\gamma}{dT} \cdot \frac{dT}{dx} \cdot \frac{L^2}{\eta \cdot a} \quad (3.1)$$

Onde:

- $M_a$  é o número de Marangoni [adimensional]
- $\frac{d\gamma}{dT}$  é a variação da tensão superficial com a temperatura
- $\frac{dT}{dx}$  é o gradiente de temperatura
- $L$  é o comprimento característico;
- $\eta$  é a viscosidade;
- $a$  é a difusividade térmica <sup>[25]</sup>

A Figura 3.12 representa esquematicamente o efeito do sinal de  $M_a$  no fluxo de metal líquido na poça e no formato do cordão. Esta Figura também mostra esquematicamente o efeito de outros fatores no fluxo de metal líquido.

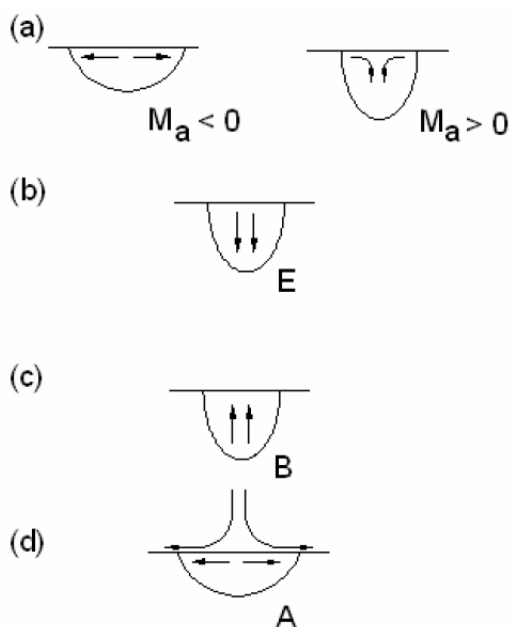


Figura 3.12 – Representação dos mecanismos propostos para o fluxo de metal líquido na poça de fusão: (a) Efeito Marangoni  $\{M_a > 0$  ou  $M_a < 0\}$ , (b) Efeito Eletromagnético  $\{E\}$ , (c) Convecção natural de calor  $\{B\}$  e (d) Arraste aerodinâmico  $\{A\}$ . <sup>[24]</sup>

O valor de  $M_a$  será negativo, considerando um gradiente térmico ( $dT/dx$ ) positivo, quando a tensão superficial diminuir com a temperatura, o que é observado em metais de alta pureza. A presença de elementos tensoativos, por sua vez, tende a reduzir a tensão superficial no líquido invertendo a sua variação com a temperatura e tornando, assim,  $M_a$  positivo <sup>[24]</sup>.

O sentido do fluxo de metal líquido é determinado pelo sinal de  $M_a$  devido ao efeito Marangoni. Para  $M_a < 0$ , Figura 3.13(a), o fluxo ocorrerá das regiões do centro para as regiões da borda da poça de fusão. Para  $M_a > 0$ , Figura 3.13(b), o fluxo ocorrerá das regiões das bordas para as regiões do centro da poça de fusão <sup>[24]</sup>.

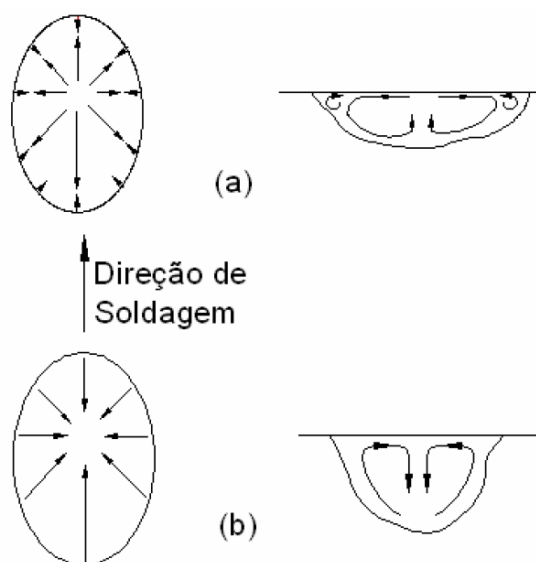


Figura 3.13 – Representação esquemática das forças de Marangoni atuantes em uma poça de fusão: (a)  $M_a < 0$ ; (b)  $M_a > 0$ . <sup>[24]</sup>

O perfil da solda depende grandemente da forma como o metal líquido se movimentava dentro da poça de fusão. A variação da tensão superficial ao longo da superfície da poça que induz a convecção de Marangoni. É usual a tensão superficial ( $\gamma$ ) diminuir com o aumento de temperatura ( $T$ ) ( $\frac{\partial \gamma}{\partial T} < 0$ ) para um metal puro. Nestes e em diversas ligas, conforme mostra à Figura 3.14(a), o movimento do metal líquido que ocorre na poça de fusão durante o processo TIG convencional é no sentido do centro da poça para as suas bordas. Desta forma, o fluxo de calor (contido no metal mais aquecido) é centro da poça de fusão para as bordas da poça <sup>[26]</sup>.



No processo ATIG os componentes do fluxo colocado na superfície da junta poderiam promover micro modificações da composição química na poça de fusão, causando a inversão no gradiente de tensão superficial e gerando uma inversão do movimento de metal líquido ( $\frac{\partial\sigma}{\partial T} > 0$ ). Desta forma, o metal mais aquecido, localizado no centro da poça de fusão, será direcionado para o fundo da poça, causando redução da largura do cordão e aumento na penetração. A Figura 3.14(b) ilustra o descrito.

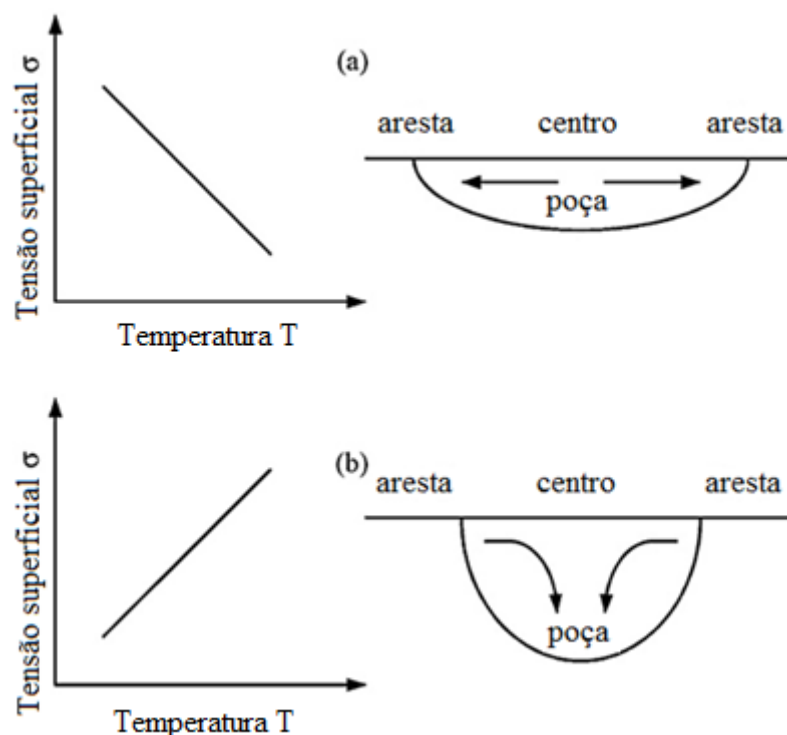


Figura 3.14 – Mecanismo do Efeito Marangoni: (a)  $\frac{\partial\sigma}{\partial T} < 0$  e (b)  $\frac{\partial\sigma}{\partial T} > 0$  [26]

Alguns elementos onde se destacam os do grupo VIA da tabela periódica (O, S, Se, Te) causariam uma forte redução na tensão superficial do líquido e modificando a relação entre a tensão superficial do metal ou da liga com a temperatura; outros elementos (N, P, Sb, além de alguns elementos halogênicos) teriam efeito similar [24]. Como resultado, para uma faixa limitada de temperatura acima do ponto de fusão, a tensão superficial do líquido passa a aumentar com a temperatura.

Elementos que não são tensoativos tais como Al, Si, Mn, Ti, Ca, Ce, La, C e Cr, também podem provocar mudanças na geometria da poça de fusão e conseqüentemente do cordão de solda. Estes elementos podem reagir com os

---

elementos tensoativos existentes e formar compostos, os quais não são ativadores de superfície, retirando desta forma, os elementos tensoativos da solução. Com isto, o efeito destes elementos no metal líquido pode ser até mesmo eliminado.

Nos aços inoxidáveis, as variações inesperadas na penetração do cordão de solda, observadas na década de 1970, foram inicialmente associadas com a presença de elementos como alumínio e titânio <sup>[23]</sup>. Associação similar foi estudada embora em sentido contrário <sup>[23, 24]</sup>, às alterações nos teores de enxofre e oxigênio. Os teores para os quais estes elementos produziram este efeito foram superiores a 60ppm para o enxofre e 40ppm para o oxigênio.

Pesquisadores <sup>[23]</sup> atribuíram o papel do alumínio neste fenômeno à sua capacidade de reagir com o oxigênio (elemento tensoativo em aços) na poça de fusão, para formar a alumina, a qual não afeta a tensão superficial dos aços. Na ausência de uma concentração substancial de outro elemento tensoativo como o enxofre, por exemplo, a elevada desoxidação da poça de fusão promoveria alterações na geometria do cordão de solda, produzindo soldas largas e rasas, semelhantes à representada na Figura 3.13(a).

Mecanismos adicionais, incluindo a fixação do arco em pontos de escória e o efeito da camada de fluxo como isolante elétrico e térmico, são citados, na literatura, para explicar a variação do formato do cordão observada na soldagem ATIG <sup>[27]</sup>.

Lu e colaboradores <sup>[28]</sup> avaliaram o efeito da quantidade superficial de fluxos de um componente ( $\text{Cu}_2\text{O}$ ,  $\text{NiO}$ ,  $\text{SiO}_2$  e  $\text{TiO}_2$ ) no formato do cordão e na concentração de oxigênio no metal de solda em testes realizados em chapas de aço SUS304 com 10 mm de espessura. Foi observado um aumento no teor de oxigênio com a quantidade de fluxo. Por outro lado, a razão entre a penetração e a largura do cordão tendeu a aumentar, passando por um máximo e depois se reduzindo.

### 3.3.5. Rendimento teórico ou eficiência de fusão ( $\eta_f$ )

O rendimento teórico de fusão ( $\eta_f$ ) é definido como a razão entre a energia teórica mínima necessária para a obtenção do cordão de solda (isto é, a energia necessária para aquecer o material do cordão até a sua temperatura de fusão e fundi-lo) e a energia efetivamente gasta no processo <sup>[31]</sup>:

$$\eta_f = \frac{m_w \cdot [(H_{T_{\text{fusão}}} - H_{T_{\text{inicial}}}) + \Delta H_f]}{q} \quad (3.2)$$

Onde:

- $m_w$  é a massa do metal que foi fundido para formar o cordão de solda (kg),
- $(H_{T_{\text{Fusão}}} - H_{T_{\text{Inicial}}})$  é a quantidade de energia necessária para aquecer o material do cordão desde a sua temperatura inicial até a sua temperatura de fusão (J/kg)
- $\Delta H_f$  é o seu calor latente de fusão (J/kg)
- $q$  é a calor gerado pela fonte (J)

O rendimento teórico de fusão pode ser um bom parâmetro para comparar um cordão de solda feito pelo processo TIG comparando-o com o processo ATIG sob os mesmos parâmetros de soldagem. Nestas condições a massa do metal será o padrão de diferenciação entre os dois processos.

O presente trabalho avalia o efeito da concentração do fluxo e de outros fatores na soldagem ATIG de aço inoxidável austenítico. Os testes de soldagem foram realizados em aço inoxidável austenítico – ABNT 304. Foram medidas as variações de tensão elétrica, medição do perfil do cordão de solda e medição do teor de ferrita  $\delta$  nos corpos de prova. A descrição detalhada da metodologia e equipamentos adotados neste trabalho será apresentada no próximo capítulo.

## CAPITULO 4: METODOLOGIA

### 4.1. Introdução

Neste capítulo descreve-se a metodologia utilizada no estudo da mudança de formato do cordão que ocorre na mudança do processo convencional (TIG) para o processo ATIG. Os cordões de solda foram feitos sobre chapa sem metal de adição.

Os componentes de fluxo utilizados foram o óxido de cromo ( $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ), o óxido de alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) e o perclorato de potássio ( $\text{KClO}_4$ ). Em um primeiro bloco de testes três fatores foram considerados: (a) densidade superficial de fluxo, (b) seu grau de pureza e (c) a presença de um componente oxidante (perclorato de potássio –  $\text{KClO}_4$ ).

Em um segundo bloco de testes foi utilizado o óxido de cromo ( $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ) com um maior intervalo de variação da densidade superficial de fluxo.

No terceiro e último bloco, o óxido de alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) foi usado junto com o óxido de cromo no fluxo. A Figura 4.1 mostra uma representação esquemática da metodologia adotada neste estudo.

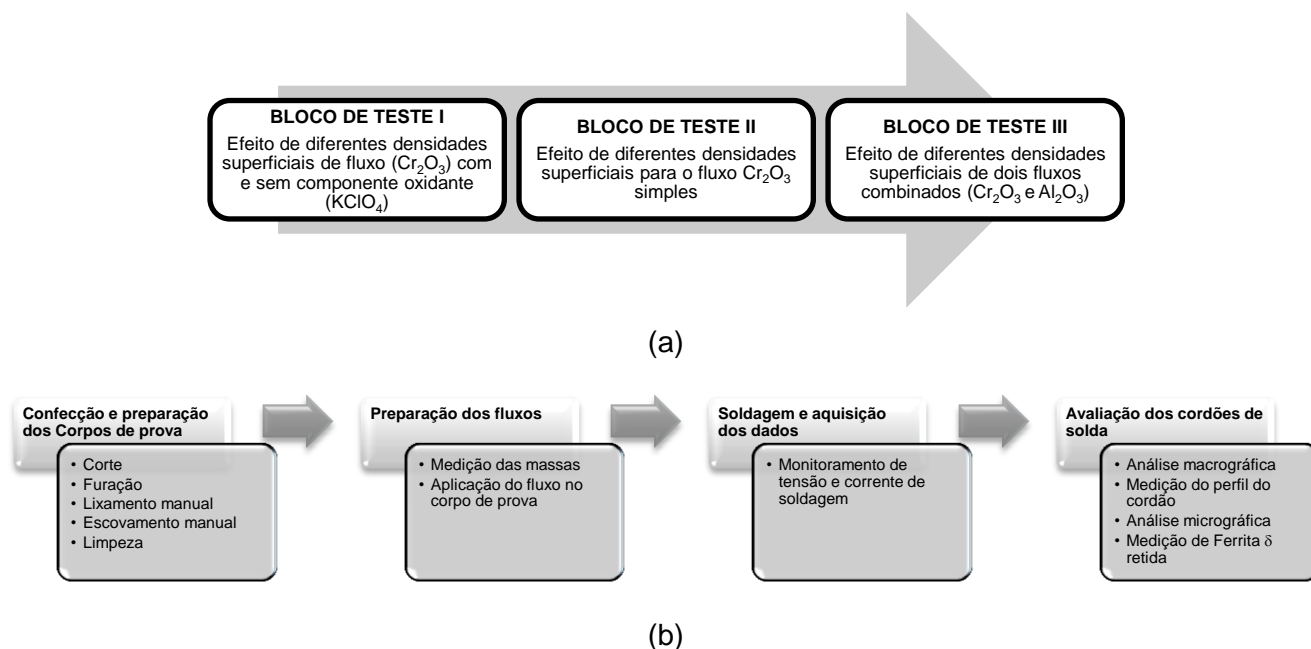


Figura 4.1 – Representação esquemática da metodologia usada: (a) Blocos de testes. (b) Sequência de operações usuais em cada bloco.

## 4.2. Equipamentos e materiais

Nesta seção é apresentada uma descrição dos equipamentos e materiais utilizados nesta dissertação. Esta descrição envolve informações como dados técnicos, dimensões, tipo, modelo e fabricante. Para os materiais usados na elaboração dos fluxos é apresentada também uma justificativa para a seleção dos mesmos.

### 4.2.1 Equipamentos

O equipamento de soldagem utilizado (Figura 4.2) foi uma fonte transistorizada chaveada no secundário (INVERSAL 300). Do ponto de vista operacional, esta fonte possibilita a abertura do arco elétrico através do toque do eletrodo com a peça, dispensando o uso de alta frequência.



Figura 4.2 – Fonte de energia transistorizada INVERSAL 300 da IMC.

Os testes de soldagem foram realizados com uma tocha com um bocal de proteção cerâmico de diâmetro interno igual a 10 mm e um eletrodo de tungstênio dopado com óxido de tório (EWTh-2) com 3,2mm de diâmetro, com ângulo de ponta afiado a 60°.

A tocha foi fixada em um posicionador sobre a bancada de testes dotada de um sistema mecânico de deslocamento da peça (tartaruga). Este sistema permite controlar a velocidade e o sentido de deslocamento de soldagem dentro de uma faixa de operação de 0,05 a 0,60 m/min.

Na medição das massas dos fluxos usou-se uma balança analítica digital Bioprecisa FA2104N (Figura 4.3) com precisão de  $1 \times 10^{-4}$  mg, um béquer (50mL), acetona, um tubo de PVC com 26mm de diâmetro externo, uma tesoura e papel alumínio (Figura 4.4).



Figura 4.3 – Medição das massas de fluxo

Para a aplicação dos fluxos misturados com acetona usaram-se hastes metálicas manufaturadas no laboratório, um conta-gotas, uma tesoura, fita adesiva para determinação da área útil de aplicação do fluxo e um dispositivo para o corte desta fita (Figura 4.5).

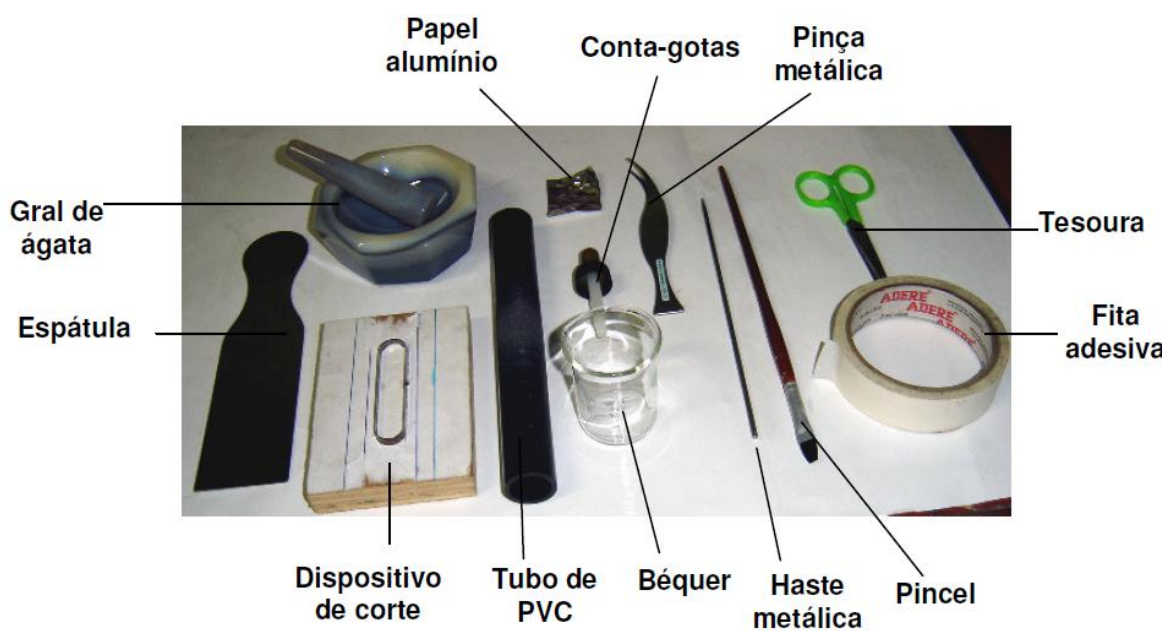


Figura 4.4 – Materiais usados na preparação e aplicação dos fluxos <sup>[10]</sup>.

O dispositivo de corte foi confeccionado no laboratório para manter constante a área de aplicação dos fluxos a ser usada em todos os testes. Este dispositivo realiza o corte da fita adesiva definindo a área de aplicação do fluxo. Os detalhes e as dimensões do dispositivo para corte da fita são mostrados na Figura 4.5.

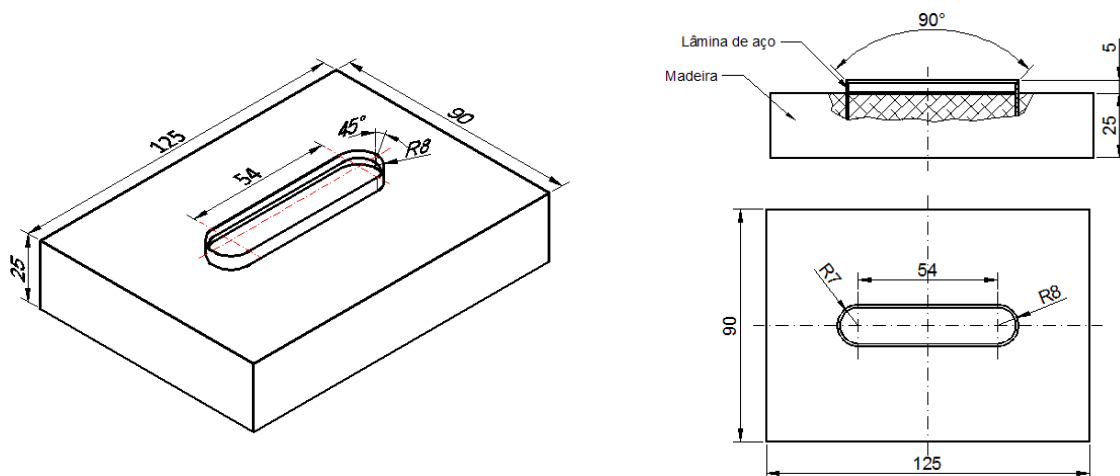


Figura 4.5 – Dispositivo para corte da fita adesiva (dimensões em mm).

Os cortes dos corpos de prova soldados foram realizados no laboratório com uma cortadora do tipo bancada. As amostras foram lixadas em lixadeiras de bancada. A sequência utilizada para lixamento foi com granulações de 100, 240, 320, 400, 600 e 1200 para macrografia. Algumas amostras foram selecionadas para realização de micrografia e, para tanto, foram polidas em politrizes universais.

As imagens das seções das macrografias foram realizadas com máquina digital Canon Rebel XTi com lente macro.

As imagens fotografadas das seções transversais dos corpos de prova foram medidas com auxílio do programa ImageJ versão 1.44p.

Finalmente foram medidos os valores percentuais de ferrita  $\delta$  nas regiões fundidas com o equipamento Ferristoscope Fisher MP3.



## 4.2.2 Materiais

O material estudado foi o aço inoxidável austenítico AISI 304, na forma de chapas de 5,0 mm de espessura, cuja composição química especificada está representada na Tabela IV.1.

Tabela IV.1 – Composição química do AISI 304 – valores máximos e faixa.

% C	% Mn	% Si	% P	% S	% Ni	% Cr
0,08	2,00	1,00	0,045	0,03	8,0 -10,5	18-20

As dimensões dos corpos de prova ficaram definidas como (150x50x5)mm. Os cortes da chapa, realizados com máquina de corte a plasma. Os corpos de prova foram furados (Figura 4.6) para a sua fixação a uma placa de cobre conforme será mostrado na seção 4.3.

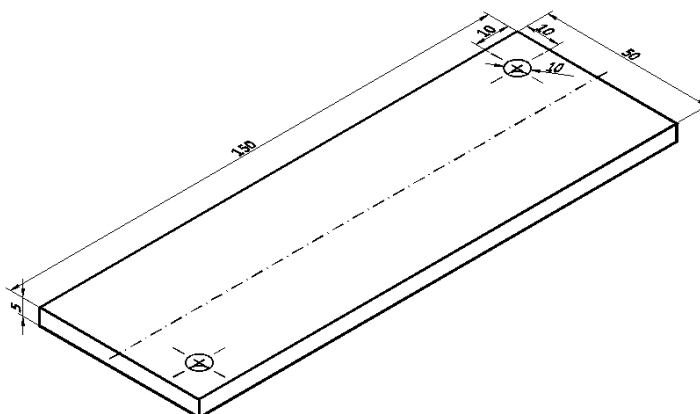


Figura 4.6 – Corpo de prova (dimensões em mm)

Foi realizado acabamento lixando manualmente os corpos de prova para eliminação de rebarbas seguido de limpeza com sabão a base de carbonato de sódio –  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  (sapólio) e detergente para retirada de gorduras e óleos. Esta lavagem era repetida caso a aplicação do fluxo não fosse feita imediatamente.

Os fluxos utilizados já estavam armazenados em forma de pó em vasilhames identificados com a composição química de cada um deles. Foram utilizados como fluxos o Óxido de Cromo ( $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ); o Óxido de Alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) e, no primeiro bloco de testes, um elemento oxidante, o perclorato de cálcio ( $\text{KClO}_4$ ).

### 4.3. Procedimento Experimental

#### 4.3.1. Preparação do fluxo e dos corpos de prova

As massas dos fluxos foram medidas com a balança analítica digital, guardadas em pedaços de papel alumínio identificadas quanto ao tipo e quantidade de fluxo. No corpo de prova já limpo foi colocada a máscara para aplicação do fluxo. Hastes metálicas confeccionadas no laboratório foram utilizadas para facilitar o espalhamento da mistura do fluxo com acetona. A Figura 4.7 demonstra a aplicação.

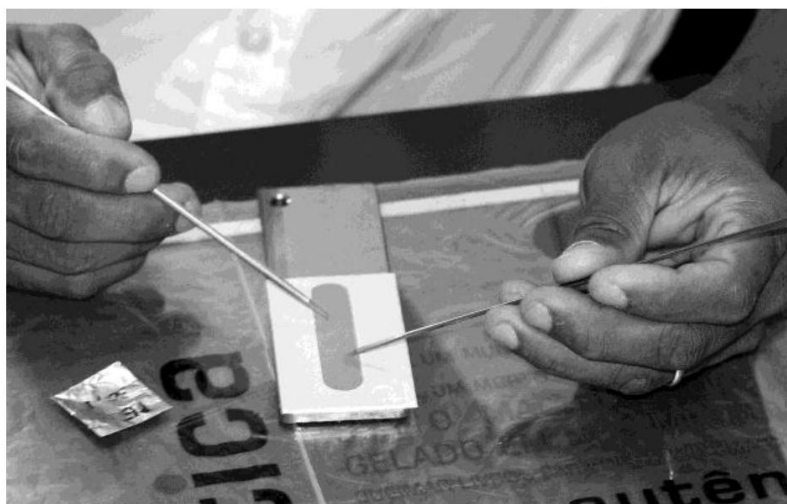


Figura 4.7 – Preparação do corpo de prova para a deposição da camada de fluxo.

Para a aplicação usaram-se hastes metálicas manufaturadas no laboratório, um conta-gotas com acetona. A acetona facilita o espalhamento do pó e, com sua evaporação, o fluxo é fixado na área determinada, utilizando-se espécie de máscara a partir de uma fita adesiva que demarca a área onde a mistura será aplicada; ao invés de pincéis (como utilizados em outras técnicas), as hastes metálicas foram utilizadas para espalhar o fluxo com maior uniformidade (Figura 4.7). Esta técnica foi desenvolvida no laboratório <sup>[10, 29]</sup>. Após esta evaporação a fita é retirada. O corpo de prova preparado para seguir para a próxima etapa é mostrado no desenho da Figura 4.8.

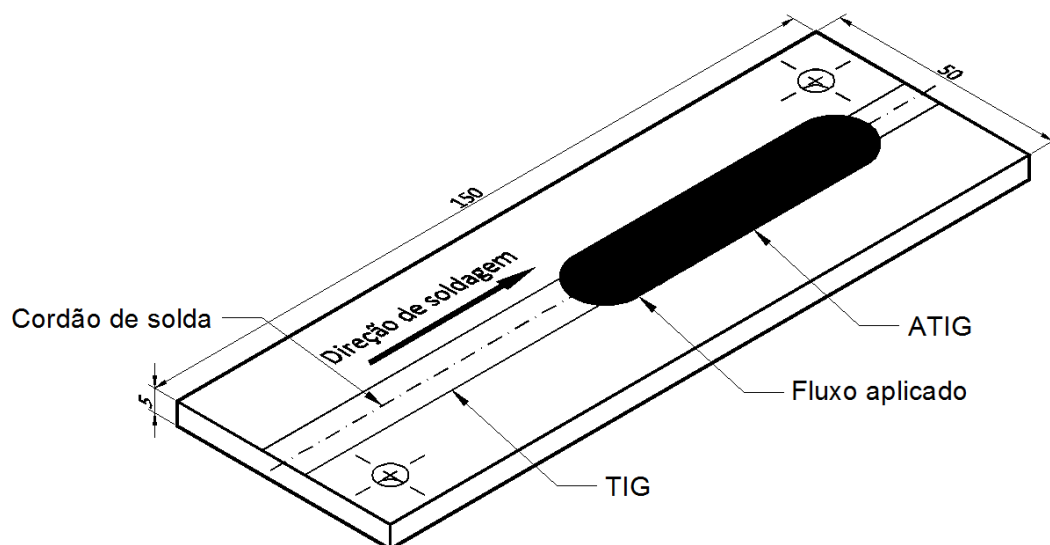


Figura 4.8 – Corpo de prova com fluxo aplicado

#### 4.3.2. Procedimento de soldagem

A soldagem utilizada em todas as etapas deste estudo foi mecanizada com a fonte, sistema de aquisição de dados e demais acessórios descritos na seção anterior.

Os parâmetros de todos os testes realizados estão colocados na Tabela IV.2.

Tabela IV.2 – Condições de soldagem

Eletrodo	EWTh-2	Gás de proteção:	Argônio
Diâmetro:	3,2 mm	Vazão:	10 L/min
Ângulo da ponta:	60°	Comp. de arco:	3 mm
Corrente:	200 A	Polaridade:	CC-
Velocidade:	0,20 m/min	Posição:	Plana

### 4.3.3. Testes de soldagem

Foram realizados três blocos de testes conforme descrito na seção 4.1.

O bloco de Teste I [Figura 4.1(a)] foi realizado de acordo com as condições indicadas na Tabela IV.1. A densidade superficial foi testada em três níveis. A pureza em dois níveis (industrial e analítica) e a presença do clorato de potássio (aditivo) em dois níveis. Quando o aditivo estava presente, a densidade superficial prevista na Tabela IV.1 foi mantida, mas substituiu-se um total de 6 g/m<sup>2</sup> de Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> pela mesma quantidade de aditivo, isto é, 54 + 6 mg para o primeiro nível, 24 + 6 mg para o segundo e 9 + 6 mg para o terceiro. O grau de pureza foi definido pela origem do Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>: uma amostra (IND) foi fornecida por um fabricante nacional de consumíveis de soldagem do material usado em sua linha de produção e a outra (ESP) de um fornecedor de produtos químicos e rotulado como “puríssimo”. Ambos, contudo, possuíam composições similares, com teor de Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> superior a 99%.

Tabela IV 3 – Condições experimentais usadas no Bloco I.

CP	Fluxo		Pureza	Aditivo (6 mg)		Conc.
	Tipo	Densidade Superficial (g/m <sup>2</sup> )		S/N	Tipo	
CP01	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	60	IND	N	-	A
CP02		30	IND	N	-	B
CP03		15	IND	N	-	C
CP04		54	IND	S	KClO <sub>4</sub>	A
CP05		24	IND	S		B
CP06		9	IND	S		C
CP07		60	IND	N	-	A
CP08		15	IND	N	-	C
CP09		24	IND	S	KClO <sub>4</sub>	B
CP10		9	IND	S		C
CP11		60	ESP	N	-	A
CP12		30	ESP	N	-	B
CP13		15	ESP	N	-	C
CP14		30	ESP	N	-	B

O bloco de testes II [Figura 4.1 (a)] foi realizado conforme as condições indicadas na Tabela IV.4. A densidade superficial foi testada em cinco níveis.

Tabela IV.4 – Sequência de corpos de prova com respectivos fluxos (bloco II).

CP	Fluxos		Conc.
	Tipo	Densidade Superficial (g/m <sup>2</sup> )	
CP15	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7,5	A
CP16		15	B
CP17		30	C
CP18		60	D
CP19		120	E
CP20		120	E
CP21		7,5	A

O bloco de teste II I [Figura 4.1 (a)] foi realizado conforme as condições indicadas na Tabela IV.5.

Tabela IV.5 – Sequência de corpos de prova com respectivos fluxos (bloco III).

CP	Fluxos				Conc.
	Tipo	Densidade Superficial (g/m <sup>2</sup> )	Tipo	Densidade Superficial (g/m <sup>2</sup> )	
CP22	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	60	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0	A
CP23		55		5	B
CP24		50		10	C
CP25		40		20	D
CP26		50		10	C
CP27		40		20	D

Os testes foram realizados na posição plana, de forma autógena, sem chanfro. O corpo de prova foi fixado em cima de uma chapa de cobre e esta no sistema de deslocamento. A tocha de soldagem permaneceu fixa.

Durante todos os testes, os valores de corrente e tensão foram registrados com um sistema digital de aquisição de dados conectado a um microcomputador. A partir das médias dos valores de tensão para os processos ATIG e TIG, definiu-se um parâmetro denominado  $\Delta U$  como a diferença entre os valores de tensão ATIG pelos valores de tensão TIG conforme equação 4.1.

$$\Delta U = U_{\text{ATIG}} - U_{\text{CTIG}} \quad (4.1)$$

Os testes de soldagem foram realizados em uma bancada que é representada esquematicamente na Figura 4.9.

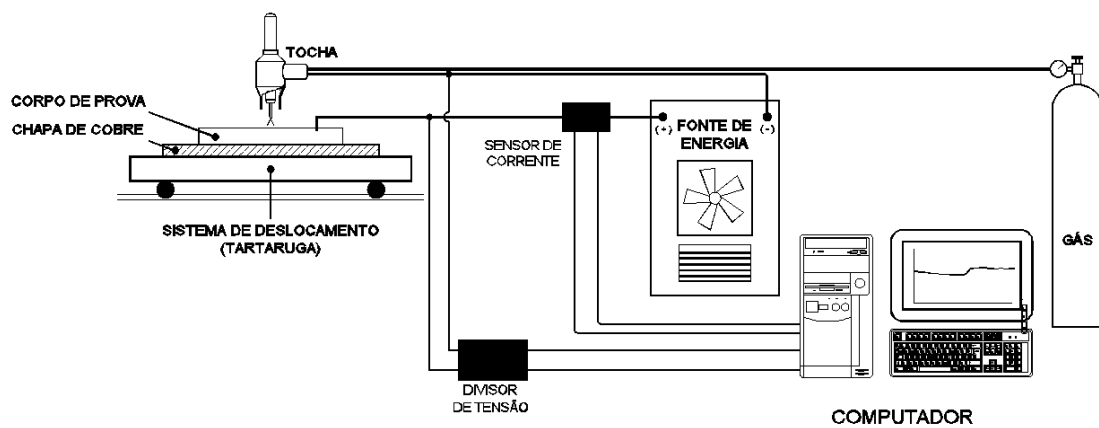


Figura 4.9 – Representação esquemática da montagem experimental

#### 4.3.4. Análise macrográfica

Após a soldagem, foram retiradas, de cada corpo de prova, duas seções transversais ao cordão na parte TIG e duas na parte ATIG (Figura 4.10). Todas as amostras foram preparadas para análise macrográfica sendo lixadas e atacadas com reativo de cloreto férrico.

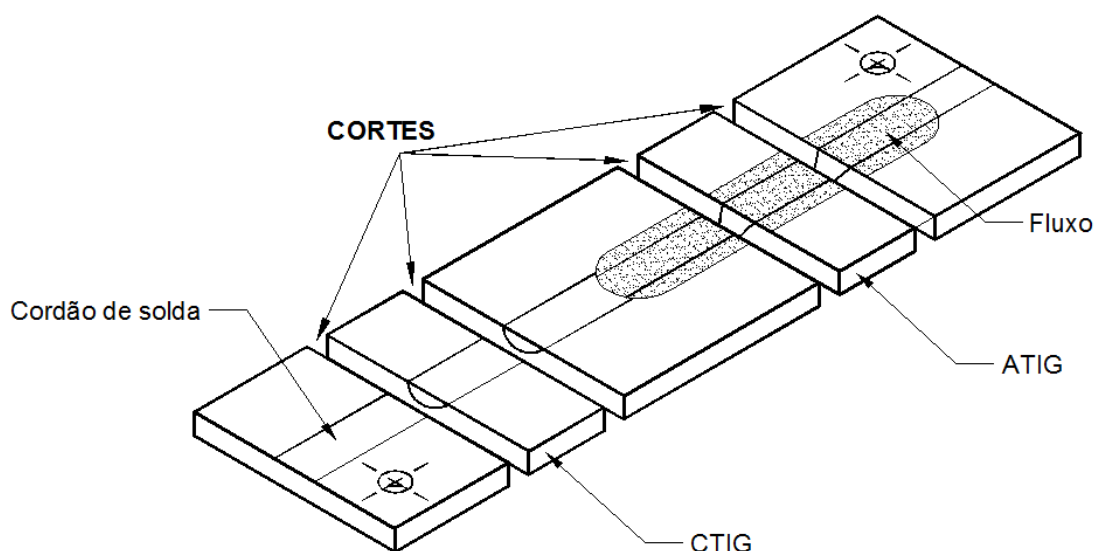


Figura 4.10 – Representação dos corpos de provas cortados para análise macrográfica

As seções atacadas foram fotografadas e as imagens analisadas com o programa ImageJ para cálculo da largura, penetração e área da seção transversal do cordão. Adicionalmente, a largura do cordão foi medida em fotos da superfície dos cordões. Como a maior parte das soldas ATIG apresentou penetração total (nas chapas de 5 mm de espessura usadas), decidiu-se caracterizar a capacidade de penetração do processo pelo parâmetro “Largura da raiz” (LR). Este foi baseada na área fundida na raiz da solda (Figura 4.11), que foi medida em fotografias tiradas da face da chapa oposta à face onde a soldagem foi feita. LR foi definida como o resultado da divisão desta área pelo comprimento da máscara de aplicação do fluxo (69,2mm) – equação 4.2, tendo, portanto, unidades de comprimento (ou largura). Desta forma, valores nulos deste parâmetro indicam ausência de penetração total. Valores diferentes de zero indicam a existência de penetração total em, pelo menos, parte do cordão de solda e valores maiores deste parâmetro indicam uma melhor capacidade de fusão em condições de penetração total.

$$LR = \frac{\text{Área fundida na raiz da solda}}{69,2\text{mm}} \quad (4.2)$$

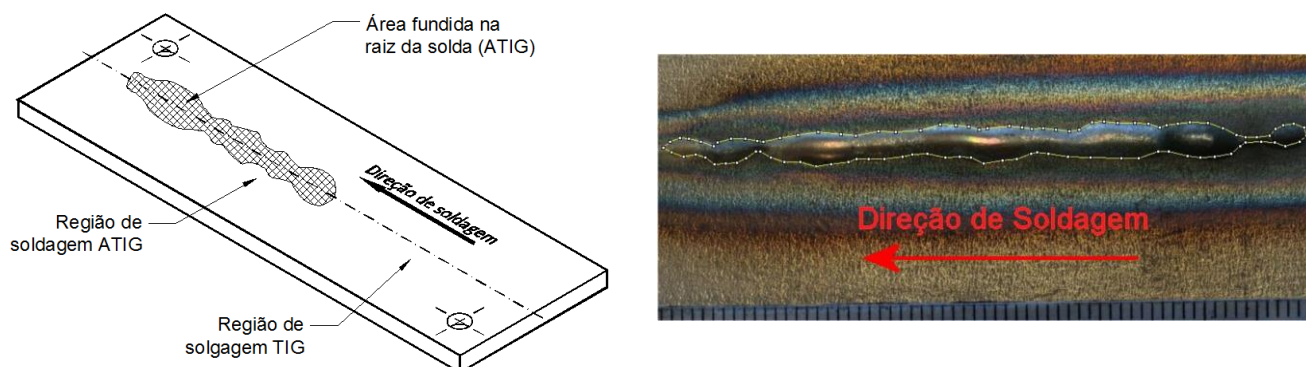


Figura 4.11 – Região fundida na raiz de um cordão ATIG delimitada para a determinação de sua área. (a) desenho esquemático mostrando a área fundida na raiz e (b) foto da raiz do cordão.

A análise micrográfica foi realizada para verificação de possível alteração na microestrutura da zona fundida para soldas TIG e ATIG selecionadas pelos valores de densidade superficial das amostras. Foi adotada a técnica convencional com polimento em diamante até  $1\mu\text{m}$  e ataque com reativo Marble.

Finalmente foi realizado teste para verificação do valor da ferrita  $\delta$  retida na zona fundida nas regiões TIG e ATIG. As medições foram realizadas na “parte superior do cordão” e na “face da seção transversal do cordão” do corpo de prova com o auxílio do Ferristoscope (Figura 4.12)

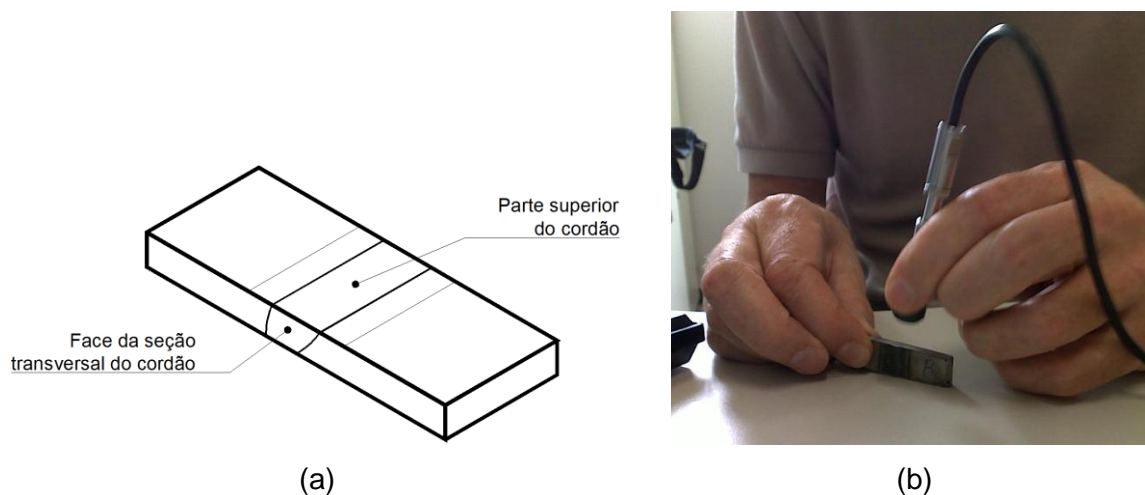


Figura 4.12 – (a) Corpo de prova marcando locais de medição e (b) exemplo de medição de Ferrita  $\delta$  retida



Foram realizadas dez medições na zona fundida de amostras selecionadas tanto da região de soldagem TIG como de soldagem ATIG (Tabela IV.6). As medições foram realizadas tanto na superfície do cordão como em sua seção transversal com a finalidade de verificar possíveis discrepâncias devido à área reduzida de algumas seções transversais dos cordões de solda (particularmente, nas soldas obtidas pelo processo TIG convencional).

Tabela IV.6 – Corpos de prova selecionados para medição de Ferrita- $\delta$  .

Bloco	TIG	ATIG
I	CP01	CP07; CP12 e CP14
II	CP15	CP16; CP17; CP18; CP19; CP20 e CP21
III	CP27	CP22; CP23; CP24; CP25; CP26 e CP27

## CAPITULO 5: RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1. Introdução

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos nos testes de soldagem realizados nas três etapas deste estudo (Figura 4.1a). Estes resultados foram discutidos visando a caracterização do efeito de diferentes densidades superficiais de fluxos simples durante a soldagem ATIG no aço inoxidável austenítico. Das ferramentas previstas para a caracterização dos cordões de solda (Figura 4.1b), a análise macrográfica, medição do perfil do cordão e medição da quantidade de ferrita  $\delta$  retida foram usadas em todas as etapas. A análise micrográfica foi realizada apenas em cordões de solda selecionados. Quando resultados de medições realizadas aparecerem no formato Valor01  $\pm$  Valor02, o primeiro valor indicará a média das medidas realizadas e, o segundo, o seu desvio padrão. A Figura 5.1 mostra um corpo de prova após a soldagem.

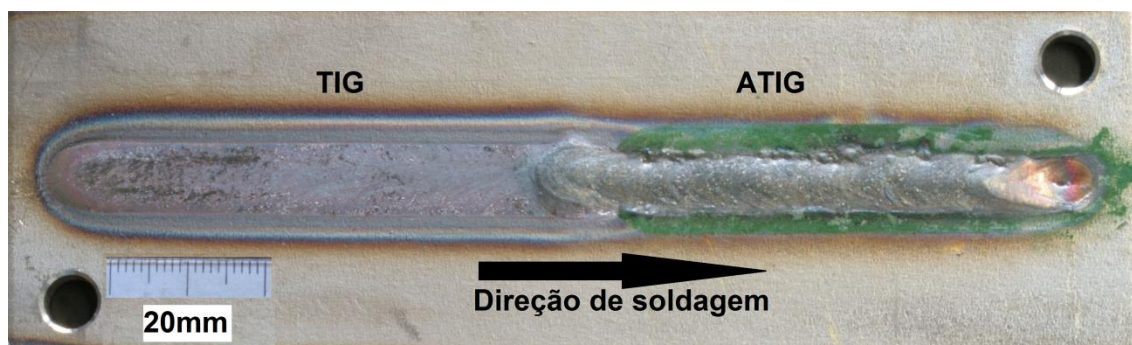


Figura 5.1 – Exemplo de corpo de prova após a soldagem

## 5.2. Efeito de diferentes densidades superficiais de fluxo ( $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ) com e sem componente oxidante ( $\text{KClO}_4$ ) – Bloco I

Os testes desta seção correspondem ao bloco de teste I e foram realizados com densidades superficiais nos valores de 15, 30 e 60g/m<sup>2</sup>, com alguns corpos de prova tendo fluxo misturado com o componente oxidante  $\text{KClO}_4$  (Tabela V.3).

A presença do fluxo causou pequenas alterações nas condições operacionais durante os testes. A tensão de soldagem tendeu a se elevar ligeiramente após a passagem do arco para a região com fluxo. Neste bloco os valores de  $\Delta U$  foram de, no máximo, 1,1 V (Tabela V.1).

Tabela V.1 – Valores de tensão ( $\bar{U}$ ) e corrente ( $\bar{I}$ ) – (bloco I).

CP	Fluxo			Aditivo (6mg)		Conc.	Tensão Elétrica (V)					Corrente (A)	
	Tipo	Quant. (mg)	Pureza	S/N	Tipo		$U_{\text{TIG}}$		$U_{\text{ATIG}}$		$\Delta U$	$\bar{I}$	$\bar{s}$
							$\bar{U}$	$\bar{s}$	$\bar{U}$	$\bar{s}$			
CP01	$\text{Cr}_2\text{O}_3$	60	IND	N	–	A	11,3	0,1	12,1	0,2	0,8	196,5	0,2
CP02		30	IND	N	–	B	11,0	0,0	12,1	0,3	1,1	196,6	0,2
CP03		15	IND	N	–	C	11,2	0,1	11,5	0,2	0,3	196,7	0,2
CP04		54	IND	S	$\text{KClO}_4$	A	11,5	0,1	11,8	0,3	0,3	196,7	0,2
CP05		24	IND	S		B	11,3	0,1	11,1	0,2	-0,2	196,8	0,2
CP06		9	IND	S		C	11,1	0,0	11,2	0,2	0,1	196,8	0,2
CP07		60	IND	N	–	A	11,2	0,1	11,6	0,3	0,4	196,9	0,2
CP08		15	IND	N	–	C	11,2	0,1	11,5	0,3	0,3	196,9	0,2
CP09		54	IND	S	$\text{KClO}_4$	A	11,1	0,1	11,0	0,3	-0,1	196,9	0,2
CP10		24	IND	S		B	11,2	0,2	11,7	0,3	0,5	196,2	0,3
CP11		60	ESP	N	–	A	11,4	0,0	12,3	0,1	0,9	196,7	0,2
CP12		30	ESP	N	–	B	11,5	0,1	12,1	0,1	0,6	196,6	0,2
CP13		15	ESP	N	–	C	10,8	0,0	11,6	0,1	0,8	196,9	0,2
CP14		30	ESP	N	–	B	11,7	0,1	12,3	0,0	0,6	196,6	0,2
						$\bar{U}$	11,3	0,08	11,7	0,2	0,5	196,7	0,2

Obs.:  $\bar{I}$  e  $\bar{U}$  – Valor médio.

$\bar{s}$  – Desvio padrão.

Na região de soldagem ATIG, com a presença do fluxo, o processo apresentou indícios de uma menor estabilidade tanto para os valores de corrente como para de tensão conforme ilustra a Figura 5.2 e os valores do desvio padrão da tensão de soldagem (Tabela V.1).

No oscilograma da corrente, observa-se que o valor de corrente é essencialmente o mesmo nas regiões de soldagem TIG e ATIG, o que era esperado considerando que a fonte operou em corrente constante. Apesar disto, pode-se observar uma variação maior entre picos da corrente durante a soldagem ATIG. O oscilograma da tensão mostra um claro aumento dos valores durante a soldagem ATIG, mostrando também maior variação entre os picos máximos e mínimos.

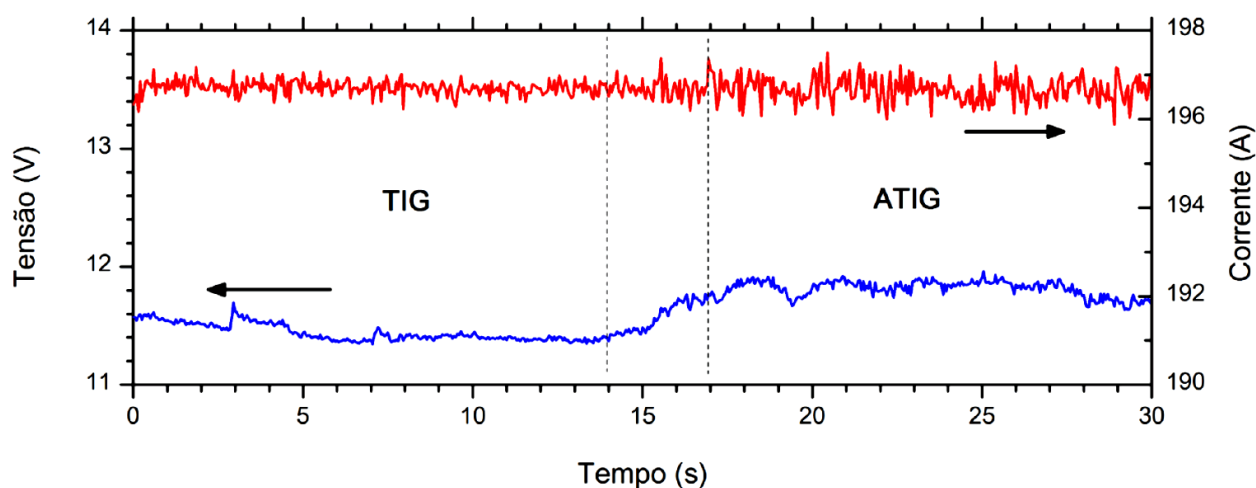


Figura 5.2 – Variação de corrente (curva superior) e tensão durante um teste de soldagem (bloco I).

Como o projeto experimental usado tem um formato fatorial, os valores médios de  $\Delta U$  para cada nível de cada fator do experimento (densidade superficial, pureza e presença de aditivo) foram calculados (Tabela V.2). Os resultados indicam que a presença do aditivo tende a aumentar a tensão de operação na soldagem ATIG com fluxo de  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  e, ainda, sugerem um aumento de  $\Delta U$  com a densidade de fluxo aplicada. Um aumento da tensão de operação pode indicar alguma interação do fluxo no arco, incluindo a sua constrição. Por outro lado, trabalhando com nove diferentes fluxos de um componente, Modenesi e colaboradores<sup>[3]</sup> não observaram qualquer correlação entre os valores de  $\Delta U$  e o aumento da penetração devido ao fluxo. Por

outro lado, existem indicações que o tipo de mecanismo causador do aumento de penetração depende da composição do fluxo, com a constrição do arco tendendo a ocorrer com fluxos de fluoretos e o efeito Marangoni prevalecendo com fluxos de óxido<sup>[30]</sup>. No presente trabalho, foi observada uma possível correlação entre os valores de  $\Delta U$  e a penetração, mas, como já indicado, as variações de tensão observadas foram relativamente pequenas sugerindo que este efeito, se existir, teria um papel secundário.

Tabela V.2 – Valores médios e desvios padrões de  $\Delta U$  (bloco I).

Valores de $\Delta U$		Médias (V)	Desvios (V)
Concentração (g/m <sup>2</sup> )	60	0,7	0,2
	30	0,7	0,1
	15	0,5	0,2
Pureza	IND	0,6	0,3
	ESP	0,7	0,3
Aditivo (fluxo IND)	Sim	0,1	0,2
	Não	0,6	0,3

O  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  é um componente comum em fluxos de um ou mais componentes para soldagem ATIG de aços inoxidáveis austeníticos tendo sido observado um efeito pronunciado deste na penetração<sup>[3, 13]</sup>. No presente trabalho foi analisado o efeito da densidade superficial de  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  na soldagem ATIG, sendo testados três níveis desta densidade. Os únicos trabalhos encontrados, que estudaram de forma sistemática o efeito da variação da densidade superficial do fluxo, foram os de Lu e colaboradores<sup>[28, 30]</sup>. Estes autores espalharam quantidades controladas de fluxo (entre  $1 \times 10^{-5}$  e  $4,8 \times 10^{-3}$  mols de oxigênio contido no fluxo) em um rebaixo usinado no corpo de prova de  $5 \times 50$  mm ( $250 \text{ mm}^2$ ) sobre o qual a solda foi feita, interagindo, em princípio, com todo o material espalhado. Considerando o comprimento do rebaixo, isto correspondeu a entre  $2 \times 10^{-4}$  e  $9,6 \times 10^{-2}$  moles de [O] por metro de solda. No presente trabalho, o fluxo foi distribuído sobre uma área mais larga do que o cordão de solda, não sendo possível uma comparação direta, pois nem todo o material interagiu com a poça de fusão. Contudo, considerando a largura média de 7,5mm dos cordões de solda ATIG e um comprimento médio do cordão de 70 mm (correspondente ao comprimento da máscara usada), as quantidades correspondentes de fluxo usadas (sem aditivo) foram de  $15 \times 10^{-5}$  a  $60 \times 10^{-5}$  moles de oxigênio ou  $2,1 \times 10^{-3}$  a  $8,7 \times 10^{-3}$  moles/m. Estes valores

estão no limite inferior da faixa trabalhada por Lu e colaboradores <sup>[30]</sup> e dentro das condições em que o aumento de penetração da solda observado por estes autores foi máximo. Deve-se ressaltar, contudo, que, em seus trabalhos, Lu e colaboradores <sup>[28, 30]</sup> não estudaram, como fluxo para soldagem ATIG, o  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ .

Adicionalmente, o presente trabalho avaliou o efeito de adições de perclorato de potássio ( $\text{KClO}_4$ ) ao fluxo. Este composto é altamente oxidante, se decompondo a cerca de  $600^\circ\text{C}$  e liberando oxigênio pela reação:



Devido a esta decomposição, o perclorato de potássio foi considerado como uma forma possível de aumentar a capacidade do fluxo fornecer oxigênio à poça de fusão e, desta forma, favorecer o aumento da penetração (considerando a formação de correntes de metal líquido na poça de fusão pelo efeito Marangoni como o mecanismo responsável pelo aumento da penetração na soldagem ATIG) para uma dada densidade de fluxo.

A Figura 5.3 mostra seções transversais de algumas das soldas feitas. Os testes, em média, indicaram que a presença do fluxo causou uma redução da largura do cordão (passando, em média, de  $9,9 \pm 0,1\text{mm}$  (média  $\pm$  desvio padrão) na soldagem TIG para  $7,5 \pm 0,2\text{ mm}$  na soldagem ATIG) – Tabela V.3 – e um aumento na penetração (na soldagem TIG, esta foi de  $1,8 \pm 0,1\text{mm}$  e, na soldagem ATIG, a maioria das soldas teve penetração total). Além disto, a quantidade de material fundido durante a soldagem aumentou no processo ATIG (a área da seção transversal na soldagem TIG foi, em média, igual a  $13,8 \pm 0,7\text{mm}^2$  passando para  $24,0 \pm 1,7\text{mm}^2$  na soldagem ATIG). Considerando-se que a energia de soldagem praticamente não mudou entre as partes TIG e ATIG dos cordões feitos, estes resultados indicam um aumento de cerca de 75% no rendimento teórico de fusão do processo.

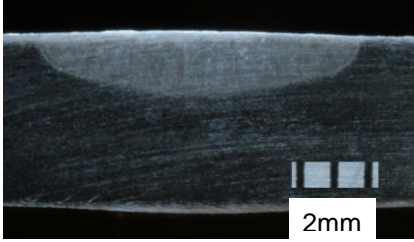
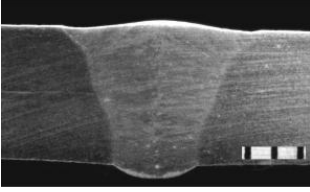

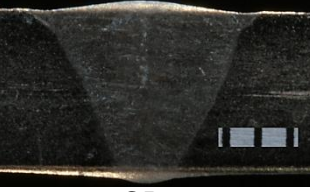

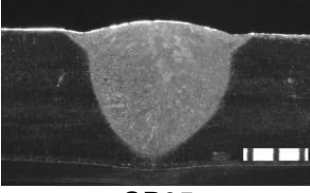
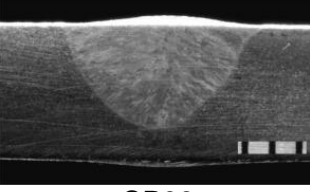
TIG	ATIG	Fluxo (mg)	Aditivo (mg)
		Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	KClO <sub>4</sub>
	 CP11	60	0
	 CP012	30	0
	 CP03	15	0
	 CP04	54	6
	 CP05	24	6
	 CP06	9	6

Figura 5.3 – Seções transversais de cordões TIG e ATIG (bloco I).

Tabela V.3 – Valores médios ( $\bar{x}$ ) e desvios padrões ( $\bar{s}$ ) da largura do cordão (bloco I).

CP	Fluxo		Aditivo (6 mg)		Conc.	Largura (mm)				$\Delta L$ (mm)	Altura (mm)			
	Tipo	Quant. (mg)	S/N	Tipo		TIG		ATIG			TIG		ATIG	
						$\bar{x}$	$\bar{s}$	$\bar{x}$	$\bar{s}$		$\bar{x}$	$\bar{s}$	$\bar{x}$	$\bar{s}$
CP01	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	60	N	-	A	9,9	0,1	7,4	0,2	2,5	1,7	0,0	5,9	0,2
CP02		30	N	-	B	9,9	0,1	7,5	0,2	2,4	1,9	0,1	6,0	0,3
CP03		15	N	-	C	9,8	0,1	7,4	0,1	2,4	1,9	0,1	5,8	0,0
CP04		54	S	KClO <sub>4</sub>	A	9,9	0,1	7,3	0,1	2,6	1,8	0,2	5,7	0,0
CP05		24	S		B	9,8	0,1	7,3	0,2	2,5	1,8	0,1	4,7	0,9
CP06		9	S		C	9,8	0,1	7,3	0,1	2,5	1,7	0,1	4,9	1,0
CP07		60	N	-	A	9,9	0,1	7,4	0,6	2,5	1,8	0,1	5,9	0,7
CP08		15	N	-	C	9,8	0,1	7,5	0,2	2,2	1,8	0,0	5,9	0,1
CP09		24	S	KClO <sub>4</sub>	B	9,9	0,1	7,2	0,2	2,7	1,8	0,1	5,4	0,3
CP10		9	S		C	9,9	0,1	7,4	0,1	2,5	2,2	0,3	5,5	0,1
CP11		60	N	-	A	9,8	0,0	7,5	0,1	2,4	1,8	0,0	5,8	0,3
CP12		30	N	-	B	9,9	0,1	7,7	0,1	2,2	1,8	0,0	5,9	0,0
CP13		15	N	-	C	9,8	0,1	7,7	0,3	2,0	1,9	0,2	5,8	0,0
CP14		30	N	-	B	9,9	0,1	7,7	0,1	2,2	1,7	0,0	5,9	0,0
					$\bar{x}$	9,9	0,1	7,5	0,2	2,4	1,8	0,1	5,7	0,3



A Tabela V.4 apresenta os valores da área da seção transversal e desvios padrões da zona fundida.

Tabela V.4 – Valores da área da seção transversal e desvios padrões da zona fundida na soldagem ATIG (bloco I).

CP	Fluxo			Aditivo (6 mg)		Conc.	Amostra	Área (mm <sup>2</sup> )	
	Tipo	Quant. (mg)	Pureza	S/N	Tipo				
CP01	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	60	PI	N	-	A	ATIG	24,9 ± 0,2	
							TIG	13,0 ± 0,5	
CP02		30	PI	N	-	B	ATIG	25,7 ± 1,0	
							TIG	14,9 ± 1,4	
CP03		15	PI	N	-	C	ATIG	23,9 ± 0,1	
							TIG	14,0 ± 0,4	
CP04		54	PI	S	KClO <sub>4</sub>	A	ATIG	21,5 ± 0,7	
							TIG	13,5 ± 0,9	
CP05		24	PI	S		B	ATIG	21,6 ± 2,5	
							TIG	13,6 ± 0,6	
CP06		9	PI	S		C	ATIG	22,9 ± 3,5	
							TIG	12,9 ± 0,6	
CP07		60	PI	N		-	A	ATIG	25,3 ± 3,0
								TIG	13,3 ± 0,1
CP08	15	PI	N	-		C	ATIG	22,9 ± 1,5	
							TIG	14,0 ± 0,4	
CP09	24	PI	S	KClO <sub>4</sub>		B	ATIG	24,2 ± 3,5	
							TIG	13,4 ± 0,1	
CP10	9	PI	S	C		ATIG	24,0 ± 1,3		
						TIG	14,4 ± 1,5		
CP11	60	PE	N	-	A	ATIG	26,1 ± 0,2		
						TIG	13,3 ± 0,1		
CP12	30	PE	N	-	B	ATIG	25,6 ± 0,7		
						TIG	13,2 ± 0,2		
CP13	15	PE	N	-	C	ATIG	23,7 ± 0,6		
						TIG	14,2 ± 0,6		
CP14	30	PE	N	-	B	ATIG	24,2 ± 0,6		
						TIG	12,9 ± 0,2		
Médias (ATIG)								24,0 ± 1,4	
Médias (TIG)								13,6 ± 0,5	

A Tabela V.5 apresenta os valores médios e desvios padrão da área da seção transversal da zona fundida para cada nível dos fatores considerados na parte relativa à soldagem ATIG do projeto experimental usado neste trabalho. Os valores obtidos indicam um possível efeito negativo da presença o aditivo ( $KClO_4$ ) no rendimento teórico de fusão do processo. Estes resultados também sugerem, embora com uma elevada incerteza, uma tendência de redução da área da zona fundida com a redução da densidade superficial abaixo de  $30 \text{ g/m}^2$ .

Tabela V.5 – Valores médios e desvios padrões da área da seção transversal da zona fundida na soldagem ATIG (bloco I).

Área Fundida		Médias ( $\text{mm}^2$ )	Desvios ( $\text{mm}^2$ )
Concentração ( $\text{g/m}^2$ )	60	25,4	1,0
	30	25,6	1,3
	15	23,5	0,7
Pureza	IND	24,5	1,5
	ESP	25,2	1,2
Aditivo (fluxo IND)	Sim	22,5	1,2
	Não	24,5	1,5

A Tabela V.6 apresenta os valores das áreas fundidas medidas na raiz dos cordões de solda e a medida da Largura da Raiz (LR). Por sua vez, a Tabela V.7 permite avaliar a influência dos fatores estudados na capacidade de fusão na raiz do processo ATIG. As medidas de LR indicam um efeito negativo do uso do aditivo que leva a uma redução da fusão na raiz. Não se observa uma diferença significativa em termos de fusão da raiz quando se considera a pureza do fluxo. Este efeito é o esperado considerando-se a similaridade de composição dos dois componentes. Quanto à densidade superficial do fluxo, os resultados para o fluxo IND e sem aditivo sugerem uma redução na capacidade de fusão, particularmente quando esta densidade foi reduzida de 60 para  $30 \text{ g/m}^2$ .

Tabela V.6 – Valores das áreas fundidas e da Largura da Raiz (LR) (bloco I).

CP	Fluxo			Dopante (6 mg)		Conc.	LR (mm)		
	Tipo	Quant. (mg)	Pureza (Ind./Extrema)	S/N	Tipo		ATIG		
							A (mm <sup>2</sup> )	$\overline{LR}$	$\overline{s}$
CP01	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	60	PI	N	-	A	157,6	2,3	0,5
CP02		30	PI	N	-	B	95,3	1,4	0,1
CP03		15	PI	N	-	C	127,2	1,8	0,2
CP04		54	PI	S	KClO <sub>4</sub>	A	48,2	0,7	0,2
CP05		24	PI	S		B	20,3	0,3	0,1
CP06		9	PI	S		C	10,3	0,1	0,5
CP07		60	PI	N	-	A	145,2	2,1	0,2
CP08		15	PI	N	-	C	107,7	1,6	0,8
CP09		24	PI	S	KClO <sub>4</sub>	B	19,6	0,3	0,2
CP10		9	PI	S		C	10,3	0,1	0,3
CP11		60	PE	N	-	A	143,2	2,1	0,3
CP12		30	PE	N	-	B	85,1	1,2	0,1
CP13		15	PE	N	-	C	115,4	1,7	0,2
CP14		30	PE	N	-	B	135,3	2,0	0,3

Tabela V.7 – Valores médios e desvios padrões da Largura da Raiz (LR) (bloco I).

Largura da Raiz		Médias (mm)	Desvios (mm)
Concentração (g/m <sup>2</sup> )	60	2,1	0,3
	30	1,3	0,1
	15	1,7	0,4
Pureza	IND	1,7	0,5
	ESP	1,6	0,4
Aditivo (fluxo IND)	Sim	0,2	0,3
	Não	1,7	0,5

A tendência indicada (redução da capacidade de fusão na raiz quando a densidade superficial de fluxo é reduzida) é reforçada quando os resultados das medidas do fluxo com aditivo são considerados (Figuras 5.3 e 5.4).

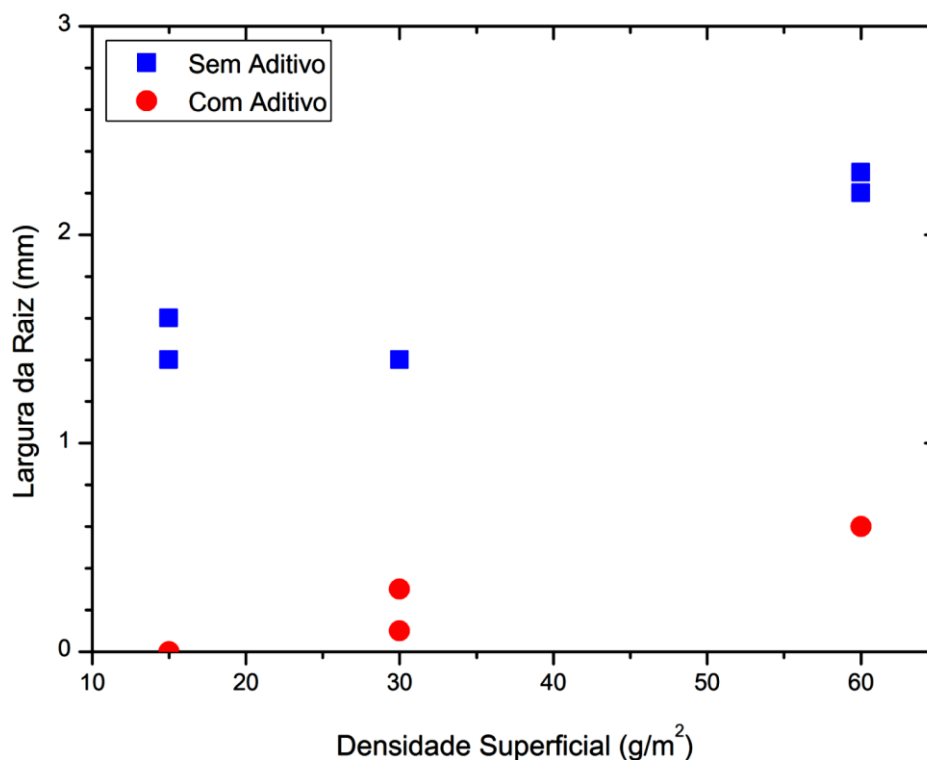


Figura 5.4 – Variação da largura da raiz da solda ATIG com fluxos de pureza IND com e sem adição de  $KClO_4$  (bloco I).

A Tabela V.8 lista os valores médios (seção transversal e superfície do cordão) de ferrita  $\delta$  no metal de base e na zona fundida tanto para a soldagem TIG quanto para a ATIG.

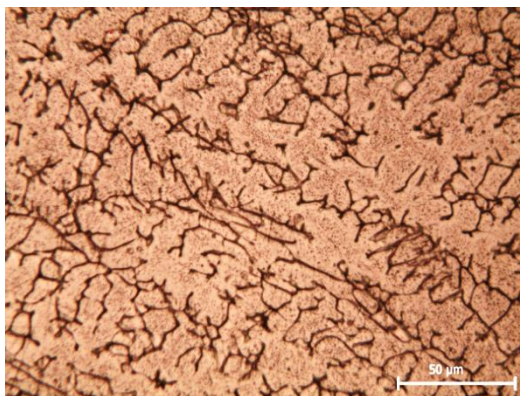
Tabela V.8 – Valores médios e desvios padrões das porcentagens de ferrita  $\delta$  (bloco I).

Porcentagem de Ferrita $\delta$		Médias (%)	Desvios (%)
TIG		6,50	0,25
ATIG Concentração (g/m <sup>2</sup> )	60	6,63	0,25
	30	6,53	0,61
	15	6,09	0,39

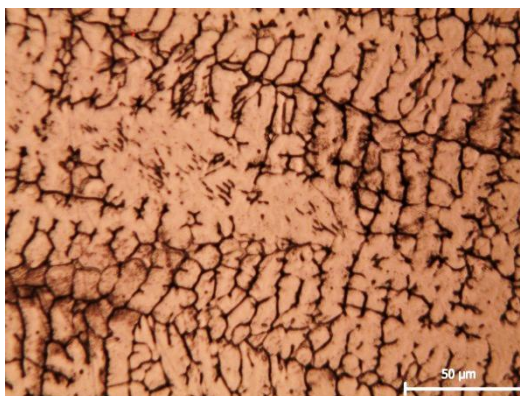
De modo geral, as diferentes densidades de fluxo parecem não afetar a quantidade de ferrita delta na ZF de modo significativo. O valor médio da ferrita  $\delta$  foi de  $6,50 \pm 0,25\%$  para o TIG enquanto o ATIG teve valor médio de  $6,42\%$  e desvios padrão na faixa de

0,25 a 0,61; o que sugere a inexistência de uma diferença significativa na quantidade de ferrita delta para as duas condições de soldagem.

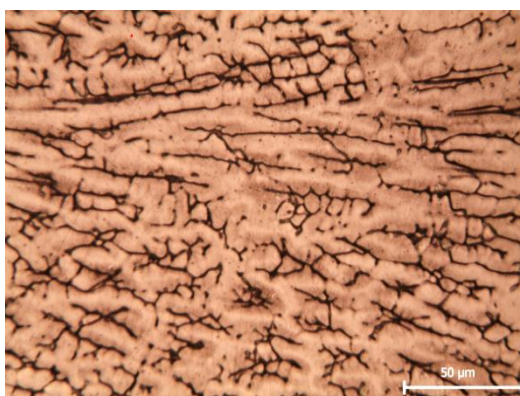
A Figura 5.5 apresenta micrografias da zona fundida (ZF) obtidas na soldagem na soldagem ATIG.



60g/m<sup>2</sup>



30g/m<sup>2</sup>



15g/m<sup>2</sup>

Figura 5.5 – Microestrutura das ZF de três amostras com diferentes densidades superficiais (bloco I)

As imagens da Figura 5.4 mostram as microestruturas da ZF de soldas obtidas pelo processo ATIG em diferentes densidades superficiais. Observa-se estrutura bifásica de matriz austenítica e veios de ferrita- $\delta$ . Não se observa maiores diferenças nas microestruturas soldadas quando comparadas com densidades superficiais diferentes.

### 5.3. Efeito de diferentes densidades superficiais para o fluxo $\text{Cr}_2\text{O}_3$ simples – Bloco II

Os testes desta seção correspondem ao bloco de teste II e foram realizados com densidades superficiais nos valores de 7,5; 15; 30; 60 e  $120\text{g/m}^2$  apenas com o óxido de cromo ( $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ), conforme é mostrado na Tabela V.9.

Tabela V.9 – Valores de tensão ( $\bar{U}$ ) e corrente ( $\bar{I}$ ) (bloco II).

CP	Quant. (mg)	Tensão Elétrica (V)					Corrente (A)	
		$U_{\text{TIG}}$		$U_{\text{ATIG}}$		$\Delta U$	$\bar{I}$	$\bar{s}$
		$\bar{U}$	$\bar{s}$	$\bar{U}$	$\bar{s}$			
CP15	7,5	12,0	0,2	11,6	0,2	-0,4	197,6	0,2
CP16	15,0	12,0	0,1	12,3	0,2	0,3	197,4	0,2
CP17	30,0	11,8	0,1	12,4	0,2	0,5	197,2	0,2
CP18	60,0	12,1	0,1	12,8	0,1	0,7	197,6	0,2
CP19	120,0	12,1	0,1	12,3	0,2	0,2	196,9	0,2
CP20	120,0	11,7	0,2	11,8	0,2	0,0	197,6	0,2
CP21	7,5	12,0	0,0	12,2	0,1	0,2	197,7	0,2
	Médias	12,0	0,1	12,2	0,16	0,2	197,4	0,2

De forma similar à observada na seção anterior, a presença do fluxo causou pequenas alterações nas condições operacionais durante os testes. A tensão de soldagem tendeu a se elevar ligeiramente após a passagem do arco para a região com fluxo, isto é, com valores de  $\Delta U$  de, no máximo, 0,7 V (Tabela V.9).

Também de forma similar, na região de soldagem ATIG, sob a presença do fluxo, o processo apresentou indícios de uma menor estabilidade tanto para os valores de corrente como para de tensão.

Neste bloco, o projeto experimental usado foi concentrado em um único fator: a densidade superficial. A Figura 5.6 mostra a variação da tensão entre os processos ATIG e TIG com seus respectivos desvios.

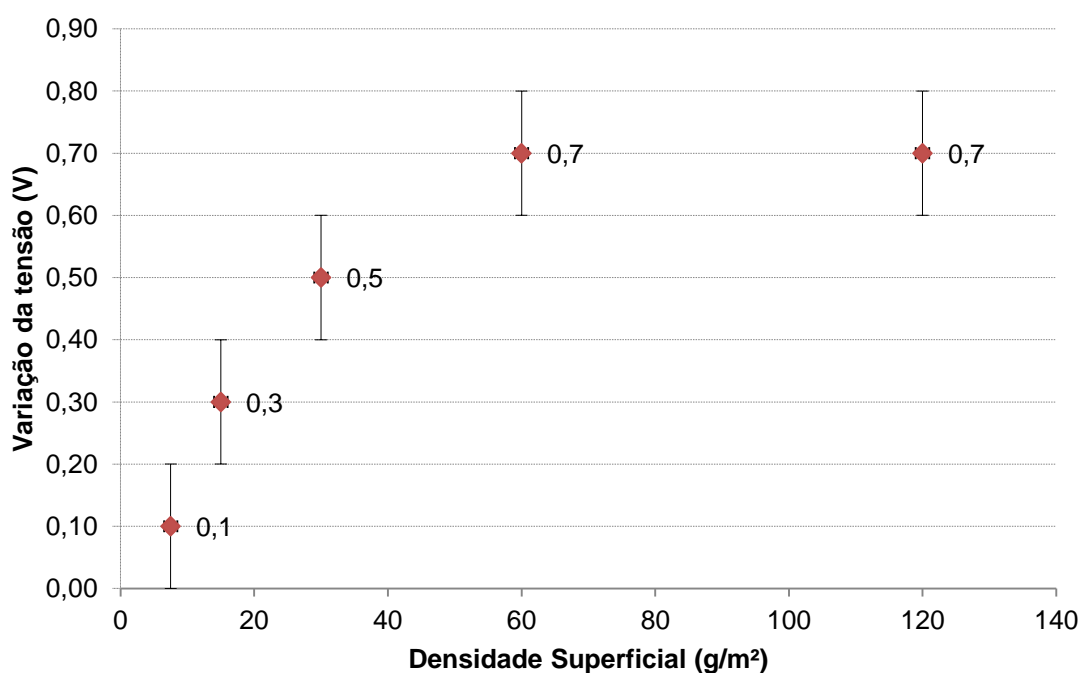


Figura 5.6 – Variação da tensão ATIG e TIG em função da densidade superficial (bloco II)

Os resultados indicam um aumento de  $\Delta U$  com a densidade de fluxo aplicada entre 7,5 a 60 g/m<sup>2</sup>, estabilizando-se a partir de 60 g/m<sup>2</sup> o que pode indicar um limite da variação de tensão em função da quantidade do fluxo, dentro das condições do teste.

A Figura 5.7 mostra seções transversais de soldas feitas com diferentes densidades superficiais de fluxo e de uma das soldas realizadas sem fluxo. Verificou-se que a presença do fluxo causou uma redução da largura do cordão que passou de uma largura média, na soldagem TIG, de  $9,9 \pm 0,1$  mm para  $7,7 \pm 0,3$  mm na soldagem ATIG (Tabela V.10).







TIG	ATIG	Fluxo (g/m <sup>2</sup> )
	 CP15	7,5
	 CP16	15
	 CP17	30
	 CP18	60
	 CP20	120

Figura 5.7 – Seções transversais de cordões TIG e ATIG (bloco II).



Tabela V.10 – Valores médios ( $\bar{x}$ ) e desvios padrões ( $\bar{s}$ ) da largura do cordão (bloco II).

CP	Quant. (mg)	Largura (mm)				$\Delta L$ (mm)
		TIG		ATIG		
		$\bar{x}$	$\bar{s}$	$\bar{x}$	$\bar{s}$	
CP15	7,5	9,8	0,1	8,5	0,2	1,3
CP16	15,0	9,9	0,1	7,8	0,9	2,1
CP17	30,0	9,9	0,0	7,3	0,4	2,6
CP18	60,0	9,9	0,1	7,8	0,1	2,1
CP19	120,0	9,8	0,1	6,8	0,2	3,0
CP20	120,0	9,9	0,1	7,2	0,1	2,7
CP21	7,5	9,8	0,1	8,7	0,2	1,1
Médias		9,9	0,1	7,7	0,3	2,1

A penetração média na soldagem TIG foi de  $1,8 \pm 0,1$  mm e, na soldagem ATIG, a maioria das soldas teve penetração total (apenas no teste com densidade superficial de  $7,5 \text{ g/m}^2$  não se obteve penetração total).

A quantidade de material fundido durante a soldagem aumentou consideravelmente no processo ATIG em especial com a densidade superficial de  $120 \text{ g/m}^2$ . A área da seção transversal do cordão na soldagem TIG foi, em média, igual a  $15,2 \pm 0,7 \text{ mm}^2$  chegando ao valor de  $29,8 \pm 3,6 \text{ mm}^2$  na soldagem ATIG com  $120 \text{ g/m}^2$ , conforme mostra a Figura 5.8. Considerando-se que a energia de soldagem praticamente não mudou entre as partes TIG e ATIG dos cordões feitos, estes resultados indicam um aumento de cerca de 96% no rendimento teórico de fusão do processo.

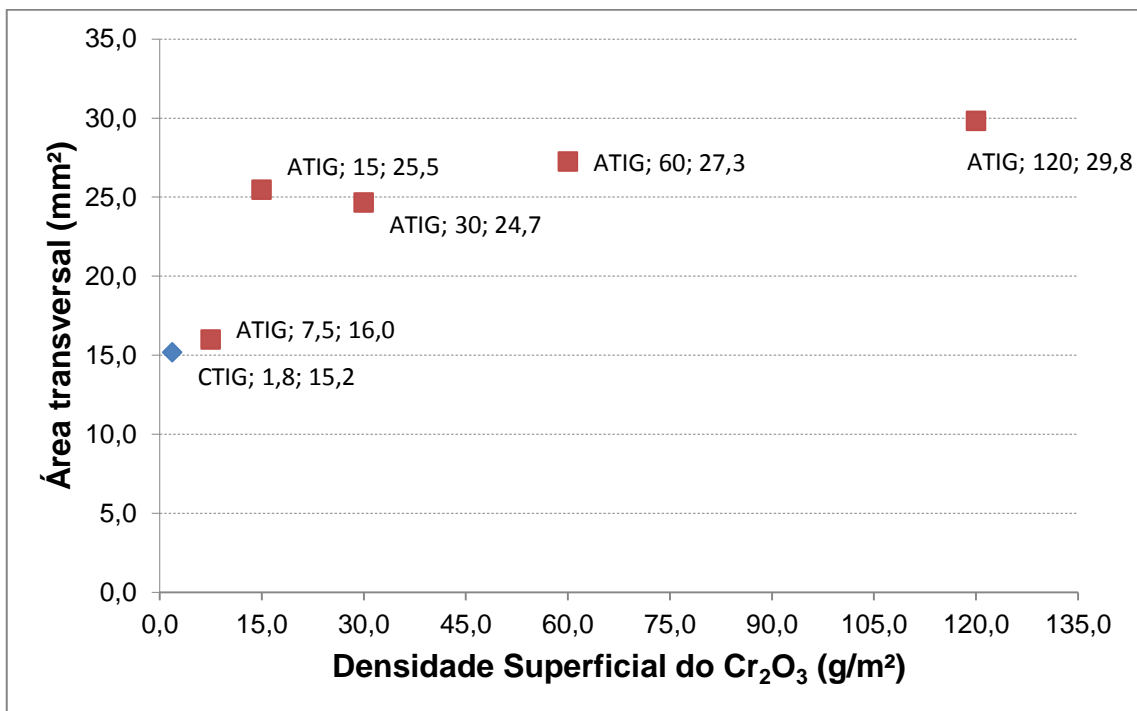


Figura 5.8 – A área da seção transversal na soldagem TIG e ATIG em função da densidade superficial (bloco II)

A Figura 5.9 apresenta a Largura da Raiz (LR) em função da densidade superficial. As medidas de LR indicam uma elevação da fusão na raiz com o aumento da densidade superficial de fluxo. A densidade superficial de  $30 \text{ g/m}^2$ , assim como no bloco I teve ligeira redução da LR comparado com a densidade superficial de  $15 \text{ g/m}^2$ , indicando a possibilidade de uma menor penetração, contudo, esta variação dever estar mais provavelmente ligada a flutuações das condições experimentais.

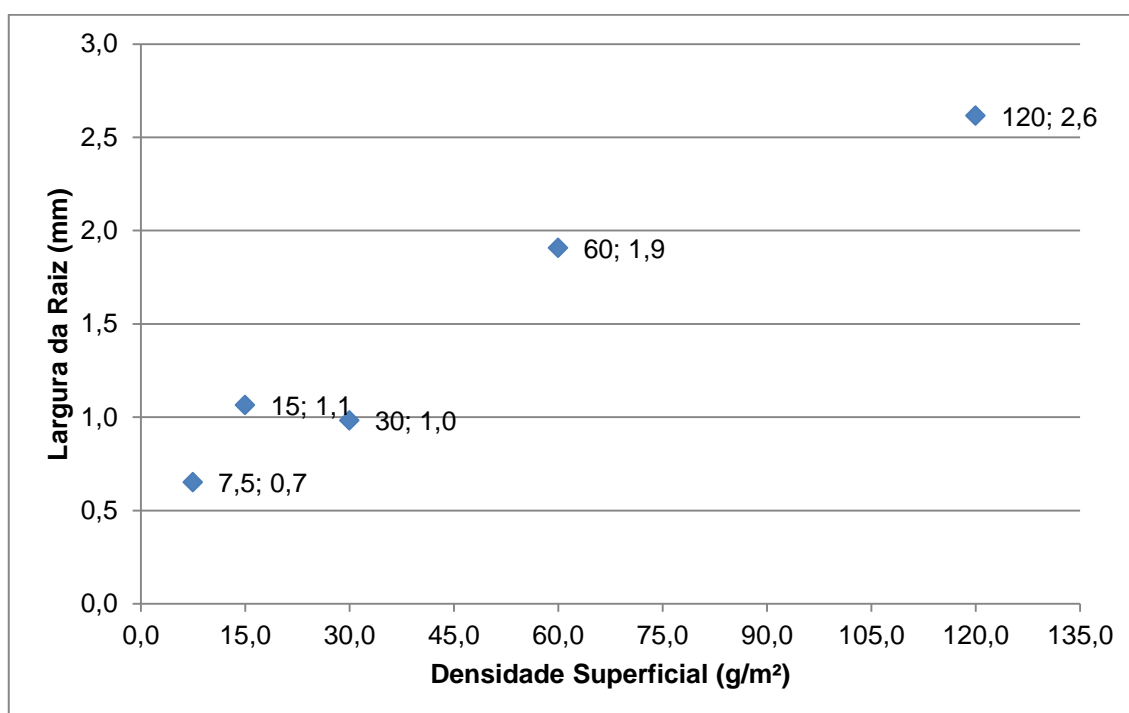


Figura 5.9 – Largura da Raiz (bloco II)

A Tabela V.11 lista os valores de ferrita  $\delta$  no metal de base e na zona fundida tanto para a soldagem TIG quanto para a ATIG.

Tabela V.11 – Valores médios e desvios padrões das porcentagens de ferrita  $\delta$  (bloco II)

Porcentagem de Ferrita $\delta$		Médias	Desvios
		(%)	(%)
TIG		6,56	0,37
ATIG Concentração (g/m²)	7,5	6,35	0,64
	15	6,86	0,48
	30	6,41	0,44
	60	6,42	0,31
	120	6,63	0,40

De modo geral, as diferentes densidades de fluxo parecem não afetar a quantidade de ferrita delta presente na ZF de modo significativo. O valor médio da ferrita  $\delta$  foi de  $6,56 \pm 0,37\%$  para o TIG enquanto o ATIG teve valor médio de  $6,53\%$  e desvios padrão na faixa de  $0,31$  a  $0,64$ ; o que sugere a inexistência de uma diferença significativa.

#### 5.4. Efeito de diferentes densidades superficiais de dois fluxos combinados ( $\text{Cr}_2\text{O}_3$ e $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) – Bloco III

Os testes desta seção correspondem ao bloco de teste III e foram realizados com densidades superficiais nos valores de óxido de cromo ( $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ) entre 60, 55, 50 e 40 e o óxido de alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) entre 5, 10 e 20g/m<sup>2</sup>, conforme Tabela V.12.

Tabela V.12 – Valores de tensão e corrente para os testes (bloco III)

CP	Fluxos				Tensão Elétrica (V)					Corrente (A)	
	Tipo	Quant. (mg)	Tipo	Quant. (mg)	$U_{\text{TIG}}$		$U_{\text{ATIG}}$		$\Delta U$	$\bar{I}$	$\bar{S}$
					$\bar{U}$	$\bar{s}$	$\bar{U}$	$\bar{s}$			
CP22	$\text{Cr}_2\text{O}_3$	60	$\text{Al}_2\text{O}_3$	0	13,2	0,2	13,3	0,2	0,1	197,5	0,3
CP23		55		5	12,7	0,2	13,0	0,2	0,3	197,6	0,2
CP24		50		10	12,2	0,1	12,6	0,2	0,3	197,6	0,2
CP25		40		20	12,6	0,2	12,9	0,2	0,3	197,6	0,2
CP26	$\text{Cr}_2\text{O}_3$	50	$\text{Al}_2\text{O}_3$	10	12,8	0,2	13,4	0,1	0,6	197,7	0,2
CP27		40		20	12,5	0,2	12,7	0,2	0,2	197,7	0,2
				Médias	12,7	0,2	13,0	0,2	0,3	197,6	0,2

De modo similar ao observado nos blocos anteriores, a presença do fluxo causou pequenas alterações nas condições operacionais durante os testes. A tensão de soldagem tendeu a se elevar ligeiramente após a passagem do arco para a região com fluxo, isto é, com valores de  $\Delta U$  de, no máximo, 0,6 V (Tabela V.12).

Neste bloco, o projeto experimental usado foi concentrado em um único fator a quantidade relativa de  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  e de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  no fluxo. A Figura 5.10 mostra a variação da tensão entre os processos ATIG com os dois fluxos.

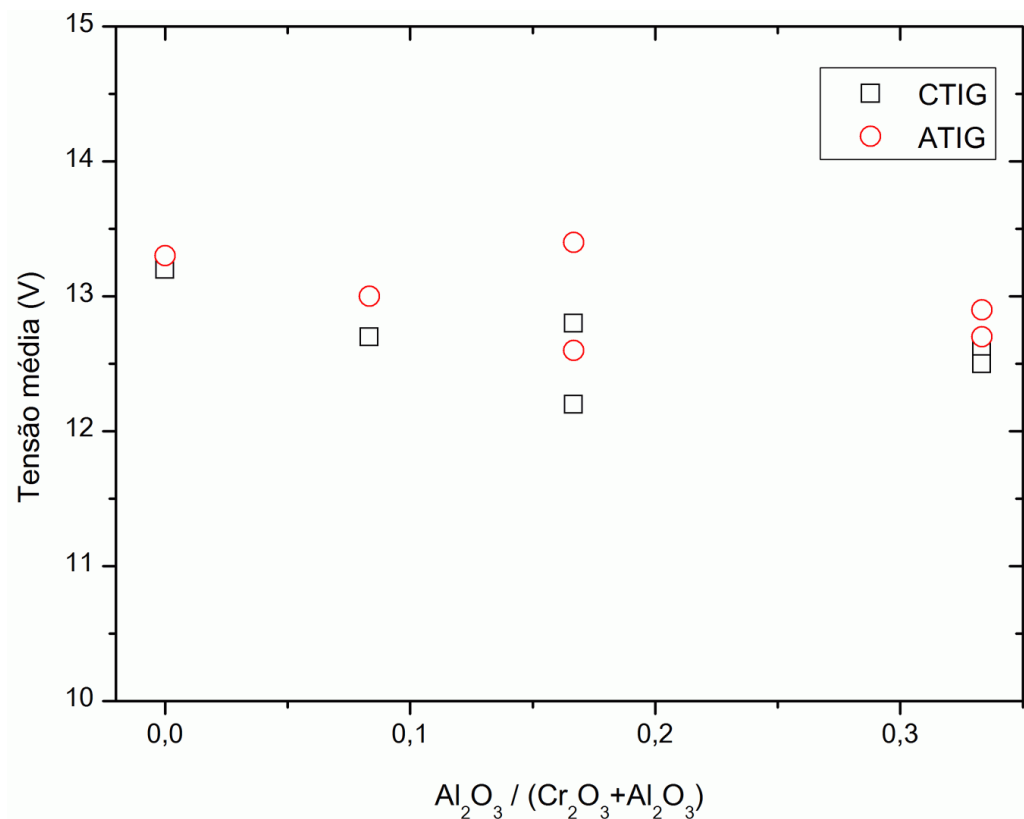


Figura 5.10 – Tensão média em função da relação do  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e a quantidade de pó total (bloco III)

Os resultados sugerem um possível aumento de  $\Delta U$  com o acréscimo do óxido de alumínio ao óxido de cromo embora a dispersão associada com a medida deste parâmetro possa ser considerável considerando principalmente a pequena variação que este apresenta.

As seções transversais das soldas obtidas com as diferentes quantidades de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e para uma das soldas TIG são mostradas na Figura 5.11.

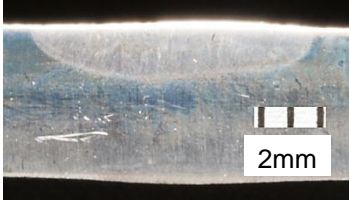
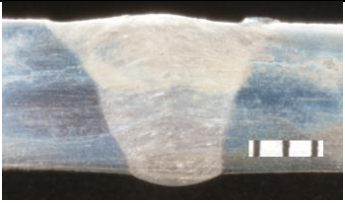

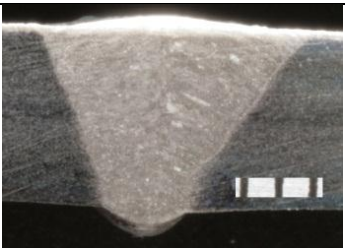
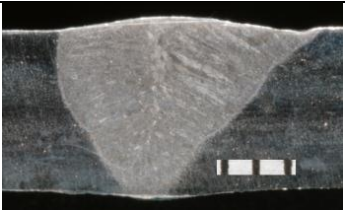
TIG	ATIG	Fluxo (g/m <sup>2</sup> )	
		Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
	 CP22	60	0
	 CP23	55	5
	 CP24	50	10
	 CP27	40	20

Figura 5.11 – Seções transversais de cordões TIG e ATIG (bloco III)

Nos testes realizados neste bloco verificou-se que a presença do fluxo causou uma redução da largura do cordão que passou, em média, de  $9,7 \pm 0,1\text{mm}$  na soldagem TIG para  $8,2 \pm 0,4\text{mm}$  na soldagem ATIG (Tabela V.13). Por outro lado, a presença de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  não parece ter causado alterações significativas na largura do cordão.

Tabela V.13 – Valores médios ( $\bar{x}$ ) e desvios padrões ( $\bar{s}$ ) da largura do cordão (bloco III).

CP	Fluxos				Largura (mm)				$\Delta L$ (mm)
	Tipo	Quant. (mg)	Tipo	Quant. (mg)	TIG		ATIG		
					$\bar{x}$	$\bar{s}$	$\bar{x}$	$\bar{s}$	
CP22	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	60	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0	9,6	0,0	8,3	0,3	1,2
CP23		55		5	9,9	0,3	7,9	0,5	2,0
CP24		50		10	9,6	0,2	8,1	0,3	1,5
CP25		40		20	9,6	0,1	7,9	0,1	1,8
CP26		50		10	9,9	0,1	8,8	0,6	1,1
CP27		40		20	9,5	0,1	7,9	0,3	1,6
						Médias	9,7	0,1	8,2

A Figura 5.12 apresenta a Largura da Raiz (LR) em função da quantidade relativa de Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> no fluxo. As medidas de LR indicam uma elevação da fusão na raiz com o aumento da densidade superficial. A medida da LR da densidade superficial de 60g/m<sup>2</sup> do Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> se manteve com o maior valor, indicando ser o óxido de cromo o componente do fluxo de maior efeito no aumento da penetração.

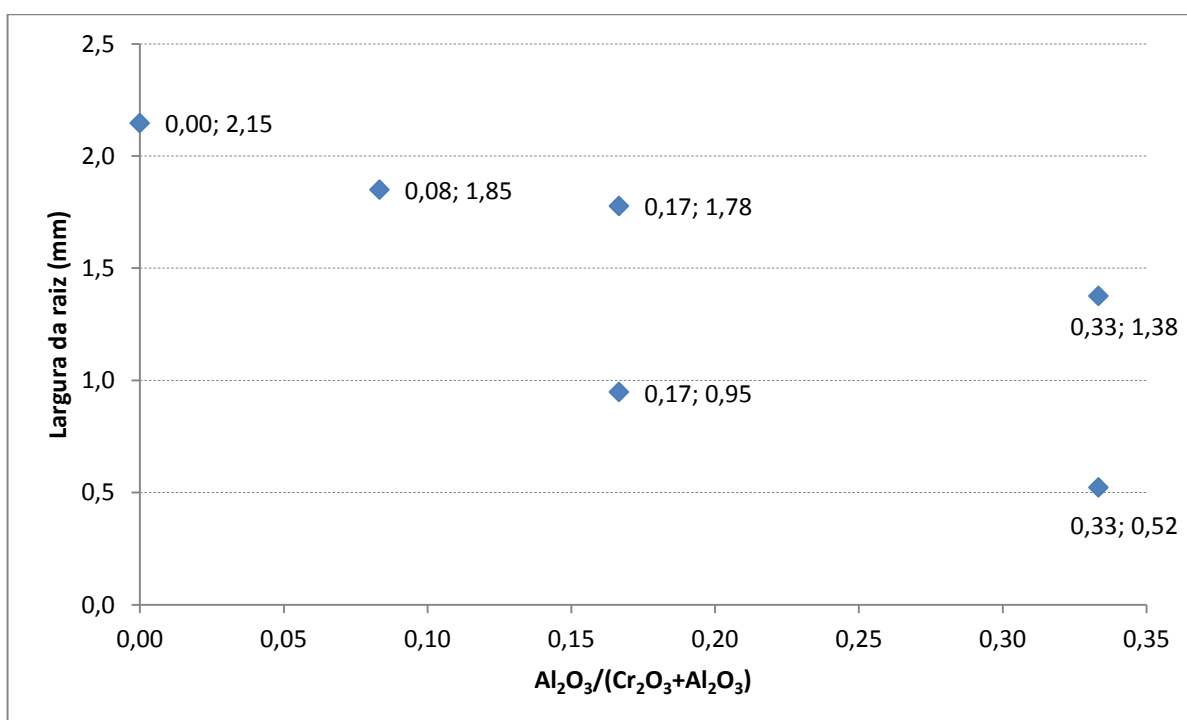


Figura 5.12 – Largura da Raiz (LR) em função da relação do Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e a quantidade de pó total (bloco III)

De modo geral, as diferentes quantidades relativas de  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  e de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  no fluxo parecem não afetar a quantidade de ferrita delta na ZF de modo significativo. Por outro lado, a comparação dos testes com fluxo com os resultados dos testes sem fluxo parece indicar uma pequena diferença. O valor médio da ferrita  $\delta$  foi de  $6,19 \pm 0,40\%$  para os testes com soldagem TIG enquanto que, nos testes ATIG, teve valor médio de  $6,55\%$  e desvios padrão na faixa de  $0,51$  a  $0,65$ . Este valor foi o mais alto entre os três testes, porém, este valor ATIG é cerca de  $6\%$  maior comparando com o TIG. Porém, considerando os desvios padrões obtidos, esta diferença pode ser considerada como pouco significativa.

Tabela V.14 – Valores médios e desvios padrões das porcentagens de ferrita  $\delta$  (bloco III)

Porcentagem de Ferrita $\delta$			Médias	Desvios
			(%)	(%)
TIG			6,19	0,40
ATIG Concentração (g/m <sup>2</sup> )	$\text{Cr}_2\text{O}_3$	$\text{Al}_2\text{O}_3$		
	60	0	6,64	0,51
	55	5	6,32	0,65
	50	10	6,46	0,49
	40	20	6,77	0,57

De modo geral, as diferentes densidades de fluxo parecem não afetar a quantidade de ferrita delta na ZF de modo significativo. O valor médio da ferrita  $\delta$  foi de  $6,19 \pm 0,40\%$  para o TIG enquanto o ATIG teve valor médio de  $6,55\%$  e desvios padrão na faixa de  $0,51$  a  $0,65$ . Este valor foi o mais alto entre os três testes, porém, este valor ATIG é cerca de  $6\%$  maior comparando com o TIG o que sugere uma diferença pouco significativa.



---

## CAPITULO 6: CONCLUSÕES

As principais conclusões deste estudo foram:

- Nas condições de soldagem usadas, o fluxo de um componente ( $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ) possibilitou a soldagem com penetração total em chapas de aço inoxidável ABNT 304 com 5 mm de espessura para densidades superficiais deste fluxo entre 15 e 60  $\text{g/m}^2$ .
- O fluxo  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  aumentou o rendimento teórico de fusão do processo TIG levando a um aumento de aproximadamente 75% na área da seção transversal da zona fundida.
- O uso do fluxo com aditivo ( $\text{KClO}_4$ ), embora cause um aumento de penetração em relação à soldagem TIG convencional, tornou este aumento de penetração menos pronunciado do que o observado com o fluxo de  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  sem aditivo.
- Atribuiu-se este menor efeito a dois fatores: (a) a liberação de oxigênio pelo perclorato de potássio a temperaturas muito baixas e inferiores à temperatura de início de fusão do metal base e (b) a uma diluição do óxido de cromo pelo aditivo, resultando em uma menor atividade desse.
- O fluxo  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  com densidade superficial de  $120\text{g/m}^2$  aumentou o rendimento teórico de fusão comparado com o processo TIG a aproximadamente 96% na área da seção transversal da zona fundida.
- A mistura  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  e  $\text{Al}_2\text{O}_3$  reduziu o rendimento teórico de fusão em relação ao obtido com  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  puro.
- Os testes realizados no presente trabalho não permitem indicar claramente qual dos mecanismos (constricção do arco ou a alteração do movimento do metal líquido na poça de fusão) seria o mais relevante para as mudanças na morfologia do cordão associadas com a soldagem ATIG. Contudo, as variações observadas na tensão do arco durante a transição entre a região sem fluxo e a com fluxo, não indicam mudanças no arco elétrico que pudessem ser associadas com as mudanças observadas na morfologia do cordão.

## **CAPITULO 7: SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

- Estudar os efeitos de fluxos na soldagem ATIG com o fluxo  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  com densidades superficiais com valores superiores a  $120 \text{ g/m}^2$  em chapas com espessura maior que 5mm.
- Estudar, de forma mais aprofundada, o efeito de variações nos parâmetros de soldagem (corrente, velocidade de deslocamento, comprimento de arco etc.) no formato do cordão na soldagem ATIG.
- Estudar os efeitos no arco elétrico alterando seu comprimento com a finalidade de entender melhor o mecanismo proposto da constrição do arco elétrico.

---

## CAPITULO 8: REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. MARQUES, P. V., MODENESI, P. J. BRACARENSE, A. Q. *Soldagem: fundamentos e tecnologia*. Belo Horizonte: Editora da UFMG, 2005. p. 205–227.
2. AWS - AMERICAN WELDING SOCIETY. *Welding handbook: welding processes*. 8. ed. Miami: AWS, 1991. v.2, 955p.
3. MODENESI, P. J.; APOLINÁRIO, E. R.; PEREIRA, I. M.; *TIG Welding with single-component fluxes*. Journal of Materials Processing Technology, 2000. v.99, p. 260-265.
4. LUCAS, W.; HOWSE, D. S. *Activating flux-Increasing the performance and productivity of the TIG and plasma processes*. Welding & Metal Fabrication, 1996. v.64 n.1, p. 11-17.
5. AZEVEDO, A. G. L.; FERRARESI, V. A.; FARIAS, J. P. *Uma revisão sobre o processo de soldagem A-TIG*. In: 16º POSMEC – Simpósio de Engenharia Mecânica, Uberlândia, 2006.
6. WAINER, E.; BRANDI, S.; HOMEM DE MELO, F.. *Soldagem: processos e metalurgia*. São Paulo: Editora Blucher, 2005, p. 60–98.
7. MODENESI, Paulo José. *Introdução à física do arco elétrico e sua aplicação na soldagem dos metais*. Belo Horizonte: PPGEM, 2009. 155p.
8. REIS, R. Pablo; SCOTTI, Américo. *Fundamentos e Prática da Soldagem a Plasma*. São Paulo. Arliber Editora, 2007.
9. AZEVEDO, A. G. L.; FERRARESI, V. A.; FARIAS, J. P. *Soldagem de um Aço Inoxidável Ferrítico com o Processo A-TIG*. Soldagem Insp. São Paulo, Vol. 14, No. 1, 2009, p.002-009.
10. OLIVEIRA, W.C. *Estudo do Efeito de Fluxos na Soldagem ATIG de Alumínio*. Escola de Engenharia da UFMG, 2007. 181p. (Tese, Doutorado em Engenharia Metalúrgica).
11. PASKELL, T.; LUNDIN, C.; CASTNER, H. *GTAW flux increases weld joint penetration*. Welding Journal, 1997. v. 76 n.4, p. 57-62.
12. HUANG H. Y., SHYU S. W., TSENG K. H. and CHOU C. P. *Evaluation of TIG flux welding on the characteristics of stainless steel*. In: Science and Technology of Welding and Joining, 2005 v. 10 n.5, p. 566-573.
13. US Patent No 3 584 187, *Method of Welding Stainless Steel, United States Steel Corp*, 1969. Apud: Lucas & Howse 1996.

14. DONG, C.; ZHU Y.; CHAI, G.; ZHANG, H. *Preliminary Study on the Mechanism of Arc Welding With the Activating Flux*. Joining and Welding Research Institute, Osaka University, Japan. 2004.
15. ANDERSON, P. C. J., WIKTOROWICZ, R. *Improving productivity with A-TIG welding*, Welding & Metal Fabrication, Março, p.108-109, 1996.
16. PERRY, N., MARYA, S, & SOUTIF, E., 1998, *Study and Development of Flux Enhanced GTA Penetrations in a Commercial Grade Titanium*. In: Trends In Welding Research, Proceedings Of The 5th International Conference, Pine Mountain, Georgia, USA, p.520-525. Apud: AZEVEDO e colaboradores 2006.
17. LUCAS, W.; HOWSE, D. S. *Investigation into arc constriction by active fluxes for tungsten inert gas welding*. Science and Technology of Welding end Joining, 2000. v.5 n.3, p. 189-193.
18. LECONTE, S., PAILLARD, P., CHAPELLE, P., HENRION, G., SAINDRENAN, J., *Effects of flux containing fluorides on TIG welding process*, Science and Technology of Welding and Joining, vol. 12 n. 2, p.120-126, 2007.
19. HIDETOSHI FUJII, TOYOYUKI SATO, SHAMPING LU, KIYOSHI NOGI *Development of an advanced A-TIG (AA-TIG) welding method by control of Marangoni convection*, Materials Science and Engineering A, v. 495, p. 296–303, 2008.
20. XU, Y.L., DONG, Z.B., WEI, Y.H., YANG, C.L., *Marangoni convection and weld shape variation in A-TIG welding process*, Theoretical and Applied Fracture Mechanics, v. 48, p. 178–186, 2007.
21. Associazione per l'Insegnamento della Fisica. Carlo Giuseppe Matteo Marangoni. Parma, 2011. Disponível em: <[http://www.aif.it/index.php?FISICI\\_7/fisico19.htm](http://www.aif.it/index.php?FISICI_7/fisico19.htm)> . Acesso em: 27/12/2011.
22. FINOTTI, A. R., *Efeitos da transferência de massa na relação matemática entre espessuras real e aparente em fase livre de gasolina com etanol nas contaminações subterrâneas*. Porto Alegre: UFRS, 2003. 190p. (Tese, Doutorado em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental).
23. HEIPLE, C. R.; ROPER J. R. *Mechanism of minor element effect on GTA fusion zone geometry*. Miami: Welding Journal, 1982. v. 61 n. 4, p. 97-102.
24. MILLS, K. C.; KEENE, B. J. *Factors affecting variable weld penetration*. *International Materials Reviews*, 1990. v. 35, n. 4, p.185-216.
25. MILLS, K. C.; KEENE, B. J.; BROOKS R. F; SHIRALI A. *Marangoni effects in welding*. Phil. Trans. R. Soc. Lond. A, 1998. v. 356, p.911-925.

26. FUJII, H.; SATO, T.; LU, S.; NOGI, K.; *Development of an advanced A-TIG (AA-TIG) welding method by control of Marangoni convection*. Materials Science and Engineering A 495 (2008) 296–303.
27. PERRY, N. *Etude et développement des flux solides en vue d'application en soudage ATIG appliqué au titane et ses alliages ainsi qu'aux aciers inoxydables*. Tese de doutorado (15 June 2000), Laboratoire de Mécanique et Matériaux, ECOLE CENTRALE DE NANTES - ECN.
28. LU, S., FUJII, H., TANAKA, M., NOGI, K. *Oxide flux quantity and size effects on the penetration depth in A-TIG welding*, Transactions of JWRI, v. 31, n. 2, p. 187-192, 2002.
29. APOLINÁRIO, E. R. *Estudo da influência de fluxos no processo de soldagem TIG em aço inoxidável austenítico*. Belo Horizonte: EE-UFMG, 1998. Dissertação de mestrado. 71p.
30. LU, S., FUJII, H., SUGIYAMA, H., TANAKA, M., NOGI, K. *Marangoni convection and welding penetration in A-TIG welding*, Transactions of JWRI, v. 32, n. 1, p. 79-82, 2003.
31. MODENESI, P. J., MARQUES P. V., SANTOS D. B.. *Introdução à Metalurgia da Soldagem*. Belo Horizonte: PPGEM, 2010. 205p.