



**I Curso de Especialização em Engenharia da Soldagem  
Turma 2011 - CTA DEMEC-TC/UFPR**

VINÍCIUS DE OLIVEIRA

**PROCESSOS DE ALTA PRODUTIVIDADE GMAW:  
PARÂMETROS NÃO CONVENCIONAIS**

**CURITIBA-PR**

**2013**

VINÍCIUS DE OLIVEIRA

**PROCESSOS DE ALTA PRODUTIVIDADE GMAW:  
PARÂMETROS NÃO CONVENCIONAIS**

Monografia apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de Especialista em Engenharia da Soldagem do curso de Especialização em Engenharia da Soldagem da Universidade Federal do Paraná, na área de concentração fabricação.

Orientador: Prof. Dr. Ramón Sigifredo Cortés Paredes.

**CURITIBA**

**2013**

**TERMO DE APROVAÇÃO**

VINÍCIUS DE OLIVEIRA

**PROCESSOS DE ALTA PRODUTIVIDADE GMAW:  
PARÂMETROS NÃO CONVENCIONAIS**

Monografia aprovada como requisito parcial à obtenção de grau de Especialista em Engenharia da Soldagem, área de concentração Fabricação, no Curso de especialização em Engenharia da Soldagem, Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná.

Banca Examinadora :

  
Prof. Dr. Hélio Padilha  
UFPR

  
Prof. Dr. Ramon Sigifredo Cortés Paredes  
UFPR

  
Prof. Dr. Paulo Cesar Okimoto  
UFPR

Curitiba, 31 de outubro de 2013.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus pela saúde e oportunidade de participar do curso de especialização, e ainda por tantas vezes ter me feito entender o quão importante seria ter paciência e perseverança para alcançar o resultado, mesmo nos momentos mais difíceis.

Aos familiares e amigos, pelo apoio, confiança e colaboração para que fosse possível a conclusão do curso, ainda, por tantas vezes serem compreensivos pela minha ausência, distancia, e muitas vezes até mesmo minha falta de atenção por estar dividido entre tantas atividades.

À minha esposa Fátima, que me incentivou a dar início a essa etapa, mesmo sabendo o custo em termos de tempo e atenção que esse curso teria, e em toda a jornada foi participativa, tendo sido sempre meu porto seguro nos momentos de desânimo, sempre me lembrando da razão de buscar crescer profissionalmente e pessoalmente.

Aos professores Paulo Okimoto, Ramón Paredes e Américo Scotti, pela compreensão com a minha dedicação compartilhada entre as atividades acadêmicas, pessoais e profissionais, não deixando nunca que isso se tornasse um obstáculo intransponível me oportunizando buscar a realização do sonho de contribuir para a comunidade acadêmica com meu trabalho.

Por fim, um especial agradecimento A um grande amigo que me apresentou ao mundo da soldagem, Sr. Osvaldo Jacinto, conhecido por suas atividades na Cavsteel, por ter sempre me conduzido com suas orientações à buscar aliar o conhecimento técnico e prático na solução dos problemas, e ter me dado o apoio final para que na última hora, do último dia eu realizasse minha inscrição para dar início a essa jornada.

## RESUMO

Os processos de soldagem se estabeleceram como um dos principais processos de produção industrial metal mecânica ao longo do último século, sendo o principal processo de ligação de componentes, especialmente os metálicos, tendo assim uma crescente importância dentro do desenvolvimento industrial em geral. Dentre os processos existentes o *Gas Metal Arc Welding* (GMAW) ganha destaque devido ao atendimento à soldagem de todos os materiais usualmente aplicados as construções metal mecânicas, sua facilidade de uso, maior produtividade, entre outras vantagens quando comparado com processos concorrente como o *Gas Tungsten Arc Welding* (GTAW) e o *Shield Metal Arc Welding* (SMAW). Dada a importância do processo, a busca por uma maior produtividade é essencial, e diferentes forma de obter esse ganho tem sido apresentadas, desde o uso de gases de proteção desenvolvido, uso de duplo arame, trabalhos com processos híbridos, entre outros, tendo este trabalho o intuito de abordar a busca dessa melhoria através do uso de parâmetros não convencionais. Essa abordagem dará destaque a classificação desses modos de transferência metálica, aplicações, vantagens e desvantagens frente as demais técnicas.

**PALAVRAS-CHAVE:** GMAW. Alta Produtividade. Parâmetros Não Convencionais. Modos de Transferência Metálicos. Goticular.

## **ABSTRACT**

Welding processes have established themselves as one of the main industrial metalworking production processes over the last century, the main method of bonding components, especially metal, and thus increasing importance within the industrial development in general. Among the existing processes, Gas Metal Arc Welding (GMAW) is emphasized due to compliance with welding all materials usually applied in mechanical constructions, its ease of use, increased productivity, among other advantages compared to competing processes such as Gas Tungsten Arc Welding (GTAW) and Shield Metal Arc Welding (SMAW). Given the importance of the welding process, the search for higher productivity is essential, and different ways to get this gain has been made from the use of shielding gases developed, using double wire work with hybrid processes, among others, having this work the aim of of the pursuit of the improvement, as approach through the use of unconventional parameters. This approach will highlight the classification of these modes of metal transfer, applications, advantages and disadvantages, comparing with the other techniques.

**KEYWORDS:** GMAW. High Productivity. Unconventional Settings. Metal Transfer Modes. Spray.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Processo GMAW.....	16
Figura 2 – Modos de Transferência Metálica Clássicos.....	17
Figura 3 – Corpo de Prova 2 de Soldagem utilizando Rapid Melt™ .....	22
Figura 4 – Corpo de Prova 1 de Soldagem utilizando Rapid Melt™ .....	23
Figura 5 – Formação de Reentrância com Arco Curto.....	23
Figura 6 – Efeito de constrição do arame fundido (a) e de reignição (b).....	25

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - Distribuição do Número de Textos Localizados, Excluídos e Selecionados após Leitura de Resumos, por Fonte.....	14
TABELA 2 – Dados e Parâmetros de aplicação por AGA (1996).....	21

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

AWS – American Welding Society

GMAW – Gas Metal Arc Welding

GTAW – Gas Tungsten Arc Welding

IIW – International Institute of Welding

SMAW – Shield Metal Arc Welding

## LISTA DE SÍMBOLOS

$i$  – Corrente de Soldagem

$l$  – Comprimento Livre do arame eletrodo

$V_{alim}$  – Velocidade de alimentação do arame eletrodo.

$\alpha$  - Constante relacionada a diâmetro e composição do arame eletrodo, gás de proteção e polaridade da corrente

$\beta$  - Constante relacionada a diâmetro e composição do arame eletrodo, gás de proteção e polaridade da corrente

$\eta$  - Rendimento

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>11</b>
<b>2 METODOLOGIA.....</b>	<b>13</b>
<b>3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>15</b>
<b>3.1 Caracterização do processo GMAW .....</b>	<b>16</b>
<b>3.2 Produtividade em Soldagem.....</b>	<b>19</b>
<b>3.3 Técnicas de alta produtividade com parâmetros não convencionais.....</b>	<b>21</b>
<b>4 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>27</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>30</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Ao longo dos últimos 50 anos, a soldagem se tornou um dos principais processos de fabricação existentes para a junção de partes metálicas e também não metálicas, além de sua aplicação para promover a transformação de superfícies através da deposição de revestimentos. Entre suas principais vantagens estão a versatilidade do processo, os menores tempos de produção, a possibilidade de automação do processo, a redução de peso de componentes, comparado com outros processos de junção que necessitam do uso de componentes adicionais e da criação de geometrias adicionais, como flanges, como no caso dos processos de união por ancoragem mecânica, como o rebitamento ou o aparafusamento.

Neste contexto, trataremos a soldagem particularmente como processo de união de componentes, abordando a produtividade, que é parâmetro fundamental na avaliação dos recursos empregados, uma vez que com seu ganho processos mais ágeis e com menor aplicação de mão de obra são desenvolvidos. Além disso, com o domínio dos parâmetros de soldagem aplicados, pode-se utilizar, por exemplo, arames eletrodos e gases de proteção mais baratos através da compensação de suas dificuldades com o uso de parâmetros otimizados.

Os processos de soldagem tiveram um grande avanço nos últimos anos graças ao progresso relacionado à eletrônica, que permitiu a implantação de controles digitais nos parâmetros de soldagem, inclusive com a criação de controles independentes para variáveis até então inter-relacionadas. Além disso, possibilitou a automatização dos processos, o que pôde produzir resultados além do que um operador humano seria capaz de conseguir, como altas velocidades e grandes intensidades de corrente de soldagem, precisão de manutenção de posicionamento e velocidades.

O processo GMAW, tendo como base a soldagem feita através da formação de um arco elétrico entre um arame alimentado automaticamente pelo equipamento e o metal base, em uma fonte de tensão constante, tem tido seu uso ampliado devido à versatilidade do processo em atender os mais diversos materiais usualmente aplicados na indústria, assim como, pela facilidade de operação do processo e rendimento e taxa de deposição muito superior a processos até então aplicados, como GTAW e SMAW.

O objetivo deste trabalho foi fazer uma revisão na literatura sobre o desenvolvimento de técnicas que aumentam a produtividade do processo de GMAW através do uso de parâmetros não convencionais. Buscou-se apresentar os estudos produzidos, as aplicações que tem sido feitas do processo e suas vantagens e desvantagens em relação às demais técnicas.

## 2 METODOLOGIA

Para atender ao objetivo proposto pelo presente trabalho, estabeleceu-se o método de pesquisa buscando responder às perguntas: Que pesquisas relevantes já foram produzidas sobre o problema de pesquisa? Como é caracterizado o modo de transferência metálica aplicada com essas técnicas? Quais suas aplicações? Quais suas vantagens em relação a outras técnicas de alta produtividade em soldagem GMAW?

Os textos buscados deveriam abordar o *processo de soldagem GMAW e a apresentação de técnicas de alta produtividade ou classificação de modos de transferência metálica*.

As informações para o desenvolvimento do trabalho foram buscadas em 14 bases de dados internacionais relevantes na área: ACS, Scitation, ASCE, Annual Reviews, Begell House, Wiley, Cambridge, Emerald, Thomas, IEEExplore, IOP, OECD, Sage e Science Direct. Nos mecanismos de busca das bases de dados, disponíveis em páginas da internet, foram procurados artigos com as palavras-chave GMAW, Gas Metal Arc Welding e GMA Welding.

Os textos selecionados foram submetidos a uma análise preliminar através da leitura de seus títulos e, em caso de refinamento, de seus resumos. Alguns textos foram excluídos, como no de título *Microstructure evolution simulation in hot rolled DP600 steel during gas metal arc welding*, pois além de não haver nenhuma relação direta com as referências a apresentação de técnicas de alta produtividade ou classificação de modos de transferência metálica, há ainda uma evidente relação com a análise metalúrgica e não acerca de processo.

Os resultados desse processo podem ser vistos na Tabela 1.

**TABELA 1 - Distribuição do Número de Textos Localizados, Excluídos e Selecionados após Leitura de Resumos, por Fonte.**

<i>Fonte</i>	<i>Textos localizados</i>	<i>Textos excluídos</i>	<i>Textos selecionados</i>
ACS	4	4	0
Scitation	28	28	0
ASCE	50	50	0
Annual Reviews	1	1	0
Begell House	1	1	0
Wiley	352	351	1
<i>Fonte</i>	<i>Textos localizados</i>	<i>Textos excluídos</i>	<i>Textos selecionados</i>
Cambridge	44	44	0
Emerald	87	87	0
Thomas	0	0	0
IEEEExplore	162	161	1
IOP	246	246	0
OECD	3	3	0
Sage	0	0	0
Science Direct	1141	1137	4
<b>Total</b>	<b>2119</b>	<b>2112</b>	<b>7</b>

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A soldagem, de modo geral, pode ser definida como o processo de união de materiais através da aproximação de átomos ou moléculas das peças, sob condições tais que haja a formação de ligações químicas entre as partes envolvidas, inclusive de um terceiro material envolvido na junta. Este processo tem grande importância dentro da indústria de fabricação, sendo o mais importante processo de união de metais utilizado industrialmente (MODENESI; MARQUES; BRACARENSE, 2008). Sua utilização é ampla como processo de fabricação: desde itens de pequeno porte, como componentes eletrônicos, até mesmo equipamentos e estruturas de milhares de toneladas. Também podem ser executados dos mais simples componentes até os que envolvem os mais altos graus de responsabilidade técnica, como componentes estruturais de grandes edifícios, usinas nucleares entre tantos outros.

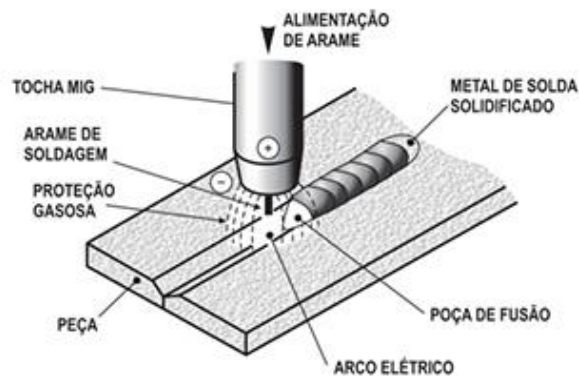
Os primeiros registros de soldagem da forma conhecida atualmente datam de cerca de 100 anos, advindas justamente do desenvolvimento demandado ao início do século XX, com o desenvolvimento dos processos industriais de fabricação em substituição dos processos manuais, quase artesanais, até então aplicados.

Seu desenvolvimento ao longo do século se deu de forma concentrada durante os dois períodos de conflitos bélicos mundiais, devido às novas demandas em termos de recursos utilizados, assim como necessidade de maior produtividade e qualidade das ligações executadas. Já no último quarto do século, com o avanço da computação e da globalização do conhecimento com o advento de novos métodos de acesso à informação, assim como a maior competitividade gerada pelo acesso global à produção, houve novamente um forte avanço, então com o uso de controles eletrônicos dos parâmetros e de processos híbridos.

Dentre os processos de soldagem mais utilizados na indústria em geral, o processo GMAW ganha destaque devido a sua flexibilidade no atendimento às necessidades de produção em geral, atendimento a soldagem de praticamente todos os materiais comercialmente mais importantes, relativo baixo custo de implantação, facilidade de operação de equipamentos, além da produtividade relativamente alta quando comparada com os demais processos de soldagem usuais, fazendo assim com que haja grande interesse pelo seu desenvolvimento em termos de aplicação industrial e de pesquisa tecnológica e acadêmica.

### 3.1 Caracterização do processo GMAW

Conforme classificação definida pela American Welding Society, o processo de soldagem GMAW é um processo de soldagem a arco, com a abertura entre o eletrodo-arama alimentado automaticamente e o metal de base, com a proteção de um gás, tanto ativo quanto inerte (BRACARENSE, 2003).



**Figura 1 - Processo GMAW**  
Fonte: Site [www.esab.com.br](http://www.esab.com.br)

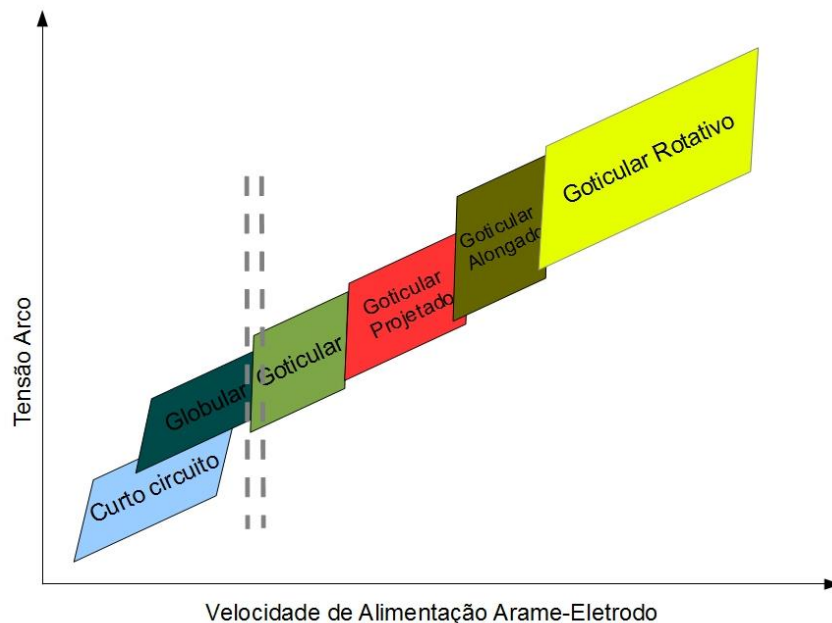
Pode ser utilizado nos modos automático, semiautomático ou mecanizado, tendo como vantagens o atendimento à todas as posições de soldagem, taxas de deposição relativamente altas em relação à processos como SMAW, assim como velocidade de soldagem, e limpeza mínima após a soldagem necessária.

Entre as limitações apresentadas estão a geometria da tocha que dificulta o acesso em locais de acesso já difíceis, a dificuldade de uso em soldas de campo, visto que as correntes de ar podem impedir a correta proteção da poça fundida pelo gás alimentado, entre outros.

O modo de transferência metálica, ou seja, o modo como as gotas formadas pelo arame eletrodo liquefeito são transportadas pelo arco elétrico até a poça de fusão, é um fenômeno característico do processo GMAW e as características de soldagem estão diretamente ligadas com o modo de transferência metálica obtida, de acordo com os parâmetros de soldagem utilizados, dentre eles diâmetro do eletrodo arame, composição, velocidade de alimentação e extensão livre do arame-eletrodo, gás de proteção utilizados, corrente de soldagem e extensão (IORDACHESU; QUINTINO, 2008). Assim, é possível obter os seguintes meios de transferência do metal pela classificação clássica do *International Institute of Welding*

(IIW): Curto Circuito, Globular, Goticular, Goticular Projetado, Goticular Moderado ou Alongado e Goticular Rotativo, além dos não convencionais como o Pulsado (GMAW-P).

Alguns trabalhos tem buscado apresentar uma nova forma de classificação desses modos de transferência metálicos, trazendo um possível alinhamento entre as aplicações de pesquisa e industriais, atualizando a classificação clássica da IIW que tem sido utilizada nas últimas décadas. Essa atualização se faz necessária pela introdução dos modos não naturais de transferência e pela possibilidade de se medir e analisar o processo de soldagem com maior precisão e resolução, onde muitos processos que até então grosseiramente seriam considerados os mesmos, acabam tendo suas características diferenciadas.



**Figura 2 - Modos de Transferência Metálica Clássicos segundo IIW**

Experimentos conduzidos com o objetivo de procurar uma nova classificação dos modos de transferência tem sido pesquisado por Scotti et al. (2012), com o uso de técnicas experimentais como análise de imagem em alta velocidade da deposição do material pela técnica de retro iluminação em sincronia com a análise de sinais elétricos de corrente e tensão. Para este trabalho, de acordo com as similaridades em intensidade de corrente e tensão aplicados, assim como as características de formação de gota, e transporte, fica evidenciado que temos para as técnicas em estudo a transferência em voo livre com os modos goticular moderado (*Streaming spray transfer*) e goticular rotativo (*rotating spray transfer*) obtidos, ficando bastante

evidente o forte efeito das forças eletromagnéticas causadas pelas correntes de alta intensidade aplicadas. É interessante observar que ambos os modos são classificados na classe de modos de transferência naturais aplicadas pelos autores.

Existe atualmente um forte desenvolvimento de processos com controle eletrônico dos parâmetros, alguns inclusive com curvas de tensão e corrente modeladas com complexos requisitos, possibilitando a aplicação de modelos individuais para cada etapa do processo, desde a formação da poça de fusão com o material de base, até mesmo a formação e o destacamento da gota, como apresentado por Cramer (2012).

São diversas as iniciativas quanto à aplicação destes novos processos na produção industrial, possibilitando o ganho de produtividade, evitando ainda os problemas típicos do trabalho de alta produtividade, como no caso da transferência por curto circuito, quando do uso de alta velocidade de alimentação do arame existe o aumento da formação de respingos, que é minimizada com o uso de correntes pulsadas (GMAW-P), de vasta aplicação na indústria automotiva.

Quando se busca a alta produtividade no uso do processo GMAW com altas taxas de deposição, passasse a trabalhar com maiores velocidade de alimentação passando pela corrente de transição e atingindo o modo de transferência Goticular, assim como suas variantes, com o uso de gases de proteção com alta concentração de argônio. Neste modo pequenas gotas são formadas na liquefação do arame-eletrodo, sendo aceleradas em direção a poça de fusão, com o tamanho da gota reduzido de acordo com o aumento da corrente, tendo, no entanto, um aumento significativo no volume de salpicos visto que o direcionamento axial do material transportado é reduzido, como apresentado por Gimenes (2003)

A composição do gás de proteção é fator fundamental para a caracterização do modo de transferência, além da sua função básica de proteger o material sendo transferido, assim como a poça de fusão do efeito oxidante da atmosfera ambiente. As propriedades físicas e químicas dos gases de proteção tem efeito direto na formação do arco, perfil de cordão e outros. A densidade tem efeito direto na função protetora do gás, com gases de maior densidade que o ar, como Ar e CO<sub>2</sub>, tendo proteção mais eficiente que gases como H e He de menor densidade, favorecendo a maior formação de turbulência.

Propriedades elétricas dos gases de proteção são diretamente afetadas pelas características de dissociação e ionização dos gases, acabam sendo influenciadas

pelos vapores metálicos formados, necessitando assim de menor energia para a ionização.

Alguns desses novos processos foram desenvolvidos para atender a alta produtividade com o uso de parâmetros não convencionais, com a aplicação de regulagem de tensão relativamente baixa e da alta velocidade de alimentação do arame-eletrodo, sendo denominado por alguns fabricantes como modo de transferência spray modificado ou goticular modificado em uma completa tradução ao idioma. Esses processos podem ser utilizados para a soldagem de chapas de grande espessura, atendendo a requisitos de penetração, acabamento e alta produtividade, esses fundamentais para o atendimento técnico e viabilidade comercial dos processos.

Ganhos expressivos em produtividade, intimamente relacionados a redução dos custos de produção, através de maiores taxas de deposição, assim como melhoria na qualidade da soldagem através de um melhor perfil de penetração, maior fusão lateral, transição suavizada entre reforço e metal de base, tem sido obtidos com o uso desses processos.

Através de um maior conhecimento dos parâmetros de processo e suas possíveis variações, em especial no caso velocidade de alimentação e extensão livre do arame eletrodo, estabelecendo uma razão de causa-efeito, é possível estabelecer uma maior faixa de trabalho, chegando a variações de modos de transferência como o arco goticular, como alongado e o rotativo (AGA, 1996).

### **3.2 Produtividade em Soldagem**

A produtividade dentro da soldagem pode ser avaliada como o volume soldado durante o período de tempo avaliado (1) , e assim, tendo em vista que facilmente pode-se mensurar o material depositado durante o período adotado, é usual relacionar diretamente a produtividade com a taxa de deposição do material de adição nos processo com alimentação automatizada. É interessante salientar que para que essa relação direta exista, é necessário avaliar o rendimento de deposição, tendo em vistas as possíveis perdas de massa do material alimentado, seja por respingos e formação de vapores metálicos.

$$PRODUTIVIDADE = \eta \cdot \frac{V_{a\lim}}{\text{tempo}} \quad (1)$$

Segundo Suban (2001) a busca pelo aumento de produtividade no processo para redução de custos produtivos através da redução do tempo de produção ocorre atualmente através de três iniciativas:

O uso de gases de proteção com até quatro componentes;

Novos conceitos de equipamentos de soldagem e;

Uso de parâmetros não convencionais para a soldagem, sendo este o nosso objeto de estudo.

Relacionando o aumento da produtividade com um aumento na taxa de deposição do material de adição, as técnicas usuais atuam para o aumento da velocidade de alimentação deste, através do aumento da extensão livre do arame eletrodo, ou da intensidade da corrente de soldagem, ambas as alterações contempladas pela Equação do Consumo:

$$V_{a\lim} = \alpha i + \beta li^2 \quad (2)$$

É importante verificar na apresentação da (2), que  $\alpha$  e  $\beta$  são constantes dependentes do diâmetro e composição do arame eletrodo, gás de proteção e polaridade da corrente, que enquanto o aumento do comprimento livre ( $l$ ) atua de maneira direta para o aumento na velocidade de alimentação, o aumento da corrente ( $i$ ) atua de forma quadrática para esse resultado.

Segundo Rao et al (2012), é importante fazer o destaque da importância da colaboração do aquecimento por efeito joule do arame eletrodo, na taxa de deposição, sendo seu feito predominante no cálculo, sendo na equação apresentada (2), representado pelo ultimo termo.

Pode-se ainda trabalhar com a inversão da polaridade para este aumento trabalhando com as constantes, pois a soldagem com o eletrodo ligado ao polo negativo possibilita uma maior taxa de deposição que ligada ao polo positivo em função da maior queda de tensão obtida no catodo que no anodo, além da maior facilidade na formação da região.

### 3.3 Técnicas de alta produtividade com parâmetros não convencionais

Através do desenvolvimento de fontes eletronicamente controladas, assim como processos automatizados e novos implementos, como tratores de múltiplos estágios para alimentação de arame eletrodo, novas misturas gasosas para a proteção, entre outros, a ampliação da faixa de trabalho em termos de tensão e corrente para o processo GMAW foi obtida. Com isso se tornou viável a aplicação de variações até então não exploradas nos processos, inclusive com a possibilidade de desvinculação desses como variáveis dependentes no ajuste.

Estudos da década de 70 já trabalhavam com mudanças nos parâmetros de soldagem como forma de se obter aumentos da ordem de 30% na taxa de deposição para o processo com arame de diâmetro 1,2 mm, trabalhando em corrente de 350 A, com aumento de extensão livre de 25 para 35 mm, como apresentado por Norrish (2006).

Aumentos na intensidade da corrente de soldagem provocam o aumento na taxa consumo, ocasionando o pré-aquecimento por efeito resistivo do arame eletrodo condutor em sua extensão livre, obtendo modo de transferência de arco rotativo, uma técnica utilizada por alguns fabricantes que tem se mostrado comercialmente viáveis, como o Rapid Melt da AGA.

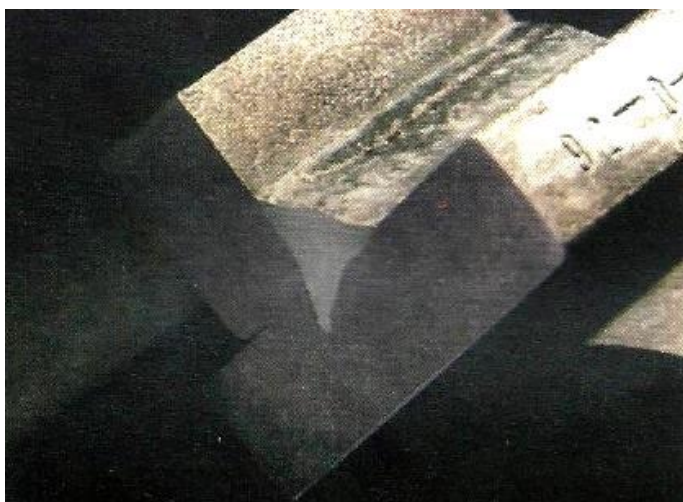
Exemplos de aplicação apresentados por AGA (1996) deste processo são apresentados nas figuras 3 e 4 para verificação de seu perfil de penetração, assim como seus dados e parâmetros de processo são apresentados na tabela 2.

**TABELA 2 – Dados e Parâmetros de aplicação por AGA (1996)**

	<b><i>Corpo de Prova 1</i></b>	<b><i>Corpo de Prova 2</i></b>
<b>Tipo de Arco</b>	Goticular Rotativo	Goticular Moderado
<b>Espessura de chapa (mm)</b>	20	20
<b>Velocidade de Soldagem (cm/min)</b>	35	35
<b>Taxa de Deposição (kg/h)</b>	19	19
<b>Aporte Térmico (kJ/min)</b>	4,4	4,2
<b>Grau de Mecanização</b>	Mecanizado	Mecanizado
<b>Espessura da Garganta (mm)</b>	11	11
<b>Nº Passes</b>	1	1

Um dos grandes obstáculos à utilização de altas correntes e comprimentos livres de arame eletrodo é manutenção da estabilidade do arco formado, assim como a confiabilidade de um sistema de alimentação continua com velocidades de trabalho da ordem de 30 m/min. O uso de arames-eletrodo sem o revestimento em cobre, assim como sistemas com múltipla tração tem sido desenvolvido para contornar esses limitantes. Outro limitante quando se trabalha com altas correntes de soldagem é a formação de grandes poças de fusão, sendo assim favorecida a posição plana de trabalho, e em condições específicas, limitando-se a essa (WEMAN, 2011).

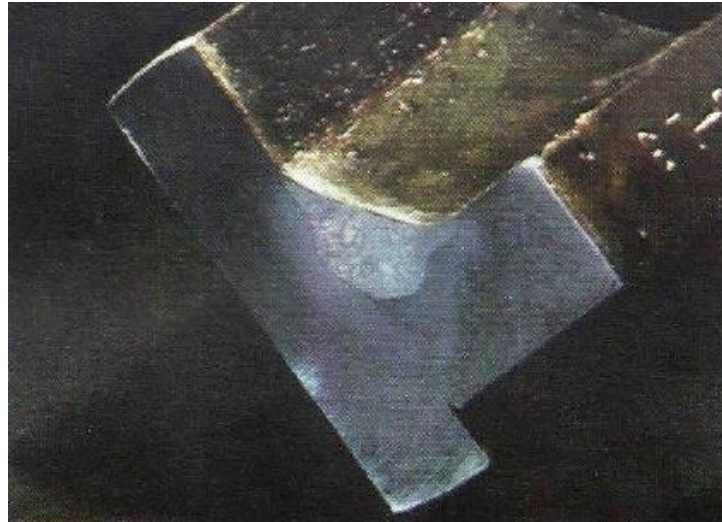
Uma técnica aplicada utilizando arcos curtos, com menores tensões que usuais, porém com alta intensidade de corrente e conseqüentemente grande taxa de deposição é apresentada por Kramer (2012) como uma transferência goticular de arco curto. Nesta técnica, devido a alta intensidade de corrente campos magnéticos de alta intensidade são formados, gerando assim pressão estática elevada sobre a poça de fusão gerando uma reentrância nesta, formando uma cavidade onde o arco elétrico é estabelecido.



**Figura 3 – Corpo de Prova 2 de Soldagem utilizando Rapid Melt™**  
Fonte: Catalogo AGA

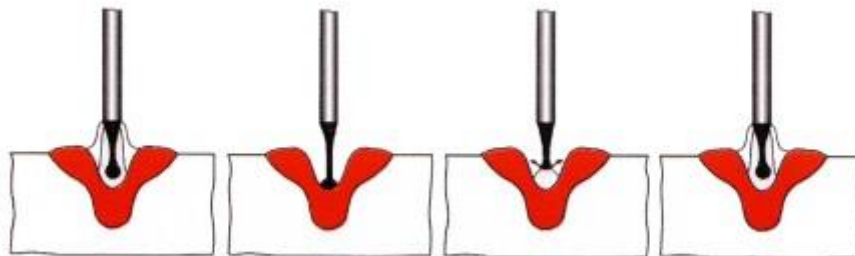
Ainda, devido à elevada densidade de corrente, a resultante gera forças radiais que geram uma grande constrição na extremidade do arame-eletrodo, gerando uma estricção que facilita o desprendimento das gotas, ocorrendo contatos de ponte muito rápidos entre o metal de adição fundindo e a poça de fusão. Devido a

esses rápidos curtos circuitos formados, o som da soldagem acaba apresentando um ruído muito semelhante ao da transferência por curto circuito.



**Figura 4- Corpo de Prova 1 de Soldagem utilizando Rapid Melt™**  
Fonte: Catalogo AGA

Devido ao efeito de ejeção causado por essas forças não há formação de grandes respingos, mesmo quando da re-ignição do arco do arco, ou seja, alteração abrupta na resistência do sistema, pela suavização de pico causada elétrica ou eletronicamente aplicada pela fonte de soldagem podendo realizar a compensação inclusive na taxa de alimentação do metal de adição para a compensação momentânea na corrente de soldagem. Ainda, os respingos de menor volume formados acabam retornando a poça de fusão por estarem sendo formados dentro da reentrância.



**Figura 5 – Formação de Reentrância com Arco Curto**

Fonte: Cramer (2012)

A reentrância formada favorece a obtenção de um cordão de solda com menor índice de mordedura, perdas por radiação, maior formação de poros devido à

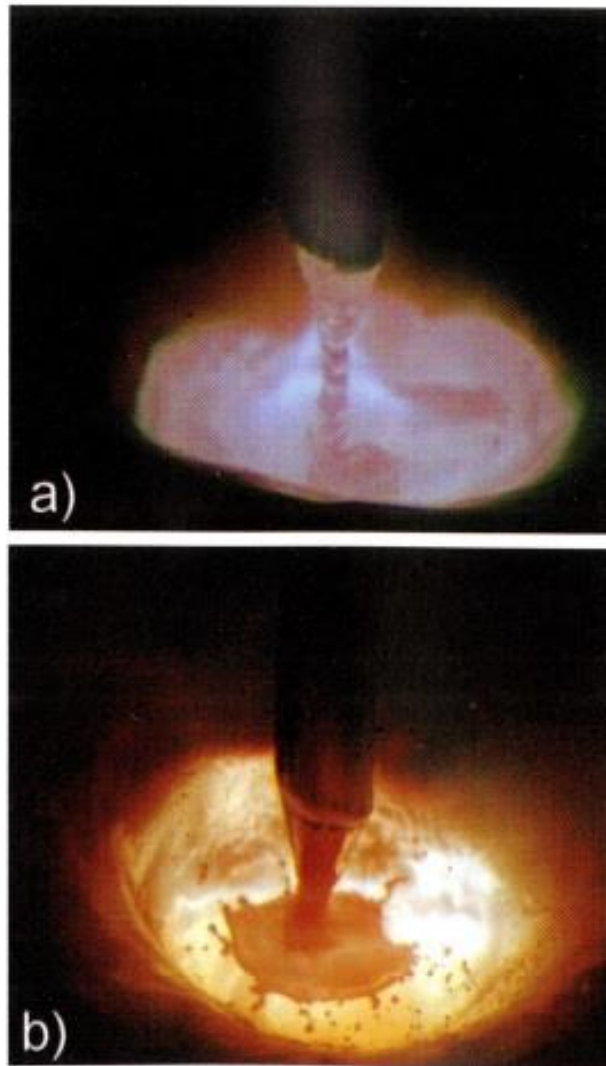
agitação na poça de fusão, maior penetração pelos efeitos térmicos e mecânicos e maior efeito do sopro magnético nas bordas da peça de trabalho.

Além do efeito de alta taxa de fusão obtido pela técnica, é possível obter um perfil de penetração bastante favorável, possibilitando a aplicação com chanfros de menores dimensões e ângulos de abertura, tendo assim um menor volume de soldagem necessário por unidade de comprimento da solda, favorecendo assim a redução de tensões residuais e ainda das deformações na peça de trabalho.

Suban (2001) por sua vez, busca estabelecer a relação da taxa de deposição com o gás de proteção, e para tal a técnica T.I.M.E. (*Transferred Ionized Molten Energy*) desenvolvida pelos pesquisadores Church e Imaizumi (1990) é apresentada.

A técnica tem como diferencial a aplicação de uma mistura quaternária de gases para a proteção do arco e poça, tendo na prática a sua composição patenteada formada por 65% Ar, 26,5% He, 8% CO<sub>2</sub> e 0,5% O<sub>2</sub>, agregando propriedades a mistura como o aumento na condutividade térmica e energia de ionização causada pelo He, redução da tensão superficial, facilitando a ionização do gás causada pelo O<sub>2</sub>, assim como o maior efeito de limpeza e penetração, produtos da adição do CO<sub>2</sub>, entre outros.

Taxas de fusão da ordem de 27 kg/h, com arame eletrodo de 1,2 mm de diâmetro e com velocidades de alimentação de 50m/min, são apresentadas em seus estudos, tendo produtividade superior a tecnicamente anteriormente apresentada, porém devido a impossibilidade de obtenção de características mecânicas favoráveis no cordão de solda, as velocidades de alimentação acabam sendo limitadas a 25 m/min para arames eletrodo dessa bitola.



**Figura 6 -Efeito de constrição do arame fundido (a) e de reigição (b)**  
Fonte: Cramer (2012)

Experimentos são apresentados por Suban (2001), com a avaliação dos seguintes parâmetros: corrente de soldagem, tensão, massa da peça de trabalho antes e depois da deposição, tempo e velocidade de alimentação do arame eletrodo. A análise foi efetuada com quatro diferentes composições de gases de proteção, como variáveis fundamentais do experimento: Ar puro; CO<sub>2</sub> puro; 82% de Ar com balanço em CO<sub>2</sub> e 65% de Ar, 26,5% He, 8% CO<sub>2</sub> e balanço em O<sub>2</sub>, sendo este último o gás que caracteriza a técnica, além de um fluxo com base Aluminato-Rutílico aglomerado.

Para a avaliação quanto à taxa de deposição, objeto de interesse quando do estudo da produtividade, a influência da corrente de soldagem, gás de proteção, extensão livre do arame eletrodo foram analisados. Quanto a corrente, essa

mostrasse diretamente relacionada com a taxa de fusão, aumentado com o aumento da intensidade da primeira. É possível verificar que para arames maciços há uma maior taxa de deposição para a mistura própria do processo TIME, exceto para altas intensidades que trazem tanto o CO<sub>2</sub> como o fluxo, como maiores taxas de deposição. Quanto à extensão livre do arame eletrodo, é possível identificar variações positivas de cerca de 30% em razão da variação de 25 para 45 mm, com a aplicação de arame eletrodos de diâmetro 1,6 mm, acordando com o apresentado por Norrish (2006).

Através do trabalho de Suban (2001), é possível estabelecer uma relação muito mais favorável em termos de ganho de produtividade através do trabalho com diferentes parâmetros de soldagem relacionados pela equação do consumo, que com o meio de proteção em si, dando desvios na ordem de 6% apenas para arame maciço quando da mudança entre meios de proteção. Além disso, há a validação desta equação como modelo físico aplicado, tendo uma relação praticamente direta entre valores experimentais e os teóricos calculados.

#### 4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Através da pesquisa realizada, dentre as fontes de consulta selecionadas, observou-se um volume pequeno de trabalhos produzidos em relação ao tema, de acordo com a metodologia aplicada, sendo que mesmo tendo sido feita uma busca abrangente, tendo obtido um número grande de textos selecionados, poucos foram selecionados. Trabalhos como de Cramer (2012) trazem uma abordagem bastante generalista acerca dos novos processos de soldagem com alta produtividade, faltando como referência trabalhos com maior profundidade na abordagem de nosso tema.

Tendo sido encontrada uma classificação para os modos de transferência aplicadas, como Goticular Rotativa e Goticular Alongado, de acordo com os trabalhos como de Scotti et al. (2012) uma sugestão para futuros trabalhos é de estabelecer um método de pesquisa tomando como referência o modo de transferência, para que possam ser abordadas essas técnicas de alta produtiva sob outras perspectivas que não só essa, possibilitando assim que trabalhos com diferentes objetivos sejam encontrados e possibilitem uma maior riqueza de informações acerca das técnicas.

É importante ressaltar que há muita discussão acerca da classificação dos modos de transferência metálica, portanto poderia ser objeto de um futuro trabalho uma caracterização experimental dos processos envolvendo diretamente as técnicas de alta produtividade aqui apresentadas, inclusive com a aplicação de modos não naturais de transferência.

Dentre os pontos de importância avaliados neste trabalho, alguns ganham destaque pelo contexto do desenvolvimento dos processos de alta produtividade em soldagem, atualmente. As altas taxas de deposição apresentadas nos trabalhos de referência são um dos pontos de destaque, com valores apresentados até cerca de 30 kg/h, bastante acima do usual para o processo. Alguns problemas decorrentes da alta velocidade de alimentação do arame eletrodo são apresentados, pois as altas velocidades entre eles e os condúites de transporte provocam grande desgaste dos componentes, além de qualquer restrição causar uma grande variação no seu valor nominal. Neste aspecto, os trabalhos apresentam os resultados de forma qualitativa, tendo assim uma oportunidade em futuros trabalhos de buscam quantificar as

velocidades aplicadas e faixas de surgimento dos principais problemas de forma a se buscar obter uma faixa de trabalho para aplicações futuras.

Outro ponto bastante importante nas informações apresentadas é a característica de perfil de penetração que os cordões de solda obtidos através do uso de parâmetros não convencionais apresentam, com grande profundidade de penetração, sem haver um grande acréscimo na zona fundida, em termos de largura de cordão. Uma grande diferença é apresentada entre os processos com modo de transferência metálica Goticular Rotativo e Goticular Alongado, tendo o primeiro um destaque quanto a alta penetração, com um ângulo bastante agudo formado entre as linhas de fusão da raiz, quando o outro apresenta uma maior diluição nas regiões de interface lateral, no caso dos corpos de prova preparados em junta em ângulo. Quando da apresentação dos resultados por AGA (1996) é verificado o diferente aporte térmico entre as duas aplicações, de 4,4 e 4,2 kJ/min, respectivamente, porém para que fosse possível uma análise com maior clareza, a apresentação dos parâmetros de soldagem como tensão e corrente seria necessária, assim como um volume maior de corpos de prova afim de possibilitar que haja uma formação de relação dos parâmetros com os resultados em uma maior gama de aplicações, passando pelas zonas de transição.

Resultados apresentados por Suban (2001) relacionando aplicações do processo T.I.M.E. com aplicações de soldagem com parâmetros não convencionais, para processos de alta produtividade, demonstram a participação em ganhos em relação a taxa de deposição muito maiores para a segunda aplicação, trazendo a discussão então a necessidade de desenvolvimento de trabalhos caracterizando essas técnicas, e discutindo as possibilidades de resultados a serem obtidos com sua aplicação. Uma oportunidade para futuros trabalhos é o estudo do processo T.I.M.E. como uma melhoria da técnica de soldagem com o uso de parâmetros não convencionais, de forma a otimizar os resultados obtidos.

Por fim, contemplando todas as características apresentadas, a possibilidade de aplicação de altas taxas de deposição para soldagem em chapas de grande espessura, reduzindo o número de passes se mostrou bastante interessante em aplicações de fabricação metal-mecânica, até mesmo pela possibilidade de implantação com baixo custo dessas técnicas, e possibilidade de desenvolvimento de processos utilizando arames-eletrodos de menor bitola para possibilitar o uso dos equipamentos já existentes no processo fabril. Ainda, sua possível aplicação para

chapas de menor espessura em processos mecanizados ou automatizados, com altas velocidades de soldagem, reduzindo drasticamente os tempos de produção.

## REFERÊNCIAS

AGA. **Fatos sobre:** alta produtividade na soldagem MIG/MAG - rapid Arc™ - rapid melt™: catálogo. Rio de Janeiro, 1996, 32 p.

BRACARAENSE, A. Q. Gas Metal Arc Welding. Belo Horizonte: Site Infosolda, 2003. Disponível em: <<http://www.infosolda.com.br/artigos/processos-de-soldagem/423-gas-metal-arc-welding.html>>. Acesso em: 03 jun 2013.

CRAMER, H. Prozesse nach Maß. **Der Praktiker**. München, v. 64, n. 5, 190-198, 2012.

GIMENES, L.; RAMALHO, J. P., MIG-MAG. São Paulo: Site Infosolda, 2003. Disponível em: <[http://www.infosolda.com.br/images/Downloads/Artigos/processos\\_solda/mig-mag.pdf](http://www.infosolda.com.br/images/Downloads/Artigos/processos_solda/mig-mag.pdf)>. Acesso em: 05 jun 2013.

IORDACHESCU, D.; QUINTINO, L. Steps toward a new classification of metal transfer in gas metal arc welding. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 202, p. 391-397, 2008.

MODENESI, P. J.; MARQUES, P. V.; BRACARENSE, A. Q. **Soldagem: fundamentos e tecnologia**. 3. ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2009.

NORRISH, J. **Advanced welding processes**. 1. ed. Australia: Woodhead Publishing, 2006. p.134-135.

RAO, Z. H.; ZHOU, J.; TSAI, H. L. Determination of equilibrium wire-feed-speeds for stable gas metal arc welding. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 55, n. 23-24, p. 6651-6664, 2012.

SCOTTI, A.; PONOMAREV, V.; LUCAS, W. A scientific application oriented classification for metal transfer modes in GMA welding. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 212, p. 1406-1413, 2012.

SUBAN, M.; TUSEK, J. Dependence of melting rate in MIG/MAG welding on the type of shielding gas used. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 119, p. 185-192, 2001.

WEMAN, K. **Welding process handbook**. 2. ed. Sweden: Woodhead Publishing, 2011. p. 54-55.