



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

**RODRIGO GONÇALVES DA SILVA**

**Aplicação de tecnologia C.M.T. na soldagem MAG de chapas finas, para  
substituir os processos MIG Brazing.**

**CURITIBA-PR**

**2013**

RODRIGO GONÇALVES DA SILVA

**APLICAÇÃO DE TECNOLOGIA C.M.T. NA SOLDAGEM MAG DE  
CHAPAS FINAS, PARA SUBSTITUIR OS PROCESSOS MIG  
BRAZING.**

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. PhD. Eng. Américo Scotti.

**CURITIBA**

**2013**

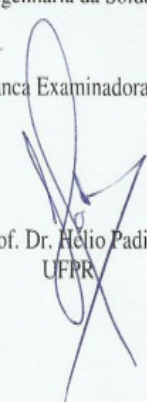
**TERMO DE APROVAÇÃO**

RODRIGO GONÇALVES DA SILVA

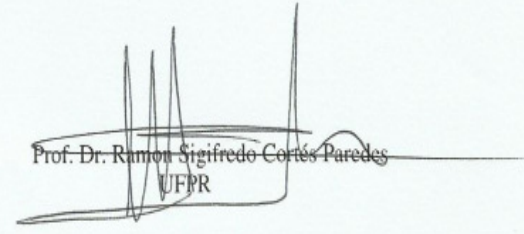
**APLICAÇÃO DE TECNOLOGIA C.M.T. NA SOLDAGEM MAG DE  
CHAPAS FINAS, PARA SUBSTITUIR OS PROCESSOS MIG  
BRAZING.**

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

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	5
2	REVISÃO BILIOGRÁFICA.....	7
3	GENERALIDADES.....	9
3.1	A soldagem na indústria automotiva.....	9
3.2	Diferentes tipos de soldagem na indústria automotiva.....	9
3.2.1	Solda Ponto por Resistência.....	9
3.2.2	Solda por Projeção.....	11
3.2.3	Solda Laser Autógena.....	12
3.2.4	Brasagem a Laser.....	13
3.2.5	Soldagem MIG MAG.....	15
3.2.5.1	Processo de soldagem MIG Brazing.....	16
3.2.5.2	Soldagem MIG/MAG por curto circuito.....	17
3.2.5.3	Soldagem MIG/MAG com tecnologia CMT (Cold Metal Transfer).....	20
4	CONSUMÍVEIS DE SOLDA E EQUIPAMENTOS UTILIZADOS.....	25
4.1	Arames eletrodos.....	25
4.2	Gases de proteção.....	26
4.2.1	Fontes de soldagem utilizadas.....	27
5	ESTUDO DA VIABILIDADE ECONÔMICA.....	29
5.1	Cálculo do consumo de arame CuSi3.....	29
5.1.1	Obtenção do tempo de soldagem.....	29
5.1.2	Obtenção do comprimento do arame utilizado.....	31
5.1.3	Obtenção do volume de material de adição utilizado.....	31
5.1.4	Cálculo da massa de material de adição utilizado.....	32
5.1.5	Levantamento do custo dos consumíveis.....	33
5.2	Levantamento do custo com gases de proteção.....	33
5.3	Levantamento dos custos com eletrodos.....	35
5.4	Levantamento de custos de investimentos com maquinário.....	36
5.5	Levantamento de investimento para alteração da rede de gás.....	36
5.6	Balanco final de viabilidade econômica.....	37
6	PROCESSO EXPERIMENTAL.....	38
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	43
8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	44

## 1 INTRODUÇÃO

A indústria automobilística no Brasil, durante muitos anos foi dominada por quatro grandes montadoras que mantinham uma hegemonia, não só no mercado nacional como também a nível mundial.

Este cenário nacional era fruto de uma política de fechamento absoluto às importações, que incluía normas que não diziam respeito apenas às tarifas de importação, como as cotas de importação por empresa, fazendo com que o acesso aos bens de consumo importados fosse muito difícil, não só por causa do preço, mas também pela dificuldade.

A consequência desta política era um mercado muito fechado e protecionista para com as empresas instaladas no país, por sua vez, o consumidor não tinha poder de barganha, já que a concorrência era baixa e haviam poucos modelos e marcas de veículos.

No início da década de 90, houve a abertura do mercado brasileiro e incentivo fiscais foram oferecidos pelo governo, atraindo diversas montadoras que instalaram-se no país aumentando a competitividade do setor.

Atualmente há dezenas de fábricas instaladas no país o que leva o consumidor à escolher entre uma variedade muito grande de produtos.

Para os construtores automobilísticos que querem continuar sendo competitivos em um mercado muito concorrido, é importante reduzir o peso e o custo dos veículos e, ao mesmo tempo, garantir sua qualidade sem comprometer a segurança dos mesmos. Este objetivo é difícil, mas continua sendo possível com o desenvolvimento e utilização de novas tecnologias.

A redução do peso dos veículos vem sendo cada dia mais importante, haja visto que veículos mais leves demandam menor potência do motor e ao mesmo tempo reduzem o consumo de combustível.

Uma alternativa encontrada pelos engenheiros de desenvolvimento de produto para diminuir a massa do veículo é a redução da espessura das chapas da carroceria, porém para não comprometer a segurança faz-se necessário o emprego de aços de baixo carbono e média liga, que possuem propriedades mecânicas superiores aos convencionais aços comuns de baixo carbono.

Esta nova configuração gera um desvio bastante grande aos engenheiros de soldagem, tendo em vista a dificuldade de soldar com qualidade e rapidez chapas cada vez mais finas e ao mesmo tempo de forma mais barata.

O objetivo deste estudo é verificar a viabilidade técnica e econômica de substituir o processo de soldagem atual MIG Brazing por um processo MAG com tecnologia de transferência CMT em uma determinada estação de trabalho, sem comprometer o tempo de tacto e mantendo a qualidade do produto.

Para isto, foram realizados testes práticos e levantamentos de viabilidade econômica e os resultados obtidos estão apresentados neste trabalho.

## 2 REVISÃO BILIOGRÁFICA

Em uma linha de montagem de carrocerias, onde a base do processo de industrialização é a soldagem, é possível observar várias possibilidades de ganhos, tanto na qualidade das uniões soldadas quanto na redução dos custos da soldagem.

Nos últimos dez anos, as tecnologias de soldagem tem apresentado um desenvolvimento significativo, e novos processos tem sido criados.

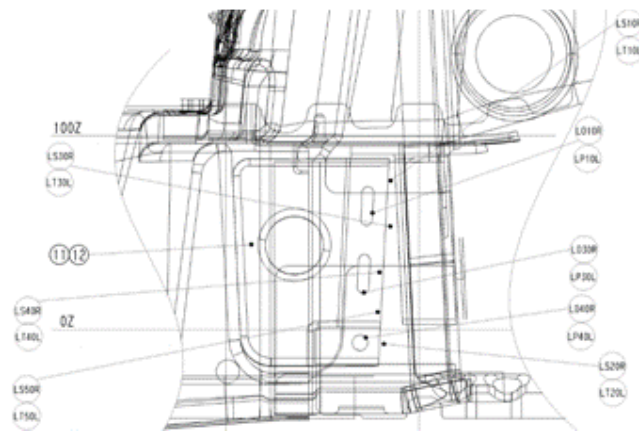
Uma das tecnologias que vem sendo largamente empregada na indústria automotiva é a soldagem por curto circuito controlado na confecção de cordões de solda MAG em chapas relativamente finas, sem que a mesma seja danificada por um excesso de diluição do metal base.

O estudo em questão traz uma proposta de utilização da tecnologia em um posto de trabalho, substituindo o processo existente de soldagem MIG Brazing utilizando uma fonte de soldagem sinérgica com curto circuito pulsado convencional, depositando como material de adição uma liga de CuSi3 e utilizando o gás argônio como gás de proteção.

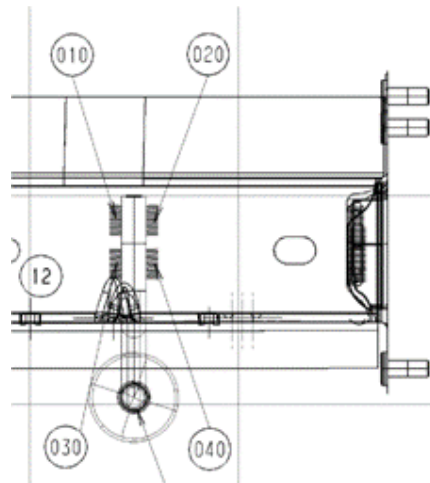
A implementação desta alteração depende do resultado do estudo da viabilidade econômica e da qualidade dos cordões após testes macrográficos dos cordões de solda MAG, utilizando como metal de adição o eletrodo ER70S6, e como gás de proteção a mistura de 82% de argônio com 18% de gás carbônico, feitos com a tecnologia CMT pulsado.

Na estação de solda em questão são realizados os cordões de solda que unem a lateral do assoalho intermediário ao assoalho traseiro, além da união entre longarina traseira e gancho de fixação do escapamento.

Nesta estação todas as soldas são executadas na posição vertical, e a configuração das uniões varia entre solda sobreposta, de topo e preenchimento de oblongos. As espessuras variam de 0,9mm à 1,6mm para as chapas do assoalho, já a longarina traseira possui uma espessura de 1,4mm e recebe a soldagem de um gancho de 10mm de diâmetro. A figura 1 apresenta o desenho destes cordões que unem os assoalhos e a figura 2 apresenta os cordões que unem o gancho de fixação do escapamento à longarina traseira.



**Figura1:** Desenho do posicionamento dos cordões de solda de união do assoalho.



**Figura2:** Desenho do posicionamento dos cordões de solda de união do gancho de fixação do escapamento à longarina.

## **3 GENERALIDADES**

### **3.1 A soldagem na indústria automotiva**

Existem basicamente três principais formas de manter uma união entre chapas na indústria automotiva sendo elas:

- Colagem estrutural;
- Parafusamento e soldagem.

Todos esses processos possuem suas vantagens em relação aos demais, sendo especificados ainda na fase de projeto.

### **3.2 Diferentes tipos de soldagem na indústria automotiva**

A carroceria de um veículo é formado de aproximadamente 1200 peças metálicas, todas unidas entre si para formar a estrutura do veículo. Isto explica o motivo de haver uma diversidade grande de tecnologias de soldagem e em quantidade significativamente alta. Abaixo estão listadas as principais tecnologias empregadas na soldagem.

- Solda ponto por resistência;
- Solda por projeção;
- Solda laser autógena;
- Brasagem a laser;
- Soldagem MIG e MAG.

Na sequência será verificado o princípio de funcionamento e as peculiaridades de cada uma das tecnologias citadas acima.

#### **3.2.1 Solda Ponto por Resistência**

A Solda a Ponto é o processo de unir duas ou mais peças metálicas numa pequena área localizada, por meio da aplicação de calor e pressão, no qual o calor usado é resultante da resistência do metal ao fluxo de uma corrente elétrica, num circuito do qual a própria peça é parte integrada. O calor é desenvolvido nas peças a serem soldadas, e a pressão é aplicada pela máquina de solda através das pontas dos eletrodos.

A modalidade de solda à resistência, utilizada na indústria automobilística em geral, é um dos processos para unir duas ou mais peças metálicas num ponto. A solda é feita mantendo-se juntas, sob pressão, as peças a serem soldadas e submetendo-as à passagem de uma corrente elétrica através do metal, na área ou ponto sob pressão. Ao passar por esse ponto, a corrente elétrica desenvolve calor, fundindo o metal das peças a serem soldadas e, se a pressão for mantida após a interrupção da passagem de corrente elétrica, o metal fundido solidifica novamente, formando uma “lentilha de solda” visível externamente nesse ponto. O diâmetro da lentilha e a estrutura do mesmo determinam a resistência mecânica das peças à tração (D. STOCCO e R. P. CARVALHO, 2011).

São utilizados em média 4.000 pontos de solda na fabricação de uma carroceria de um veículo popular.

Este processo de soldagem é geralmente composto das seguintes etapas:

- Posicionamento das chapas sobrepostas: o posicionamento das chapas é geralmente de forma automática ou semiautomática. É importante, pois além minimizar a distância entre chapas, mantém os componentes pré-ajustados, garantindo o dimensional do conjunto.

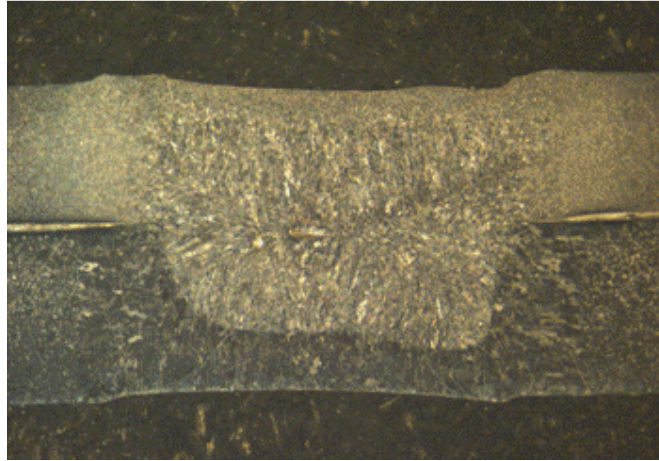
- Pré-pressão: é a pressão exercida pelos eletrodos com o intuito de eliminar o afastamento entre as chapas, que pode gerar um aumento muito grande da resistência a passagem de corrente e conseqüentemente um superaquecimento do ponto de solda.

- Aplicação da corrente de soldagem: durante a passagem da corrente elétrica pelas chapas, é gerado o calor necessário para que haja o aquecimento e por conseqüência a fusão dos metais. Esta variável é diretamente proporcional à somatória das espessuras das chapas a serem soldadas e inversamente proporcionais ao tempo de passagem de corrente e a condutividade elétrica do metal. O tempo de soldagem também pode ser chamado de impulso e em alguns casos são necessários vários impulsos para que o ponto se forme de maneira desejada;

- Pulso de revenimento: é geralmente utilizado para revenir o ponto de solda quando o material a ser soldado possui um valor de carbono equivalente maior que 0,4%. Este pulso também pode ser utilizado para evitar trincas nos pontos de solda, provenientes de um alto gradiente térmico;

- Aplicação de pós-pressão: a pós-pressão é um intervalo de tempo, necessário para que o eletrodo esfrie o ponto de solda e mantenha-o sob pressão até sua solidificação total, evitando trincas de solidificação ou vazios (poros) no interior do ponto de solda.

A figura 3 apresenta a macrografia de um ponto de solda para diferentes espessuras de chapas.

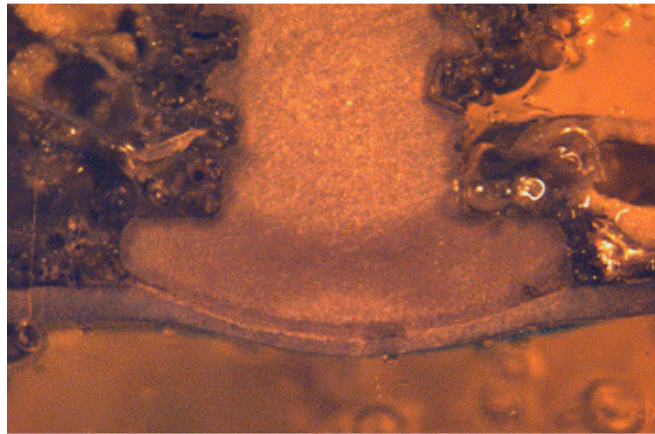


**Figura 3:** Exemplo de macrografia de ponto de solda.

### 3.2.2 Solda por Projeção

A solda por projeção é um processo bastante semelhante ao de solda ponto. Este processo também utiliza o aquecimento gerado pela passagem de corrente entre as peças para fundir os metais e assim promover sua soldagem, porém o local de passagem desta corrente é direcionado por uma protuberância na peça, restringindo assim a área de contato e consecutivamente direcionando a passagem de corrente para o ponto de fusão desejado. Este método é muito utilizado na soldagem de pinos, porcas e parafusos em chapas.

A figura 4 apresenta a macrografia de uma solda projeção unindo uma chapa a um pino.



**Figura 4** : Exemplo de macrografia de solda à projeção.

### 3.2.3 Solda Laser Autógena

A palavra LASER significa: Amplificação de Luz por Emissão Estimulada de Radiação.

As primeiras aplicações da solda a laser num contexto industrial datam do fim anos 70, com dois tipos de aplicações ligadas às tecnologias da época:

- Os lasers CO<sub>2</sub> contínuos de potência a fluxo transversal, foram utilizados pelos Estados Unidos com AVCO Everett e UTRC, e emitiam potências de aproximadamente 8kW. Estas aplicações eram para uso da indústria automotiva, com soldagem de peças mecânicas para caixa de velocidade automática em veículos da Ford e GM. Logo após, fez concorrência à soldagem com Feixe de Elétrons, para peças de revolução, boa precisão em produção em série.

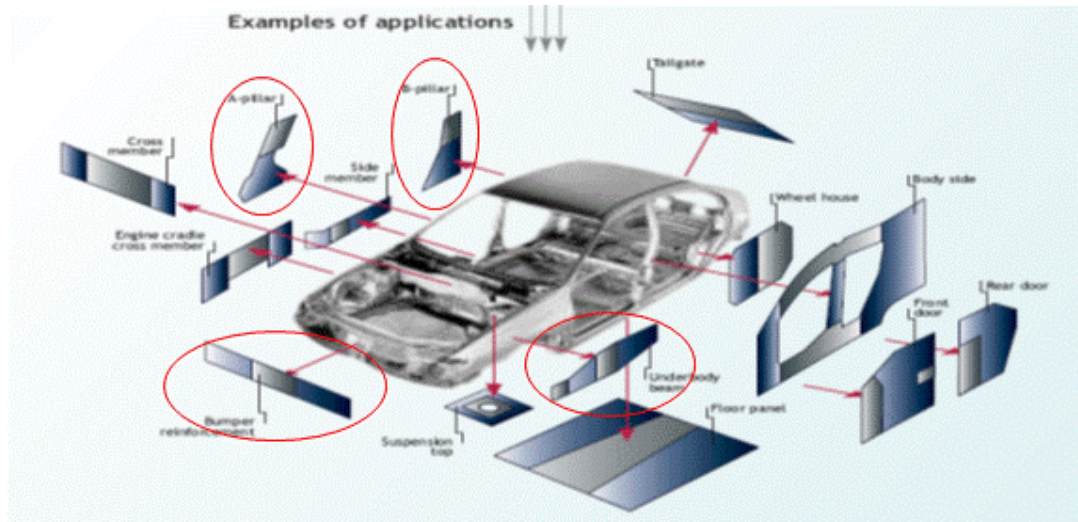
Até o início dos anos 90, a soldagem a laser permaneceu sempre com uma fraca divulgação e nos mesmos domínios, com um crescimento "fraco" apoiado pelo aumento da potência média das fontes lasers: 5kW para o CO<sub>2</sub>, 700W para Nd-YAG. A precisão do posicionamento e o transporte do feixe por espelhos foram freios ao desenvolvimento desta tecnologia.

Para as altas potências, dois novos mercados apareceram, ainda para a indústria automobilística:

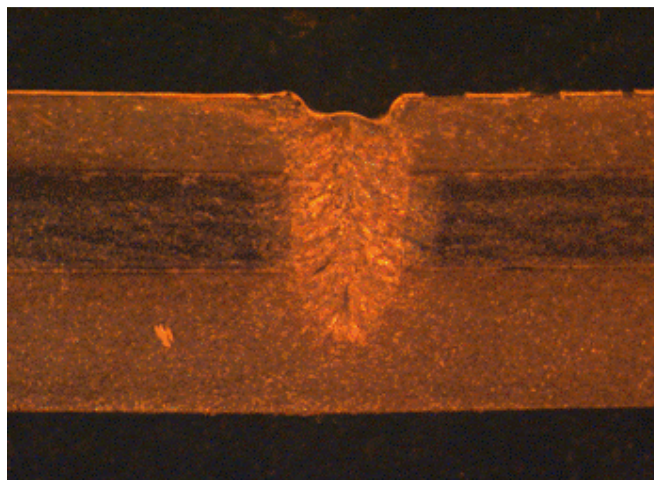
- União de chapas da carroceria (soldagem face à face de chapas planas antes da conformação).
- Tubos soldados a laser.

Fim dos anos 90, um novo grande mercado abre-se na indústria automotiva. As evoluções da tecnologia Nd-YAG (potência contínua de 4kW e transporte por fibra óptica) permitem aplicações de soldagem automotiva sobre a carenagem.

A figura 5 exemplifica algumas peças automotivas que podem ser obtidas com chapas de diferentes espessuras, soldados em componentes de segurança da carroceria: reforço do para-choque, longarinas, pedaleira, entre outras (D. BOISSEILIER, O. FRENEAUX, JP. GAUFILLET, J. HAMY e D. MARCHAND, 1998).



**Figura 5:** Utilização de soldagem a laser na confecção de componentes automotivos.



**Figura 6:** Macrografia da união de três chapas sobrepostas soldadas à laser

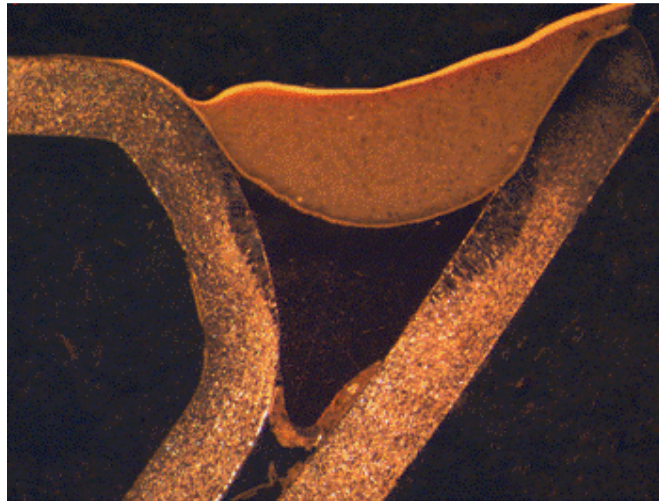
### 3.2.4 Brasagem a Laser

A brasagem a laser é um processo que utiliza a tecnologia da concentração de luz para o de aquecimento e fusão do material de adição e, ao mesmo tempo, o aquecimento do metal base.

Este processo não visa à fusão do material de base, ao reduzir a carga térmica depositada durante a soldagem, diminui a probabilidade de ocorrerem defeitos relacionados ao aquecimento, como furos em chapas finas ou distorções causadas pela dilatação térmica e tensões residuais de aquecimento.

Os materiais normalmente utilizados para adição normalmente são ligas a base de cobre ou prata, possuindo boas propriedades mecânicas e ponto de fusão inferior a 1000°C, cerca de 70% da temperatura de fusão dos metais de base (em geral aços de baixo carbono e média liga).

A figura 7 mostra um exemplo de macrografia de uma brasagem a laser. Devido ao baixo aporte térmico, é possível observar uma pequena região afetada termicamente que alcança aproximadamente a metade da espessura da chapa, mesmo tendo em vista a utilização de uma velocidade de soldagem relativamente alta (aproximadamente 6m/min) e uma espessura de arame do material de adição de 1,6mm.



**Figura 7:** Macrografia de um cordão de solda feito através do processo de brasagem à laser

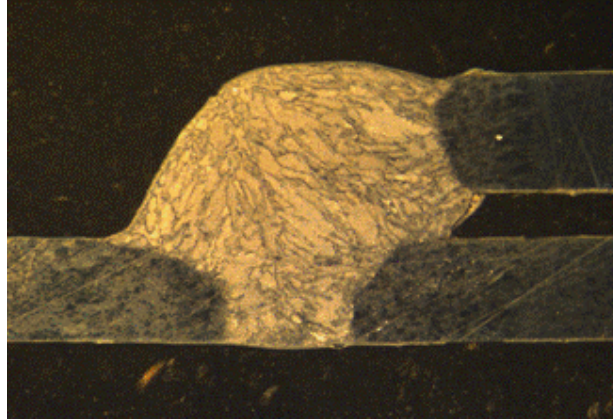
### 3.2.5 Soldagem MIG MAG

O processo MIG/MAG, também conhecido mundialmente pela sigla GMAW (*Gas Metal Arc Welding*), é um processo de soldagem que se baseia na fonte de calor de um arco elétrico mantido entre a extremidade de um arame nu consumível, alimentado continuamente, e a peça a soldar. A proteção da região da solda é feita por uma atmosfera protetora de gás inerte (comercialmente, Argônio e Hélio) ou ativo (usualmente CO<sub>2</sub>) ou misturas deles. A nomenclatura MIG/MAG é acrograma advindo do inglês, onde MIG representa *Metal Inerte Gás* e MAG representa *Metal Active Gás*.

Este processo MIG/MAG pode ser aplicado de forma automática, quando o movimento da tocha é feito por uma máquina ou semiautomática, quando a tocha é

conduzida manualmente pelo operador. Em ambos os casos, a alimentação do arame é feita mecanicamente (A. SCOTTI e V. PONOMAREV, 2008).

A figura 8 apresenta a macrografia da união de chapas sobrepostas por um cordão de solda MAG



**Figura 8:** macrografia de um cordão de solda MAG em chapas finas

### 3.2.5.1 Processo de soldagem MIG Brazing

A crescente demanda de reduzir o risco de danos por corrosão levaram muitos ramos da indústria a fazer uso de chapas revestidas, entre elas, pode-se destacar a indústria automotiva. Existem vários métodos disponíveis de proteger o aço contra a corrosão, e a proteção com zinco tem mostrando-se um dos melhores custos benefício por possuir boas propriedades de corrosão e por seu preço ser relativamente baixo.

Uma propriedade importante do zinco é seu baixo ponto de fusão que inicia-se a temperaturas de cerca de 420 °C, e seu ponto de ebulição em torno de 906 °C. Estas propriedades do zinco tem um efeito desfavorável sobre o processo de soldagem, isto porque o zinco começa a evaporar-se logo que se forma o arco. Os vapores e os óxidos de zinco podem gerar porosidades e um arco instável além de retirar o zinco da região próxima ao arco, gerando uma área desprotegida contra a corrosão, por esta razão, é importante que a quantidade de calor utilizada nos processos de soldagem das chapas galvanizadas seja pequena.

Um método alternativo para a soldagem de chapas galvanizadas é a utilização de eletrodos de ligas de cobre. Os eletrodos mais utilizados são ligas de cobre-silício, (por exemplo, CuSi3) e ligas de alumínio. Devido ao seu elevado teor de cobre, estes eletrodos apresentam um ponto de fusão relativamente baixo (cerca

de 1000-1080 ° C, dependendo dos constituintes da liga), portanto não há fusão do metal de base, ou seja, a união é mais semelhante à brasagem que um processo de soldagem propriamente dito, porém com resistência mecânica bastante alta.

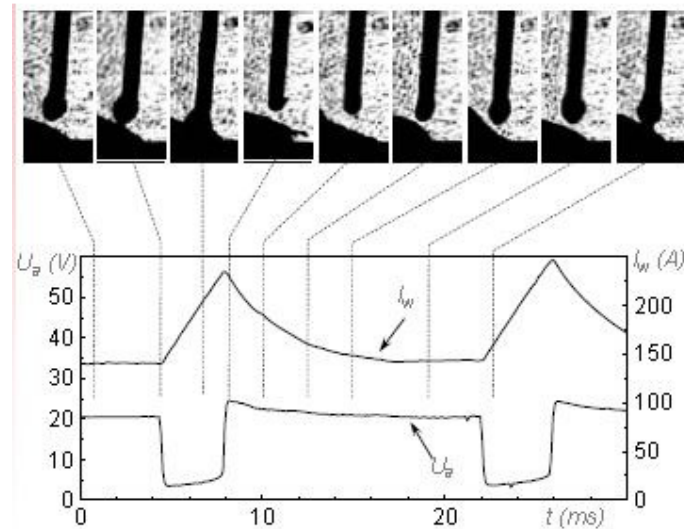
Como regra geral, o gás de proteção recomendado é o Argônio puro, mas estudos mostram a viabilidade de utilizar misturas de Argônio com baixas quantidades de CO<sub>2</sub> ou O<sub>2</sub>, que auxilia na estabilização do arco.

As seguintes vantagens podem resultar da utilização destas ligas: mínima queima do revestimento devido à baixa energia de soldagem utilizada, diminuição do risco de formação de poros no interior do cordão e a condição de uma união forte sem a necessidade de fusão do metal de base (H. HACKL, 1997).

### **3.2.5.2 Soldagem MIG/MAG por curto circuito**

Segundo Junior, Milton Correia, cujo capítulo 2.8 está apresentado na íntegra como base de estudo para este trabalho, neste tipo de transferência, forma-se uma gota metálica na ponta do arame eletrodo que cresce e atinge à poça de fusão ocasionando um curto-circuito e a extinção simultânea do arco. Ocorre geralmente para baixos valores de tensão e corrente de soldagem. A baixa corrente de soldagem gera uma força eletromagnética de pequena intensidade que permite que a gota tenha grandes diâmetros e arcos curtos que permitem que a gota toque à poça antes de se destacar do arame eletrodo.

Observando-se os sinais de corrente e tensão, percebe-se que há uma queda brusca de tensão ao mesmo tempo em que a corrente sobe rapidamente e decai posteriormente. A queda ocorre quando a gota formada na ponta do eletrodo toca a poça de soldagem, já a corrente cresce rapidamente e sua queda ocorre quando a gota se destaca do arame (A. SCOTTI e V. PONOMAREV, 2008). A figura 9 apresenta a transferência da gota e o comportamento da tensão e corrente de soldagem.



**Figura – 9:** Comportamento tensão x corrente na transferência por curto-circuito.

Fonte: Scotti<sup>3</sup>

Em média há um equilíbrio entre a taxa de fusão e a velocidade de alimentação do arame, entretanto, após o fim do curto-circuito, a taxa de fusão torna-se maior que a taxa de alimentação devido à elevada corrente pós-curto-circuito. Desta forma, logo após o rompimento da gota, o comprimento do arco cresce rapidamente enquanto uma nova gota se forma (A. SCOTTI e V. PONOMAREV, 2008).

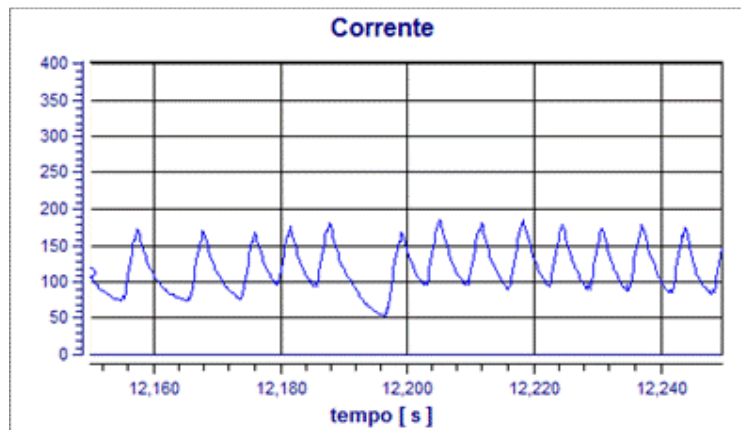
Nos primeiros milissegundos após a reabertura do arco, as taxas se igualam devido à redução da corrente, para em seguida, ainda sob a ação do arco, a taxa de fusão ser menor que a de alimentação, fazendo com que a ponta do arame se aproxime gradualmente da poça de fusão. Entretanto, devido às oscilações mútuas da gota que está em crescimento e da poça que está em agitação, ocorre uma oscilação no comprimento do arco que pode gerar novos curtos-circuitos antes do período previsto para um ciclo quando desconsideradas estas oscilações.

A principal força que atua neste tipo de transferência é a de tensão superficial, porém, há também a interferência da força eletromagnética que pode atuar a favor ou contra a transferência metálica. O efeito desta força tende a separar um elemento maior área transversal de outro de menor, por exemplo, a gota no contato com o arame eletrodo. O componente radial tende a comprimir a área de contato, enquanto que, o componente axial tende a separar a gota da superfície da poça de fusão. Assim, durante a fase inicial da transferência, o formato da gota-poça faz com que o

efeito *Pinch* atue contra a transferência metálica, porém, neste caso, com baixa intensidade devido à baixa corrente. Já, na fase final do curto-circuito, pouco antes da gota se transferir, forma-se um pescoço entre a gota e o arame eletrodo, causado pela tensão superficial. A alta corrente neste instante e a pequena área nesta região aumentam a ação do efeito *Pinch*, agora facilitando a transferência. Deve-se considerar também que ocorre um aquecimento súbito da ponta líquida entre a gota e a poça de fusão devido à elevação de corrente que colabora para o rompimento entre a gota e o arame eletrodo. O rompimento da gota depende da indutância. Para baixos valores, o gradiente de elevação de corrente é elevado, o que acarreta num efeito *Pinch* mais forte no instante inicial do estabelecimento de contato entre a gota e a poça. Esta condição é denominada curto-circuito incidental ou prematuro e causa repulsões da gota pela superfície da gota pela superfície da poça, gerando respingos de grandes dimensões. Por outro lado, uma indutância elevada reduz o gradiente de subida de corrente, e desta forma, minimiza a probabilidade de formação de respingos. Entretanto, se a gota demorar a se desprender do arame, ele pode mergulhar na poça de fundida e extinguir o arco. Assim, a indutância deve ser adequada para evitar a ocorrência de respingos e o contato do arame com a poça. Este tipo de transferência metálica é de natureza aleatória, e uma análise das curvas de tensão e corrente apresenta formas irregulares. O grau de irregularidade dependerá do quanto a tensão e a indutância são adequadas à velocidade de alimentação do arame.

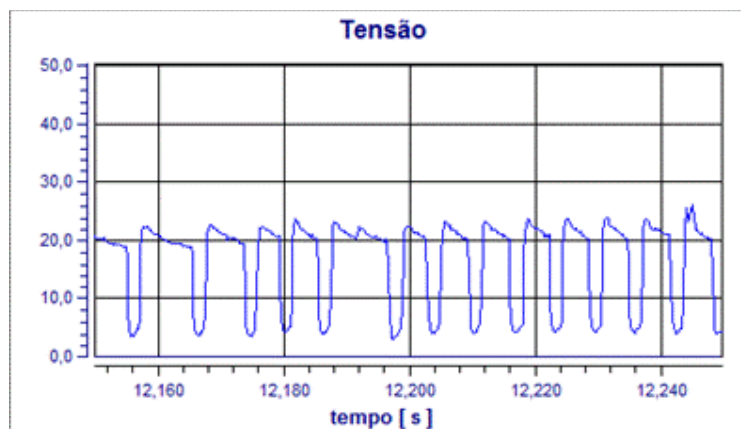
Para condições menos adequadas, a presença de curtos-circuitos prematuros ou incidentais é muito frequente e neste caso, se o balanço das forças de tensão superficial, eletromagnética e gravitacional entre outras, não for favorável à transferência, a gota será repelida no momento em que encostar-se à poça fundida.

As figuras 10 e 11 exemplificam a natureza aleatória da transferência por curto-circuito convencional.



**Figura 10:** Oscilograma corrente x tempo curto-circuito convencional

Fonte – Santos <sup>5</sup>



**Figura – 11** – Oscilograma tensão x tempo curto-circuito convencional

Fonte – Santos

Natureza aleatória demonstrando a variação no período de transferência durante as transferências metálicas.

Os baixos valores de tensão e corrente, também devido ao fato que o arco se apaga durante a transferência, o calor transferido para o material é reduzido. Esta condição é ideal para a soldagem de chapas finas e posições de soldagem fora da plana (M. C. Jr. SANTOS, 2012).

### 3.2.5.3 Soldagem MIG/MAG com tecnologia CMT (Cold Metal Transfer)

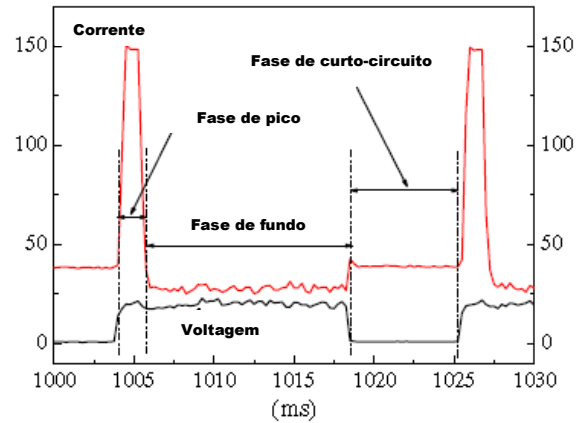
Segundo o estudo de referencia bibliográfica feito por Milton Correia (M. C. Jr. SANTOS, 2012) em sua tese de dissertação, cujo o capítulo 2.7 está apresentado na íntegra, Pickin e Young <sup>6</sup> iniciaram os estudos sobre CMT descrevendo os princípios básicos de operação. O controle na transferência da gota metálica e maior coeficiente de fusão quando comparado ao curto-circuito convencional revelaram

indicação para a soldagem de alumínio de pequena espessura. Feng et al (J. FENG, H. ZANG e P. HE, 2009) chegaram a mesma conclusão. Agudo et al (L. AGUDO, N. JANK e J. WAGNER, 2008) e Zhang et al (H. ZHANG, J. FENG e P. HE, 2009) concluíram que devido ao baixo aporte térmico deste processo, há maior controle da formação de intermetálicos na soldagem de ligas de alumínio e Wang et al abordou a soldagem de dissimilares.

Conforme Zhang et al (H. ZHANG, J. FENG, P. HE, B. B. ZHANG, J. M. CHEN e L. WANG, 2009) o processo CMT é adequado para a soldagem dissimilares como ligas de alumínio e aço galvanizado, resultando em juntas soldadas com camadas de intermetálicos com espessura inferior a 5 $\mu$ m que acabam resultando em juntas com boa resistência à tração.

O processo foi desenvolvido pela empresa Fronius e sua principal inovação é o controle da movimentação do arame eletrodo durante a transferência metálica. O movimento de retração do arame auxilia no destacamento da gota durante o curto-circuito, desta forma a gota é transferida para dentro da poça de fusão sem a ação da força eletromagnética, o que reduz o aporte térmico e a formação de respingos. Definindo-se como período o tempo necessário para o depósito de uma gota de arame fundido à poça de fusão, ele pode se dividido em três partes:

- A fase de pico, caracterizado por uma voltagem constante e correspondendo com alto pico de corrente. O pulso de corrente faz a ignição do arco facilmente e aquece o arame eletrodo de maneira à formar a gota, nesta fase o brilho do arco é intenso.
- A fase de fundo que possui uma baixa corrente, que basicamente tem a função de inibir a transferência globular. Esta corrente se mantém até que ocorra o curto-circuito.
- A fase de curto-circuito, nesta fase o arame entre em contato com a poça de soldagem e a voltagem cai a zero e o arco se extingue. A força de recuo do arame é o principal agente a proporcionar o rompimento entre a gota fundida e o eletrodo fazendo que ela seja transferida para dentro da poça de fusão (C. PICKIN e K. YONG, 2009). A figura 12 ilustra o processo.



**Figura 12:-** Oscilograma corrente x tensão CMT arame eletrodo Al-Si

Fonte: Zhang

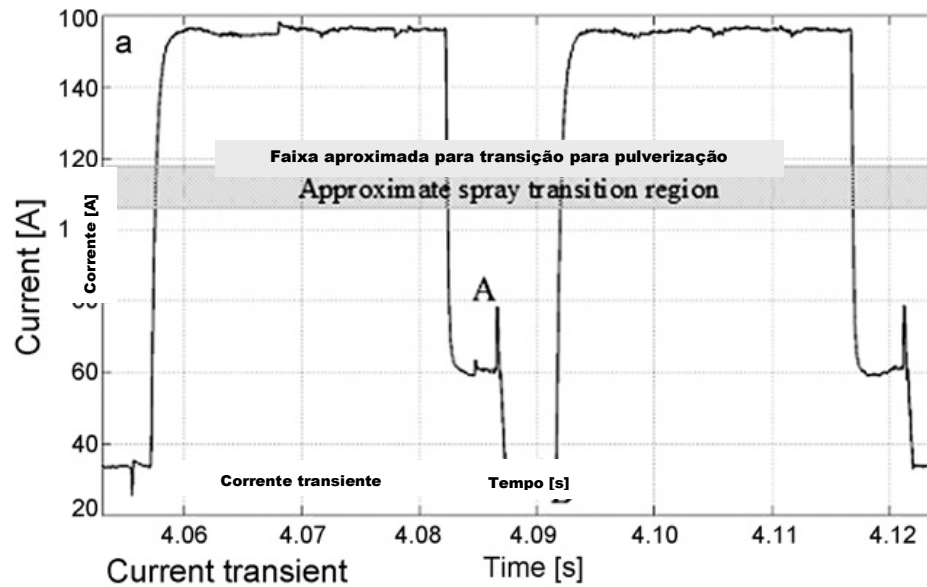
De acordo com Pickin et al (C. PICKIN, S. W. WILLIAMS e M. LUNT, 2011) o processo de CMT opera conforme um ciclo composto por uma fase de arco aberto na qual a gota de metal se forma na ponta do eletrodo e a poça metálica é criada. Após um tempo definido, o arame é alimentado em direção da poça de soldagem para formar o curto-circuito, durante esta fase a transferência metálica é iniciada e a corrente de soldagem reduz substancialmente. Decorrido determinado tempo, o arame é movimentado para fora da poça de soldagem, este movimento auxilia na transferência da gota para dentro da poça de soldagem.

Então, o arco é aberto novamente e o processo se repete. Este é o único processo onde o movimento do arame e as características elétricas são controladas o que resulta numa transferência metálica com baixa corrente e tensão.

Em contraste com o comportamento teórico explicado acima, os autores verificaram a transferência de mais de uma gota durante um ciclo de abertura e extinção de arco. Foi constada a transferência de três gotas metálicas durante a fase de arco aberto, aumentando nesta região a deposição de material.

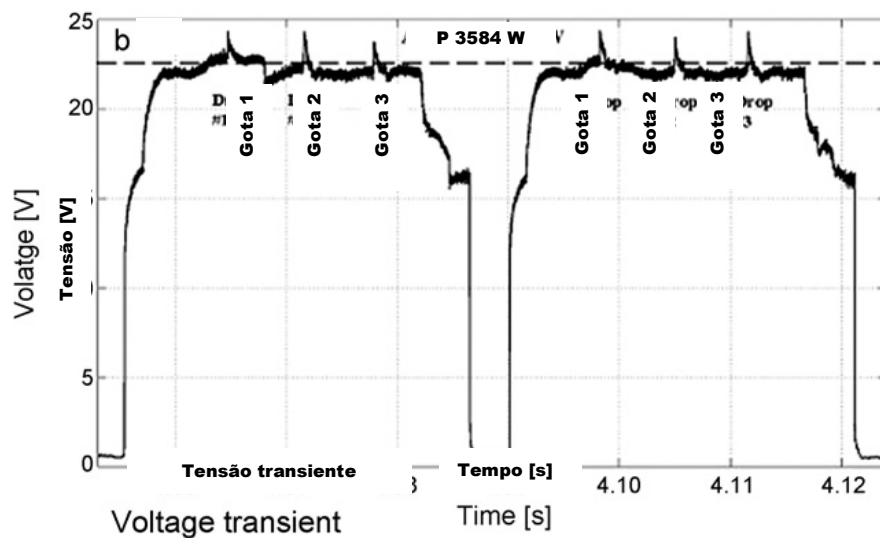
Devido aos controles eletrônicos da fonte sobre os parâmetros de soldagem, mesmo durante as três transferências metálicas a corrente programada permaneceu constante. Também pode ser observado na figura 13 que a corrente é alterada quando o arame é avançado (ponto A) e recuado (ponto B) em relação à poça de soldagem. A figura 14 mostra o comportamento da tensão durante as três transferências metálicas. Entretanto, devido aos controles eletrônicos, o par

corrente x tensão é mantido estável até mesmos nas duas gotas adicionais transferidas durante a fase de arco aberto.



**Figura 13:** Comportamento da corrente durante transferência metálica. Durante as três transferências metálicas a corrente ficou estável e acima de 140 A. Somente no avanço do arame a corrente caiu para cerca de 60 A e quando o arame foi recuado, a corrente caiu para cerca de 30 A. Demonstrando que a corrente ficou estável, o que não aconteceria para o caso do curto-circuito convencional.

Fonte: Pickin <sup>11</sup>



**Figura 14:** Comportamento da tensão durante transferência metálica. Cada pico de tensão indica

*uma transferência metálica.*

Fonte: Pickin

Finalmente, o CMT é um modo de transferência baseado na mistura entre a transferência por curto-circuito e pulverização (*spray*), sua transferência metálica depende dos parâmetros aplicados. A estabilidade do par corrente x tensão é garantida através dos controles eletrônicos, até mesmo no caso da transferência de gotas adicionais durante um ciclo de corrente e tensão (C. PICKIN e K. YOUNG, 2009).

## 4 CONSUMÍVEIS DE SOLDA E EQUIPAMENTOS UTILIZADOS

Para o processo de soldagem atual e para a alteração proposta, diferentes equipamentos foram utilizados, assim como consumíveis de solda. Neste capítulo serão abordadas as principais características e propriedades dos arames eletrodos e dos gases de proteção, além de uma breve descrição dos equipamentos utilizados.

### 4.1 Arames eletrodos

O arame eletrodo é popularmente denominado apenas arame (devido ao seu formato cilíndrico de pequeno diâmetro e de seu grande comprimento). O mesmo se torna eletrodo (condutor de eletricidade para um arco) na sua região que ultrapassa o bico de contato, ou seja, entre o bico de contato e a poça do metal base. Os arames eletrodos são fornecidos em diâmetros que variam de 0,8 à 1,6 mm, sendo que quanto menor é seu diâmetro, mais difícil é sua alimentação.

Os arames podem assumir as mais diversas composições químicas (diferentes tipos de metais e classes dentro cada material), de acordo com a aplicação (A. SCOTTI e V. PONOMAROV, 2008).

O arame eletrodo utilizado no processo atual (MIG Brazing) é o arame CuSi3, cuja especificação provem das normas AWS – A 5.7 e DIN 1733. A base desta liga é o cobre, sendo o principal elemento adicionado o silício com porcentagem variando entre 2,8 à 4%, além destes materiais, existe ainda a tolerância de até 0,3% de ferro, até 0,2% de zinco, estanho, chumbo e fósforo, máximo de 0,1% de alumínio e manganês variando entre 0,5 à 1,5%. Os valores de resistência a tração desta liga varia de 330 à 370 MPa e seu alongamento em torno de 40%.

A principal propriedade desta liga é possuir uma temperatura de fusão de 910° C e temperatura de líquido de 1025° C, por serem temperaturas mais baixas da temperatura de fusão do aço, esta liga é largamente como material de adição de brasagem.

O arame eletrodo utilizado para o teste na soldagem MAG é o arame ER70S-6, cuja especificação prove da norma AWS – A 5.18 de 2005. Diferente do CuSi3 esta é uma liga ferrosa com baixa quantidade de carbono variando de 0,06 à 0,15%, manganês variando entre 1,4 à 1,85%, silício entre 0,8 à 1,15%, os limites para o

nióbio, cromo e molibdênio é 0,15%, e vanádio 0,03%, já os teores das impurezas de fósforo menores que 0,025% e enxofre menor que 0,035%.

O arame ER70S-6 possui um limite de resistência à ruptura de 480 MPa e taxa de alongamento de 28%.

## **4.2 Gases de proteção**

Tanto o processo MIG quanto o processo MAG requer um fluxo de gás em torno do conjunto metal de base/arame eletrodo para produzir soldas com qualidade, principalmente por proteger a poça de fusão e gotas em transferência. Além da função de proteger, o gás tem influência na estabilização do arco, influencia nas características metalúrgicas da solda, nas propriedades mecânicas e na geometria do cordão de solda.

O fluxo adequado do gás é dependente diretamente da corrente de solda utilizada, sendo maior para correntes mais altas. A configuração da junta também é um fator importante na regulação da vazão e quanto mais exposto estiver o arco de solda, mais alta deve ser a quantidade de gás utilizado (A. SCOTTI e V. PONOMAROV, 2008).

Nas indústrias automotivas é frequente o uso de ventiladores próximos ao posto de trabalho, estes são utilizados tanto para remover os fumos provenientes do processo quanto para refrigerar os soldadores principalmente em dias de calor, por este motivo, o ajuste da vazão foi de 20 l/min valor cerca de 4 l/min maior que o recomendado para este tipo de cordão, se utilizar fluxos mais altos, o gás pode gerar turbulência diminuindo a eficiência da proteção e possibilitando a inclusão de elementos contaminantes prejudicando assim a qualidade da solda.

Os gases são comumente classificados como gases Inertes ou Ativos. Os gases inertes são aqueles que não reagem quimicamente com o metal de solda, também chamados gases nobres sendo os mais usados no processo de soldagem o Argônio (Ar) e o Hélio (He), enquanto os ativos são aqueles que reagem quimicamente de forma moderada e controlada, podendo ser utilizados de forma pura ou em combinações com gases inertes em diferentes proporções, sendo os mais usados o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), o oxigênio (O<sub>2</sub>), o nitrogênio (N<sub>2</sub>) e o óxido de nitrogênio (NO).

Uma das funções dos gases é a condução da corrente elétrica, porém os gases em seu estado físico natural é normalmente considerado um isolante elétrico. Para que ele passe a conduzir corrente elétrica é necessária a ionização do átomo, ou seja, é necessário retirar um ou mais elétrons do átomo. Uma propriedade importante do gás é o potencial de ionização (PI), que é a energia necessária (em eV) para que o gás seja ionizado, sendo que quanto maior o PI, maior será a tensão necessária para a ionização do gás e, conseqüentemente o arco de solda seja aberto e mantenha-se estável. Gases que possuem um PI mais alto necessitam de uma maior tensão de soldagem para uma mesma corrente de solda, neste caso o arco é popularmente chamado de arco quente, exemplo gás Hélio (PI = 24,6 eV), os gases com um PI mais baixo necessitam de menor tensão para a ionização e conseqüentemente são chamados de arcos frios, exemplo gás Argônio (PI = 15,8 eV).

Os gases constituídos por moléculas de dois ou mais átomos são dissociados devido às altas temperaturas e depois sofrem ionização, assim a quantidade de energia necessária é maior. Outra propriedade importante dos gases é a capacidade de trocar calor, quanto maior é a capacidade de trocar calor, mais calor é transmitido à poça de fusão, proporcionando uma diluição mais profunda. Pode-se destacar como gases com alta capacidade de trocar calor He, CO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub> (A. SCOTTI e V. PONOMAROV, 2008). Isto explica a opção de utilizar misturas de ArCO<sub>2</sub> como forma de obter a altura de arco desejada e ao mesmo tempo, variando a energia de soldagem aplicada à solda.

#### **4.2.1 Fontes de soldagem utilizadas**

A fonte de solda utilizada no processo atual é uma fonte de soldagem Fronius TransPuls Synergic 2700 (TPS 2700). O TPS 2700 é uma fonte de energia com características muito particulares: é totalmente digitalizado e permite uma soldadura de alta qualidade, seu funcionamento sinérgico facilita a estabilidade do arco (Catalogo Fronius).

A ficha técnica do equipamento contendo suas principais características de funcionamento podem ser observadas na figura 15.

<b>CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS</b>		<b>TPS 2700</b>	
Tensão de rede		3 x 400 V	
Tolerância de tensão de rede		+/- 15 %	
Protecção fusível de rede		16 A	
Potênc. cont. prim. [oper. cont. (OC) 100 %]		4,5 kVA	
Cos fi		0,99	
Eficiência		87 % (70 A)	
Área de corrente da soldad.	MIG/MAG	3 – 270 A	
	Eléctrodos	10 – 270 A	
	TIG	3 – 270 A	
Corrente de soldadura a	10 min / 25° C	60 % ED	270 A
		100 % ED	210 A
	10 min / 40° C	40 % ED	270 A
		60 % ED	210 A
		100 % ED	170 A
Tensão em vazio		50 V	
Tensão operacional	MIG/MAG	14,2 – 27,5 V	
	Eléctrodos	20,4 – 30,8 V	
	TIG	10,1 – 20,8 V	
Tipo de protecção		IP 23	
Tipo de arrefecimento		AF	
Classe de isolamento		B	
Dimensão l/b/h		625 x 290 x 475 mm	
Peso		27 kg	

**Figura 15:** Características técnicas do equipamento TPS 2700. Fonte: Fronius <sup>12</sup>

Para o teste experimental, um equipamento TPS 2700 CMT foi utilizado. Este equipamento é similar ao TPS 2700, mas contém um comando de micro processo, regulado digitalmente, possui também um alimentador de arame integrado e um pacote de funcionamento para CMT.

## 5 ESTUDO DA VIABILIDADE ECONÔMICA

Para a realização desta alteração, é necessário ser viável economicamente e a qualidade do conjunto soldado seja mantida, por isso a primeira etapa foi verificar a viabilidade econômica desta modificação.

### 5.1 Cálculo do consumo de arame CuSi3

Os cordões de solda em questão unem componentes da plataforma baixa do veículo, sendo feita após a união de vários outros componentes. Isso inviabilizou uma das formas mais tradicionais de obter a massa do arame consumido para a execução dos cordões que é medir a massa das peças antes e depois da soldagem.

Outro método possível de ser utilizado para esta situação seria marcar o comprimento do arame gasto, e depois medir a massa de um pedaço de arame com comprimento equivalente.

Por fim, escolheu-se medir de maneira indireta, calculando este consumo conforme descrito a seguir.

#### 5.1.1 Obtenção do tempo de soldagem

O primeiro passo para a obtenção da massa de arame foi medir quanto tempo o arco mantém-se aberto em cada ciclo de produção, ou seja, qual o tempo de soldagem efetiva necessário para que todos os cordões em questão sejam soldados.

Para a obtenção deste tempo, foi utilizado um cronometro digital de precisão, fabricante *Oregon scientific*, modelo *500 lap memory*, cuja foto encontra-se na figura 16.



**Figura 16:** Cronometro utilizado para obtenção do tempo de arco aberto.

A estação de solda onde são confeccionados os cordões funciona com duas máquinas de solda, alocadas uma em cada lado da carroceria (direito e esquerdo), sendo manuseadas por dois soldadores ao mesmo tempo. Conforme descrito anteriormente, o número de cordões de solda diverge, sendo que no lado esquerdo, por haver um componente a mais à ser soldado, o tempo de arco aberto é maior e por isso foi necessário a tomada de tempo individual para cada um dos lados.

Foram realizadas quatro tomadas de tempo para cada operação (direita e esquerda) e os resultados dos tempos medidos estão apresentados na tabela 1.

<b>Tempo de Arco Aberto (s)</b>		
Medições	DIR	ESQ
Tempo 1	15,80	23,70
Tempo 2	17,10	25,20
Tempo 3	16,90	26,90
Tempo 4	16,10	26,10
Média dos tempos	16,48	25,48

**Tabela 1:** Valores de tempo de arco aberto medido durante testes

Para os cálculos seguintes, foi considerado a média dos tempos obtidos.

### 5.1.2 Obtenção do comprimento do arame utilizado

A obtenção do comprimento de arame consumido em cada uma das máquinas foi obtido levando-se em conta a velocidade de arame utilizada. A velocidade de avanço do arame é uma das variáveis do processo, esta variável indica a taxa com que está sendo feito o depósito do material, sendo indicada no visor do equipamento em metros por minuto.

Ao multiplicar o tempo de soldagem pela velocidade de avanço do arame, encontrou-se o comprimento de arame gasto para a soldagem de cada veículo por cada uma das máquinas de solda em questão. Os valores podem ser verificados na tabela 2.

Tempo de Soldagem (s)	VEL ARAME (m/min)		COMP. ARAME (m)			
	DIR	ESQ	DIR	ESQ		
T1	15,80	23,70	10,8	12,0	2,844	4,740
T2	17,10	25,20	10,8	12,0	3,078	5,040
T3	16,90	26,90	10,8	12,0	3,042	5,380
T4	16,10	26,10	10,8	12,0	2,898	5,220
MÉDIA	16,48	25,48	10,8	12,0	2,966	5,095

**Tabela 2:** Obtenção do comprimento de arame gasto para a soldagem

Por se tratar de um equipamento sinérgico, ao aumentar a velocidade de deposição de arame, a corrente de soldagem é aumentada simultaneamente.

Esta situação gera um limitador na velocidade de deposição, tendo em vista que correntes de soldagem elevadas podem causar defeitos como mordeduras e excesso de fusão do material base, inadmissíveis na soldagem de chapas finas.

### 5.1.3 Obtenção do volume de material de adição utilizado

Para a obtenção do volume de material de adição utilizado, considerou-se o arame eletrodo como sendo um cilindro de altura igual ao comprimento do arame calculado no item anterior. Considerando o diâmetro da bitola do arame de um milímetro, aplicando a equação a seguir, foram obtidos os valores de consumo da tabela 3.

$$V = \pi \frac{\phi^2}{4} \cdot H$$

<b>VOLUME DE MATERIAL DE ADIÇÃO GASTO (m3)</b>		
Amostra	DIR	ESQ
1	0,000002233	0,000003721
2	0,000002416	0,000003956
3	0,000002388	0,000004223
4	0,000002275	0,000004098
MÉDIA	0,000002328	0,000004000

**Tabela 3:** Volume calculado de material de adição gasto

#### 5.1.4 Cálculo da massa de material de adição utilizado

A compra dos eletrodos é feita pela massa, ou seja, o material é comprado e seu valor cotado em kg, portanto considerando que não há desperdício de material de adição (desconsiderando o desperdício com respingos e escória para ambos os processos em questão), considerou-se que o volume de material de adição utilizado para a soldagem MIG Brazing com CuSi3 é o mesmo que para o processo MAG com CMT pulsado com ER70S-6.

Os valores de densidade específica dos materiais de adição CuSi3 e ER70S-6 são 8,9 g/cm<sup>3</sup> e 7,9 g/cm<sup>3</sup> respectivamente.

As massas de material consumidas para ambos os processos foram calculadas multiplicando o volume de material gasto para a confecção dos cordões (considerado igual para as duas situações), pela densidade específica de cada material, os valores de consumo de CuSi3 obtidos podem ser verificados na tabela 4.

Amostra	VOLUME (m3)		Densidade CuSi3 (kg/m3)	Consumo atual (kg/veículo)		Consumo total de CuSi3 por veículo (kg)
	DIR	ESQ		DIR	ESQ	
1	0,000002233	0,000003721	8900	0,020	0,033	0,053
2	0,000002416	0,000003956	8900	0,022	0,035	0,057
3	0,000002388	0,000004223	8900	0,021	0,038	0,059
4	0,000002275	0,000004098	8900	0,020	0,036	0,057
MÉDIA	0,000002328	0,000004000	8900	0,021	0,036	<b>0,056</b>

**Tabela 4:** Cálculo do consumo de CuSi3 em massa.

Já a tabela 5 apresenta o mesmo cálculo, mas para o processo utilizando o eletrodo ER70S-6

Amostra	VOLUME (m3)		Densidade ER70S6 (kg/m3)	Consumo previsto (kg/veículo)		Consumo total previsto por veículo (kg)
	DIR	ESQ		DIR	ESQ	
1	0,000002233	0,000003721	7900	0,018	0,029	0,047
2	0,000002416	0,000003956	7900	0,019	0,031	0,050
3	0,000002388	0,000004223	7900	0,019	0,033	0,052
4	0,000002275	0,000004098	7900	0,018	0,032	0,050
MÉDIA	0,000002328	0,000004000	7900	0,018	0,032	<b>0,050</b>

**Tabela 5:** Cálculo do consumo de ER70S-6 em massa.

Devido a diferença de densidade dos materiais de adição mencionada anteriormente, foi verificado uma redução de massa de 6 gramas ao utilizar o ER70S6, isto gera uma diferença de consumo, em massa, de aproximadamente 12% menor do que o valor original do consumo de CuSi3. Estes valores de consumo serão utilizados como base de cálculo para os levantamentos com custos com eletrodos.

### 5.1.5 Levantamento do custo dos consumíveis

São vários os fatores que geram custos no processo de soldagem a arco elétrico, como consumo de energia elétrica, consumo de gás de proteção, consumo de eletrodos, utilização de mão de obra, depreciação e manutenção de maquinário, entre outros. Para enfatizar na proposta, levou-se em conta somente as diferenças entre os custos do arame de solda e dos gases de proteção, que serão abordados a seguir.

## 5.2 Levantamento do custo com gases de proteção

O consumo do gás de proteção foi calculado somando os períodos médios de arco aberto de ambos os lados e multiplicando pela vazão regulada no milímetro que é ajustada em 20 l/min, ou seja, para a soldagem dos cordões em questão, foi cronometrado um tempo médio de 42 s equivalente a 0,7 min, este valor foi multiplicado pela vazão onde encontrou-se um consumo médio de 14 litros (0,014 m3) de gás por ciclo de trabalho. Este consumo foi considerado o mesmo para o processo atual e para o proposto.

Na soldagem dos cordões pospostos, o gás utilizado foi uma mistura de Argônio com gás carbônico em proporção volumétrica de 82% e 18% respectivamente.

O gás de proteção utilizado no processo original é o Argônio (Ar), cujo a descrição de suas propriedades estão no capítulo III.2. O custo deste gás é de

R\$ 4,00 por m<sup>3</sup>, já o custo do gás carbônico é de R\$ 1,70 por m<sup>3</sup>, com base nesses valores, a tabela a seguir foi montada, apresentando os volumes consumidos e os valores para cada processo.

Levantamento do custo de gás de proteção					
Gás	Valor do m3 (R\$)	Consumo por veículo atual (m3)	Custo por veículo atual (R\$)	Consumo por veículo proposto (m3)	Custo por veículo proposto (R\$)
Ar	4,00	0,014	0,056	0,0115	0,046
CO2	1,70	0	0	0,0025	0,004
<b>Custo total por veículo (R\$)</b>			<b>0,056</b>		<b>0,050</b>

**Tabela 6:** Cálculo do custo de gás de proteção para o processo atual e proposto.

### 5.3 Levantamento dos custos com eletrodos

Tendo como base as quantidades calculadas anteriormente de material de adição consumidas do arame CuSi3, e utilizando um valor médio de mercado do kg deste material, foi encontrado um valor médio do custo de para a confecção dos cordões. Os valores utilizados e obtidos estão apresentados na tabela 7.

Amostra	Preço (R\$/kg)	Consumo total atual por veículo (kg)	Custo atual por veículo (R\$)
	CuSi3		
1	31,28	0,053	1,657
2	31,28	0,057	1,774
3	31,28	0,059	1,841
4	31,28	0,057	1,774
MÉDIA	31,28	0,056	<b>1,762</b>

**Tabela 7:** Cálculo do custo de arame CuSi3 por veículo.

O mesmo processo foi utilizado para o levantamento do custo para a fabricação utilizando como material de adição o eletrodo ER70S-6, e os valores encontrados estão apresentados na tabela 8.

Amostra	Preço (R\$/kg)	Consumo total previsto por veículo (kg)	Custo previsto por veículo (R\$)
	ER70S6		
1	4,60	0,047	0,22
2	4,60	0,050	0,23
3	4,60	0,052	0,24
4	4,60	0,050	0,23
MÉDIA	4,60	0,050	<b>0,23</b>

**Tabela 8:** Cálculo do custo de arame ER70S-6 por veículo.

Tendo como base os valores obtidos nas tabelas 8 e 9 foi possível calcular o saving, ou seja, a redução de custo gerado substituindo o CuSi3 pelo ER70S-6, e os valores obtidos estão apresentados na tabela 9.

Amostra	Custo atual de CuSi3 por veículo (R\$)	Custo previsto com ER70S6 por veículo (R\$)	Save por veículo (R\$)
1	1,657	0,22	1,441
2	1,774	0,23	1,543
3	1,841	0,24	1,600
4	1,774	0,23	1,543
MÉDIA	<b>1,762</b>	<b>0,23</b>	<b>1,532</b>

**Tabela 9:** Cálculo do Saving por veículo, substituindo o arame atual pelo ER70S-6.

Os cálculos realizados apresentam uma economia de R\$ 1,53 por veículo. Para comprovar a viabilidade econômica desta alteração será necessário um estudo que considere o valor do investimento em maquinário, necessário para que a alteração seja possível.

#### **5.4 Levantamento de custos de investimentos com maquinário**

Para que o processo possa ser alterado, será necessária a aquisição de duas máquinas com tecnologia CMT, sendo que a utilizada nos testes foi uma Transfer Puls Synergic 2700 (CMT TPS 2700), cujas características foram abordadas no capítulo III.3.

Essas máquinas são mais caras que as utilizadas atualmente no posto de trabalho e, portanto deve-se levar em conta o volume de produção e o tempo de utilização para que seja verificado o retorno financeiro desta alteração.

O valor médio de mercado de cada máquina deste modelo está em torno de R\$ 50.000,00, então ao considerar o valor de investimento de duas máquinas, será necessário uma produção de cerca de 65.000 veículos para que a partir de então haja um retorno financeiro que justifique a alteração. Deve-se observar para este investimento que as máquinas atuais não necessariamente serão descartadas, podendo ser utilizadas em outros postos de soldagem, como máquinas de back up ou até mesmo pode-se retirar suas peças para manutenção de outras máquinas do mesmo modelo, ou seja, diminuindo o custo de alteração das máquinas para a planta.

#### **5.5 Levantamento de investimento para alteração da rede de gás**

Deve-se levar em conta também a alteração no abastecimento da rede de gás, atualmente as estações de solda em questão estão utilizando Argônio puro e será

necessária a alteração para que a mesma seja abastecida com a mistura de CO<sub>2</sub> + Ar, o que gera um custo de R\$ 5.000,00, ou seja, 3300 carros devem ser fabricados para que as despesas com a alteração na rede de gás seja viabilizada.

## **5.6 Balanço final de viabilidade econômica**

Somando as despesas que esta alteração acarretará, somente após a produção de 68.300 veículos, os custos gerados serão igualados ao retorno financeiro e a empresa começará a ter um retorno líquido sobre o investimento.

Considerando o volume atual aproximado de veículos produzidos, após cinco meses de produção o investimento estará pago e o saving gerado será de aproximadamente R\$ 367.000,00 por ano, isto faz com que a alteração seja considerada viável economicamente.

## 6 PROCESSO EXPERIMENTAL

Para o processo experimental, conforme já apresentado anteriormente, foi utilizado a fonte de solda TPS 2700 CMT. Para que o teste fosse representativo, as mesmas condições do processo atual foram mantidas, ou seja, o teste foi realizado no posto de trabalho com uma carroceria normal de produção e com os soldadores que realizam o job rotation neste posto de trabalho.

Um primeiro teste foi realizado com a máquina de solda ajustada para o modo de transferência CMT pulsado, com gás de proteção utilizando-se de uma mistura com 82% de argônio e 18% de CO<sub>2</sub> com vazão de 20 l/min. O arame eletrodo utilizado foi o ER70S-6 e a máquina regulada com os parâmetros apresentados na tabela 10.

Parâmetros de Soldagem Teste 1					
Velocidade do Arame (m/min)	Corrente de Soldagem (A)	Tensão (V)	Indutância (H)	Espessura teórica da chapa (mm)	Altura do arco
7,3	165	13,3	1	1,8	-15

***Tabela 10:*** Parâmetros de soldagem utilizados no teste 1.

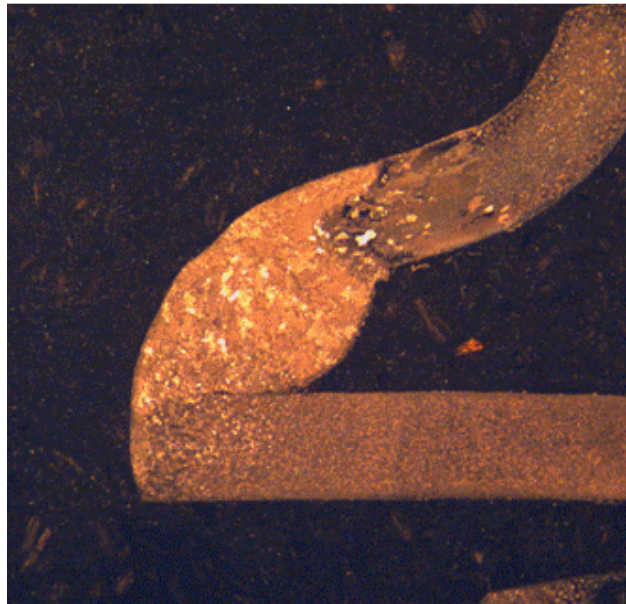
O primeiro teste foi efetuado em um veículo, cuja inspeção visual realizada mostrou-se satisfatória e não houve descontinuidades aparentes, além de apresentar um baixo índice de respingos que é extremamente prejudicial aos banhos de pintura. O aspecto externo pode ser observado na figura 17.



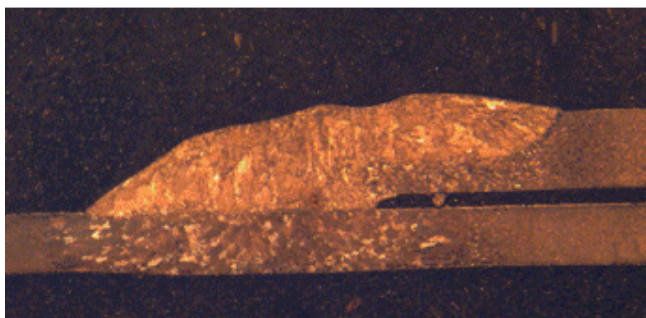
***Figura 17:*** Foto dos cordões de solda resultantes do teste 1.

Em seguida os cordões foram submetidos à análise macrográfica, onde características como comprimento de perna, largura de garganta, porosidades e profundidade de diluição foram avaliados.

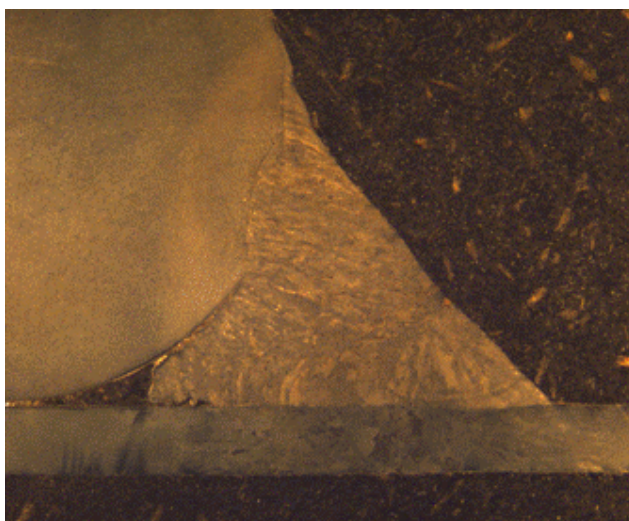
Embora não foram encontradas descontinuidades graves que comprometessem a qualidade dos cordões avaliados, dois fatores inviabilizaram a implementação em processo desta condição de soldagem, sendo o principal deles o tempo de soldagem elevado, que por ter sido executado com uma velocidade arame bastante reduzida (valor do processo atual 12 m/min e teste com 7,3 m/min), extrapolou o tempo de ciclo máximo em cerca de 6 s por veículo, comprometendo o volume de produção. Outro fator que influenciou na decisão de não validação destas condições para a soldagem nesta condição foi a análise macrográfica que apresentou uma profundidade de diluição bastante baixa, evidenciando o risco de não haver diluição entre metal base e arame eletrodo, podendo comprometer a resistência mecânica dos cordões. Esta condição pode ser observada nas figuras 18a, 18b e 18c.



**Figura 18a:** Macrografia de cordão de solda de aresta apresentando baixa profundidade de diluição.



**Figura 18b:** Macrografia de cordão de solda sobreposta apresentando baixa profundidade de diluição.



**Figura 18c:** Macrografia de cordão de solda do suporte do gancho do escapamento apresentando baixa profundidade de diluição.

Com base nos resultados encontrados no primeiro teste, um segundo teste foi efetuado com o mesmo equipamento (TPS 2700 CMT), operando no modo CMT pulsado, a vazão de gás foi mantida em 20 l/min e igual composição (82% de argônio e 18% de CO<sub>2</sub>), porém os parâmetros de soldagem foram ajustados para uma maior taxa de deposição, implicando velocidades de soldagem mais elevadas e uma maior quantidade de energia imposta aos cordões. Para este segundo teste, utilizou-se os parâmetros apresentados na tabela 11.

Parâmetros de Soldagem Teste 2					
Velocidade do Arame (m/min)	Corrente de Soldagem (A)	Tensão (V)	indutância (H)	Espessura teórica da chapa (mm)	Altura do arco
10,5	208	15	0	2	-10

**Tabela 11:** Parâmetros de soldagem utilizados no teste 2.

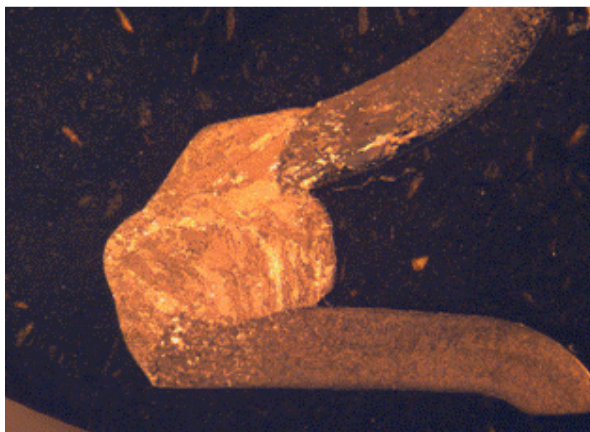
Com a velocidade de deposição do arame ajustada em 10,5 m/min o tempo de tacto foi mantido abaixo do máximo estabelecido para o posto de trabalho. A

inspeção visual dos cordões mostrou-se novamente satisfatória, com a ausência de defeitos aparentes e mantendo a quantidade de respingos à níveis aceitáveis. O aspecto externo destes cordões pode ser observado na figura 19.

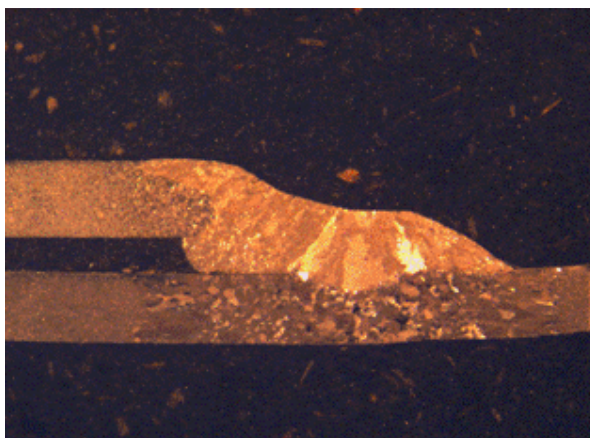


**Figura 19:** Foto dos cordões de solda resultantes do teste 2.

Após a validação da aparência externa dos cordões através da análise visual, os cordões foram preparados para a análise macrográfica, com o propósito de avaliar a geometria interna dos mesmos e verificar a existência de defeitos internos. Desta forma, pode-se constatar um aumento significativo da profundidade de diluição do metal base, diminuindo o risco de ocorrer uma falha por falta de diluição entre metal base e arame eletrodo. Esta condição pode ser observada nas macrografias apresentadas nas figuras 20a, 20b e 20c, demonstrando a viabilidade da utilização destes parâmetros de soldagem no posto de trabalho.



***Figura 20a:*** Macrografia de cordão de solda de aresta apresentando boa profundidade de diluição



***Figura 20b:*** Macrografia de cordão de solda sobreposta apresentando boa profundidade de diluição.



***Figura 20c:*** Macrografia de cordão de solda do suporte do gancho do escapamento apresentando boa profundidade de diluição.

## 7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ao concluir esse trabalho, pode-se constatar que, há viabilidade na troca da tecnologia MIG Brazing pulsado utilizando arame eletrodo de CuSi3, por transferência CMT pulsada com arame eletrodo ER70S-6 para a soldagem de chapas finas.

O método de transferência CMT pulsada apresentou um aporte térmico menor que o processo convencional de soldagem MAG, o fator aquecimento era um limitador da utilização do processo MAG para soldagem de chapas finas com taxa de deposição elevada, pois quanto maior a taxa de deposição, maior se torna a quantidade de corrente elétrica usada para a fusão do arame eletrodo e portanto, maior é o calor imposto à peça que por sua vez pode gerar defeitos como mordeduras e excesso de fusão do metal base, chegando algumas vezes a furar a chapa. Além desses defeitos, um aporte térmico mais alto tende a gerar deformações nas chapas devido a maior ocorrência de tensões térmicas residuais, estes problemas foram amenizados ao utilizar a tecnologia de transferência CMT pulsado.

Tendo em vista o alto volume de produção de veículos, mesmo pequenas economias, tornam-se significativas, justificando investimentos em tecnologias que permitem reduzir custos sem afetar a qualidade do produto final.

Pôde-se constatar também a viabilidade econômica desta alteração, uma vez que o arame eletrodo composto pela liga CuSi3, é em média seis vezes mais caro que o arame eletrodo ER70S-6 e os investimentos necessários para a implementação desta tecnologia é amortizada em cinco meses de produção. Após este período, haverá um lucro de R\$ 367.000,00 por ano, justificando a alteração.

Considerando que o valor do CO2 é menor que o valor do gás argônio, era esperado uma redução de custos do processo devido à utilização da mistura entre argônio e CO2, porém apesar de ser necessária para a alteração do processo, esta redução mostrou-se insignificante economicamente e decidiu-se não levar em conta para a análise econômica final.

## 8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

A. SCOTTI, V. PONOMAREV – Soldagem MIG / MAG – melhor entendimento melhor desempenho (2008).

Catálogo do fabricante Fronius - [www.fronius.com](http://www.fronius.com) - (2013).

C. G. PICKIN, S. W. WILLIAMS, M. LUNT, Characteristics of cold metal transfer (CMT) process and its application for low dilution cladding; Journal of Materials Processing Technology 211 (2011).

C. PICKIN, K. YOUNG, Evaluation of cold metal transfer (CMT) for welding aluminium alloy; Sci. Technol. Weld Join (2009).

D. BOISSEILIER, O. FRENEAUX, JP GAUFILLET, J. HAMY, D. MARCHAND - Os processos de soldagem por fusão – Le soudage laser – (março de 1998).

D. STOCCO, R. P. CARVALHO “Ultrassom Solda a Ponto” (2011).

H. HACKL - MIG brazing of galvanised light-gauge sheets (1997).

H. ZHANG, J. FENG, P. HE, Interfacial phenomena of cold metal transfer (CMT) welding of zinc coated steel and wrought aluminium; Mater. Sci. Technol. 24 (2007)

H. ZHANG, J. FENG, P. HE, B. B. ZHANG; J. M. CHEN; L. WANG – The arc characteristics and metal transfer behavior of cold metal transfer and its use in joining aluminium to zinc-coated steel; Material Science and Engineering A; 499 (2009).

J. FENG, H. ZANG, P. He - The CMT short-circuiting metal transfer process and its use in thin aluminium sheet welding; Mater. Des. 30 (2009) (5) 1859-1852.

L. AGUDO, N. JANK, J. WAGNER - Investigation of microstructure and mechanical properties of steel-aluminium joints produced by metal arc joining; Stl. Res. Int. (2008).

M. C. Jr. SANTOS – Influência da transferência metálica por curto-circuito e CMT na geometria do cordão e características da ZTA do Dual Phase DP 600 (2012).