

MARIA PAULA DE SOUZA MORGANTI

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DO ESPAÇAMENTO ENTRE CHAPAS E DO
POSICIONAMENTO DO ATAQUE DO ARAME NO PROCESSO ROBOTIZADO DE
SOLDAGEM MIG/MAG DE JUNTA SOBREPOSTA PARA ARAME DE 1,2MM**

São Caetano do Sul

2013

MARIA PAULA DE SOUZA MORGANTI

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DO ESPAÇAMENTO ENTRE CHAPAS E DO
POSICIONAMENTO DO ATAQUE DO ARAME NO PROCESSO ROBOTIZADO DE
SOLDAGEM MIG/MAG DE JUNTA SOBREPOSTA PARA ARAME DE 1,2MM**

Monografia apresentada ao curso de Pós-Graduação em Engenharia de Soldagem, da Escola de Engenharia Mauá do Centro Universitário do Instituto Mauá de Tecnologia para a obtenção do título de Especialista.

Orientador: Prof. Camilo Carletti

São Caetano do Sul

2013

Morganti , Maria Paula de Souza

Estudo da influência do espaçamento entre chapas e do posicionamento do ataque do arame no processo robotizado de soldagem MIG/MAG de junta sobreposta para arame de 1,2mm. São Caetano do Sul, SP: Escola de Engenharia Mauá, 2013.

54p.

Monografia — Pós-Graduação em Engenharia de Soldagem. Centro Universitário do Instituto Mauá de Tecnologia, São Caetano do Sul, SP, 2013.
Orientador: Prof. Camilo Carletti

1. Soldagem 2. MIG/MAG 3. Automação 4. Variação dimensional 5. Junta
I. Morganti, Maria Paula de Souza. II. Instituto Mauá de Tecnologia. Centro
Universitário. Centro de Educação Continuada. III. Estudo da influência do
espaçamento entre chapas e do posicionamento do ataque do arame no processo
robotizado de soldagem MIG/MAG de junta sobreposta para arame de 1,2mm.

AGRADECIMENTOS

A todos os professores do curso de Engenharia de Soldagem, que foram importantes na minha vida acadêmica e no desenvolvimento desta monografia.

Aos meus amigos, colegas e familiares, pelo incentivo e apoio constantes.

RESUMO

Atualmente o processo de soldagem MIG/MAG é amplamente utilizado nas indústrias em virtude de sua alta produtividade e aplicação. O processo pode ser aplicado para uma grande variedade de aços, como aço carbono, inoxidável entre outras ligas ferrosas. E como dito anteriormente, uma característica importante deste processo é a excelente produtividade devido à facilidade na automação dos equipamentos. Estes processos automatizados já são empregados em nível industrial, entretanto, os processos anteriores à soldagem (como processos de conformação, tendo estampagem como exemplo) possuem variações dimensionais (devidas às propriedades de material, como “efeito-mola”, ou *spring back*) causando diferenças nas chapas a serem soldadas. O objetivo principal deste trabalho é, a partir dos resultados das combinações de soldagens de diversos espaçamentos entre chapas versus os pontos de ataque do arame de solda, definir quais as condições ótimas de soldagem para a junta em questão do trabalho. Assim, será mostrado que é possível manter a qualidade da junta soldada quando as variações entre chapas são maiores que as pregadas nos métodos atuais (metade do diâmetro do arame utilizado). Este trabalho é de cunho totalmente tecnológico e exploratório, e não científico, visando atender os interesses das indústrias principalmente pela sua aplicação prática.

Palavras-chave: Soldagem. MIG/MAG. Automação. Variação dimensional. Junta.

ABSTRACT

Recently the welding process MIG/MAG is widely used in industries due to its high productivity and application. The process can be applied to a large steel variety, as carbon steel, stainless steel and other ferrous alloys. As written before, an important feature from this process is its excellent productivity due to the facility in the equipments automation. These automated process are applied in industrial level, however, the processes before the welding one (as stamping, for example) have dimensional variations provoking differences on the plates to be welded. The main goal of this work is, based on the results from several welded plates gaps combinations versus the welding wire positions incidences, to define which are the good conditions from the joint mentioned. So, it will be shown that is possible to keep the welded joint quality even when these variations are bigger than the ones used on the current methods (half of the wire diameter). The present work is totally directed to technological and exploratory field, not scientific, aiming to achieve the industries interests and its practical application.

Keywords: Welding. MIG/MAG. Automation. Dimensional variation. Joint.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 01 – Participação Mensal dos Emplacamentos no 1º Semestre de 2007 a 2012.....	11
Figura 02 – Investimento 1980/2011 na Indústria Automobilística Brasileira	12
Figura 03 – Esquema Ilustrativo de Posição de Ataque do Arame de Solda e do Espaçamento Entre Chapas.....	13
Figura 04 – Processo de Soldagem MIG/MAG	15
Figura 05 – Forma de preparação para diversas espessuras a soldar por MIG/MAG	16
Figura 06 – Penetração de Solda em Junta Sobreposta	16
Figura 07 – Perna da Solda em Junta Sobreposta.....	17
Figura 08 – Garganta da Solda em Junta Sobreposta	17
Figura 09 – Formas de Distorção em Juntas Soldadas	19
Figura 10 – Desalinhamento em Junta de Topo	19
Figura 11 – Dimensões adequadas de Solda por Filete	20
Figura 12 – Exemplos de Perfis de Solda Inadequados.....	20
Figura 13 – Esquema de uma Falta de Fusão	22
Figura 14 – Esquema de uma Falta de Penetração	22
Figura 15 – Mordeduras	23
Figura 16 – Correntes de Soldagem x Velocidade de Arame.....	25
Figura 17 – Influência do <i>stick out</i> na Geometria do Cordão de Solda.....	27
Figura 18 – Distância Bico de Contato-Peça (DCBP).....	27
Figura 19 – Efeito da distância entre o bico de contato e peça na corrente de soldagem	28
Figura 20 – Efeito da Orientação no Eletrodo na Morfologia do Cordão de Solda	28
Figura 21 – Perfis de cordões produzidos por arcos protegidos com gás inerte	29
Figura 22 – Efeito de Adições de Dióxido de Carbono ao Argônio.....	30
Figura 23 – Transferências Metálicas no processo MIG/MAG	31
Figura 24 – Aplicabilidade da soldagem a partir do gráfico Tensão x Corrente	32
Figura 25 – Transferência por Curto-Círcuito	32
Figura 26 – Transferência por <i>Spray</i>	34
Figura 27 – Composição Química do Metal de Base (%p/p).....	37
Figura 28 – Composição Química do Arame de Solda (%p/p)	37
Figura 29 – Esquema da junta soldada	38
Figura 30 – Posição de soldagem nos testes.....	38

Figura 31 – Ângulo de Deslocamento do Ataque da Tocha de Soldagem	39
Figura 32 – Esquema da posição de ataque do arame/eletrodo	40
Figura 33 – Robô de Solda a Arco utilizado para o teste	41
Figura 34 – Fonte de Solda a Arco utilizada para o teste	41
Figura 35 – Valores mínimos de aprovação das amostras em questão	42
Figura 36 – Gráfico a ser preenchido com os resultados das análises de corte.....	42
Figura 37 – Corte dos Corpos de Prova Utilizados para Avaliação através do Mapa.....	44
Figura 38 – Mapa “Abertura de Chapas x Ataque do Arame/Eletrodo”	44

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

DBCP Distância Bico de Contato-Peça

GMAW *Gas Metal Arc Welding*

MAG *Metal Inert Gas*

MIG *Metal Inert Gas*

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
1.1 OBJETIVO	13
2 CORPO DO TRABALHO	14
2.1 PROCESSO MIG/MAG	14
2.2 DIMENSÕES DE ANÁLISE DE SOLDA	16
2.2.1 Penetração (p)	16
2.2.2 Perna (p₁, p₂)	17
2.2.3 Garganta (g)	17
2.3 DESCONTINUIDADES EM JUNTAS SOLDADAS	17
2.3.1 Descontinuidades Dimensionais	18
2.3.1.1 Distorção	18
2.3.1.2 Formato Incorreto da Junta	19
2.3.1.3 Dimensão Incorreta da Solda	19
2.3.1.4 Perfil Incorreto da Solda	20
2.3.2 Descontinuidades Estruturais	21
2.3.2.1 Porosidades	21
2.3.2.2 Inclusões de Escória	21
2.3.2.3 Falta de Fusão	22
2.3.2.4 Falta de Penetração	22
2.3.2.5 Mordeduras	23
2.3.2.6 Trincas	23
2.3.3 Descontinuidades Relacionadas com Propriedades Indesejáveis da Região de Solda	23
2.4 PRINCIPAIS PARÂMETROS DE SOLDAGEM MIG/MAG	24
2.4.1 Corrente de Soldagem	24
2.4.2 Tensão do Arco	25
2.4.3 Velocidade de Soldagem	26
2.4.4 Extensão Livre do Eletrodo (<i>stick out</i>) e Distância Bico de Contato Peça (DBCP)	26
2.4.5 Ângulo de Inclinação da Tocha de Soldagem	28
2.4.6 Gases de Proteção	29

2.4.7 Tipos de Transferência Metálica.....	31
2.4.7.1 Transferência por Curto-Círcuito	32
2.4.7.2 Transferência Globular	33
2.4.7.3 Transferência por <i>spray</i> (aerosol).....	33
2.5 PROCESSO MIG/MAG COM AUMENTO DE PRODUÇÃO	34
2.5.1 Limitações da Soldagem Robotizada	35
2.5.2 Projeto de Junta e Tolerâncias para a Soldagem Robotizada.....	36
3 MÉTODO	36
3.1 INTRODUÇÃO.....	36
3.2 MATERIAIS, EQUIPAMENTOS E MÉTODO.....	37
3.3 CRITÉRIO DE APROVAÇÃO	41
4 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS.....	43
5 CONCLUSÕES	45
6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	46
REFERÊNCIAS	47
APENDICE A – Título.....	49
ANEXO A - Título	50

1 INTRODUÇÃO

Em virtude da crescente econômica que tem acontecido ultimamente, bem como prospecções positivas para curto e médio prazos para países emergentes (como é o caso do BRICS, do qual o Brasil faz parte), a indústria automobilística vem se preparando para uma demanda de veículos cada vez maior.

Dessa maneira, as empresas automobilísticas vêm se defrontando com um aumento em seus volumes de produção, gerando maior demanda de processos produtivos. A contratação de pessoas e recursos é essencial para a garantia de tal aumento produtivo.

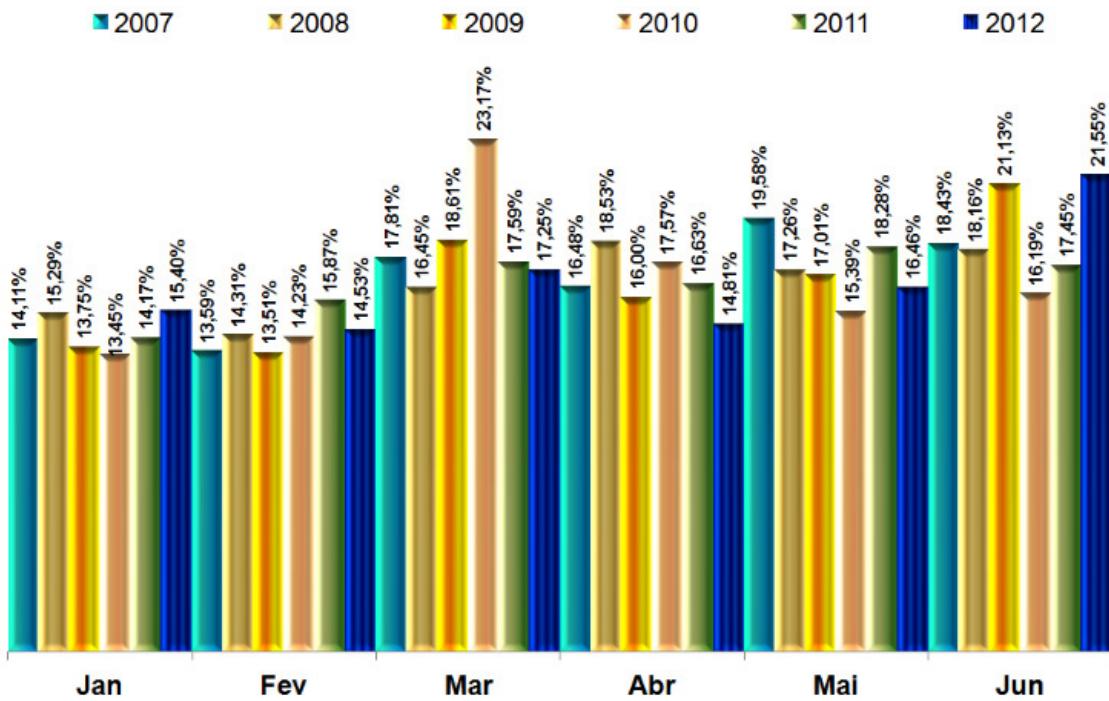


Figura 01 – Participação Mensal dos Emplacamentos no 1º Semestre de 2007 a 2012^[1]

Embora o mercado possua mão-de-obra disponível, no caso de processos especiais, como a soldagem por exemplo, a necessidade de pessoas qualificadas torna-se fundamental para a garantia de uma boa qualidade do processo. Em função do alto custo da mão-de-obra qualificada, chega um momento em que a automação é menos custosa, fazendo com que os investimentos das empresas sejam focados nela, realidade esta que tem sido claramente

visualizada na indústria automobilística brasileira nos últimos anos. Isso faz com que cada vez menos se utilize de mão de obra (soldador) e cada vez mais utilize robôs para manufatura de solda.

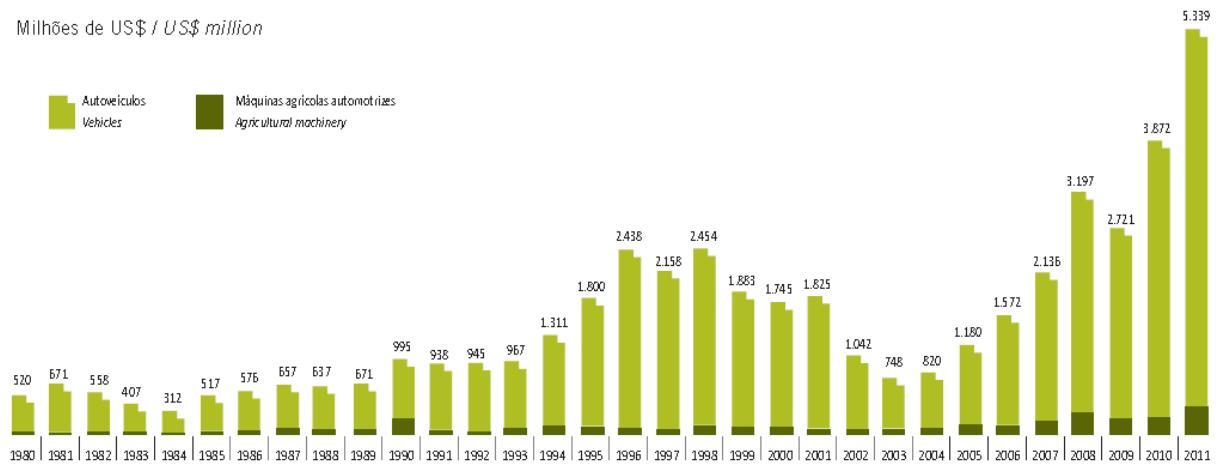


Figura 02 – Investimento 1980/2011 na Indústria Automobilística Brasileira^[2]

Porém, o aumento da automação dos processos de solda incorre em uma série de problemas relacionados à qualidade e repetibilidade dos mesmos, como problemas relacionados às variações de peças, dispositivos, entre outros, os quais, no processo manual são completamente passíveis de compensação (*know how* do soldador), o que não é possível para um robô de solda, que não “percebe” tais variações.

Uma vez que o robô de solda não supre essa variação, podem ocorrer condições adversas que não garantem as condições de resistência da solda, como a falta de penetração por exemplo, culminando na redução da vida útil do componente, além da possibilidade de falhas.

Para tanto, as variáveis do processo de soldagem têm que ser muito bem conhecidas e estudadas, e controladas quanto aos efeitos que poderão ser causados na solda a fim de garantir sua qualidade e repetibilidade no processo automatizado.

1.1 OBJETIVO

O presente trabalho visa avaliar o comportamento das dimensões da junta sobreposta (perna, garganta e penetração) com arame de 1,2mm quando variam-se os espaçamentos entre chapas e as posições de ataque do arame de solda, conforme a Figura 03, mantendo constantes os parâmetros estipulados no estudo preliminar do projeto.

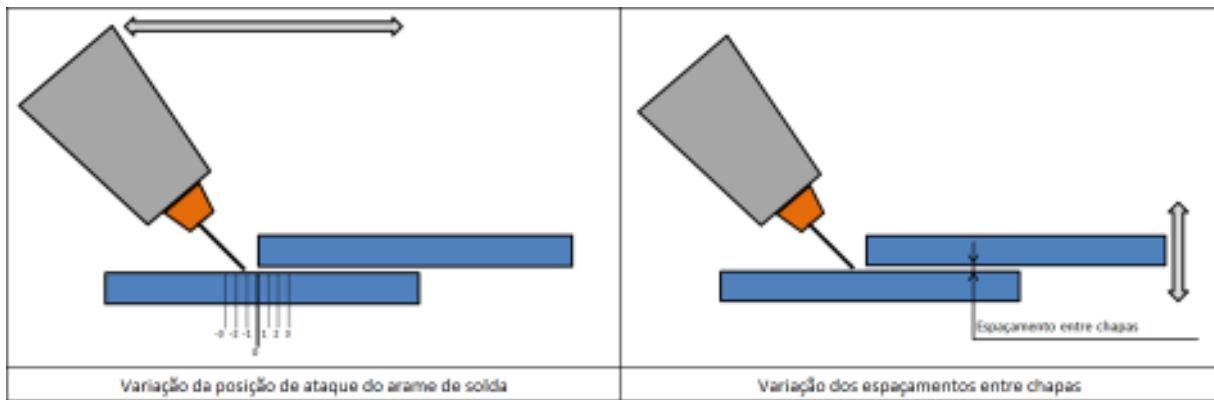


Figura 03 – Esquema Ilustrativo de Posição de Ataque do Arame de Solda e do Espaçamento Entre Chapas

Desta forma, com as condições de contorno já controladas e estabelecidas conforme histórico do processo, que existe há mais de 10 anos, será possível avaliar quais as máximas variações permitidas pelo processo em questão que podem ser absorvidas pelo robô. Isto é, conhecendo-se qual a amplitude de variação aceitável do processo, é possível estabelecer qual a variação máxima permitida do espaçamento entre chapas bem como o melhor posicionamento de ataque do arame de solda (programação estabelecida do robô).

Uma vez que o processo de fabricação da peça, em especial o processo de soldagem MIG/MAG, já está definido e em funcionamento (corrente de soldagem, tensão de soldagem, velocidade de soldagem, entre outros parâmetros já estabelecidos) atendendo a critérios de produtividade contemplados no projeto, o único fator que influenciará nas dimensões de uma junta é a variação do espaçamento entre as chapas, proveniente do processo de conformação mecânica, como a estampagem por exemplo, que pode variar não somente devido às características do material em si (efeito “mola”), mas também por desgaste de ferramenta, entre outros. Mantendo o processo de soldagem estável, isto é, quando as condições do preenchimento de junta (perna, garganta, penetração) forem conhecidas, é possível reduzir a

frequência de testes de controle de qualidade que verifiquem descontinuidades dimensionais de processos seriados. Isto significa que, na medida em que se estudam as relações dos fatores mencionados acima e os seus respectivos resultados em termos de dimensionais da solda, o processo torna-se mais previsível (para uma dada condição, o resultado já é esperado), possibilitando, portanto, ter o conhecimento do resultado dimensional do cordão de solda mesmo sem efetuar testes destrutivos.

Não serão avaliados ou propostos métodos para verificação de quais são as solicitações mecânicas permissíveis que o conjunto ficará submetido, tampouco calcular a resistência através das áreas mínimas resistentes. O objetivo consiste em encontrar uma “janela de estabilidade” para um processo já estabelecido (ou seja, com parâmetros de soldagem já determinados), cruzando duas variáveis do processo que são o espaçamento entre chapas e o ponto de incidência do arame de solda, uma vez que os parâmetros de solda não se alteram ao longo do processo.

Este trabalho é de cunho tecnológico e exploratório, e não científico, visando atender os interesses da indústria automobilística principalmente pela sua aplicação prática.

2 CORPO DO TRABALHO

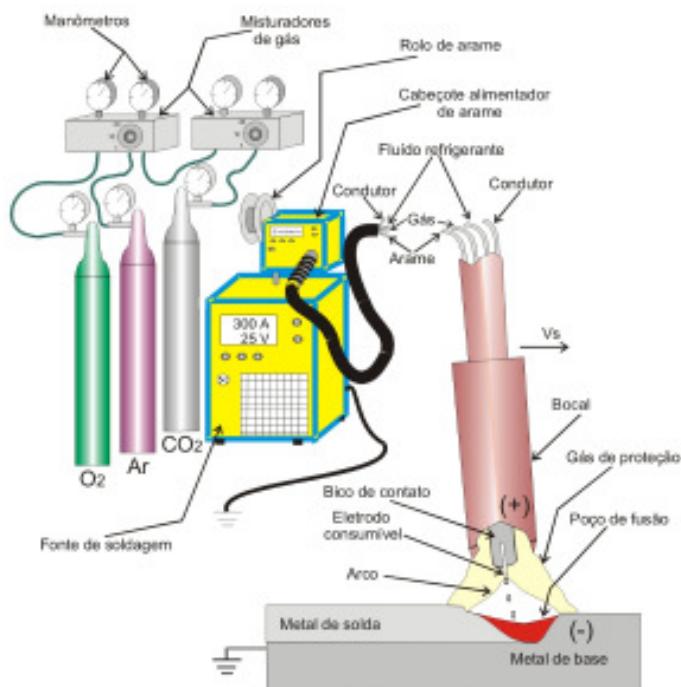
2.1 PROCESSO MIG/MAG

A soldagem a arco com proteção gasosa (*Gas Metal Arc Welding – GMAW*) é um processo em que a união de peças metálicas é produzida pelo aquecimento destas com um arco elétrico estabelecido entre um eletrodo metálico nu (consumível) e a peça de trabalho^[3].

Uma vez que o arame (metal de adição) não possui revestimento como, por exemplo o processo de soldagem por eletrodo revestido, torna-se necessária a proteção do arco e de sua poça de fusão por um gás inerte ou ativo.

Na soldagem com gás inerte (*Metal Inert Gas - MIG*), o gás utilizado por ser o Ar (Argônio), He (Hélio) ou misturas controladas ricas em Ar complementadas com He, O₂ (Oxigênio) ou CO₂ (Dióxido de Carbono). Esse gás inerte não reage metalurgicamente com a gota ou a poça de fusão, somente age como proteção destas regiões e auxílio na abertura e manutenção do arco elétrico. No caso da soldagem com gás ativo (*Metal Active Gas - MAG*), é utilizado o

gás CO₂ puro ou misturado (Ar+CO₂ ou Ar+CO₂+O₂) que, além da função de proteção, esse gás reage metalurgicamente com a gota e a poça de fusão. Embora o CO₂ seja um gás mais barato que os outros mencionados acima, permite maior penetração, porém com maiores quantidades de respingos.



FONTE: Barra^[4]

Figura 04 – Processo de Soldagem MIG/MAG

O processo MIG/MAG pode ser aplicado de forma automática (mecanizada), ou seja, quando o movimento da tocha é feito por uma máquina, ou semi-automática, que é quando a tocha é conduzida manualmente pelo operador (soldador). Para ambas as aplicações, a alimentação do arame é feita mecanicamente (o equipamento mantém a velocidade de alimentação e o comprimento do arco constantes)^[5].

A soldagem MIG/MAG pode ser utilizada para materiais numa ampla faixa de espessura, tanto para materiais ferrosos quanto não ferrosos, como pode ser vista na Figura 05. O diâmetro dos eletrodos usados variam entre 0,8 e 2,4mm.

Espessura da chapa (mm) ▶	0,4	1,6	3,2	4,8	6,4	10,0	12,7	...
Procedimento								
Passe único sem preparação	→	←	→	←	→	←	→	...
Passe único com preparação	→	←	→	←	→	←	→	...
Passes múltiplos	→	←	→	←	→	←	→	...

Figura 05 – Forma de preparação para diversas espessuras a soldar por MIG/MAG^[3]

2.2 DIMENSÕES DE ANÁLISE DE SOLDA

O objetivo principal de uma solda é unir duas ou mais peças atendendo requisitos mínimos de resistência, ou seja, uni-las suportando as forças às quais o conjunto está submetido, a região do cordão de solda às quais estão sendo submetidas a tais esforços (cisalhamento, tração, entre outros) deverá conter uma área mínima para que não haja ruptura. Para tanto, há diversas Normas associando algumas dimensões do cordão (perna, garganta, penetração) com suas respectivas resistências a esforços mínimos suportados.

2.2.1 Penetração (p)

É a quantidade de material penetrada no material base. Se refere à cota entre a superfície do metal base até a linha de fusão. Ou seja, é a profundidade alcançada pela fusão, medida perpendicularmente à superfície do material de base, na seção reta da solda^[6].

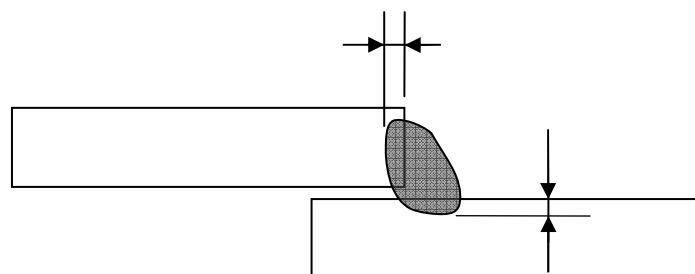


Figura 06 – Penetração de Solda em Junta Sobreposta

A penetração é diretamente proporcional à corrente de soldagem utilizada e inversamente proporcional à velocidade de soldagem.

2.2.2 Perna (p_1, p_2)

É a projeção do segmento de reta que representa a largura da solda sobre uma das superfícies do metal de base. Para junta sobreposta, há duas pernas^[6].

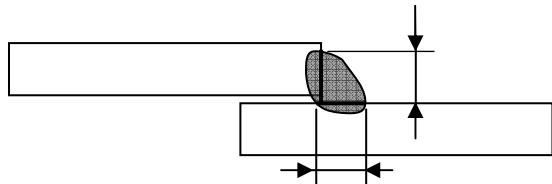


Figura 07 – Perna da Solda em Junta Sobreposta

2.2.3 Garganta (g)

É a altura do triângulo formado pelos pés da solda e o ponto de encontro entre as duas superfícies do metal de base, também chamado de origem da junta^[6].

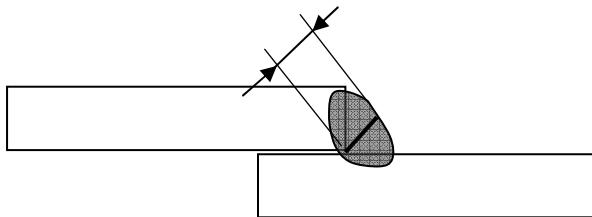


Figura 08 – Garganta da Solda em Junta Sobreposta

Para o caso da solda em estudo, a determinação da sua área resistente é dada pelo comprimento efetivo de solda e sua garganta efetiva. Isso significa que, caso haja uma variação do espaçamento entre chapas mantida a posição de ataque do arame, haverá uma solda diferente da esperada, fazendo com que haja a redução da garganta efetiva e, consequentemente, de sua resistência final.

2.3 DESCONTINUIDADES EM JUNTAS SOLDADAS

A descontinuidade é considerada como uma interrupção da estrutura típica ou esperada de uma junta soldada, ou seja, como a falta de homogeneidade de características físicas, mecânicas ou metalúrgicas do material ou da solda^[7]. A existência de descontinuidades em

uma junta não significa necessariamente que a mesma seja defeituosa, esta condição depende da aplicação a que se destina o componente final. Porém, de acordo com exigências específicas de qualidade para uma dada junta soldada, uma descontinuidade pode ser considerada como prejudicial para a utilização futura da mesma, constituindo-se portanto em um defeito e exigindo assim ações corretivas que acarretam numa elevação do tempo e do valor final do serviço. Logo, juntas defeituosas precisam em geral ser reparadas ou até mesmo substituídas. Desta forma, a presença de defeitos deve ser sempre evitada.

No geral, existem os seguintes tipos de descontinuidades: descontinuidades dimensionais, descontinuidades estruturais e descontinuidades relacionadas com propriedades indesejáveis da região de solda^[7].

2.3.1 Descontinuidades Dimensionais

Para a fabricação de uma estrutura soldada, é necessário que tanto a sua estrutura quanto às suas soldas possuam dimensões e formas similares (dentro de exigências de Normas ou outras tolerâncias exigidas) às indicadas em desenhos e projetos. Uma junta que não atenda à tais exigências necessitam de correções antes da aceitação final, uma vez que encontra-se defeituosa. As principais descontinuidades estruturais são:

2.3.1.1 Distorção

É a mudança de forma da peça soldada devido às deformações térmicas do material durante a soldagem^[7]. Soldagem em excesso, soldagem em juntas livres, seleção incorreta do chanfro ou da sequência de soldagem, entre outros fatores podem causar esta descontinuidade. Porém, podem ser corrigidas através da diminuição de calor e metal depositado, com a utilização de dispositivos de fixação, pelo martelamento entre passes e pela escolha correta de chanfros e sequência de soldagem. Isto é, está relacionada diretamente com a sua energia de soldagem, que depende da combinação dos parâmetros de processo.

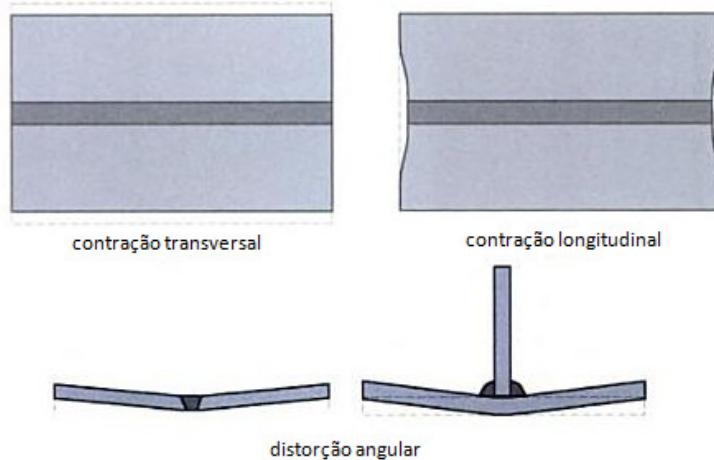


Figura 09 – Formas de Distorção em Juntas Soldadas

2.3.1.2 Formato Incorreto da Junta

O posicionamento ou dimensionamento inadequado das peças a serem soldadas pode levar a problemas como um desalinhamento.

No exemplo de um dispositivo para soldagem, um grampo de fechamento de um conjunto a ser soldado, caso não tenha uma boa manutenção, poderá ter uma folga, acarretando portanto em um posicionamento incorreto do conjunto a ser soldado.

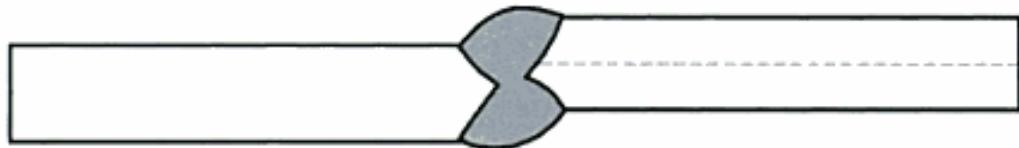


Figura 10 – Desalinhamento em Junta de Topo^[3]

2.3.1.3 Dimensão Incorreta da Solda

As dimensões das soldas são especificadas de modo a atender algum requisito específico de projeto, como por exemplo, atender às exigências de resistência à tração. Dimensões fora das tolerâncias admissíveis configuram defeitos de soldagem, uma vez que a solda deixa de atender à esses requisitos.

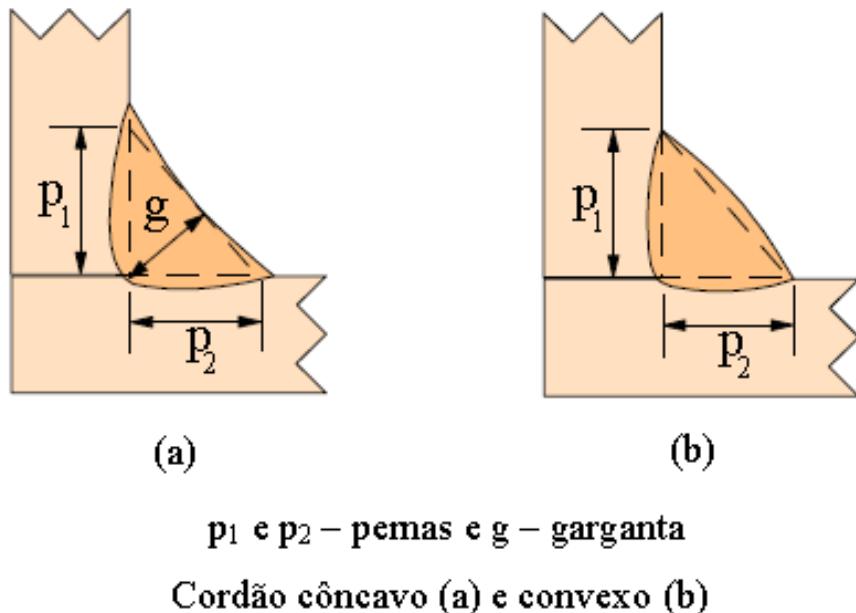


Figura 11 – Dimensões adequadas de Solda por Filete^[7]

2.3.1.4 Perfil Incorreto da Solda

O perfil deve ser considerado quando as variações geométricas bruscas ocorrerem, agindo como concentradores de tensões, facilitando a formação e propagação de trincas.

Convexidade excessiva de cordões em soldas multipasses, por exemplo, podem causar a falta de fusão. Em quase todos os casos, um perfil inadequado do cordão de solda está relacionado com a manipulação ou má posicionamento do eletrodo e/ou utilização de parâmetros de soldagem inadequados ao processo.

A forma da solda influencia significativamente na performance à fadiga, tendo em vista que uma elevada convexidade na raiz, por exemplo, concentra mais tensão, favorecendo mais facilmente o surgimento de trincas e a redução do tempo de vida da junta.

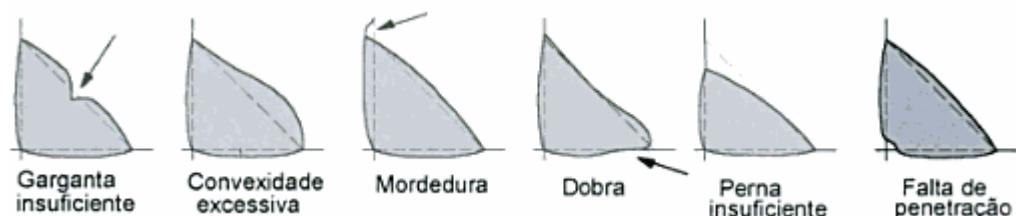


Figura 12 – Exemplos de Perfis de Solda Inadequados^[3]

2.3.2 Descontinuidades Estruturais

São descontinuidades na micro ou macroestrutura na região soldada, associadas à falta de material ou à presença de material estranho em quantidades apreciáveis.

2.3.2.1 Porosidades

Essa descontinuidade surge da evolução dos gases durante a solidificação da solda. As bolhas de gás podem ser aprisionadas pelo metal solidificado à medida que a poça de fusão é deslocada. Os poros normalmente possuem um formato esférico, porém existem poros alongados que podem ser formados, geralmente, pela associação ao hidrogênio^[7].

As suas causas mais comuns são a contaminação por sujeiras, umidade, óleo, graxa, entre outros. Correntes de ar durante a soldagem ou ainda corrente ou tensão inadequadas podem causar este tipo de descontinuidade.

Pequenas quantidades de poros não são consideradas prejudiciais. Porém, se ultrapassam um limite estabelecido por Normas, a porosidade pode afetar as propriedades mecânicas, reduzindo a seção efetiva da junta soldada. Como forma de correção, a porosidade pode ser minimizada por uso de equipamentos em boas condições de uso e de parâmetros de soldagem adequados.

2.3.2.2 Inclusões de Escória

Esta expressão é utilizada para descrever partículas de óxido e outros sólidos não metálicos que ficam aprisionados entre passes de solda ou entre a própria solda e o metal de base. Várias reações acontecem na poça de fusão, podendo gerar produtos insolúveis no metal líquido a separar deste e também formar escória. Por vários motivos, parte dessa escória pode ficar presa entre os passes ou entre a solda e o metal de base. As inclusões alongadas formadas são concentradores de tensão relativamente graves, podendo auxiliar na propagação de trincas.

2.3.2.3 Falta de Fusão

Esta descontinuidade é a ausência de união por fusão entre passes adjacentes ou entre a solda e o metal de base, resultante do não aquecimento adequado do material presente na junta ou da presença de uma cama de óxido suficiente que dificulte a fusão do material.

Isso pode ocorrer pela falta de limpeza da junta, pela insuficiente energia de soldagem, pela impossibilidade do arco atingir certas regiões da junta, entre outros. A falta de fusão é um concentrador de tensões grave, que pode facilitar o aparecimento e a propagação de trincas.

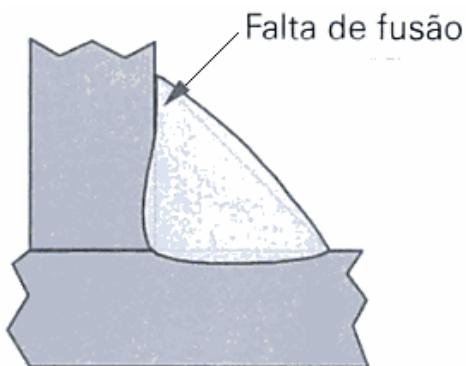


Figura 13 – Esquema de uma Falta de Fusão^[3]

2.3.2.4 Falta de Penetração

Esta descontinuidade refere-se a falha em se fundir e encher completamente a raiz da solda, por uma manipulação incorreta do eletrodo ou da junta mal projetada (ângulo de chanfro ou abertura de raiz pequenos), pela corrente de soldagem inadequada, ou ainda da alta velocidade de soldagem e do diâmetro do eletrodo grande. Com isso, pode-se resultar na redução da seção útil da solda e na concentração de tensões. A falta de penetração pode ser evitada por um projeto adequado da junta e pela utilização de um procedimento de solda adequado.

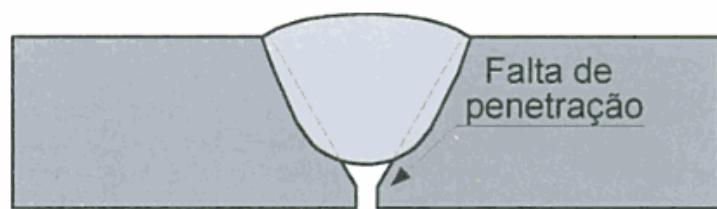


Figura 14 – Esquema de uma Falta de Penetração^[3]

2.3.2.5 Mordeduras

Esta descontinuidade descreve o processo de reentrâncias agudas formadas pela ação da fonte de calor do arco entre um passe de solda e o metal de base, ou outro passe adjacente. Isso ocorre devido a manipulação incorreta do eletrodo, de um excessivo comprimento de arco e/ou corrente ou velocidade de soldagem muito elevadas. Isso resulta na redução da área útil e concentração de tensões, além de reduzir a resistência à fadiga.

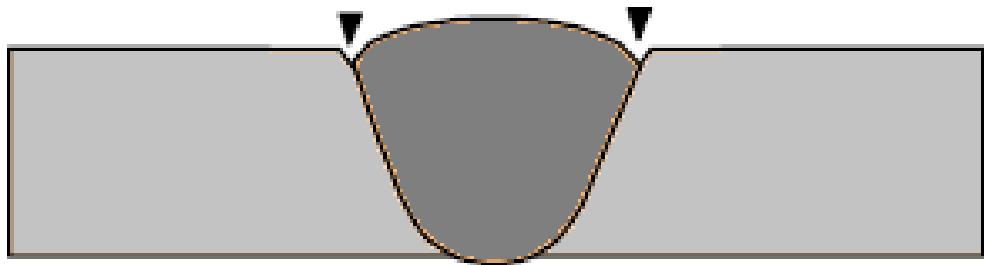


Figura 15 – Mordeduras^[3]

2.3.2.6 Trincas

São consideradas as descontinuidades mais graves em soldagem. São fortes concentradores de tensão, e podem favorecer o início de uma fratura frágil na estrutura soldada. A trinca é considerada como resultado da incapacidade do material em responder às solicitações impostas localmente pelas tensões decorrentes do processo de soldagem.

2.3.3 Descontinuidades Relacionadas com Propriedades Indesejáveis da Região de Solda

Soldas depositadas em uma peça ou estrutura devem possuir suas propriedades adequadas para a aplicação pretendida. Estas propriedades são, em geral, especificadas em Normas, projetos ou Contratos, e validadas em testes de qualificação ou amostras de lotes de produção.

2.4 PRINCIPAIS PARÂMETROS DE SOLDAGEM MIG/MAG

Os parâmetros referentes ao processo de soldagem MIG/MAG são: intensidade de corrente, tensão e comprimento do arco, velocidade de soldagem, comprimento livre do eletrodo (*stick out*), ângulo de inclinação da tocha de soldagem, gases de proteção e tipo de transferência metálica. A posição de soldagem e o diâmetro do eletrodo também influenciam na geometria de um cordão de solda.

Os processos MIG/MAG geralmente utilizam fontes de corrente contínua e polaridade inversa com eletrodo positivo (CC+), possibilitando melhor penetração e maior estabilidade do arco^[4]. Quando não é necessária uma grande penetração, é possível utilizar polaridade direta (CC-), o que aumenta a velocidade de deposição do eletrodo.

O controle da taxa de fusão do eletrodo é influenciado pela intensidade de corrente do arco que é determinada a partir das espessuras das peças a serem soldadas, do diâmetro do eletrodo e das características do cordão^[8].

2.4.1 Corrente de Soldagem

A corrente de soldagem é a corrente de saída da fonte quando a solda está sendo realizada. Se forem mantidas constantes todas as outras variáveis de soldagem, um aumento na corrente iria causar um aumento na taxa de deposição e, consequentemente, aumento na profundidade e largura do cordão de solda^[9].

Uma vez mantida constante a extensão do eletrodo, a corrente de soldagem fica diretamente relacionada à velocidade de alimentação do arame. Quando a velocidade de alimentação do arame é alterada, a corrente de soldagem varia no mesmo sentido. Ou seja, um aumento na velocidade de alimentação do arame causaria um aumento da corrente de soldagem, e vice-versa.

Em suma, a intensidade de corrente de soldagem influí diretamente na taxa de consumo de material de adição, na penetração da solda e na energia específica de soldagem^[10].

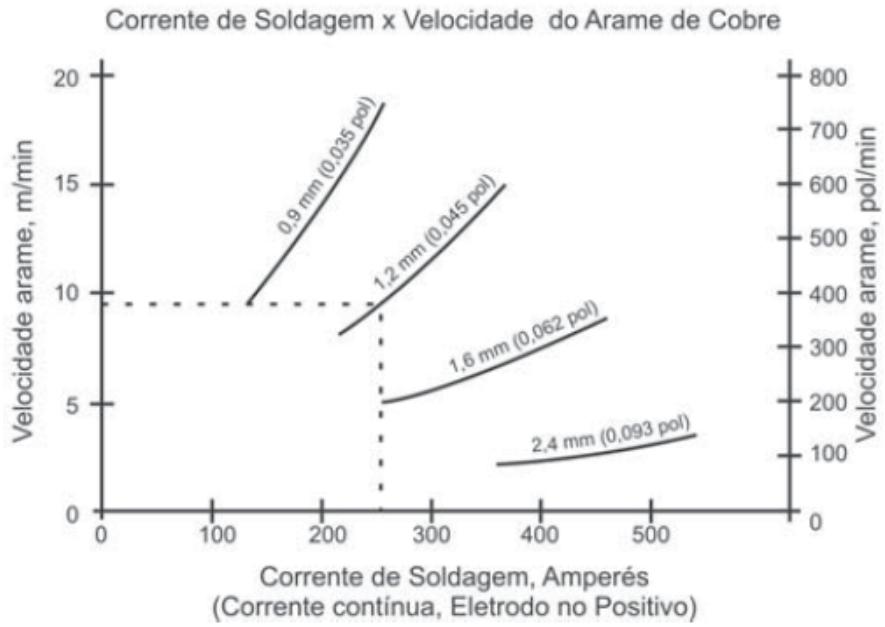


Figura 16 – Correntes de Soldagem x Velocidade de Arame^[11]

2.4.2 Tensão do Arco

A tensão do arco, juntamente com o seu comprimento, são dois parâmetros importantes na determinação das características do cordão. Um está relacionado ao outro, pois a tensão do arco depende do comprimento do arco, do tipo e do diâmetro do eletrodo e do gás de proteção, influenciando, desta forma, em seu modo de transferência.

Para um processo onde estes parâmetros são constantes, um aumento de tensão do arco gera um aumento da largura e uma diminuição da altura (ou reforço) do cordão de solda, além da redução de sua penetração.

A variação da tensão do arco não afeta somente as características do cordão de solda, como também de sua microestrutura e, consequentemente, o sucesso ou não da operação de soldagem devido a quantidade de metal transferida. Quando a tensão do arco é muito baixa, a transferência de metal é feita por curto-circuito (baixa velocidade de alimentação) ou por transferência globular (alta velocidade de alimentação). O modo de transferência metálica de uma certa condição de soldagem depende também da intensidade da corrente elétrica do arco, composição química do metal de adição, tipo de gás de proteção, diâmetro e comprimento do eletrodo^[9].

2.4.3 Velocidade de Soldagem

A velocidade de soldagem é a relação entre o caminho percorrido pelo arco ao longo da peça e o tempo gasto para percorrê-lo. A penetração da solda é maior para velocidades menores de avanço da tocha e diminui com o aumento da velocidade, assim como a largura do cordão e a altura do reforço. A redução da largura e penetração do cordão com a velocidade de soldagem estão associadas à diminuição da quantidade de energia fornecida por unidade de comprimento da junta. A influência no reforço do cordão está associada à redução da quantidade de material de adição que é fornecido à solda, com o aumento da velocidade de soldagem^[9].

No geral, três regras podem ser enunciadas com respeito à velocidade de soldagem^[12]:

- quando a espessura da peça aumenta a velocidade de soldagem deve diminuir;
- para uma dada espessura de peça e tipo de junta, quando a corrente de soldagem aumentar, a velocidade de soldagem também deve aumentar e vice-versa;
- maiores velocidades de soldagem são alcançadas empregando a técnica de soldagem empurrando.

2.4.4 Extensão Livre do Eletrodo (*stick out*) e Distância Bico de Contato Peça (DBCP)

O comprimento livre do eletrodo (*stick out*) é a distância entre o último ponto de contato elétrico, normalmente a extremidade do arame e a ponta do eletrodo ainda não fundida. Quando esta distância aumenta, aumenta também a resistência elétrica do eletrodo, que terá mais tempo para aquecer-se por efeito Joule ($I^2.R$). Com esta elevação da temperatura do eletrodo, será necessária uma menor corrente para fundir o eletrodo para a mesma taxa de alimentação, ou vendo de outra forma, para a mesma corrente de soldagem utilizada, se obterá uma maior taxa de deposição, porém com menor penetração^[12].

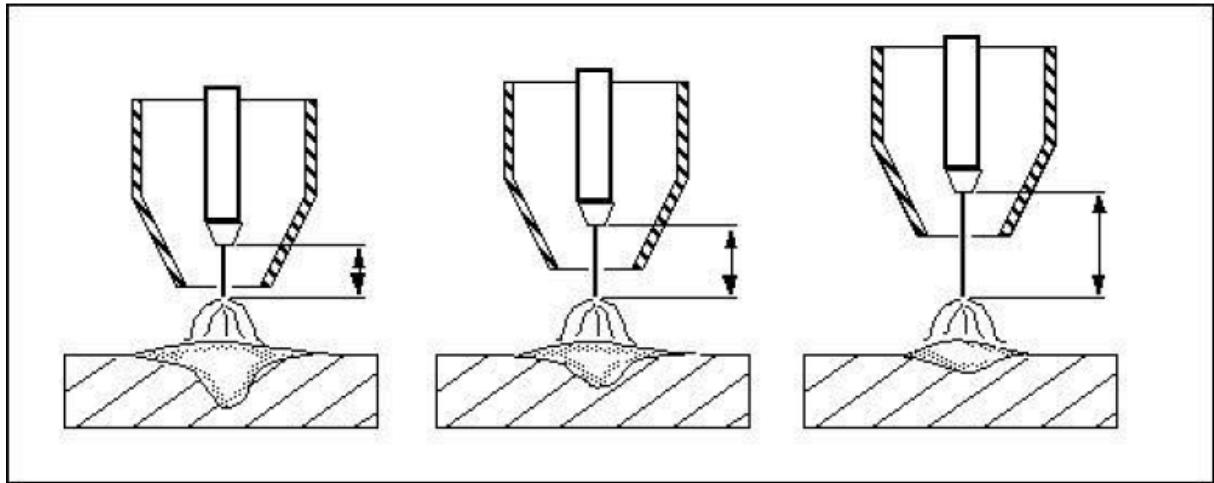


Figura 17 – Influência do *stick out* na Geometria do Cordão de Solda^[14]

Grandes extensões de eletrodo resultam em excesso de metal de solda sendo depositado com baixo calor do arco. Isso pode causar geometria desfavorável do cordão e baixa penetração. Adicionalmente, quando a distância do bico de contato a peça aumenta, o arco torna-se menos estável. É muito importante que a extensão do eletrodo seja mantida constante durante a atividade de soldagem^[12].

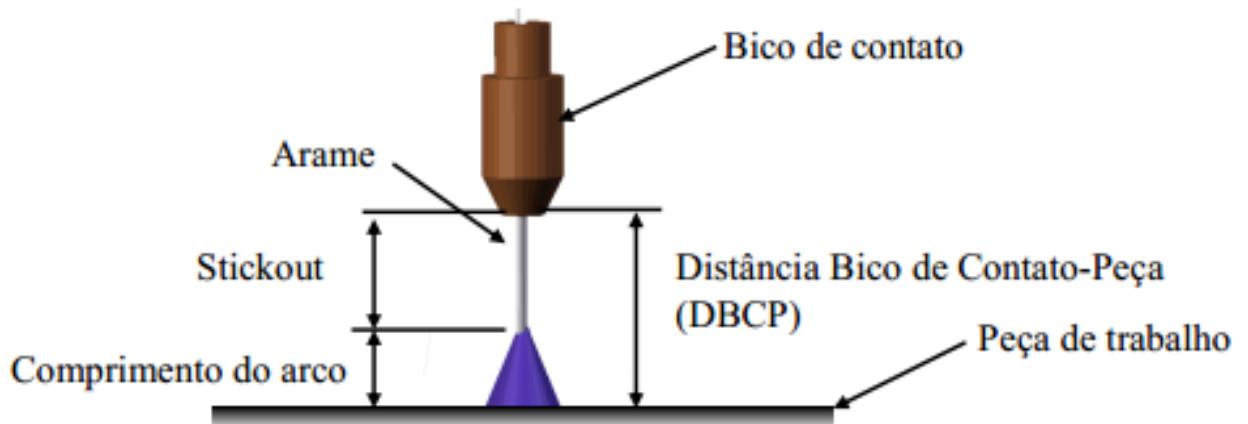


Figura 18 - Distância Bico de Contato-Peça (DBCP)



Figura 19 – Efeito da distância entre o bico de contato e peça na corrente de soldagem^[12]

2.4.5 Ângulo de Inclinação da Tocha de Soldagem

A posição da tocha em relação à direção de avanço pode afetar consideravelmente a geometria do cordão. Nos processos automatizados, a tocha é posicionada perpendicularmente à peça. Já nos processos semi-automáticos a tocha pode ser posicionada para soldar para frente ou para trás. Isso ajuda o soldador a enxergar o trabalho e executar as manobras necessárias.

A posição de solda para frente resulta em um cordão com pouca penetração, mas bastante largo. A posição de solda para trás resulta em um cordão bastante estreito e com boa penetração. Tanto a penetração quanto o tamanho do cordão podem ser manipulados, trocando-se a posição de solda para frente para a posição de solda para trás, mas não é um método de controle da geometria do cordão tão bom quanto a alteração na corrente de soldagem ou na tensão do arco.

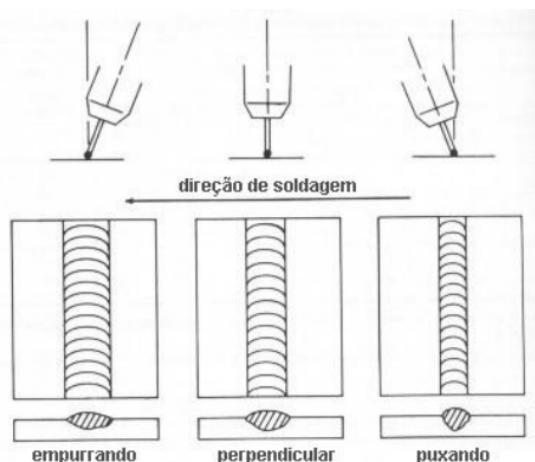


Figura 20 – Efeito da Orientação no Eletrodo na Morfologia do Cordão de Solda^[15]

2.4.6 Gases de Proteção

O Argônio (Ar) é um gás inerte com baixo potencial de ionização, baixo potencial de oxidação e baixa condutividade térmica. A alta densidade do argônio em comparação com os outros gases (1,38 em relação ao ar) promove uma maior eficiência de proteção, porque o argônio facilmente substitui o ar em torno da solda^[16]. Por tratar-se de um gás inerte, a proteção à base de argônio promove retenção de elementos de liga no cordão de solda, deixando o cordão de solda livre de inclusões, melhorando as propriedades mecânicas. Além disso, facilita a abertura do arco, melhora a estabilidade em baixas correntes, além de permitir transferência "spray".

O Hélio (He) é um gás inerte que é empregado nas aplicações de soldagem onde são necessários um maior aporte térmico para melhorar a molhabilidade do cordão de solda, maior penetração e maior velocidade de soldagem. Na soldagem MIG, o Hélio não produz um arco tão estável quanto o Argônio, além de ter um custo mais elevado. Comparado com o Argônio, o Hélio apresenta maior condutividade térmica e maior variação de tensão, e conduz a um perfil de penetração mais largo e mais raso^[12].

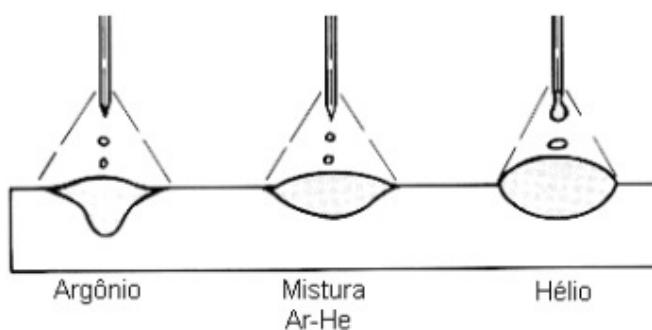


Figura 21 – Perfis de cordões produzidos por arcos protegidos com gás inerte^[15]

O gás oxigênio (O_2) é oxidante que na mistura com argônio suaviza o perfil do cordão de solda, melhorando a qualidade do cordão, principalmente na molhabilidade da poça de fusão, pela diminuição da tensão superficial no contato poça fundida/metal de base e pela estabilização da posição da raiz do arco^[16]. A adição de pequenas quantidades O_2 ao argônio (até 5% de O_2) tem influência sobre a coluna do arco reduzindo a corrente de transição globular/spray. Quando o nível de oxigênio aumenta na mistura, aumentam também as perdas de elementos de liga, podendo deteriorar as propriedades mecânicas^[16].

O dióxido de carbono (CO_2) é o mais barato entre os tipos de gases de proteção de solda e mais utilizado na soldagem MIG/MAG em aço com transferência por curto-circuito. O CO_2 se dissocia no arco para formar CO e O e o efeito global é o de gerar uma proteção oxidante. Exibe características de gás inerte em temperatura ambiente, não reagindo com outros elementos, mas é um gás ativo nas temperaturas de soldagem^[16]. Sua alta condutividade térmica é responsável por uma alta transferência de calor para o metal de base. Um padrão de penetração mais largo e arredondado é obtido quando se compara com o argônio.

Para comparar a influência do gás de proteção na qualidade do cordão de solda (tanto em termo de aspecto, metalurgia e resistência mecânica) é necessário encontrar uma condição de soldagem que seja a melhor possível para todos os tipos de gás de proteção. A busca destes parâmetros torna um pouco complexo em função da quantidade de variáveis envolvida no processo de soldagem, sendo necessário contar com algumas considerações. É importante ter sempre a mesma corrente de soldagem, mesma taxa de deposição (ter um valor constante entre a velocidade de alimentação do arame eletrodo e a velocidade de soldagem) e se possível ter sempre a mesma energia depositada no cordão de solda para todos os gases de proteção utilizada. É importante também obter sempre uma transferência metálica estável para a condição encontrada.

Misturas de Ar+ CO_2 têm sido utilizadas para muitas aplicações de soldagem em aços carbono, pois permitem uma grande estabilidade do arco elétrico, reduzindo assim a quantidade de respingos, melhorando a qualidade das soldas quando comparadas com as executadas com CO_2 puro^[17].

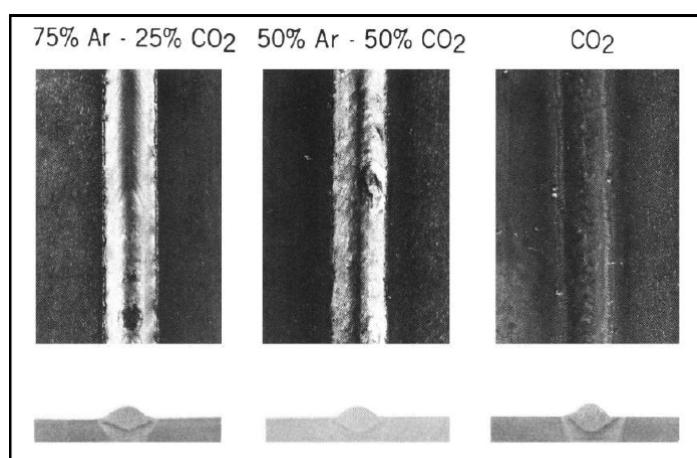


Figura 22 – Efeito de Adições de Dióxido de Carbono ao Argônio^[12]

Na figura anterior, pode-se perceber que a influência da adição de CO₂ ao gás Argônio aumenta a sua penetração, além de permitir uma solda mais “arredondada” (permite maior garganta). No processo em questão já estabelecido, utiliza-se a mistura de gás 80% Ar + 20% CO₂.

2.4.7 Tipos de Transferência Metálica

No processo MIG/MAG, a deposição do metal de solda é realizada via transferência de “gotas” de metal através da coluna do arco, sendo que o tamanho, forma e frequência desta deposição caracteriza um determinado tipo de transferência metálica^[11].

De uma forma simplificada, pode-se considerar que esse processo inclui três técnicas distintas de modo de transferência de metal: por curto-círcuito, globular ou por *spray* (aerosol)^[8].

O processo de transferência metálica pode influenciar diferentes características do processo de soldagem, como por exemplo a geometria do cordão.

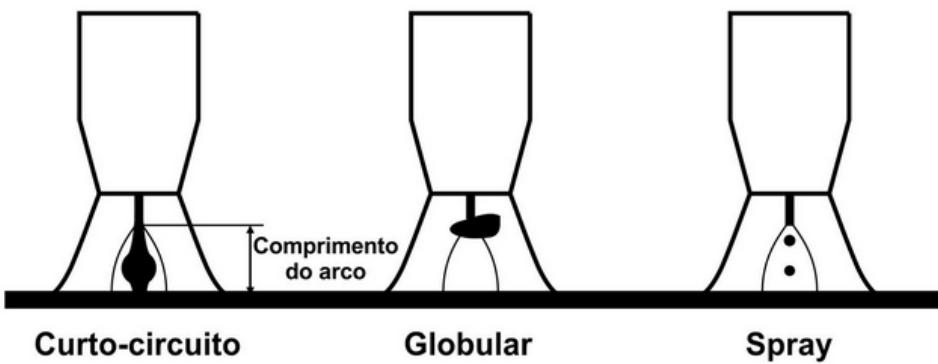


Figura 23 – Transferências Metálicas no processo MIG/MAG^[18]

Cada tipo de transferência metálica tem sua própria característica e aplicabilidade e é necessário conhecer bem a aplicação e o tipo de transferência desejada para selecionar os parâmetros e recursos que garantam a operacionalidade.

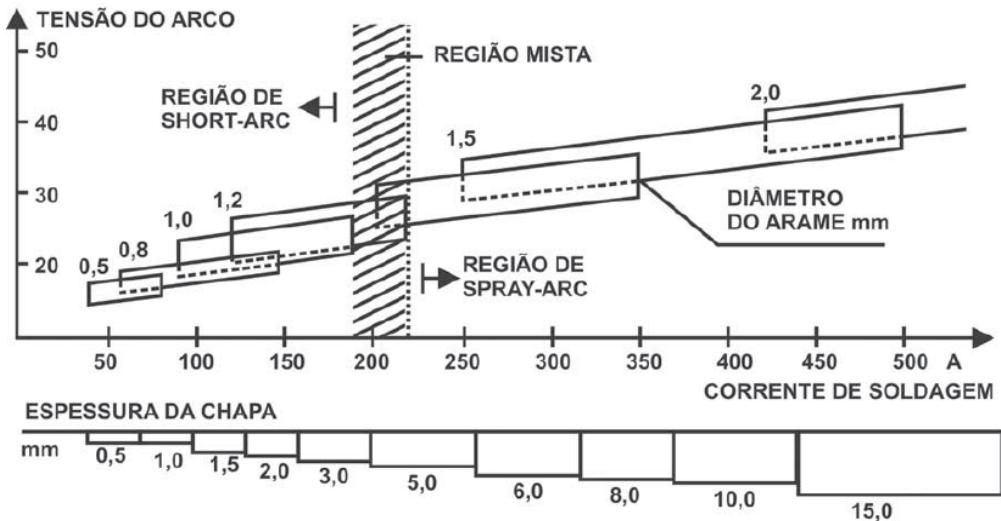


Figura 24 – Aplicabilidade da soldagem a partir do gráfico Tensão x Corrente^[11]

2.4.7.1 Transferência por curto-circuito

Ocorre quando se usam baixos valores de tensão e corrente e é o modo normalmente usado para soldagem fora de posição (posições diferentes da posição plana) ou na união de peças de pequena espessura, quando baixa energia de soldagem é necessária^[3]. Uma gota de metal de tamanho próximo ao do diâmetro do arame se forma na ponta do eletrodo e vai aumentando de diâmetro, até tocar na poça de fusão, sendo rapidamente atraída para esta, como consequência da ação da tensão superficial.



Figura 25 – Transferência por Curto-Círcito^[11]

Caracterizada pela baixa corrente e baixa tensão, é uma transferência muito utilizada em chapas finas, soldas fora de posição ou na soldagem de passe raiz em juntas tubulares. Usualmente, fica limitada para arames de até 1,2 mm de diâmetro.

Este modo de transferência caracteriza-se por uma grande instabilidade no arco, podendo apresentar formação intensa de respingos. Para se obter uma transferência em curto-círcito estável e controlável é necessário utilizar um gás de proteção adequado para o processo e ter um equipamento com características apropriadas.

2.4.7.2 Transferência Globular

É o tipo de transferência localizada entre a de curto circuito e a de *spray* (a ser mencionada no próximo tópico). Ocorre com valores intermediários de tensão e corrente de soldagem e resulta em arco mais estável que no caso anterior. Porém, a transferência é mais caótica e imprevisível devido a transferência das gotas através da coluna do arco ocasionar curtos circuitos eventuais^[8].

O diâmetro médio das gotas transferidas varia com a corrente, tendendo a diminuir com o aumento desta. Geralmente, acabam sendo maiores que o diâmetro do eletrodo. A transferência globular é caracterizada por um nível de respingos relativamente elevado e, como gotas de metal fundido se transferem principalmente por ação da gravidade, sua utilização estaria limitada à posição plana.

2.4.7.3 Transferência por *spray* (aerosol)

A medida em que aumenta-se a corrente de soldagem, o diâmetro médio das gotas de metal líquido que se transformam para a peça diminui. Após passar pela “corrente de transição”, há uma mudança brusca no modo de transferência, passando de globular para *spray*.

Na transferência por *spray*, as gotas metálicas sofrem a ação de várias forças de origem eletromagnética, que se sobrepõem à ação da força gravitacional^[3]. Como esta transferência só é possível com correntes relativamente elevadas, não pode ser usada na soldagem de chapas finas, sendo usada para metal de base de espessura superior a 3mm ou em enchimento de juntas. Sua poça de fusão fica bastante fluida (de difícil controle) e, portanto o processo pode ser utilizado somente na posição plana e horizontal. Seu arco é bastante estável, praticamente não há a ocorrência de respingos e o cordão obtido é suave e regular.



Figura 26 – Transferência por *Spray*^[11]

A “corrente de transição” depende do diâmetro do arame e do gás de proteção. Entretanto, se o gás de proteção para soldar aços carbono contiver mais que cerca de 15% de dióxido de carbono (CO_2), não haverá transição de transferência globular para transferência por *spray*^[8].

A importância do controle da transferência metálica tem um efeito grande sobre o aporte térmico ao material de base, o grau de penetração, a estabilidade da poça de fusão e a eficiência de deposição (redução de perda de material por respingos).

Portanto, embora todos os parâmetros mencionados no Capítulo influenciem diretamente na geometria da solda, uma vez que o processo do presente estudo já está estabelecido e em funcionamento, a variável restante do processo é a variação da acuracidade de peças conformadas mecanicamente (prensadas), ocasionadas por desgastes de matrizes e punções, variações do *spring back* (retorno da chapa por efeito mola), entre outros. Essas variações existem e, embora estejam dentro de tolerâncias aceitáveis pelo processo de conformação mecânica, ocasionam variações na precisão do produto soldado.

2.5 PROCESSO MIG/MAG COM AUMENTO DE PRODUÇÃO

Com a demanda pelo aumento da produtividade num mercado cada vez mais competitivo, processos com maiores taxas de deposição, redução do tempo de soldagem e custos são cada vez mais procurados^[5].

Tendo em vista o crescente índice de investimentos mostrado na Figura 02, a soldagem MIG/MAG tem sido amplamente utilizada em indústrias automobilísticas e ferroviárias por exemplo, particularmente com a aquisição e utilização de robôs^[3].

Assim como um soldador, um robô solda qualquer tipo de junta. Entretanto, quando se considera a possibilidade de robotização da soldagem de uma determinada peça, deve-se considerar também a sua repetibilidade. Isso significa que, apesar dos robôs também poderem ser utilizados para soldagens de recuperação e manutenção, deve-se considerar sempre a utilização de um robô para soldagens seriadas e, neste caso, na obtenção de cordões de solda iguais^[19], ou seja, de mesma geometria.

2.5.1 Limitações da Soldagem Robotizada

Geralmente, um soldador pode facilmente compensar variações de um conjunto a ser soldado para outro durante seu processo ao longo do cordão de solda, mantendo sua qualidade dentro dos padrões de aceitação. No entanto, em soldas robotizadas, a variação da junta e as aberturas entre peças tornam-se críticas. Essas variações podem provir dos seguintes recursos^[20]:

1. tolerância entre as peças do conjunto a ser soldado;
2. tolerância dos dispositivos;
3. repetibilidade do posicionamento do equipamento, quando utilizado;
4. distorções durante o processo de solda.

O custo para a produção de peças e dispositivos com alta precisão pode tornar o *payback* (ou o retorno do investimento) muito baixo para justificar a compra de um sistema robotizado. A posição da junta e as tolerâncias de abertura entre as peças devem ser aplicáveis para uma solda a arco robotizada e devem ter seus valores definidos em testes de solda^[20].

Para um robô de solda que não possui nenhum recurso (sensor e *software*) que faça a leitura da junta e sua devida correção durante o processo, uma vez que a posição de solda e seu percurso a ser desenvolvido estejam fixados, a posição do robô será sempre mantida, obedecidas também as condições de manutenção.

2.5.2 Projeto de Junta e Tolerâncias para a Soldagem Robotizada

Deve-se garantir que as peças a serem soldadas estejam dentro das tolerâncias aceitáveis adequadas. Neste caso, o projeto das juntas deve considerar o acesso e a abertura da junta tal que permita a deposição homogênea do metal de solda^[19].

Quanto à tolerância, algumas regras práticas têm sido utilizadas com sucesso. Uma delas diz que a abertura entre partes a serem soldadas não pode ser superior à metade do diâmetro do eletrodo. Ou seja, caso o diâmetro do eletrodo seja 1,2mm, a repetição do processo só ocorrerá se as aberturas entre as juntas não forem superiores a 0,6mm^[19]. De um modo geral, principalmente quando da soldagem robotizada de peças provenientes de processos de conformação mecânica, como a estampagem, é muito difícil garantir uma constância nas tolerâncias entre as peças e seus conjuntos. Neste caso, outros fatores devem ser considerados para conseguir uma adequada deposição, mesmo que os cordões não fiquem exatamente iguais, mas ainda dentro da sua faixa de aceitação: o processo de soldagem, a posição de soldagem e os parâmetros de soldagem (corrente, tensão, velocidade de soldagem, tipo de gás).

Em suma, no processo robotizado, uma vez estabelecidos todos os parâmetros de soldagem mencionados no Capítulo 2.4 (intensidade de corrente, tensão e comprimento do arco, velocidade de soldagem, comprimento livre do eletrodo, ângulo de inclinação da tocha de soldagem, gases de proteção e tipo de transferência metálica), as variáveis restantes que influenciam em sua qualidade são o espaçamento entre as chapas e o ponto de localização do arame na junta.

3 MÉTODO

3.1 INTRODUÇÃO

Como o objetivo final do trabalho é estudar a variação do comportamento da qualidade de solda em função do ponto de ataque do arame e dos diferentes espaçamentos entre chapas de espessuras pré-definidas para uma junta sobreposta com arame de 1,2mm, mantidos os mesmos parâmetros já existentes do processo (baseado em histórico), necessita-se observar quais os aspectos geométricos da junta realmente variam ao longo de um processo robotizado.

Contudo, foram soldados aproximadamente 30 (trinta) corpos de provas, resultando em diversas condições de juntas e analisados os cortes dos mesmos, confirmado assim se sua qualidade (verificação de garganta, pernas e penetração) ficará aprovada dentro dos requisitos de Norma específica de uma indústria do ramo automobilístico.

De acordo a Norma utilizada, uma vez que todos os aspectos da geometria da junta são atendidos, a condição de resistência mecânica da peça está obedecida, ou seja, aprovada pela sua necessidade.

3.2 MATERIAIS, EQUIPAMENTOS E MÉTODO

1. Metal de Base:

Foram utilizadas chapas de aço carbono laminadas a quente sob Norma USIRW390.

C	Mn	Si	P	S	Outros
0,12-0,18	0,40-0,80	0,10 máx.	0,025 máx.	0,025 máx.	Al 0,010-0,060

Figura 27 – Composição Química do Metal de Base (%p/p)

A espessura das chapas utilizadas para a união foram de 3,6mm e 4,00mm, sem variação (dobras, repuxos) na região a ser soldada.

2. Metal de Adição:

Arame de solda conforme Norma AWS A5.18 ER70S-G.

C	Mn	Si	P	S
0,100	1,26	0,57	0,014	0,011

Figura 28 – Composição Química do Arame de Solda (%p/p)

3. Gás de Proteção:

Foi utilizada uma mistura de 80% Ar + 20% CO₂, a uma vazão de 25 l/min (sem variação de composição química e vazão ao longo dos testes).

4. Tipo de Junta de Solda:

Junta sobreposta com penetração parcial ao longo de todo o comprimento do cordão. Foi realizado somente 1 (um) passe de solda na junta, sem preparação da mesma, porém isenta de óleo, graxa entre outros.

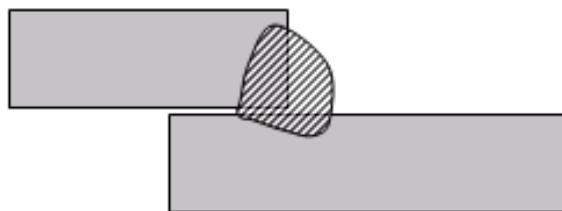


Figura 29 – Esquema da junta soldada

5. Posição de Soldagem:

Todas as amostras foram soldadas na mesma posição, horizontal (plana), conforme figura abaixo.

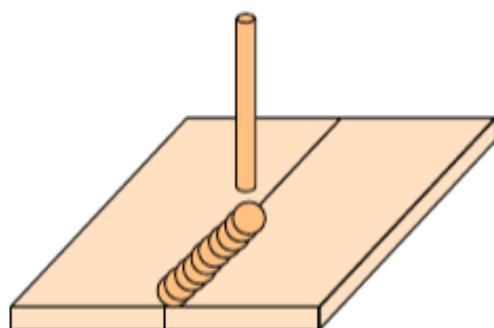


Figura 30 – Posição de soldagem nos testes

6. Velocidade de Soldagem: 1m/min (constante)

7. Tensão: 29 V (constante)

8. Corrente: 340 A (constante)

9. *Stick out*: 15mm (constante)

10. Técnica empregada:

A técnica empregada para a execução da soldagem foi empurrando o cordão, com uma inclinação da tocha de, aproximadamente, 5°.

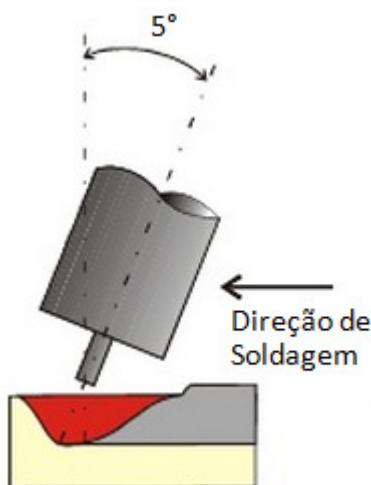


Figura 31 – Ângulo de Deslocamento do Ataque da Tocha de Soldagem

11. Espaçamento entre Chapas (*gap*):

Em função das variações decorrentes do processo anterior (conformação mecânica), o *gap* entre os painéis pode apresentar variação entre os lotes de produção não somente devido às características do material em si (efeito “mola”), mas também pelas variações do processo, como por exemplo, pelo desgaste de ferramenta. Para o presente estudo, variou-se o *gap* em passos de 0,5mm, desde 0mm até 2,5mm, utilizando lâminas de folga.

12. Posição de Ataque do Arame/Eletrodo:

Uma vez estabelecida a posição de ataque do arame, a mesma se manterá constante, pois o robô posicionará a tocha sempre na mesma localização. Ocorre que, pelo mesmo motivo que o item anterior (*gap* entre chapas), as bordas dos painéis podem variar de posição, modificando, portanto, o ponto em que o arame incide na junta de solda. Para essa simulação, variou-se o ponto de incidência do arame em passos de 1mm para ambos os lados, considerando como 0 (zero) o vértice da junta de solda, conforme a Figura 32.

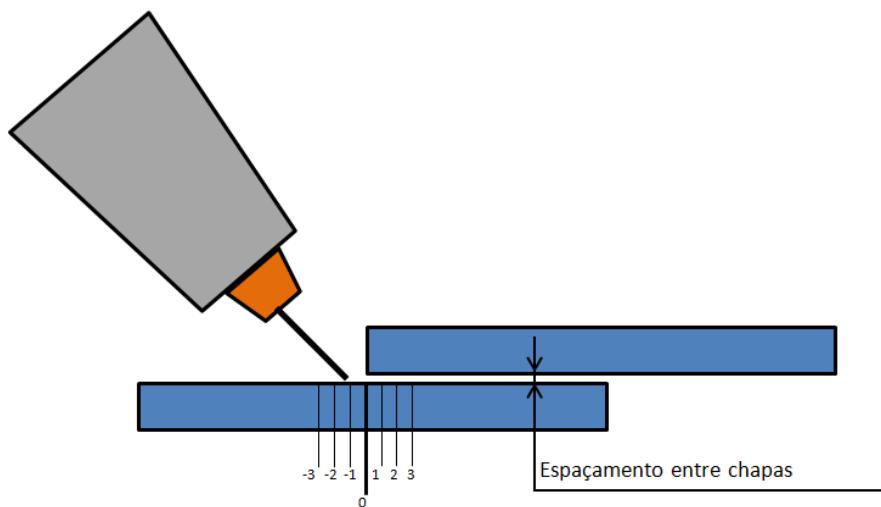


Figura 32 – Esquema da posição de ataque do arame/eletrodo

O método para a obtenção do mapa de amplitude consistiu no cruzamento de cada intervalo de espaçamento de chapas com cada posição de incidência do arame, bem como o ensaio destrutivo para a análise de solda (segundo Norma específica de uma indústria do ramo automobilístico). Para todas as amostras foi feito primeiramente teste visual, considerando as demais descontinuidades dimensionais e estruturais. No caso de alguma irregularidade visual nas mesmas, eram reprovadas.

13. Equipamentos:

Robô de solda a arco da marca Motoman, modelo EA-1400N, com 6 (seis) eixos e permite uma garantia na posição para sua repetibilidade de $\pm 0,08\text{mm}$.



Figura 33 – Robô de Solda a Arco utilizado para o teste

A fonte de solda sinérgica utilizada para os testes é do tipo eletrônica da marca Daihen, modelo DPTD-350, com chave no modo pulsado acionada.



Figura 34 – Fonte de Solda a Arco utilizada para o teste

3.3 CRITÉRIO DE APROVAÇÃO

Conforme supracitado, os critérios de aprovação seguirão a Norma específica de uma indústria do ramo automobilístico. Para a condição dos testes realizados, os valores mínimos a serem atingidos em cada amostra segue conforme esquema da página seguinte.

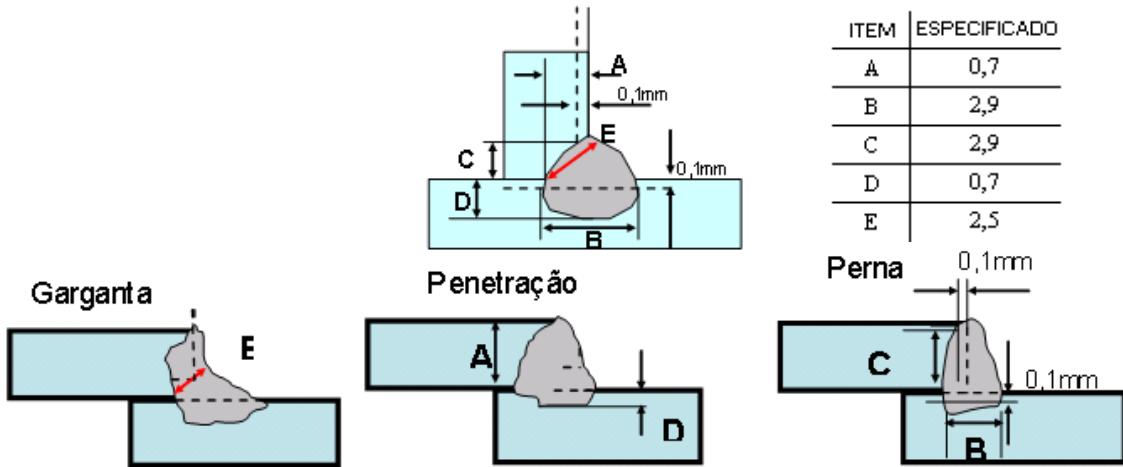


Figura 35 – Valores mínimos de aprovação das amostras em questão

As amostras foram cortadas transversalmente à linha de solda, respeitando um espaçamento mínimo de 10mm entre o início ou o fim do cordão de solda. Foi feito um ataque com solução de 10% de iodeto de potássio, solubilizado em água desmineralizada.

Os valores obtidos nos ensaios foram transferidos para um gráfico (mapa), indicando a aprovação ou reprovação conforme Norma.

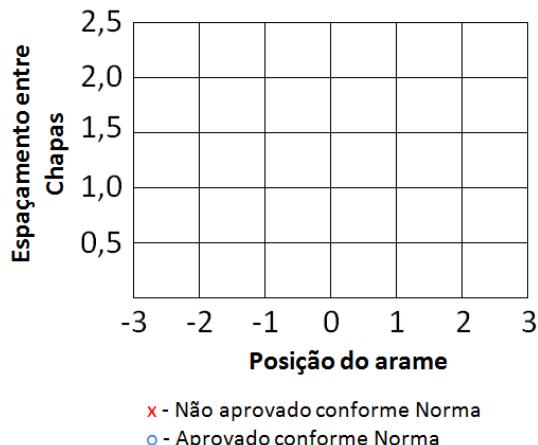


Figura 36 – Gráfico a ser preenchido com os resultados das análises de corte

4 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

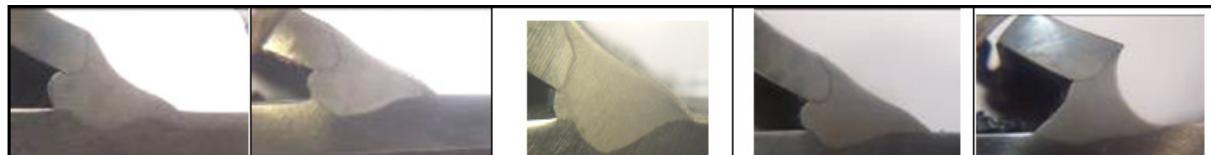
Os resultados dos cortes dos corpos de prova encontram-se abaixo. Os resultados que não foram demonstrados foram reprovados antes mesmo do corte, apresentando defeitos visuais, como, por exemplo, falta de fusão, furo na chapa ou mordeduras.



ITEM	ESPECIF.	ENCONTR.	RESULT.																
A	0,7	3,6	O																
B	2,9	8,9	O	B	2,9	8,4	O	B	2,9	8,5	O	B	2,9	8,6	O	B	2,9	9,3	O
C	2,9	3,6	O																
D	0,7	1,9	O	D	0,7	2,0	O	D	0,7	1,9	O	D	0,7	1,8	O	D	0,7	1,6	O
E	2,5	3,5	O	E	2,5	3,2	O												



ITEM	ESPECIF.	ENCONTR.	RESULT.																
A	0,7	3,6	O																
B	2,9	8,0	O	B	2,9	8,9	O	B	2,9	8,5	O	B	2,9	9,0	O	B	2,9	8,4	O
C	2,9	3,6	O																
D	0,7	1,4	O	D	0,7	1,6	O	D	0,7	1,7	O	D	0,7	1,5	O	D	0,7	1,4	O
E	2,5	3,2	O	E	2,5	3,5	O	E	2,5	3,3	O	E	2,5	3,1	O	E	2,5	3,4	O



ITEM	ESPECIF.	ENCONTR.	RESULT.																
A	0,7	3,6	O	A	0,7	3,3	O												
B	2,9	8,2	O	B	2,9	8,4	O	B	2,9	8,4	O	B	2,9	9,0	O	B	2,9	9,4	O
C	2,9	3,6	O	C	2,9	3,3	O												
D	0,7	1,3	O	D	0,7	1,4	O	D	0,7	1,2	O	D	0,7	1,2	O	D	0,7	1,1	O
E	2,5	3,5	O	E	2,5	3,5	O	E	2,5	3,3	O	E	2,5	3,3	O	E	2,5	3,3	O



ITEM	ESPECIF.	ENCONTR.	RESULT.																
A	0,7	3,3	O	A	0,7	3,3	O	A	0,7	3,6	O	A	0,7	3,6	O	A	0,7	3,6	O
B	2,9	9,3	O	B	2,9	9,4	O	B	2,9	9,8	O	B	2,9	9,2	O	B	2,9	12,2	O
C	2,9	3,3	O	C	2,9	3,3	O	C	2,9	3,6	O	C	2,9	3,6	O	C	2,9	3,6	O
D	0,7	0,6	X	D	0,7	0,7	O	D	0,7	1,1	O	D	0,7	0,9	O	D	0,7	0,6	X
E	2,5	3,3	O	E	2,5	3,6	O	E	2,5	3,6	O	E	2,5	3,5	O	E	2,5	3,6	O

																			
ITEM	ESPECIF.	ENCONTR.	RESULT.	ITEM	ESPECIF.	ENCONTR.	RESULT.	ITEM	ESPECIF.	ENCONTR.	RESULT.	ITEM	ESPECIF.	ENCONTR.	RESULT.	ITEM	ESPECIF.	ENCONTR.	RESULT.
A	0,7	3,6	O	A	0,7	3,6	O	A	0,7	3,6	O	A	0,7	3,6	O	A	0,7	3,6	O
B	2,9	8,8	O	B	2,9	5,1	O	B	2,9	6,4	O	B	2,9	3,1	O	B	2,9	9,4	O
C	2,9	3,6	O	C	2,9	3,6	O	C	2,9	3,6	O	C	2,9	3,6	O	C	2,9	3,6	O
D	0,7	0,3	X	D	0,7	0,2	X	D	0,7	0,3	X	D	0,7	0,2	X	D	0,7	0,3	X
E	2,5	3,6	O	E	2,5	3,6	O	E	2,5	3,6	O	E	2,5	3,6	O	E	2,5	2,9	O

Figura 37 – Corte dos Corpos de Prova Utilizados para Avaliação através do Mapa

A partir dos resultados acima, foi possível transferir as condições de aprovação para o gráfico da Figura 38.

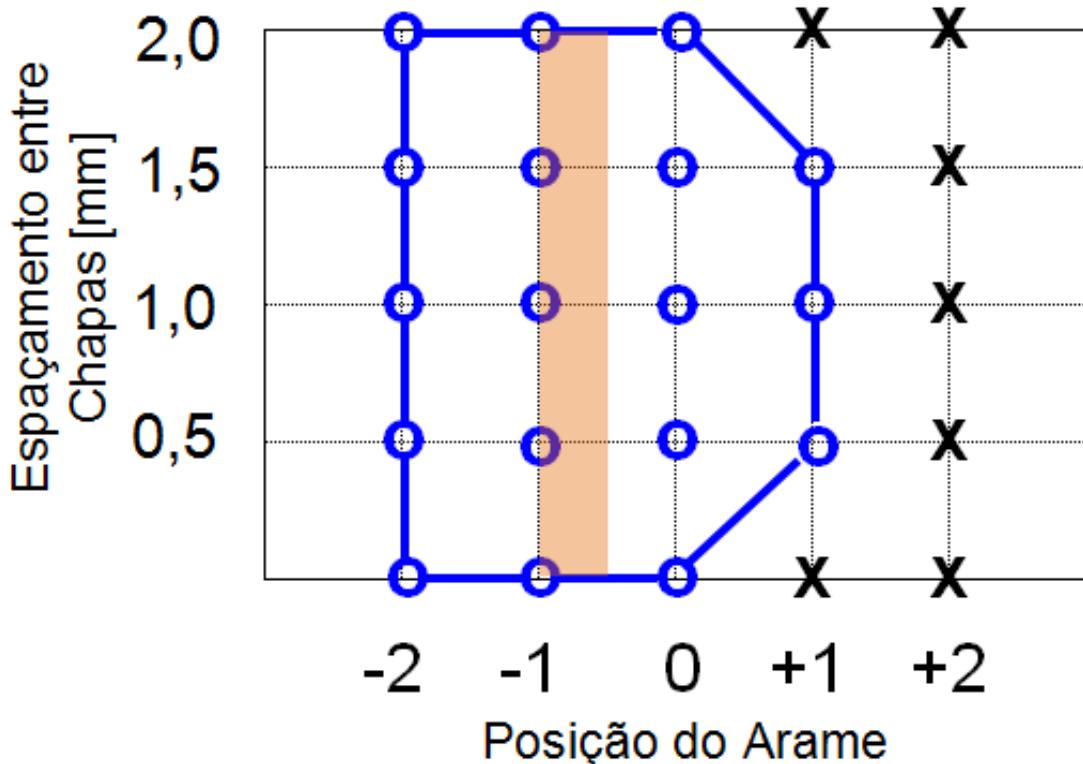


Figura 38 – Mapa “Abertura de Chapas x Ataque do Arame/Eletrodo”

Os corpos de prova que foram reprovados no corte tiveram apenas suas penetrações (item D) reprovadas, por apresentarem-se abaixo do limite mínimo especificado. O restante dos itens avaliados (perna e garganta) ficaram dentro do critério de aprovação.

Observa-se que, quanto maior o espaçamento entre as chapas, maior foi a convexidade apresentada em suas gargantas (item E). Embora o valor tenha aumentado, aponta que um maior volume de metal fundido escorreu para dentro da raiz.

Acredita-se que, para velocidades menores, maior seria a abrangência de ocorrências aprovadas pela Norma em questão, em virtude do maior preenchimento que ocorreria na junta durante a soldagem (maior deposição de material). Porém, caso algum dos parâmetros fosse modificado, um novo Mapa deveria ser preparado. Este Mapa em questão refere-se apenas e tão somente à junta sobreposta com chapa superior de 3,6mm e inferior de 4,0mm, obedecendo os parâmetros supracitados.

Para a situação simulada, a condição da abertura entre partes a serem soldadas pode ser superior à metade do diâmetro do eletrodo. Ou seja, para o caso do diâmetro do eletrodo de 1,2mm, permitiu-se uma repetição do processo em até 2mm de espaçamento entre chapas, que representa 166% do diâmetro do eletrodo para a condição de parâmetros especificamente estabelecida.

5 CONCLUSÕES

Para se evitar, portanto, que ocorram problemas durante as soldas em série neste cordão, dever-se-á trabalhar com um posição ótima de ataque do arame entre -0,5mm e -1,0mm, novamente para a condição de parâmetros especificamente estabelecida, uma vez que, se modificada a velocidade, por exemplo, um novo mapa deveria ser feito. Esta região determinada como ótima de trabalho garantirá que, embora haja variações do processo anterior, ainda que dentro dos critérios de aceitação, por se trabalhar no centro da variação, haverá maior cobertura na oscilação do processo.

Após a aplicação do método em questão, foi constatada uma maior abrangência nas variações do processo anterior diminuindo-se consideravelmente (em 40%) o índice de retrabalho da Linha de Produção.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Acredita-se ser interessante efetuar os testes de tração para as juntas que foram aprovadas acima, seguindo Norma ASTM A370. Porém, uma vez que o tipo de junta (junta sobreposta) não permite adequar os corpos de prova para a condição que a Norma exige, fica portanto a sugestão para um trabalho futuro, utilizando-se uma junta do tipo *butt weld* (topo).

Portanto, sugere-se como continuação do presente trabalho (linhas de pesquisa futuras) a análise dinâmica de fadiga dentro do universo das amostras aprovadas, evidenciando se há ou não alteração na durabilidade da junta soldada.

REFERÊNCIAS

- [¹] FEDERAÇÃO NACIONAL DA DISTRIBUIÇÃO DE VEÍCULOS AUTOMOTORES - FENABRAVE. **Relatório Semestral da Distribuição de Veículos Automotores no Brasil.** 2012.
- [²] ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS FABRICANTES DE VEÍCULOS AUTOMOTORES - ANFAVEA. **Anuário da Indústria Automobilística Brasileira.** 2012.
- [³] MARQUES P.V., MODENESI P.J., BRACARENSE A.Q. **Soldagem: Fundamentos e Tecnologia.** Belo Horizonte: Editora UFMG, 2011. 102/233-262 p.
- [⁴] BARRA, S.R. **Influência do Processo MIG/MAG Térmico sobre a Microestrutura e a Geometria da Zona Fundida.** Tese de Doutorado – Instituição UFSC, Santa Catarina. 2003.
- [⁵] SCOTTI, A. PONOMAREV, V. **Soldagem MIG/MAG. Melhor entendimento, melhor desempenho.** São Paulo: Artliber Editora, 2008. 17 p.
- [⁶] Disponível em: <<http://www.soldasoft.com.br/portal/generalidades/Terminologia%20das%20imperfei%C3%A7%C3%B5es%20da%20soldagem.pdf>>. Acesso em: 24/03/2013.
- [⁷] MODENESI, P.J. **Soldagem I: Descontinuidades e Inspeção em Juntas Soldadas.** Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais UFMG, 2001. 16 p.
- [⁸] FORTES, C. **Soldagem MIG/MAG** - traduzido e adaptado, ESAB. Agosto, 2004.
- [⁹] MODENESI, P. J. **Introdução à Física do Arco Elétrico.** Belo Horizonte: UFMG, 2005. 146 p.
- [¹⁰] MACHADO, I.G. **Soldagem & Técnicas Conexas: Processos.** Porto Alegre: Editado pelo autor, 1996. 477 p.
- [¹¹] BRACARENSE A., ZEEMANN A., ALMEIDA D., URTADO E., FERRER S., PEREIRA U. **A Soldagem GMAW (ou MIG-MAG).** Revista de Soldagem: *Ensino ABC ABS*, a.1, n.4, 6-17 p.
- [¹²] ESAB. **Soldagem MIG/MAG.** Tradução de Cleber Fortes e Assistência Técnica Consumíveis. 2005. 135 p.
- [¹³] GIMENES JR, L. RAMALHO, J.P. **Conceitos De Soldagem Mig/Mag.** Disponível em: <www.infosolda.Com.br/download/61dpe.Pdf>. Acesso em: 28/03/2013.

- [¹⁴] WAINER E., BRANDI S.D., HOMEM DE MELLO F.D. **Soldagem: Processos e Metalurgia.** São Paulo: Editora Edgar Blücher, 1992. 123-126p.
- [¹⁵] FELIZARDO, I. BRACARENSE, A.Q. **Soldagem MIG/MAG e com Arame Tubular.** Disponível em: <http://www.ivanilzafe.dominiotemporario.com/doc/GMAW-FCAW_Ivanilza.pdf>. Acesso em: 29/03/2013.
- [¹⁶] FERREIRA FILHO, D. BÁLSAMO, P.S.S. FERRARESI, V.A. **Influência do Tipo de Gás de Proteção da Soldagem MIG/MAG na Qualidade do Cordão de Aço Inoxidável.** Disponível em: <<http://www.grima.ufsc.br/cobef4/files/021008077.pdf>>. Acesso em: 29/03/2013.
- [¹⁷] LYTTLE, K. A.; STAPON, W. F. G. *Select the Best Shielding Gas Blend for the Application. Welding Journal.* v. 69, n. 11, p. 21 – 27. Nov. 1990.
- [¹⁸] Disponível em: <www.boxersoldas.com/blog/2012/03/soldamig-spray-curto-circuito>. Acesso em: 25/11/2012.
- [¹⁹] ROMANO V.F. **Robótica Industrial - Aplicação na Indústria de Manufatura e de Processos.** São Paulo: Editora Edgar Blücher, 2002. Capítulo 8.
- [²⁰] THE LINCOLN ELECTRIC COMPANY. **The Procedure Handbook of Arc Welding.** 13. ed. Ohio, 1995.

APÊNDICE A – Estudo da influência do espaçamento entre chapas e do posicionamento do ataque do arame no processo robotizado de soldagem MIG/MAG de junta sobreposta para arame de 1,2mm

ANEXO A – Estudo da influência do espaçamento entre chapas e do posicionamento do ataque do arame no processo robotizado de soldagem MIG/MAG de junta sobreposta para arame de 1,2mm