

Centro Federal De Educação Tecnológica De Minas Gerais



Dissertação de Mestrado

Autor: Euclides Gonçalves Martins Filho

**“ESTUDO DA INFLUÊNCIA RELATIVA DAS VARIÁVEIS DO PROCESSO DE
SOLDAGEM MIG-MAG (GMAW) NO PASSE DE RAIZ”**

Belo Horizonte
Novembro de 2012

Euclides Gonçalves Martins Filho

**“ESTUDO DA INFLUÊNCIA RELATIVA DAS VARIÁVEIS DO PROCESSO DE
SOLDAGEM MIG-MAG (GMAW) NO PASSE DE RAIZ”**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais do CEFET-MG, na área de concentração de Ciência e Desenvolvimento de Materiais, na linha de Pesquisa em Seleção, Processamento e Caracterização, como parte integrante dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Materiais.

Orientadora: Prof^a. Maria Celeste Monteiro de Souza Costa, Dra.

Co-orientador: Prof. Joel Romano Brandão, Msc.

Belo Horizonte

Novembro de 2012

Martins Filho, Euclides Gonçalves.

Estudo da influência relativa das variáveis do processo de soldagem MIG-MAG (GMAW) / Euclides Gonçalves Martins Filho. - 2012.

86 f. : il., tabs., grafs., fotos. -

Orientadora: Maria Celeste Monteiro de Souza Costa.

Co-orientador: Joel Romano Brandão .

Dissertação (mestrado) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais, Belo Horizonte, 2012.

Bibliografia.

1. Soldagem. 2. Processo de fabricação. I. Costa, Maria Celeste Monteiro de Souza. II. Brandão, Joel Romano. II. Título.

CDD: 671.52

AGRADECIMENTOS

A Deus, pelo dom da vida e pela família que me concedeu, meus pais, irmãos e filhos que me fazem perseverar com dedicação e carinho.

A minha orientadora, Prof^a. Maria Celeste Monteiro de Souza Costa com sua paciência e boa vontade no delineamento e verificação das fases a serem cumpridas durante o desenvolvimento da pesquisa.

Ao Prof. Joel Romano Brandão, meu co-orientador, pela ajuda imprescindível na montagem e calibração dos equipamentos para soldagem dos corpos de prova e preparação para as macrografias.

Aos colegas que lecionam a disciplina de desenho assistido por computador, Prof^a, Camila Gonçalves Castro e Prof. Claudinei Alfredo do Nascimento pela ajuda nas medições dos corpos de prova com o programa AUTOCAD.

Ao Técnico de laboratório da Pontifícia Universidade Católica de Contagem Sr. Claus Higor dos Santos Silva que disponibilizou os equipamentos e acompanhou as medições de microdureza nos corpos de prova.

A minha esposa com sua paciência e tolerância me estimulando para concretizar este trabalho.

A todos aqueles que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho, meu sincero reconhecimento e agradecimento.

RESUMO

Com os equipamentos atuais no mercado, o passe de raiz é feito manualmente utilizando os processos de soldagem SMAW, SAW, GMAW e GTAW. Destes quatro processos, aqueles que empregam eletrodos revestidos (SMAW) e o eletrodo de tungstênio (GTAW) são os processos mais difundidos para a execução do passe de raiz devido a sua versatilidade e facilidade operacional, porém apresentam algumas limitações como baixas taxas de deposição e alto fator de ocupação do soldador se comparado com o processo GMAW que consiste em um processo de operação semi-automática que pode ser conferido a este características como facilidade para a sua automação, elevada taxa de deposição além de uma solda de boa qualidade. Em função do exposto acima este trabalho teve como objetivo geral avaliar a utilização do processo GMAW na execução do passe de raiz e como objetivo específico estudar a influência das variáveis do processo de soldagem GMAW (corrente, tensão e velocidade de soldagem) nas características geométricas do cordão do passe de raiz. De acordo os resultados obtidos pode-se verificar que processo MIG-MAG pode ser um processo promissor na execução do passe de raiz em função dos parâmetros testados

Palavras – chave: Soldagem, GMAW, Passe de raiz, Parâmetros de soldagem.

ABSTRACT

With the current equipment available on the market, the root pass is done manually when using welding processes SMAW, SAW, GMAW and GTAW. Among these four processes, those who employ coated electrodes (SMAW) and tungsten electrodes (GTAW) are the most widely used processes for execution of the root pass due to their versatility and easy operation, but they have some limitations such as low deposition rates and high occupancy time of welder compared with the GMAW process, consisting of one semi-automatic process whose operation can yield features as facilities for automation, high deposition rate and a good quality of welding. This study aimed to evaluate the use of GMAW in the execution of the root pass. Moreover as specific aim is suggested to study the influence of process parameters of GMAW welding (current, voltage and welding speed) on geometric characteristics of the cord root pass. According the results can be verified that the MIG-MAG may be a promising process in the execution of the root pass considering the parameters tested.

Key - words: Welding, GMAW, Pass root, welding parameters.

SUMÁRIO

| | |
|--|-----------|
| CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO | 11 |
| CAPÍTULO 2 - OBJETIVO DA PESQUISA | 13 |
| CAPÍTULO 3 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 14 |
| 3.1 - Soldagem | 14 |
| 3.2 - Passe de raiz | 15 |
| 3.3 - Descontinuidades apresentados em passe de raiz | 17 |
| 3.4 - Processos de soldagem utilizados em passe de raiz | 18 |
| 3.5 - Processo de soldagem GMAW ou MIG/MAG | 21 |
| 3.6 - Transferência metálica | 22 |
| 3.7 - Classificação dos modos de transferência metálica | 23 |
| 3.8 - Tipos de transferência de metal no processo GMAW | 24 |
| 3.9 - Estabilidade operacional do processo de soldagem | 31 |
| 3.10 - Estabilidade operacional no processo GMAW | 32 |
| 3.11 - Variáveis do processo de soldagem GMAW | 33 |
| 3.12 - Geometria do cordão de solda | 38 |
| 3.13 - Efeitos das variáveis de soldagem na geometria do cordão de solda | 39 |
| 3.14 - Descontinuidades em juntas soldadas | 42 |
| 3.14.1 - Caracterização das descontinuidades | 43 |
| CAPÍTULO 4 - METODOLOGIA EXPERIMENTAL | 50 |
| 4.1 - Caracterização do material | 51 |
| 4.2 - Preparação dos corpos de prova (cp) | 51 |
| 4.3 - Definição dos parâmetros de soldagem | 53 |
| 4.4 - Soldagem dos corpos de prova | 54 |

| | |
|---|-----------|
| 4.5 - Preparação dos corpos de prova para análise metalográfica | 55 |
| 4.6 - Análise macrográfica dos cordões do passe de raiz | 57 |
| 4.7 - Ensaio de microdureza Vickers | 57 |
| 5 - RESULTADOS E DISCUSSÕES | 59 |
| 5.1 - Resultado da composição química do metal de base | 59 |
| 5.2 - Resultados dos testes de soldagem | 59 |
| 5.2.1 - Aspecto do cordão | 59 |
| 5.2.2 - Análise da influência da intensidade da corrente, DBCP e ângulo do chanfro sobre os parâmetros de soldagem do passe de raiz | 64 |
| 5.3 - Resultados do teste de microdureza | 70 |
| 6 - CONCLUSÕES | 75 |
| 7 - SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS | 76 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 77 |
| ANEXO I | 82 |
| ANEXO II | 83 |
| ANEXO III | 85 |
| ANEXO IV | 86 |

LISTA DE FIGURAS

| | | |
|---------------------|--|----|
| FIGURA 3.1 | – Representação esquemática de uma soldagem por fusão e macrografia de uma junta soldada | 14 |
| FIGURA 3.2 | – Elementos de um chanfro (α) ângulo do chanfro; (β) ângulo sólido ou do bisel; (g) afastamento da junta; (s) face da raiz) | 15 |
| FIGURA 3.3 | – Passe de raiz em chanfro, foto retirada do artigo | 16 |
| FIGURA 3.4 | – Características das regiões do passe de raiz | 16 |
| FIGURA 3.5 | – Efeito da técnica de soldagem no reforço da raiz | 17 |
| FIGURA 3.6 | – Efeito da corrente na geometria do reforço da raiz, altura do reforço (hrr) e largura do reforço (wrr), processo SAW | 19 |
| FIGURA 3.7 | – Efeito da abertura da junta na geometria do reforço da raiz, altura do reforço (hrr) e largura do reforço (wrr), processo SAW | 20 |
| FIGURA 3.8 | – Processo de soldagem GMAW | 22 |
| FIGURA 3.9 | – Modos de transferência de acordo com a classificação do IIW | 25 |
| FIGURA 3.10 | – Condições de corrente e tensão para as diferentes formas de transferência para a soldagem MIG/MAG com um gás de proteção a base de argônio | 25 |
| FIGURA 3.11a | – Oscilogramas de tensão e corrente de um processo com transferência Globular. Arame ER 70S6 de 1,2 mm de diâmetro, Gás CO ₂ | 26 |
| FIGURA 3.11b | – Característica da transferência metálica globular filmada em alta velocidade | 27 |
| FIGURA 3.12 | – Transferência por Curto-Circuito | 28 |
| FIGURA 3.13 | – Imagens obtidas a partir de filmagem de alta velocidade da transferência por curto-circuito | 28 |
| FIGURA 3.14 | – Oscilograma da transferência por curto-circuito para um arame de aço inoxidável (AWS E308) de 1,0 mm de diâmetro. Gás: Ar-2%O ₂ | 29 |
| FIGURA 3.15 | – Faixa de transição entre a transferência spray e globular | 30 |
| FIGURA 3.16 | – Velocidade de fusão para arame-eletrodo de 1,2 mm | 34 |
| FIGURA 3.17 | – Distância Bico de Contato Peça – DBCP | 35 |

| | | |
|--------------------|--|----|
| FIGURA 3.18 | – Força repulsiva que atua sobre a gota metálica em corrente contínua e polaridade negativa | 36 |
| FIGURA 3.19 | – Característica do arco elétrico em corrente contínua e polaridade positiva (CC+) e polaridade negativa (CC-) | 36 |
| FIGURA 3.20 | – Mudança no aumento da corrente devido à indutância | 38 |
| FIGURA 3.21 | – Formatos de poça de fusão (a) elíptica e (b) em gota | 39 |
| FIGURA 3.22 | – Relação entre a penetração e as variáveis primárias de soldagem | 40 |
| FIGURA 3.23 | – Relação entre a largura e as variáveis primárias de soldagem | 41 |
| FIGURA 3.24 | – Relação entre o reforço do cordão e as variáveis primárias | 41 |
| FIGURA 3.25 | – Características geométricas de um cordão de solda: p – penetração r - reforço, l - largura, Ad - área depositada, Af - área fundida | 42 |
| FIGURA 3.26 | – Representação da seção transversal de cordões de solda depositados por SAW | 42 |
| FIGURA 3.27 | – Regiões encontradas em uma junta soldada | 44 |
| FIGURA 3.28 | – Concavidade na raiz (a) central e (b) lateral | 44 |
| FIGURA 3.29 | – Desenho esquemático (a) da Falta de fusão na lateral da raiz e (b) falta de fusão na zona de ligação da raiz | 45 |
| FIGURA 3.30 | – Falta de penetração | 45 |
| FIGURA 3.31 | – Mordedura na raiz | 45 |
| FIGURA 3.32 | – Desenho esquemático de uma penetração excessiva na raiz | 45 |
| FIGURA 3.33 | – Desenho esquemático de porosidade na raiz | 46 |
| FIGURA 3.34 | – Desenho esquemático de trinca na raiz da solda | 46 |
| FIGURA 4.1 | – Gabarito no metal base para a realização do corte | 51 |
| FIGURA 4.2 | – Preparação do bisel com ângulo de 30 graus em relação a perpendicular | 52 |
| FIGURA 4.3 | – Montagem dos corpos de prova | 53 |
| FIGURA 4.4 | – Montagem do apêndice no corpo de prova | 53 |
| FIGURA 4.5 | – Montagem experimental utilizada para a realização dos testes de soldagem | 54 |

| | | |
|--------------------|--|----|
| FIGURA 4.6 | – Corte longitudinal ao passe de raiz efetivado na serra de fita refrigerada | 56 |
| FIGURA 4.7 | – Exemplo de corpo de prova gerado após todos os cortes na serra de fita | 56 |
| FIGURA 4.8 | – Representação esquemática dos parâmetros geométricos considerados para a análise dos cordões de solda | 57 |
| FIGURA 4.9 | – Aparelho utilizado para medição da microdureza | 58 |
| FIGURA 4.10 | – (a) Sequência dos pontos no cp(3)f1_140A para o teste de microdureza Vickers. (b) indentação gerada no referido corpo de prova | 58 |
| FIGURA 5.1 | – Aparência do cordão de solda para a condição de soldagem: 120 A, 16V, DBCP de 16 mm, ângulo de soldagem 60° | 60 |
| FIGURA 5.2 | – Aparência do cordão de solda para a condição de soldagem: 140 A, 16V, DBCP de 16 mm, ângulo de soldagem 60° | 61 |
| FIGURA 5.3 | – Aparência do cordão de solda para a condição de soldagem: 150 A, 16V, DBCP de 16 mm, ângulo de soldagem 60° | 61 |
| FIGURA 5.4 | – Aparência do cordão de solda para a condição de soldagem: 160 A, 16V, DBCP de 16 mm, ângulo de soldagem 60° | 61 |
| FIGURA 5.5 | – Aparência do cordão de solda para a condição de soldagem: 170 A, 16V, DBCP de 16 mm, ângulo de soldagem 60° | 62 |
| FIGURA 5.6 | – Aparência do cordão de solda para a condição de soldagem: 180 A, 16V, DBCP de 16 mm, ângulo de soldagem 60° | 62 |
| FIGURA 5.7 | – Aparência do cordão de solda para a condição de soldagem: 190 A, 16V, DBCP de 16 mm, ângulo de soldagem 60° | 62 |
| FIGURA 5.8 | – Aparência do perfil de solda para cada corrente de soldagem com tensão de 16V, DBCP de 16 mm e ângulo de soldagem 60° | 63 |
| FIGURA 5.9 | – Influência da corrente de soldagem na largura do cordão do passe de raiz | 65 |
| FIGURA 5.10 | – Influência da corrente de soldagem na altura do cordão do passe de raiz | 65 |
| FIGURA 5.11 | – Influência da corrente de soldagem na área do cordão do passe de raiz | 65 |
| FIGURA 5.12 | – Influência da DBCP na largura do cordão do passe de raiz | 66 |
| FIGURA 5.13 | – Influência da DBCP na altura do cordão do passe de raiz | 67 |

| | | |
|--------------------|--|----|
| FIGURA 5.14 | – Influência da DBCP na área depositada do passe de raiz | 67 |
| FIGURA 5.15 | – Influência do ângulo do chanfro na largura do cordão do passe de raiz | 69 |
| FIGURA 5.16 | – Influência do ângulo do chanfro na altura do cordão do passe de raiz | 69 |
| FIGURA 5.17 | – Influência do ângulo do chanfro na área depositado do passe de raiz | 69 |
| FIGURA 5.18 | – Distribuição da microdureza no metal de base | 70 |
| FIGURA 5.19 | – Distribuição da microdureza no corpo de prova com intensidade de corrente de 120 A | 71 |
| FIGURA 5.20 | – Distribuição da microdureza no corpo de prova com intensidade de corrente de 140 A | 71 |
| FIGURA 5.21 | – Distribuição da microdureza no corpo de prova com intensidade de corrente de 150 A | 71 |
| FIGURA 5.22 | – Distribuição da microdureza no corpo de prova com intensidade de corrente de 160 | 72 |
| FIGURA 5.23 | – Distribuição da microdureza no corpo de prova com intensidade de corrente de 170 A | 72 |
| FIGURA 5.24 | – Distribuição da microdureza no corpo de prova com intensidade de corrente de 170 A | 72 |
| FIGURA 5.25 | – Distribuição da microdureza no corpo de prova com intensidade de corrente de 170 A | 73 |
| FIGURA 5.26 | – Microdureza média dos corpos de prova com alteração da intensidade da corrente de soldagem | 73 |

LISTA DE TABELAS

| | | |
|-------------------|--|----|
| TABELA 3.1 | – Formas usuais de transferência metálica de acordo com o IIW | 24 |
| TABELA 4.1 | – Composição química prevista para aço ABNT 1020 | 51 |
| TABELA 4.2 | – Parâmetros operacionais de soldagem | 55 |
| TABELA 5.1 | – Composição química real aço ABNT 1020 utilizado neste trabalho | 59 |
| TABELA 5.2 | – Falta de penetração por grupo de estudo | 60 |
| TABELA 6.1 | – Resumo dos parâmetros geométricos com a variação da DBCP | 67 |
| TABELA 6.2 | – Resumo dos parâmetros geométricos com a variação do ângulo do chanfro. | 70 |

LISTA DE QUADROS

| | | |
|-----------------|---|----|
| QUADRO 1 | – Falta de fusão e falta de penetração: Causas e possíveis soluções | 46 |
| QUADRO 2 | – Mordedura na raiz - Causas e possíveis soluções | 47 |
| QUADRO 3 | – Penetração excessiva - Causas e possíveis soluções | 48 |
| QUADRO 4 | – Porosidade - Causas e possíveis soluções | 48 |

LISTA SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

- A – Ampère
- Ad – Área depositada
- Af – Área fundida
- A_{total} – Área total
- AW – Área da seção transversal do eletrodo
- CA – Corrente alternada
- CC- – Corrente contínua e polaridade negativa ou eletrodo ligado ao polo negativo
- CC+ – Corrente contínua polaridade inversa ou corrente contínua e polaridade positiva
- CP – Corpo de prova
- DBCP – Distância bico de contato peça
- f – Velocidade de alimentação
- F – Quociente da carga aplicada
- Fcc – Fator de curto circuito
- g – Abertura de raiz ou folga ou aresta ou afastamento da junta
- GMAW – Gás metal arc welding
- GMAW-VP – Variable Polarity Gas Metal Arc Welding ou processo de soldagem GMAW com corrente alternada
- GTAW – Gás tungsten arc welding
- hrr – Altura do reforço da raiz
- HV – Dureza Vickers
- I – Corrente
- I_c – Corrente de transição

- I_{cr} – Corrente crítica
- I_{IW} – International Institute of Welding
- kg/h – Taxa de deposição
- l – Largura
- MB – Metal de base
- MIG/MAG – Metal Inert Gas e Metal Active Gas
- P – Penetração
- r – Reforço
- RO – Abertura da raiz
- S – Face da raiz
- SAW – Processo de soldagem por arco submerso
- SMAW – Shielded metal arc welding
- T – Período de transferência de metal
- tcc – Tempo de duração de curto circuito
- V – Tensão
- v – Velocidade de soldagem
- W_{rr} – Largura do reforço da raiz
- ZF – Zona fundida
- ZTA – Zona termicamente afetada
- α – Ângulo do chanfro
- β – Ângulo de abertura da junta ou ângulo de bisel ou ângulo sólido ou do bisel
- φ – Eficiência de deposição

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Sabe-se que na indústria metal-mecânica é constante a busca por melhor qualidade do produto e competitividade, ancoradas no binômio produtividade e redução de custos. Dentre os diferentes processos de fabricação utilizados para a união de materiais metálicos e não metálicos nesta indústria, a soldagem é atualmente o processo mais empregado para a união permanente destes materiais.

Entre os vários processos de soldagem empregados para fabricação de componentes metálicos, aqueles que empregam o arco elétrico combinam uma concentração ótima de energia para fusão localizada com o custo relativamente baixo da energia elétrica e do equipamento, além de riscos aceitáveis à saúde humana, durante a operação. (Modenesi, 2009).

Na soldagem multipasses com arco elétrico, as etapas que compõem a execução do processo são: passe de raiz, passes de enchimento e passes de acabamento. Formam-se assim camadas superpostas, que gradativamente preenchem a abertura do chanfro definido pela montagem dos dois metais de base previamente preparados.

O passe de raiz é o passe realizado na região mais profunda do cordão de solda e para sua execução podem ser empregados vários processos de soldagem tais como: SMAW (*Shielded Metal Arc Welding*), GMAW (*Gás Metal Arc Welding*) e o GTAW (*Gás Tungsten Arc Welding*). (Silva, 2005).

O processo de soldagem GMAW (MIG/MAG – abreviatura de Metal Inert Gas e Metal Active Gas) proporciona muitas vantagens para a soldagem em aplicações de alta e baixa produção. As vantagens do processo GMAW sobre os processos eletrodo revestido e TIG são: modo de execução semi-automático, mecanizado ou automático o que o torna mais versátil na produção; não há necessidade de remoção de escória; apresenta alta taxa de deposição do metal de solda; tempo total de execução de soldas de cerca da metade do tempo para o processo SMAW; altas velocidades de soldagem o que minimiza distorções nas peças

soldadas; alimentação contínua do arame eletrodo evitando paradas frequentes para troca do eletrodo (SMAW) e vareta de soldagem (GTAW).

Diante das vantagens do GMAW seu uso vem se disseminando na indústria apesar de algumas limitações inerentes à própria configuração do processo, tais como: suscetibilidade de contaminação da atmosfera protetora em trabalhos no campo, maior sensibilidade à variação dos parâmetros elétricos do arco de soldagem pela forte interdependência destes durante a operação. (Villani, 2005).

O presente trabalho visa inicialmente discutir os parâmetros do processo de soldagem GMAW mecanizado com fontes de energia de potencial constante com transferência metálica curto-circuito bem como avaliar, segundo normas técnicas de ensaios não-destrutivos, características geométricas dentro dos limites propostos, para os cordões de solda executados e posteriormente, demonstrar que é possível empregar o processo de soldagem GMAW mecanizado na execução do passe de raiz com penetração total, sem a necessidade da operação de goivagem. (remoção da solda ou parte dela por meio mecânico ou térmico) pois, a operação de goivagem gera retrabalho e custos adicionais de produção.

CAPÍTULO 2

OBJETIVO DA PESQUISA

Este trabalho tem como objetivo geral avaliar a utilização do processo GMAW na execução do passe de raiz e como objetivo específico estudar a influência das variáveis do processo de soldagem GMAW (corrente, tensão e velocidade de soldagem) nas características geométricas do cordão do passe de raiz.

CAPÍTULO 3

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 - SOLDAGEM

Um grande número de diferentes processos utilizados na fabricação e recuperação de peças, equipamentos e estruturas é abrangido pelo termo soldagem. Classicamente, a soldagem é considerada como um método de união, porém, muitos processos de soldagem ou variações destes são usados para a deposição de material sobre uma superfície, visando a recuperação de peças desgastadas ou para a formação de um revestimento com características especiais (Modenesi, 2009).

De acordo com a American Welding Society (AWS, 1991) a definição de soldagem é a operação que visa obter a coalescência localizada produzida pelo aquecimento até uma temperatura adequada, com ou sem a aplicação de pressão e de metal de adição. Logo, o resultado desta operação é o que se chama de solda. A FIG.3.1 mostra de forma esquemática uma solda.

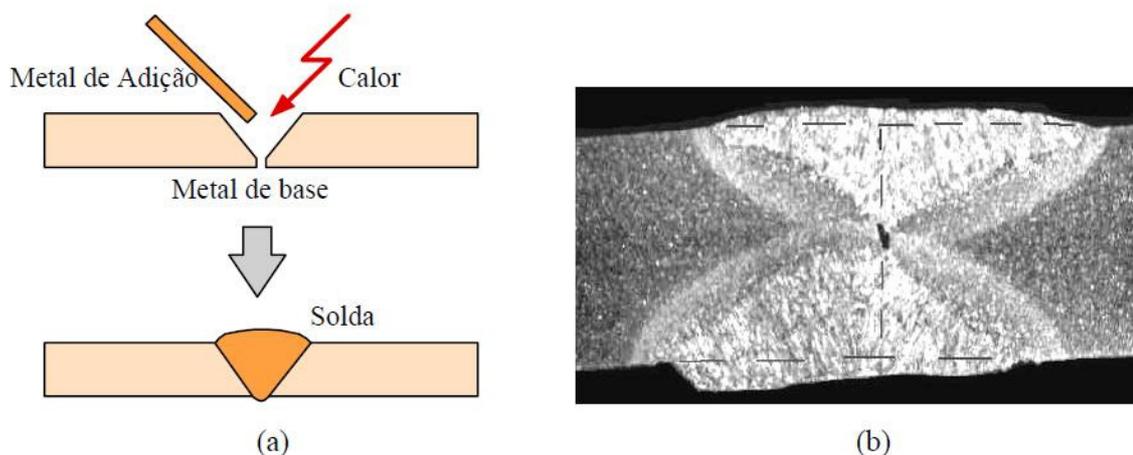


FIG.3.1 - Representação esquemática de uma soldagem por fusão (a), macrografia de uma junta soldada (b) (Modenesi, 2009)

É possível observar na FIG. 3.1 que para realizar uma solda é necessário fazer a preparação do metal a ser soldado, pois nem sempre é possível fundir a espessura total das peças, quando

as faces da junta estão paralelas entre si. Esta preparação é realizada por meio da confecção de chanfros.

O tipo e as dimensões de um chanfro são escolhidos de forma a atender os requisitos do projeto e, em particular, permitir um fácil acesso até o fundo da junta, minimizando, assim, a quantidade de metal de adição necessária para o enchimento da junta.

Na FIG. 3.2 é possível verificar as características dimensionais de um chanfro. A face de raiz ou nariz (S) é a parte não chanfrada de um componente da junta, ou seja, é a região mais estreita da junta. Esta região tende, portanto, a ser uma região na qual a soldagem é mais difícil, mais propensa à formação de descontinuidades, pois durante a soldagem, concentra-se um razoável aporte térmico ao longo da junta apresentando pequeno volume comparativamente ao volume total a ser soldado. A abertura de raiz ou folga ou aresta (g) é a menor distância entre as peças a soldar. O ângulo de abertura da junta ou ângulo de bisel (β) é aquele executado na extremidade do metal de base antes da montagem final dos componentes. Por fim, o ângulo do chanfro (α) é o ângulo gerado durante a montagem dos metais de base, ou seja, é a soma dos ângulos de bisel dos componentes da junta.

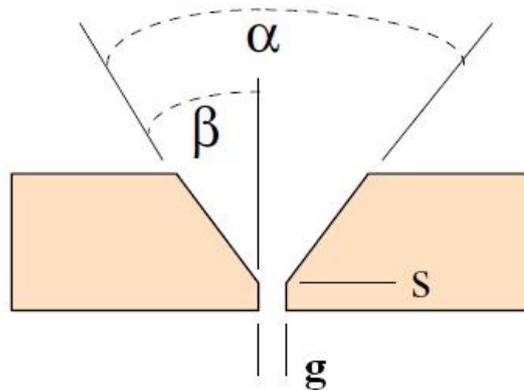


FIG.3.2 – Elementos de um chanfro: (α) ângulo do chanfro; (β) ângulo sólido ou do bisel; (g) afastamento da junta; (s) face da raiz) (MODENESI, 2009)

3.2 – PASSE DE RAIZ

O passe de raiz é o primeiro cordão de solda a ser realizado na raiz do chanfro (FIG. 3.3). É importante ressaltar que na execução de soldas de qualidade o passe de raiz tem significado

especial por representar, na construção mecânica soldada, o alicerce ou fundação na edificação da estrutura metalúrgica básica que sustentará os cordões posteriores.

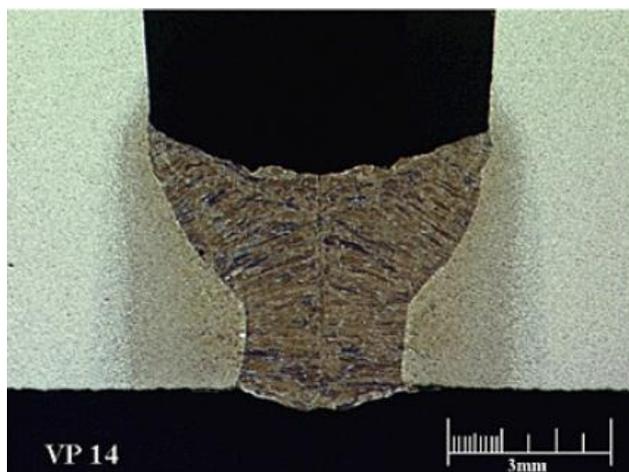


FIGURA 3.3 - Passe de raiz em chanfro, foto retirada do artigo (Barbosa, 2011)

Para obter-se uma solda de qualidade vários autores de trabalhos técnicos, (Malin, 2001; Macedo, 1985; Muir, 1985 e Cantrell, 1982) destacam a importância da execução do passe de raiz na soldagem com qualidade. De acordo com Malin (2001), é necessário indicar algumas características geométricas pertinentes ao passe de raiz, como mostra a FIG. 3.4. Estas características merecem ser avaliadas não só nos estudos sobre o assunto, como também durante a aplicação do processo na produção industrial.

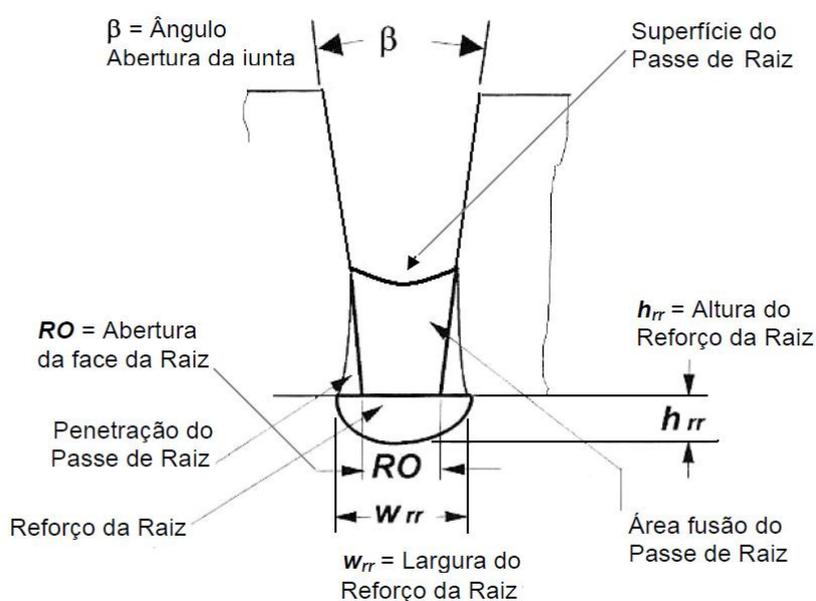


FIGURA 3.4 - Características das regiões do passe de raiz (Malin, 2001)

3.3 – DESCONTINUIDADES APRESENTADOS EM PASSE DE RAIZ

Como anteriormente mencionado, a soldagem de passe de raiz é de fundamental importância para o sucesso da solda final. Passes de enchimento e acabamento são também relevantes, contudo, não são normalmente abordados nos trabalhos uma vez que as características presentes nestes passes são inerentes à boa execução do processo de soldagem no passe de raiz (Júnior, 2010).

Descontinuidades relativas ao formato da penetração da raiz decorrem, dentre outros, dos fatores presentes na soldagem como: abertura da junta, ângulo do chanfro, dimensões da face (nariz) da raiz, ângulo da tocha em relação à direção de soldagem, velocidade de soldagem, aporte térmico, manejo da tocha, instabilidade do arco, falta de proteção gasosa, desempenho inadequado dos equipamentos, entre outros (Cantrell, 1982).

Cantrell (1982) obteve alguns formatos do reforço da raiz, atuando no manejo da tocha com e sem tecimento, conforme comparação mostrada na FIG 3.5. A velocidade de soldagem alta causa o efeito de desvio do arco em direção à borda da poça de fusão e provoca pouca penetração da raiz. Baixa velocidade elimina este efeito de desvio do arco, com excesso de contorno do reforço da raiz.

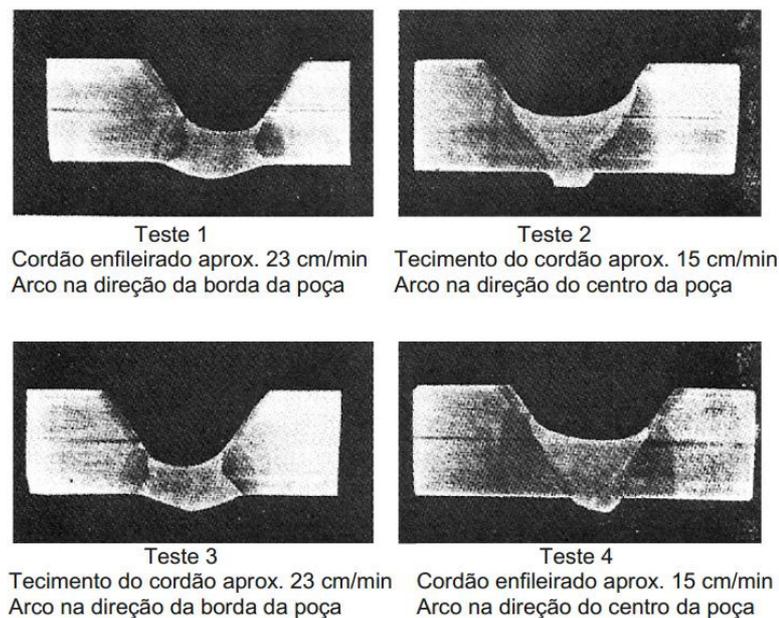


FIGURA 3.5 - Efeito da técnica de soldagem no reforço da raiz, arame ER70T-1 diâmetro 1,6 mm, posição plana, Chanfro tipo V – 60° , 240 A e 25 V – Mistura 75% Ar + 25% CO₂, sem face de raiz, abertura raiz aprox. 2,4 mm. (Cantrell, 1982)

3.4 – PROCESSOS DE SOLDAGEM UTILIZADOS EM PASSE DE RAIZ

Com os equipamentos atuais no mercado, o passe de raiz é feito manualmente utilizando os processos de soldagem SMAW, SAW, GMAW e GTAW. Destes quatro processos, aquele que emprega eletrodos revestidos (SMAW) é o processo mais difundido para a execução do passe de raiz devido a sua versatilidade e facilidade operacional porém, apresenta algumas limitações como baixa taxa de deposição que gira em torno de 1,0 a 2,6 kg/h e fator de ocupação do soldador geralmente inferior a 40 % (Villani, 2005).

Malin (2001), com o uso do processo SAW, analisa de maneira bastante abrangente a influência das variáveis de soldagem e da geometria da junta envolvidas na formatação do passe de raiz. A soldagem foi realizada nas seguintes condições: Material da chapa: aço carbono; Espessura da chapa: 17,5 mm; Junta de topo; Chanfro: tipo V simples; Eletrodo com diâmetro de 4,0 mm; Posição de soldagem: Plana; Desalinhamento: 0 (zero) mm; Polaridade eletrodo: Corrente contínua eletrodo negativo; Altura da face de raiz: 0 (zero) mm; Distância bico contato peça: 41 +/- 3 mm.

Foram elaborados gráficos relacionando as variáveis de soldagem com a geometria do reforço da raiz, entre outras características, a altura (hrr) e largura (wrr). Os efeitos causados pelas variáveis, estudadas Malin (2001), serão descritos a seguir:

- a) A corrente produz efeito na geometria da raiz, devido a sua influência na taxa de deposição e penetração do arco conforme mostra a FIG. 3.6. O efeito da corrente na altura do reforço da raiz (hrr) é complexo. Até corrente (I) menor que a crítica $I < I_{cr}$ (600 A) o arco não penetrou o suficiente (ou inadequadamente) para o reforço da raiz ser formado (considerado igual a Zero). Com a $I = I_{cr}$, o arco penetrou através das bordas da raiz e propiciou um desenvolvimento total da altura, com o máximo do hrr = 1,7 mm. Então hrr, diminuiu quando a corrente foi aumentada acima da I_{cr} , até que hrr = 0,8 mm para corrente de 1000 A. Com relação à largura do reforço (wrr), com $I < I_{cr}$ (600 A), o reforço da raiz formou-se inadequado (considerado Zero). Em $I = I_{cr}$ (600 A), o arco penetrou nas bordas da raiz e formou um reforço da raiz com a largura total (wrr = 14,1 mm). Com a corrente sendo aumentada de 600A a 1000A, a largura do reforço (wrr) foi independente da corrente e variou muito pouco (entre 13,0 - 14,1 mm).

- b) O efeito da variação da abertura da raiz (RO), mantendo-se a corrente ($I = 700$ A) e abertura da junta ($\beta = 30^\circ$) fixas, é mostrado na FIG 3.7. Observa-se que a h_{rr} aumentou proporcionalmente a abertura da raiz. Este aumento é benéfico. Na RO menor que 2,4 mm, as bordas da raiz não foram fundidas suficientemente e não se formou o reforço da raiz. Um reforço pequeno apareceu em $RO = 2.4$ mm. Um aumento gradual nas aberturas da raiz de 2,4 a 7,2 mm resultou no aumento da h_{rr} , uma tendência oposta à corrente, discutida anteriormente, Assim, a h_{rr} melhora devido ao aumento da abertura da raiz e deteriora devido ao aumento da corrente. Com relação à largura do reforço da raiz (W_{rr}), também aumenta quando a RO aumenta. Para o exemplo apresentado, o aumento da abertura da raiz de 2,4 para 7,2 mm resultou em um acréscimo do W_{rr} (51%). Esta tendência difere daquela produzida quando se aumenta a corrente acima da I_{cr} pois, conforme visto anteriormente, a W_{rr} não mudou muito.

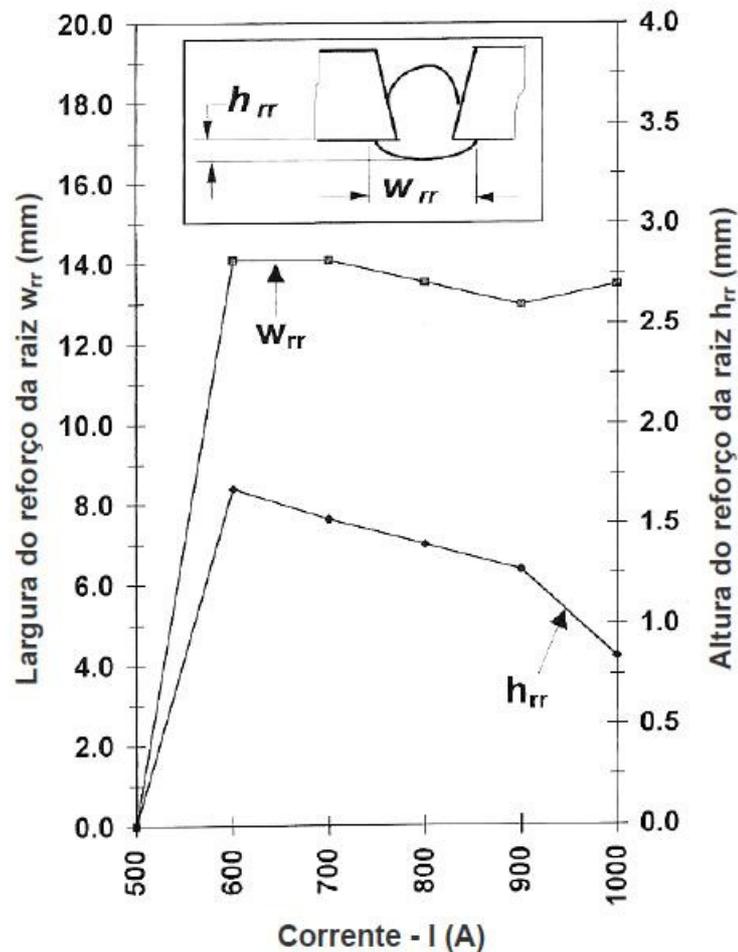


FIGURA 3.6 – Efeito da corrente na geometria do reforço da raiz, altura do reforço (h_{rr}) e largura do reforço (W_{rr}), processo SAW (Malin, 2001)

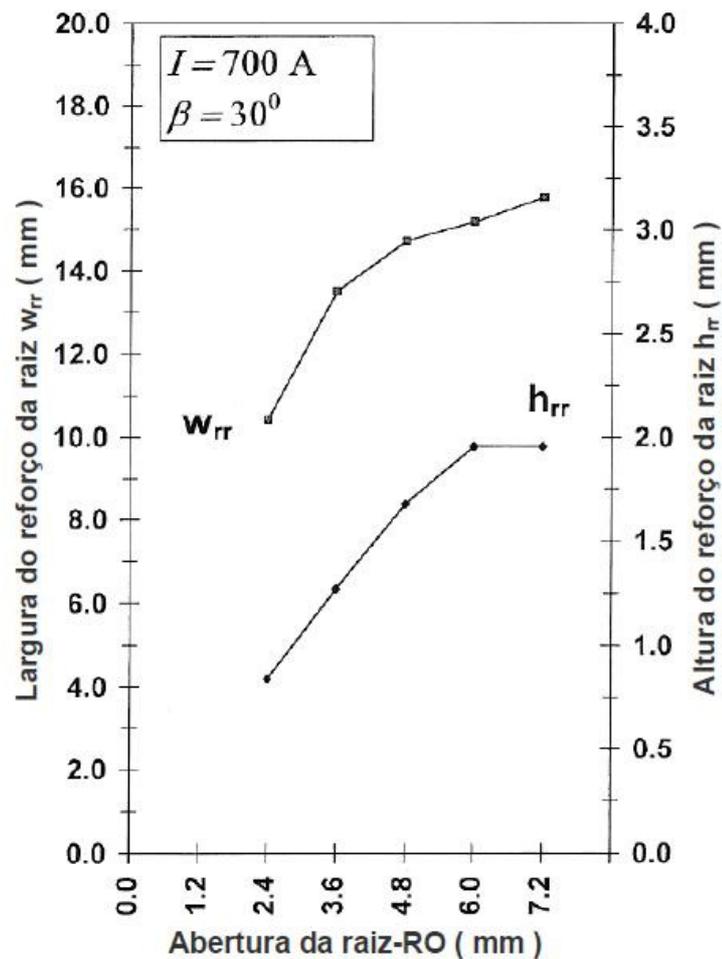


FIGURA 3.7 – Efeito da abertura da junta na geometria do reforço da raiz, altura do reforço (h_{rr}) e largura do reforço (w_{rr}), processo SAW (Malin, 2001)

Nos tempos atuais já existe no mercado fontes de alimentação para soldagem GMAW semi-mecanizada que produzem um cordão suficientemente largo para preencher completamente a raiz da junta sem a necessidade de um passe posterior (Weldreality, 2009). Porém para conseguir este cordão é importante fazer a escolha adequada dos parâmetros de soldagem a fim de que o intento seja possível (Dutra *et al*,1987). É importante conjugar os parâmetros de corrente, tensão, velocidade de soldagem, para manter a estabilidade do arco e produzir um passe de raiz com o formato que atenda as exigências de resistência mecânica da junta soldada. A realização do passe de raiz sem defeitos influenciará na consistência dos passes restantes, de enchimento e acabamento e, conseqüentemente, na obtenção de uma solda mecanicamente íntegra, que é a meta de todo processo de fabricação.

3.5 - PROCESSO DE SOLDAGEM GMAW OU MIG/MAG

O processo de soldagem GMAW (Gas Metal Arc Welding) também conhecido como GMAW foi desenvolvido por volta de 1940, para a soldagem de alumínio, magnésio e suas ligas, com a finalidade de substituir o uso de fluxos sólidos, que geravam problemas de corrosão no cordão de solda. Como o processo demonstrou ser muito eficiente na proteção da zona de fusão contra a contaminação atmosférica, ele foi gradativamente substituindo os outros processos e atualmente é aplicado na soldagem da maioria dos metais (AWS, 1991; Cary, 1998).

A soldagem GMAW é um processo que utiliza um arco elétrico estabelecido entre um eletrodo nú consumível continuamente alimentado e o metal que se deseja soldar. Este processo utiliza um gás ou mistura de gases que protege o arco e o metal de solda fundido contra a contaminação da solda pelo oxigênio, nitrogênio e hidrogênio provenientes da atmosfera, além de prover um arco com características relacionadas, por exemplo, com sua estabilidade, modo de transferência metálica, etc. Se este gás é inerte (Ar/He), o processo é chamado de MIG - **Metal Inert Gas**, pois estes gases não reagem metalurgicamente com a gota metálica ou com a poça de fusão, atuando apenas na proteção destas regiões, auxiliando na formação e manutenção do arco. Por outro lado, se o gás for ativo (CO₂ ou misturas de Ar / O₂ / CO₂), o processo é chamado alternativamente de MAG - **Metal Active Gas**. Neste caso, além das funções já citadas, o gás reage metalurgicamente com a gota e com a poça de fusão (AWS, 1991).

No processo GMAW a fusão é localizada e a união das peças é conseguida pelo calor gerado por um arco elétrico estabelecido através do contato elétrico entre um eletrodo contínuo e maciço (arame) e a peça de trabalho. No início do processo, um curto-circuito entre o eletrodo e a peça produz a passagem inicial de uma elevada corrente, provocando um aquecimento ao longo do eletrodo e na região de contato com a peça. Com este aquecimento e a ruptura do curto-circuito, ocasionada pela fusão ocorrida em alguma parte do eletrodo, o arco se estabelece. Com o surgimento do arco, o arame, continuamente fornecido, é transformado em gotas de metal fundido, as quais são transferidas para a poça de fusão, formando o cordão de solda. Nesse processo, uma parte da energia responsável pela fusão do eletrodo é devida ao efeito Joule, gerado pela passagem da corrente elétrica através do arame na região que fica entre o bico de contato e o arco. O gás ou mistura de gases protege o arco e o metal de solda

fundido contra a contaminação pela atmosfera. A FIG. 3.8 mostra, de forma esquemática, o processo de soldagem GMAW.

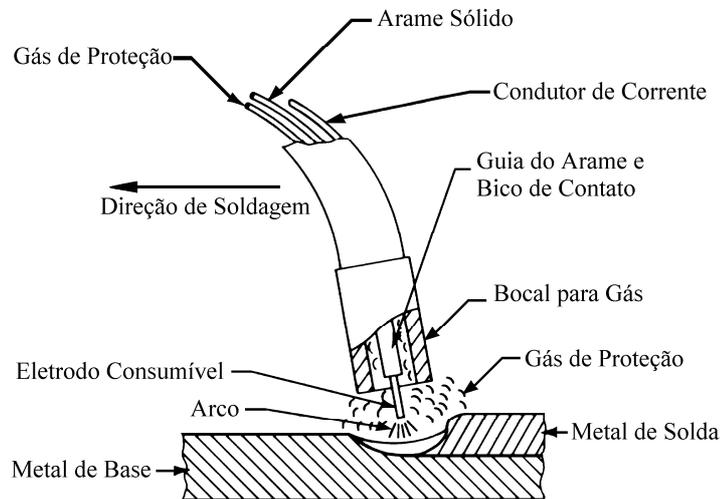


FIGURA 3.8 – Processo de soldagem GMAW (AWS, 1991)

O processo GMAW é normalmente operado de forma semi-automática, podendo ser também mecanizado ou automatizado. Convencionalmente, é utilizada no processo GMAW uma fonte retificadora de tensão constante, regulável entre 15 e 50 V, e um alimentador de arame com velocidade regulável entre cerca de 1 e 18 m/min, que permite um auto ajuste do comprimento do arco, mantendo-o relativamente constante.

As principais vantagens da utilização do processo GMAW são sua alta produtividade (quando comparado com processos GTAW e SMAW), sua versatilidade, quanto aos tipos de aços e espessuras, e sua menor exigência quanto à habilidade do operador. Este último fato deve-se à capacidade do processo em manter o comprimento do arco aproximadamente constante. Uma importante limitação deste processo é a sua grande sensibilidade aos parâmetros elétricos de operação, além da grande interdependência entre estes parâmetros, os quais têm influência direta nas características do cordão de solda depositado e na estabilidade do processo (Marques *et al*, 2005).

3.6 - TRANSFERÊNCIA METÁLICA

Nos processos de soldagem em que há o uso de um metal de adição, a forma como se dá a transferência deste metal para a peça constitui um fator importante do processo,

principalmente nos seus aspectos operacionais, em particular, o nível de respingos e fumos, a capacidade do processo ser utilizado fora da posição plana, o formato dos cordões e, enfim, a estabilidade e o desempenho operacional (Modenesi, 2009).

Este assunto tem sido estudado desde a introdução dos processos de soldagem com eletrodos consumíveis. O fenômeno da transferência metálica em soldagem a arco e especialmente os mecanismos que governaram receberam considerável atenção entre as décadas de 1950 e 1960, quando técnicas de filmagem de alta velocidade foram usadas para investigar o arco elétrico do processo GMAW (Bálsamo, 2000).

Lesnewich (1958) mostrou que o modo da transferência metálica depende das variáveis operacionais, principalmente do valor da corrente de soldagem e de sua polaridade, da extensão e diâmetro do eletrodo e da composição do gás de proteção.

A transferência metálica se processa em qualquer polaridade, com corrente contínua ou alternada e até mesmo contra a ação da gravidade, como é o caso da soldagem sobre cabeça. Isto indica que podem existir forças atuando constantemente na direção da poça de fusão, as quais são no mínimo, iguais às forças de gravidade.

As teorias mais usadas para o estudo da transferência metálica em GMAW são baseadas no balanço estático de forças na gota formada na ponta do eletrodo ou no estudo de instabilidades que podem ocorrer em cilindros líquidos percorridos por corrente elétrica, “Pinch Instability Theory” (Lancaster, 1987).

3.7 - CLASSIFICAÇÃO DOS MODOS DE TRANSFERÊNCIA METÁLICA

Diversas formas de transferência de metal podem ser observadas nos diversos processos de soldagem. De acordo com a nomenclatura do “*International Institute of Welding*” (IIW) (Lancaster, 1986), a transferência metálica pode ser classificada em três grupos principais: “Free-flight transfer” ou transferência por voo livre, “Bridging transfer” ou transferência por contato e “Slag-protected transfer” ou transferência protegida por escória, conforme esquematizado na TAB. 3.1 e ilustrado na FIG.3.9.

Tabela 3.1 – Formas usuais de transferência metálica de acordo com o IIW.

| TIPO DE TRANSFERÊNCIA | EXEMPLO DE PROCESSO DE SOLDAGEM |
|--|---|
| 1 – TRANSFERÊNCIA POR VÔO LIVRE | |
| 1.1 – Globular | |
| 1.1.1 – Gota (Drop) | GMAW - Baixa corrente |
| 1.1.2 – Repelida (Repelled) | GMAW com proteção de CO ₂ |
| 1.2 – Spray | |
| 1.2.1 – Projetada (Projected) | GMAW - Corrente intermediária |
| 1.2.2 – Spray em Fluxo (Streaming) | GMAW - Corrente média |
| 1.2.3 – Rotacional (Rotating) | GMAW - Corrente elevada |
| 1.3 – Explosiva | SMAW |
| 2 – TRANSFERÊNCIA POR PONTE | |
| 2.1 – Curto-Circuito (Short-Circuiting) | GMAW - Arco “curto” |
| 2.2 - Sem Interrupção (Without Interruption) | GTAW com alimentação contínua |
| 3 – TRANSFERÊNCIA PROTEGIDA POR ESCÓRIA | |
| 3.1 - Fluxo Guiado (Flux-Wall Guided) | SAW |
| 3.2 – Outros modos | SMAW, FCAW, ESW, etc. |

Fonte: Lancaster, 1986.

Na literatura (Liu, 1989), a transferência metálica tem sido descrita principalmente através dos termos de transferência por curto-circuito, transferência globular e transferência por spray. Cada transferência possui sua faixa de tensão e corrente de soldagem, taxa de deposição e técnicas de manipulação específicas.

A qualidade da solda está intimamente ligada ao modo de transferência metálica. A escolha dos gases de proteção e dos parâmetros de soldagem envolvidos influencia fortemente no tipo de transferência.

3.8 - TIPOS DE TRANSFERÊNCIA DE METAL NO PROCESSO GMAW

Para o processo GMAW convencional, com eletrodo positivo e gás de proteção a base de argônio, distinguem-se três modos de transferência básicos, isto é: (a) transferência globular, (b) transferência por curto-circuito e (c) transferência por “spray” ou aerossol.

A FIG. 3.10 mostra, esquematicamente, os campos operacionais das formas principais de transferência em função da corrente e da tensão na soldagem GMAW convencional com a utilização de gás de proteção a base de argônio.

Na região indicada como instável, que ocorre para valores de tensão bem baixos, tipicamente inferiores a 15 Volts, um grande volume de respingos é gerado e muito pouco calor é transferido ao metal de base, não permitindo a fusão adequada deste e do arame. Limites superiores de tensão e corrente, obviamente, também existem, em função de restrições práticas. Deve-se notar, ainda, que a transição entre alguns destes modos de transferência ocorre dentro de uma certa faixa, que pode ser relativamente grande, de tensão e corrente, ou seja, de uma forma mais ou menos gradual (Silva, 1995).

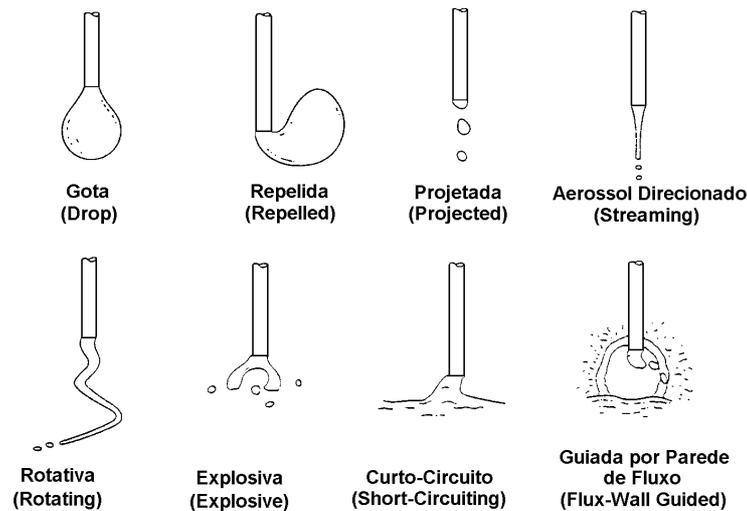


FIGURA 3.9 – Modos de transferência de acordo com a classificação do IIW (Lancaster, 1986).

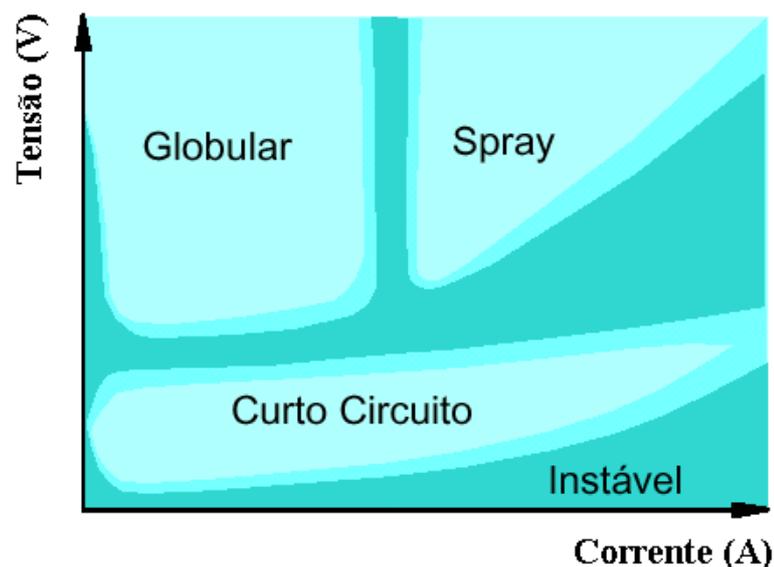


FIGURA 3.10 – Condições de corrente e tensão para as diferentes forma de transferência para a soldagem GMAW. com um gás de proteção a base de argônio (desenho esquemático) (Modenesi 2009)

a) Transferência Globular

A transferência globular é caracterizada pela formação de grandes gotas de metal fundido (cujo diâmetro é tipicamente superior ao diâmetro do eletrodo) que se transferem para poça de fusão a uma baixa frequência (10^{-1} a 10^0 gotas/s).

Na transferência globular, o metal líquido forma-se na ponta do arame pela sua fusão e mantém-se preso a este por ação da tensão superficial. Com o aumento do volume da gota, o seu peso aumenta e acaba por ocasionar a sua separação do arame e a gota do metal líquido se transfere para a poça de fusão por ação da gravidade. Oscilogramas típicos de corrente e tensão de soldagem para a transferência globular no processo GMAW são mostrados na FIG. 3.11a (Modenesi, 2009) e a FIG. 3.11b apresenta a característica da transferência metálica globular filmada em alta velocidade (Jones *et al.*, 1998).

A transferência globular ocorre quando se utiliza argônio puro ou misturas a base deste gás, para valores elevados de tensão e densidade de corrente relativamente baixa, isto é, abaixo daqueles de transição globular / spray, FIG.3.10.

Para outros gases, sobretudo misturas a base de hélio ou dióxido de carbono, este tipo de transferência é também predominantemente para níveis relativamente elevados de corrente. No caso de dióxido de carbono, a transferência globular pode ser repulsiva com grande geração de respingos. Para misturas a base de argônio, a transferência globular ocorre de forma relativamente estável.

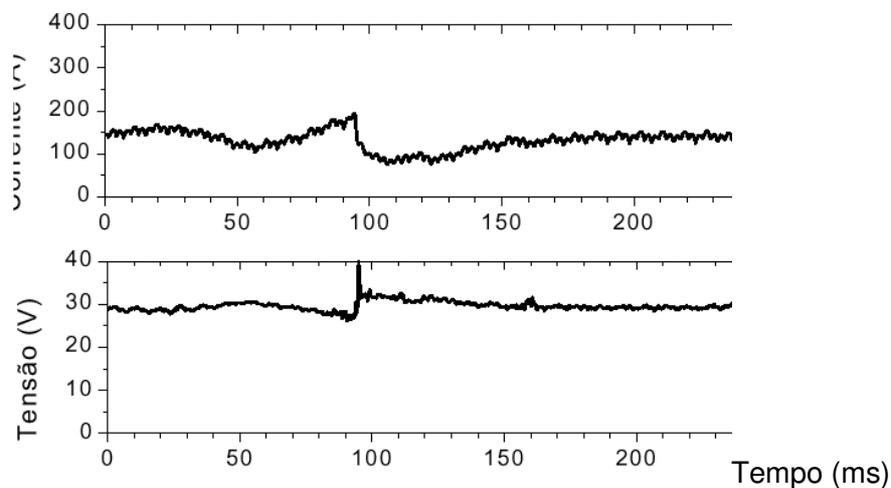


FIGURA 3.11a – Oscilogramas de tensão e corrente de um processo com transferência Globular. Arame ER 70S6 de 1,2 mm de diâmetro, Gás CO₂ (Modenesi, 2005).

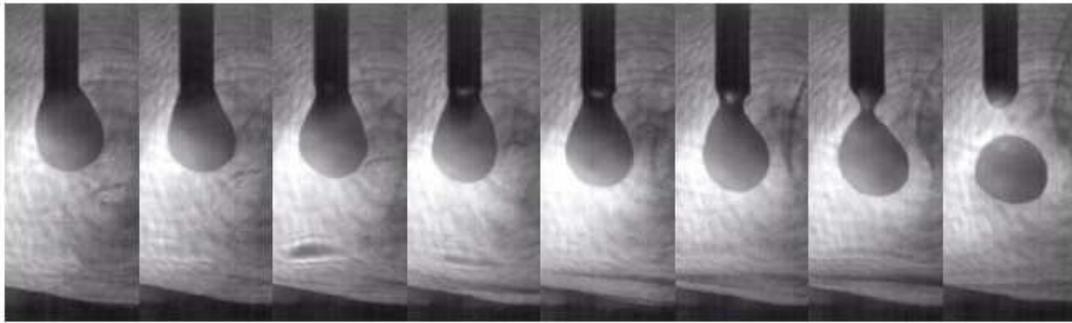


FIGURA 3.11b - Característica da transferência metálica globular filmada em alta velocidade (Jones *et al.*, 1998b).

b) Transferência por curto-circuito

Na transferência por curto-circuito, o comprimento do arco é diminuído de forma que a gota formada na ponta do arame toca a poça de fusão da solda antes que seja destacada pela ação da gravidade como no modo globular. Com isto, ocorre um curto-circuito elétrico e o arco é extinto. Com o curto-circuito, a corrente tende a se elevar rapidamente, aumentando a fusão do eletrodo por efeito Joule (RI^2) e, ao mesmo tempo, o metal fundido tende a se transferir para a poça de fusão por ação da tensão superficial e de forças de origem magnética. Com isto, o curto-circuito é rompido, o arco é restabelecido e este processo é repetido ciclicamente (FIG. 3.12). Em condições normais de operação deste tipo de transferência, aproximadamente 20 a 200 curtos podem ocorrer em um segundo (Smith, 1962).

Assim, neste modo de transferência, o processo alterna entre condições de arco, no qual há formação da gota na ponta do arame e fusão do metal de base (formação da poça de fusão), e condições de curto-circuito, quando a gota é efetivamente transferida do arame para a poça. A FIG.3.13 mostra uma filmagem do processo GMAW operando com o modo de transferência por curto-circuito.

Durante o curto-circuito, devido à alta corrente presente, o processo de transferência da gota pode se dar de forma mais ou menos explosiva, tendendo a gerar um elevado nível de respingos. Por outro lado, se a corrente é elevada de forma muito lenta, o arame sólido pode acabar por mergulhar na poça de fusão antes da ruptura da ponte líquida e o processo ser interrompido com o arame superaquecido formando um emaranhado não fundido sobre o metal de base (Modenesi, 2009).

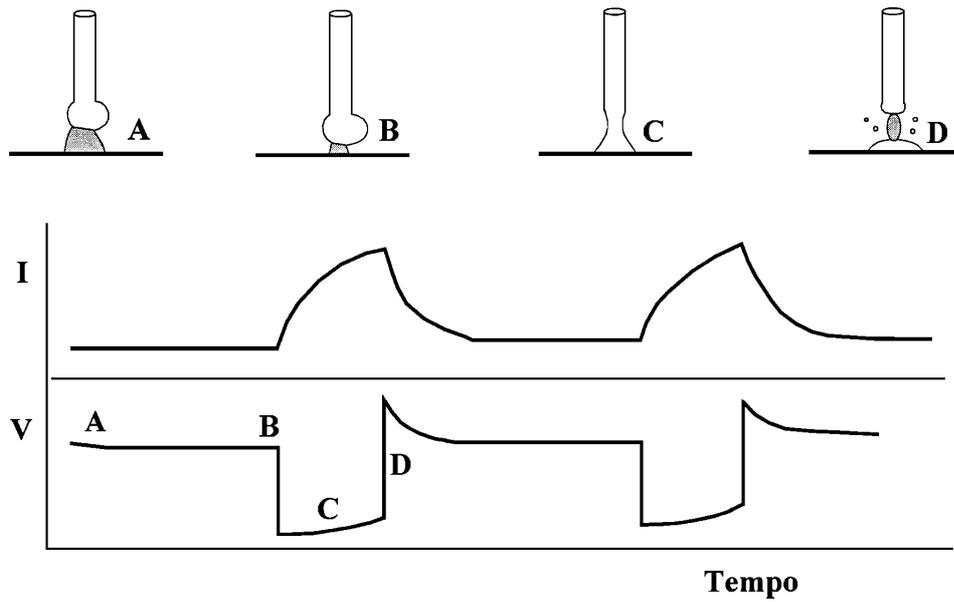


FIGURA 3.12 – Transferência por Curto-Circuito (Modenesi, 2009).

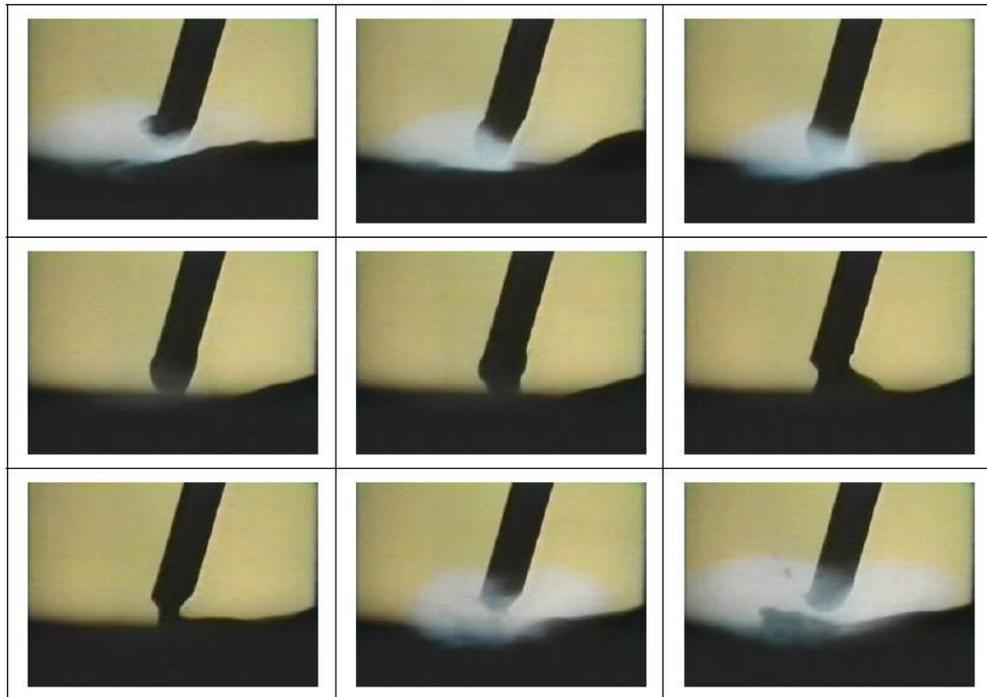


FIGURA 3.13 – Imagens obtidas a partir de filmagem de alta velocidade da transferência por curto-circuito (Modenesi, 2009)

Durante um curto-circuito, a intensidade de energia cedida à peça é relativamente baixa e, portanto, a soldagem com este tipo de transferência tende a produzir pouca fusão do metal de base. Em materiais de grande espessura ou elevada condutividade térmica, isto pode favorecer

a ocorrência de falta de fusão, contudo, na soldagem de peças de pequenas espessuras, esta característica pode, por outro lado, ser vantajosa (Silva, 1995).

As condições operacionais da soldagem com transferência por curto-circuito podem ser caracterizadas também através do estudo de oscilogramas de corrente e tensão do processo conforme apresentado na FIG. 3.14.

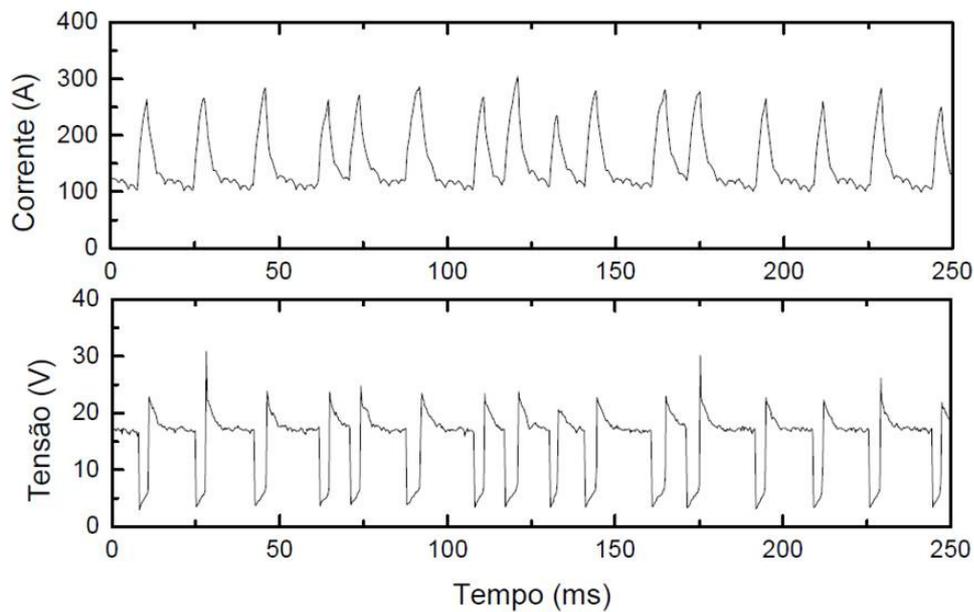


FIGURA 3.14 – Oscilograma da transferência por curto-circuito para um arame de aço inoxidável (AWS E308) de 1,0 mm de diâmetro. Gás: Ar-2% O₂ (Modenesi, 2009).

Alguns parâmetros derivados destes oscilogramas e que podem ser utilizados para essa finalidade são o período de transferência de metal (T), o tempo de duração de curto-circuito (t_{cc}) e o fator de curto-circuito (F_{cc}). Essas variáveis estão ligadas pela equação Eq. 3.1.

$$F_{CC} = \frac{t_{CC}}{T} 100$$

Eq. 3.1

O fator de curto-circuito indica, em porcentual, a fração do tempo durante a soldagem em que o arame está em contato com a poça de fusão, isto é, em curto-circuito.

c) Transferência spray ou aerossol

O modo de transferência spray ou aerossol ocorre para correntes acima da chamada corrente de transição (I_c) e tensões do mesmo nível, ou superiores, às usadas no modo globular. Nestas

condições, o arco elétrico envolve completamente a gota na ponta do eletrodo e há uma queda no diâmetro destas e, conseqüentemente, um aumento na freqüência de transferência. Tipicamente, as gotas transferidas são de diâmetro menor que do arame eletrodo, sendo a condição de igualdade entre o diâmetro da gota e do arame usada para definir a corrente de transição (Kim e Eagar, 1993).

A corrente de transição depende de inúmeros fatores, particularmente, da composição e do diâmetro do eletrodo além do seu comprimento energizado e do tipo de gás de proteção. A FIG. 3.15 mostra esquematicamente a faixa de transição entre a transferência spray e globular.

A transferência spray ocorre usualmente de forma muito estável, com mínimas perturbações do arco e poucos respingos. Acredita-se que a força principal responsável pela transferência spray seja magnética, de origem similar à associada com a formação do jato de plasma (Modenesi, 2009).

Na soldagem GMAW, a transferência spray ocorre basicamente com gases de proteção à base de argônio e com eletrodo positivo.

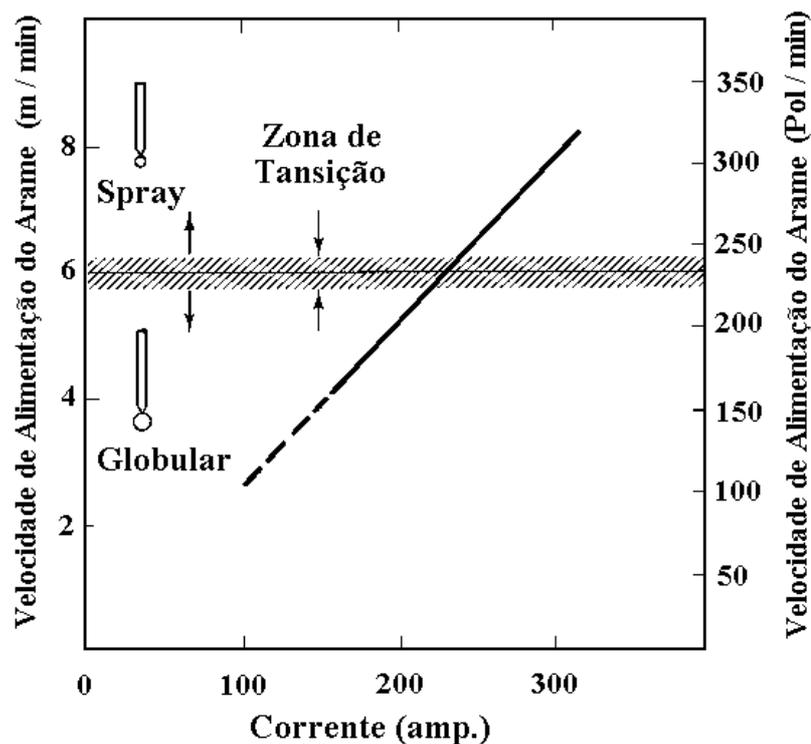


FIGURA 3.15 – Faixa de transição entre a transferência spray e globular (Cary, 1989).

3.9 - ESTABILIDADE OPERACIONAL DO PROCESSO DE SOLDAGEM

De acordo com Costa (2006) em processos de soldagem com transferência metálica, a estabilidade do próprio arco e da transferência de metal através deste é de vital importância na estabilidade geral do processo, pois estes dois fenômenos são interligados de modo que a instabilidade no comportamento de um deles provoca, em geral, a instabilidade no outro e de todo o processo.

A estabilidade, em seu significado físico, é uma propriedade geral de sistemas mecânicos, elétricos e aerodinâmicos, pela qual o sistema retorna ao estado de equilíbrio após sofrer uma perturbação (Meriam, 1999). Já o termo “estabilidade operacional” é usado na soldagem para designar genericamente condições de bom ou mal “funcionamento” da operação (Dutra, 1989).

Não existe uma metodologia única para avaliação da estabilidade de processos de soldagem, pois ela é afetada pela maioria das variáveis de soldagem (Machado, 1996; Suban e Tusek, 2003). Há algum tempo, a estabilidade era tratada apenas qualitativamente, devido principalmente à falta de recursos tecnológico para quantificá-la. Ela era determinada pelo soldador através do ruído que se gerava, ou pela quantidade de respingos, de acordo com sua experiência (Mita, 1988; Vaidya, 2002). Atualmente, com o auxílio de diferentes equipamentos e programas, a avaliação da estabilidade do processo é feita, em geral, com base nas variações dinâmicas dos sinais elétricos, sonoros e luminosos emitidos pelo arco (Lucas, 1994) e, também, por filmagens de alta velocidade da transferência metálica, a qual pode ser sincronizada com os sinais de corrente e tensão (Bálsamo *et al.* 2000a; Vilarinho, 2000)

De acordo com Suban (2003), a estabilidade do processo de soldagem é a própria estabilidade do arco e este autor ainda afirma que uma operação de soldagem a arco só é estável se o comprimento do arco for constante, se a transferência de metal for uniforme e sem presença de respingos. Porém, o conceito de estabilidade é definido distintamente por diferentes autores, podendo ser associada, por exemplo, ao equilíbrio entre a velocidade de alimentação do arame e a sua velocidade de fusão; formato regular do cordão; grau de rigidez do arco durante a soldagem e à frequência de oscilação da poça de fusão (Amin, 1983, Scotti, 1998, Den Ouden e Hemans, 1999, Vaidya, 2002). Estas abordagens podem ser, em alguns casos,

complementares, mas não traduzem o sucesso de uma solda. Após analisar todos estes conceitos, o autor deste trabalho constatou que a estabilidade de um processo de soldagem se dá quando o resultado alcançado é uma operação com regularidade na transferência metálica, independente do tipo, produzindo o mínimo de respingos.

3.10 - ESTABILIDADE OPERACIONAL NO PROCESSO GMAW

Na soldagem com eletrodo consumível, particularmente na soldagem GMAW, o comportamento da raiz do arco tem um efeito significativo na estabilidade do processo. Na soldagem dos aços, em geral, quando pequenas adições de gases oxidantes são feitas em uma proteção gasosa inicialmente inerte, observa-se uma redução da mobilidade da raiz do arco, o que melhora a estabilidade do processo (Hilton e Norrish, 1988). Este efeito é associado com a recomposição da camada de óxido próxima da raiz do arco que é continuamente destruída pela emissão de elétrons para o arco (Pattee *et al.* 1968b). Mas não só o comportamento da raiz do arco afeta a estabilidade, a transferência de metal de adição pode exercer uma influência importante no comportamento do arco. Logo, a estabilidade do processo de soldagem GMAW pode ser avaliada por três fatores: estabilidade do arco, regularidade da transferência metálica e o comportamento operacional do processo de soldagem, os quais se relacionam de forma muito próxima e complicada (Ponomarev, 2010).

Como já citado no item 3.6, dentre os modos de transferência metálica presentes no processo GMAW, nota-se que, de uma forma geral, em termos operacionais (sobretudo em relação aos níveis de respingos e fumos), para misturas de proteção a base de argônio, que a transferência spray é bastante estável e a transferência globular e por curto-circuito tende a ser mais instável, tendendo a gerar o maior nível de respingos. Sob este aspecto, portanto, a transferência spray seria a preferencialmente usada.

As diferenças de estabilidade, associadas com os diferentes modos de transferência, podem ser visualizadas nos oscilogramas de tensão e corrente típicos de cada modo. Na transferência globular ou spray, os sinais de tensão e corrente são relativamente constantes com uma pequena dispersão em torno dos valores médios. No modo de transferência globular, em função do maior tamanho das gotas, esta dispersão é geralmente maior que em spray. Já no modo curto-circuito, as ocorrências dos curtos causam variações drásticas nos sinais de tensão de soldagem. Estas diferenças de comportamento entre cada modo podem fornecer uma base

para controle em tempo real do modo de transferência. Estudos com este método indireto de análise permitem avaliar a estabilidade operacional do processo e, conseqüentemente, auxiliar na determinação de condições ótimas de soldagem.

3. 11 - VARIÁVEIS DO PROCESSO DE SOLDAGEM GMAW

Durante a soldagem existem muitas variáveis que precisam ser controladas. As variáveis de soldagem são fatores que podem ser ajustados para se controlar diversas características das soldas que se deseja produzir, como por exemplo: a penetração, a largura, a altura e o aspecto visual do cordão soldado.

A seleção dessas variáveis, para uma determinada aplicação, inclui a disponibilidade de equipamentos e materiais, considerações metalúrgicas e econômicas de modo a garantir um nível operacional adequado à qualidade exigida pelo cliente. Estas variáveis não agem especificamente de forma independente e comumente há forte interação entre elas.

As principais variáveis que afetam as características da solda na soldagem GMAW são: tensão do arco, corrente de soldagem, velocidade de soldagem, distância entre o bico de contato e a peça de trabalho (DBCP) além da polaridade da corrente (Lincoln, 1973). Algumas das principais variáveis e seus efeitos estão descritos a seguir.

a) Efeito da tensão do arco

A tensão do arco de soldagem, ou seja, a diferença de potencial estabelecida entre o eletrodo e a peça de trabalho durante a soldagem, está intimamente ligada ao comprimento do arco.

Mantendo as demais variáveis constantes (corrente, velocidade de soldagem, DBCP, etc), um acréscimo na tensão do arco resulta em um aumento do comprimento do arco. No entanto, o mesmo comprimento do arco poderá ser relacionado com diferentes tensões, dependendo da corrente, do gás de proteção e do DBCP.

Em termos de controle, apesar da importância do comprimento do arco, utiliza-se a tensão do arco justamente pela maior facilidade de monitoração. Um aumento da tensão tende a ocasionar cordões mais planos e com maior largura na zona de fusão (ASM, 1993).

b) Efeito da corrente de soldagem

A velocidade de alimentação do arame ou taxa de fusão é a variável que controla a corrente de soldagem e vice-versa. Um acréscimo na velocidade de alimentação do arame, com todos os outros parâmetros constantes, resulta em mais eletrodo para ser fundido na mesma unidade de tempo. Maior quantidade de corrente é automaticamente fornecida pela fonte, implicando no aumento da taxa de deposição (kg/h). Maior quantidade de calor e de metal de solda são aplicados no metal de base por unidade de comprimento de solda, resultando em penetração mais profunda e cordões de solda maiores (altura e largura) e vice-versa. A FIG. 3.16 ilustra o efeito da intensidade da corrente sobre a velocidade de fusão para um eletrodo sólido.

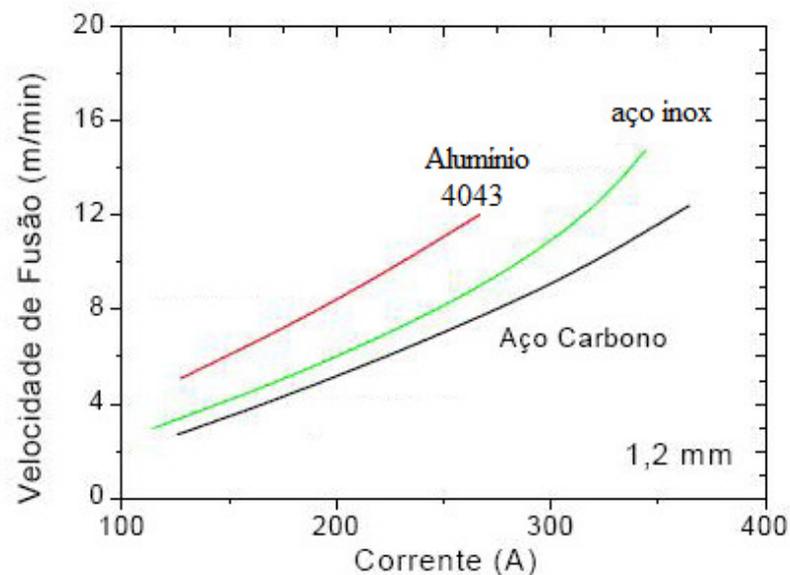


FIGURA 3.16 - Velocidade de fusão para arame-eletrodo de 1,2 mm (adaptado de Cary, 1994)

c) Efeito da velocidade de soldagem

Velocidade de soldagem é a velocidade relativa entre a tocha e a superfície de trabalho, e tem um efeito marcante na penetração e aparência do cordão de solda, pois à medida que a velocidade de soldagem aumenta, o cordão se torna menor e a penetração decresce, devido à menor quantidade de calor fornecida ao metal de base por unidade de comprimento soldado. Por outro lado, velocidades de soldagem mais baixas, geralmente proporcionam cordões de solda mais largos, altos e com maior aporte térmico. O tempo maior de aquecimento do metal de base aumenta a penetração e aumenta o depósito de solda por unidade de comprimento.

d) Efeito da distância bico de contato peça de trabalho (DBCP)

A distância entre o bico de contato e a peça de trabalho (DBCP) determina o valor da resistência elétrica e subsequentemente a quantidade de pré-aquecimento do eletrodo que fica livremente entre o bico de contato e o arco (stickout). O DBCP é mostrado na FIG.3.17 e tem influência na penetração, estabilidade do arco, taxa de deposição e na qualidade da solda. Uma DBCP curta resultará em baixa resistência do eletrodo, causando pouco pré-aquecimento do mesmo. À medida que a DBCP é aumentada, mantendo-se a velocidade do arame e demais parâmetros constantes, a quantidade de calor gerado por efeito Joule aumenta e a corrente de soldagem necessária para fundir o arame é diminuída. Controlar a extensão da DBCP, portanto, é muito importante. DBCP longas resultam em metal de solda com pouco calor, formatos irregulares e pouca penetração. Além disso, um aumento excessivo tornará também o arco instável, com salpicos, levando a uma proteção insuficiente do arco.

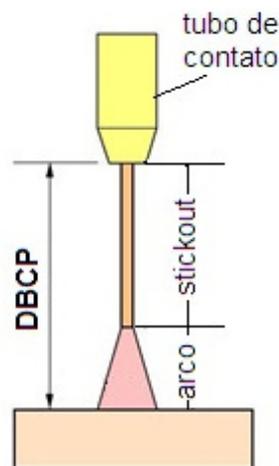


FIGURA 3.17 – Distância Bico de Contato Peça – DBCP (Modenesi,2009)

e) Efeito da polaridade do eletrodo

A soldagem pelo processo GMAW convencional é normalmente realizada com corrente contínua polaridade inversa (CC+), isto é, o eletrodo é conectado ao polo positivo e a peça ligada ao polo negativo. Segundo Souza, 2009, esta configuração permite maior penetração, melhor estabilidade do arco e da transferência metálica, menor quantidade de respingos além de possibilitar diferentes modos de transferências tais como: curto-circuito, globular, e várias formas de transferência goticular (Spray).

A soldagem com o eletrodo ligado ao polo negativo (CC-) é limitada geralmente à transferência globular e na posição plana, pois a gravidade tem um efeito marcante neste tipo de transferência e por isto, tem pouca aplicação prática porque o arco resultante é instável e os respingos produzidos são indesejáveis (Talkington, 1998). Segundo este pesquisador e Costa, 2006, o maior problema inerente à soldagem em CC- é a força catódica repulsiva que atua na extremidade fundida do eletrodo, já que os elétrons são emitidos por ele (FIG. 3.18).

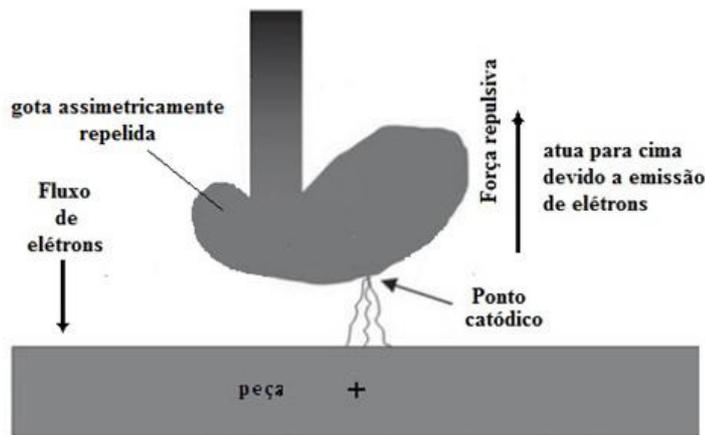


Figura 3.18 – Força repulsiva que atua sobre a gota metálica em corrente contínua e polaridade negativa, (Talkington, 1998).

De acordo com Mulligan (2003), o processo de soldagem GMAW com corrente alternada (GMAW-VP) combina as vantagens da soldagem MIG convencional (eletrodo positivo) com o aumento na taxa de deposição e redução do aporte térmico que ocorre quando o processo é operado com o eletrodo no polo negativo (eletrodo negativo). A FIG.3.19 apresenta as características fundamentais do arco elétrico em ambas as polaridades

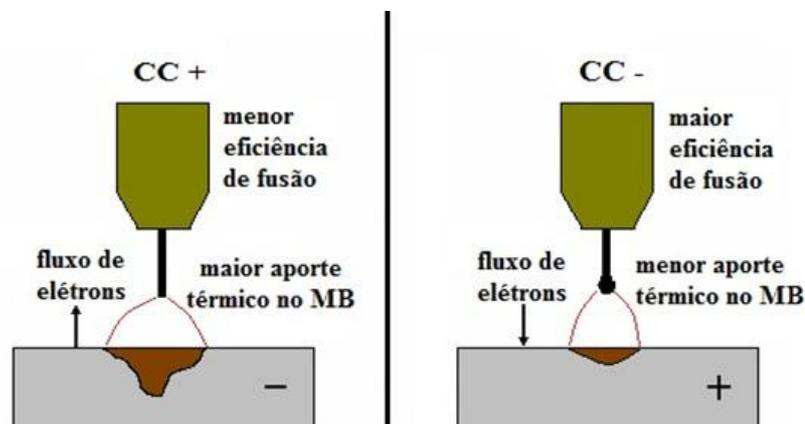


Figura 3.19 – Característica do arco elétrico em corrente contínua e polaridade positiva (CC+) e polaridade negativa (CC-)

A soldagem com polaridade negativa ou combinação de polaridades é usada com sucesso em processos de soldagem que utilizam fluxo, como o processo eletrodo revestido (SMAW), arame tubular (FCAW) e o arco submerso (SAW). Neste caso a adição de elementos ionizantes no revestimento ou no fluxo facilita a abertura e manutenção do arco elétrico em CC- ou CA.

Segundo Mulligan apud Nascimento (2006, pag 2) o processo de soldagem GMAW com corrente alternada (GMAW-VP – Variable Polarity Gas Metal Arc Welding) combina as vantagens da soldagem MIG convencional (eletrodo positivo) com o aumento na taxa de deposição e redução do aporte térmico que ocorre quando o processo é operado com o eletrodo no polo negativo.

Para superar os problemas de reignição do arco na mudança de polaridade em CA (forma de onda senoidal), altos picos de tensão são aplicados para manter a ionização na coluna de arco, o que facilita a reignição. Entretanto, esta elevação da tensão, gera uma preocupação com a segurança do soldador (Talkington, 1998).

Com os avanços da eletrônica os problemas de reignição do arco foram eliminados com a forma de onda retangular, que reduz o tempo que a corrente está no ou próxima do zero permitindo ao processo GMAW-CA uma transferência metálica basicamente globular pulsada onde o tamanho da gota pode ser controlado, e é tipicamente 1,5 a 3 vezes o diâmetro do eletrodo, permitindo soldagem estável em baixo aporte térmico. Em transferência pulsada convencional, o tamanho da gota é tipicamente 0,8 – 1,0 vezes o diâmetro do eletrodo (Mulligan apud Nascimento, 2006).

f) Efeito da indutância

A indutância é uma importante característica dinâmica deste processo e permite regular a taxa de variação da corrente elétrica no decorrer da soldagem, pois possibilita o controle do efeito de constrição (efeito “*pinch*”) do eletrodo durante o aumento da corrente elétrica no instante do curto-circuito. A taxa de variação da corrente deve ser alta o suficiente para causar a transferência da gota e baixa o bastante para minimizar os respingos e melhorar a estabilidade. (KANG, 2003; MIRANDA, 1998).

Acredita-se que o controle da indutância pode minimizar ou maximizar as perturbações geradas no arco, pois atua diretamente na cinética das forças que atuam na transferência. A

maioria das fontes de energia empregada no processo GMAW possui esta regulagem, sendo ela mais relevante com a transferência por curto-circuito (Dobigines, 2008). A FIG. 3.20 ilustra as alterações da corrente com a indutância.

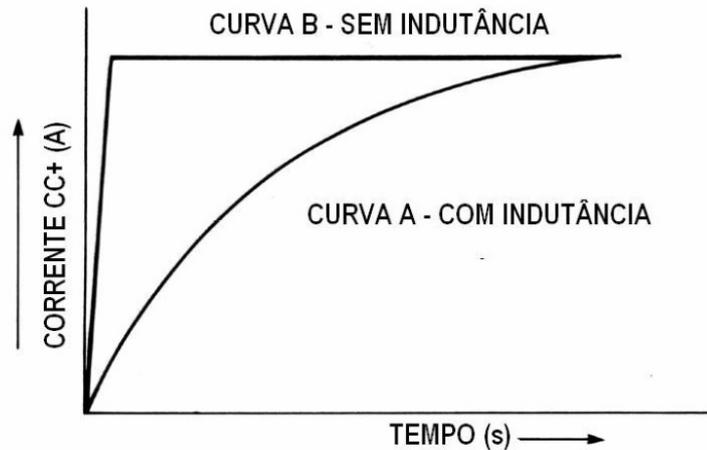


FIGURA 3.20 - Mudança no aumento da corrente devido à indutância (AWS, 1991)

Além disso, a adição de indutância causa na soldagem, um acréscimo na transferência de curto-circuito no tempo de abertura de arco e de curto-circuito, resultando em menos curtos-circuitos por segundo. Uma redução na frequência de curto-circuito (tempo de arco maior) gera mais calor na solda, o que pode alterar o rendimento e as características geométricas da solda (AWS 1991).

Segundo Scotti, *et al* (2008), operacionalmente, o controle da indutância otimiza muito mais do que apenas a redução de respingos. Na verdade homogeneiza termicamente a poça de fusão com maior controle sobre a sua formação, facilitando assim a confecção do passe de raiz e a soldagem de chapas finas ou fora da posição plana.

3.12 - GEOMETRIA DO CORDÃO DE SOLDA

Muitos fatores podem influenciar na geometria do cordão de solda, dentre eles estão os parâmetros de soldagem como: corrente, tensão, velocidade de soldagem, tipo e vazão do gás de proteção, o metal de adição, a espessura e o tipo de junta. A composição química da liga influencia as suas propriedades físicas e químicas e também interfere na interação entre arco e poça de fusão e, conseqüentemente, no formato do cordão. Segundo Campbell (1992), a

presença de enxofre e oxigênio promove a formação de escória que gera instabilidade no arco e maior agitação na poça de fusão. Outra teoria bem aceita se baseia na influência do gradiente de tensões superficiais (causado pela temperatura e concentração de solutos), no sentido do movimento do metal líquido na poça de fusão, fenômeno conhecido como efeito Marangoni (Witz *et al*, 2005). O formato da poça determina, em grande parte, o formato do cordão e a resistência mecânica da solda.

Uma variável importante e que influencia fortemente na solidificação da poça de fusão, por meio da geometria da mesma, é a velocidade de soldagem. Para velocidades de soldagem mais baixas o formato da poça de fusão é elíptico ao passo que para velocidades maiores a poça de fusão passa a ter um formato de gota. Esta mudança no formato da poça de fusão modifica o resultado final da solidificação. A FIG. 3.21 mostra as poças de fusão elíptica e em gota e o conseqüente resultado na estrutura de solidificação. Segundo Davies & Garland (1975) e Solomon (1992), uma poça de fusão em gota aumenta a possibilidade de formação de trinca a quente devido à segregação de soluto no centro do cordão. Além disso, os grãos colunares são menores em uma poça de fusão elíptica, assim o formato da poça em gota deve ser evitado sempre que possível.

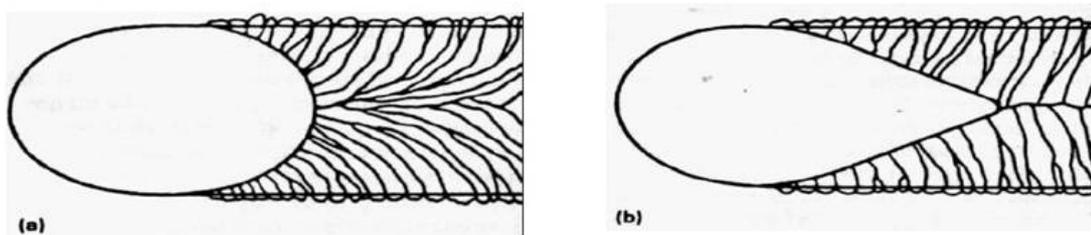


FIGURA 3.21 – Formatos de poça de fusão (a) elíptica e (b) em gota (Solomon, 1992).

3.13 - EFEITOS DAS VARIÁVEIS DE SOLDAGEM NA GEOMETRIA DO CORDÃO DE SOLDA

As FIGs 3.22, 3.23 e 3.24 mostram, de forma qualitativa, a influência da corrente, tensão e velocidade de soldagem na penetração, largura e altura do reforço (FIG. 3.25) do cordão de solda. Pode-se afirmar que a corrente tem uma influência marcante na penetração do cordão (maior corrente → maior penetração) e a tensão na sua largura (maior tensão → cordão mais largo) (Modenesi, 2009). O efeito da corrente no reforço pode ser analisado considerando-se a sua forte influência da velocidade de fusão do arame e, desta forma, na quantidade de material

depositado. Como a tensão tem um efeito menor na velocidade de fusão do arame, mas aumenta significativamente a largura do cordão, o reforço tende a ser reduzido com o aumento da tensão (isto é, a área depositada, A_d , tende a permanecer constante, mas como, a largura aumenta, o reforço fica menor quando a tensão de soldagem é elevada).

A redução da largura e penetração do cordão com a velocidade de soldagem está associada com a diminuição da quantidade de energia fornecida por unidade de comprimento da junta, FIGs. 3.22 e 3.23. A influência no reforço do cordão, ou melhor na área depositada (A_d , FIG. 3.25), está associada com a redução da quantidade de material de adição que é fornecido à solda com o aumento da velocidade de soldagem (v). Um balanço de massa simples (Eq.3.2) mostra que:

$$A_d = \varphi \frac{A_w \cdot f}{v} \quad \text{Eq. 3.2}$$

onde A_w é a área da seção transversal do eletrodo, φ é a eficiência de deposição e f é a velocidade de alimentação. A FIG. 3.26 ilustra a seção transversal de cordões de solda SAW depositados sobre chapas de aço carbono, o efeito da corrente, tensão e velocidade de soldagem no formato do cordão.

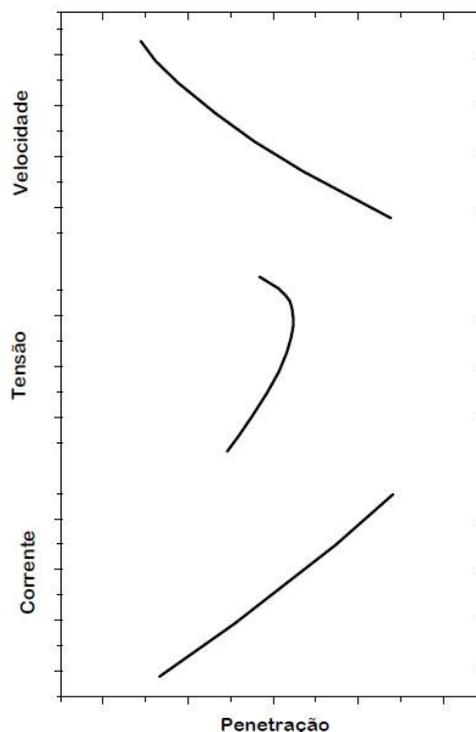


FIGURA 3.22 - Relação entre a penetração e as variáveis primárias de soldagem (esquemática) ABS 1990

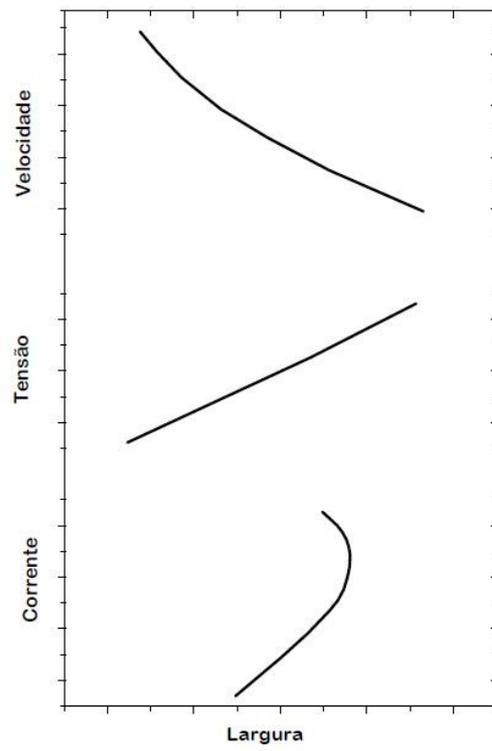


FIGURA 3.23 - Relação entre a largura e as variáveis primárias de soldagem (esquemática) ABS 1990

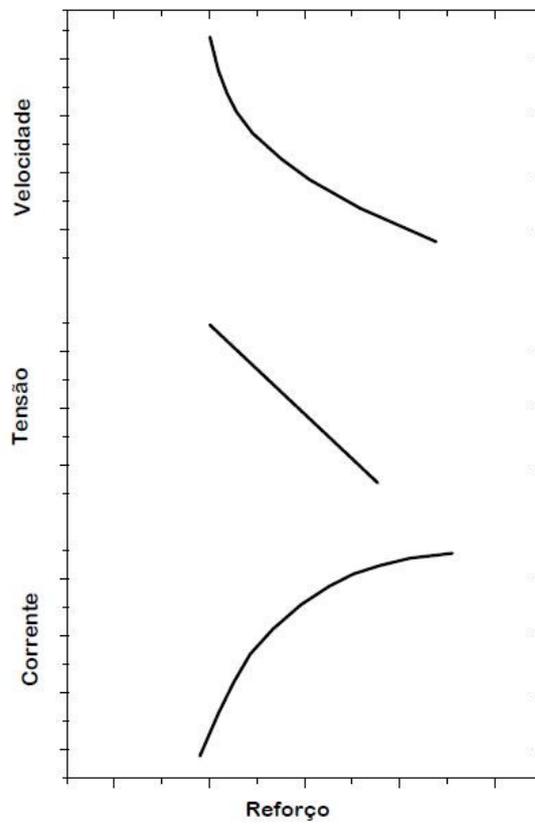


FIGURA 3.24 - Relação entre o reforço do cordão e as variáveis primárias (esquemática) ABS 1990

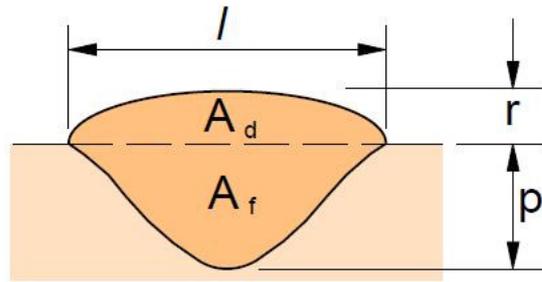


FIGURA 3.25 - Características geométricas de um cordão de solda: p – penetração, r - reforço, l - largura, A_d - área depositada, A_f - área fundida (Modenesi, 2009).

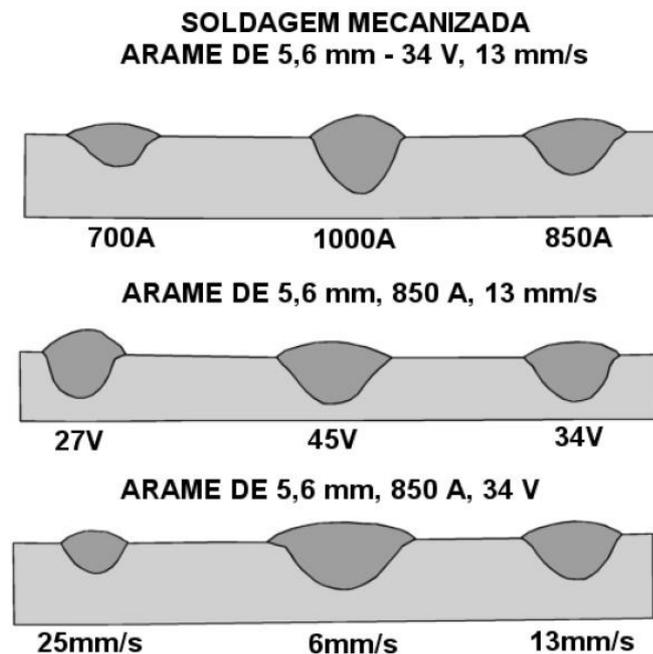


FIGURA 3.26 – Representação da seção transversal de cordões de solda depositados por SAW em chapas de aço carbono mostrando a influência da corrente, tensão e velocidade de soldagem no formato do cordão (adaptado do AWS Welding Handbook Vol. 1)

3.14 – DESCONTINUIDADES EM JUNTAS SOLDADAS

Designa-se como descontinuidade a qualquer interrupção da estrutura típica de uma junta soldada. Neste sentido, pode-se considerar como descontinuidade a falta de homogeneidade nas características físicas, mecânicas ou metalúrgicas do metal de solda.

De acordo com Novais, 2010 as descontinuidades geralmente são geradas por desvio do processo, falha operacional, falhas dos equipamentos ou acessórios. Esses desvios podem

surgir de forma isolada ou combinada, pois os processos de soldagem possuem características diferenciadas, com suas vantagens, aplicabilidade e limitações inerentes a cada um deles.

As discontinuidades podem ser classificadas quanto à origem e a forma. Com relação a sua origem, as discontinuidades podem ser:

- **Geométricas** – São aquelas geradas na etapa de montagem e de soldagem. Os exemplos mais comuns são: a falta de fusão, a falta de penetração, a mordedura, o desalinhamento, a superposição, e a deposição insuficiente.
- **Metalúrgicas** – São aquelas originadas por fenômenos metalúrgicos presentes na poça de fusão como o refino, a desoxidação, a desgaseificação e as transformações de fases no estado sólido, estas tanto na zona fundida (ZF) quanto na zona termicamente afetada (ZTA).

Com relação a sua forma, as discontinuidades podem ser classificadas em:

- **Planas** – São as que apresentam praticamente duas dimensões: é o caso das trincas de solidificação e das trincas introduzidas por hidrogênio, da falta de fusão e penetração. Essas discontinuidades geram uma concentração de tensão muito elevada nas suas extremidades e geralmente devem ser reparadas.
- **Volumétricas** - São as que apresentam três dimensões: poros, inclusões de escória e inclusões de tungstênio, no caso do processo TIG (GTAW). Elas acarretam concentração de tensão bem menor que as discontinuidades planas e, por isso, são menos críticas que aquelas.

3.14.1 - Caracterização das discontinuidades

As discontinuidades podem ser externas, isto é, alcançam a superfície visível da solda, ou podem ser totalmente internas, não sendo, nesse caso detectáveis por inspeção superficial da solda. Podem estar localizadas na Zona Fundida (ZF), na Zona Termicamente Afetada (ZTA), no metal de solda e no metal base. A FIG 3.27 apresenta as regiões encontradas em uma junta soldada.

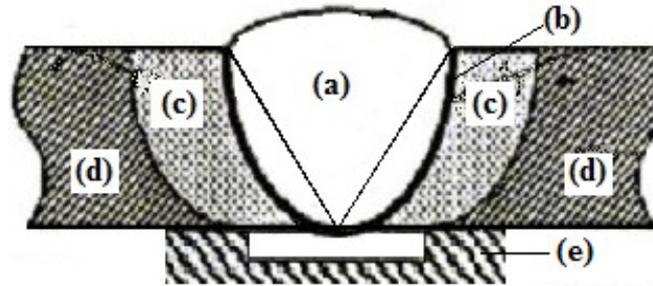


FIGURA 3.27 – Regiões encontradas em uma junta soldada: (a) Zona fundida, (b) Zona de ligação, (c) Zona termicamente afetada, (d) Metal base e (e) Cobre junta (NOVAIS, 2010).

De acordo com Novais, 2010, a correta escolha do processo de soldagem, bem como conhecer e diferenciar as possíveis discontinuidades e a forma de minimizá-las é uma importante ferramenta gerencial no controle de custos, na segurança da estrutura e do pessoal e garantia da qualidade do produto, independentemente do ramo de atividade que a empresa desenvolva na área mecânica.

O foco principal desta pesquisa recai nas discontinuidades geradas com o processo a arco elétrico com proteção gasosa e alimentação contínua do eletrodo (GMAW). A possível causa para estas discontinuidades e como minimizá-las estão descritas nos quadros 1, 2, 3 e 4 a seguir para facilitar a visualização e poder servir de orientação para correção dos problemas.

As principais discontinuidades que podem estar presentes no passe de raiz de uma junta soldada são apresentadas a seguir e identificadas conforme nomenclatura da norma N-1738 da Petrobrás (2003).

- a) Concavidade** - Reentrância na raiz da solda, podendo ser: (a) central, situada ao longo do centro da raiz; (b) lateral, situada nas laterais da raiz (FIG. 3.28).

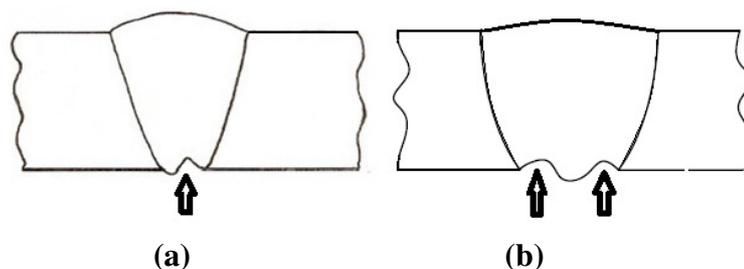


FIGURA 3.28– Concavidade na raiz (a) central e (b) lateral (Petrobras, N 1738).

- b) **Falta de fusão** - Fusão incompleta entre a zona fundida e o metal de base ou entre passes da zona fundida, podendo estar localizada: na zona de ligação, entre os passes ou na raiz da solda FIG. 3.29.

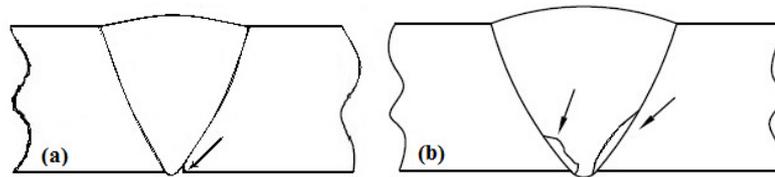


FIGURA 3.29 - Desenho esquemático (a) da Falta de fusão na lateral da raiz e (b) falta de fusão na zona de ligação da raiz (Petrobras, N 1738).

- c) **Falta de penetração** - Insuficiência de metal na raiz da solda FIG. 3.30.

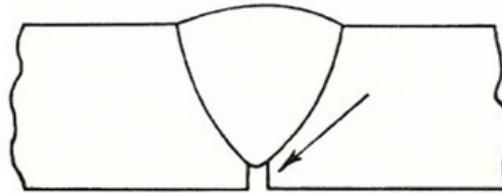


FIGURA 3.30 - Falta de penetração (Petrobras, N 1738).

- d) **Mordedura na raiz** - Depressão sob a forma de entalhe, no metal de base localizada na margem da raiz da solda FIG. 3.31.

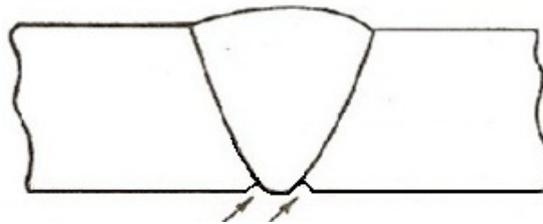


FIGURA 3.31- Mordedura na raiz (Petrobras, N 1738)

- e) **Penetração excessiva** - Metal da zona fundida em excesso na raiz da solda FIG. 3.32.

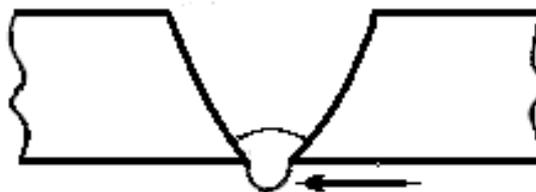


FIGURA 3.32 - Desenho esquemático de uma penetração excessiva na raiz (Petrobras, N 1738)

- f) **Porosidade** - Conjunto de poros causado pela retenção de gases durante a solidificação FIG.3.33.

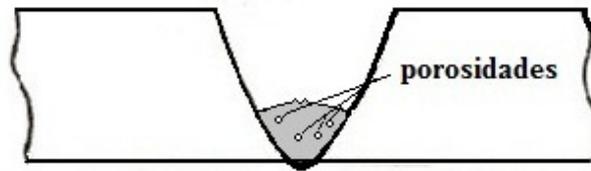


FIGURA 3.33 - Desenho esquemático de porosidade na raiz (Petrobras, N 1738)

- g) **Trinca na raiz** - Trinca que se inicia na raiz da solda, podendo estar localizada: a) na zona fundida e (b) na zona afetada termicamente FIG. 3.34.

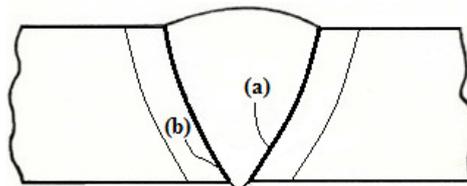


FIGURA 3.34 – Desenho esquemático de trinca na raiz da solda (a) na zona fundida e (b) na zona termicamente afetada (Petrobras, N 1738)

QUADRO 1 - Falta de fusão e falta de penetração: Causas e possíveis soluções (Novais, 2010)

| Causas | Possíveis soluções |
|--|--|
| Parâmetros inadequados de soldagem | <ul style="list-style-type: none"> – Aumentar a tensão e a velocidade de alimentação do arame-eletrodo. – Reduzir a velocidade de soldagem. – Diminuir a distância bico de contato peça. – Reduzir o diâmetro do arame. – Reduzir quando possível a dimensão de cada cordão |
| Arco instável | <ul style="list-style-type: none"> – Mau contato elétrico entre a fonte de energia e o metal base ou a tocha. – Melhorar a limpeza do metal base. – Polaridade incorreta do eletrodo. – Bico de contato desgastado. – Ajustar adequadamente a distância entre o bocal e o metal base. |
| Tocha descentralizada em relação ao chanfro no passe raiz. | <ul style="list-style-type: none"> – Alinhar a tocha com o eixo da solda. – Distribuir o calor uniformemente em ambas às faces do chanfro. |
| Inclinação excessiva da tocha. | <ul style="list-style-type: none"> – Manter a inclinação correta da tocha. |

| QUADRO 1 – Continuação | |
|---|--|
| Causas | Possíveis soluções |
| Dificuldade de acesso à raiz da junta. | <ul style="list-style-type: none"> – Alterar o projeto da junta. – Alterar a sequência de montagem ou soldagem. – Usar se possível, um bocal menor. |
| Ângulo pequeno do chanfro | <ul style="list-style-type: none"> – Aumentar o afastamento da junta. |
| Face da raiz (nariz) muito grande. | <ul style="list-style-type: none"> – Reduzir o “nariz”. – Aumentar ângulo do chanfro. |
| Desalinhamento dos metais base durante a montagem. | <ul style="list-style-type: none"> – Reduzir o desalinhamento na montagem da junta. – Compensar o desalinhamento alterando o ângulo da tocha durante a soldagem. |
| A poça de fusão se adianta em relação ao arco e impede a correta fusão das bodas. | <ul style="list-style-type: none"> – Reduzir a dimensão de cada cordão individual. |
| Velocidade de soldagem inadequada. | <ul style="list-style-type: none"> – Ajustar uma velocidade de soldagem adequada para a situação vigente. |
| Taxa de deposição muito alta na posição vertical descendente. | <ul style="list-style-type: none"> – Diminuir a velocidade de alimentação do arame na posição vertical descendente. |

QUADRO 2 - Mordedura na raiz - Causas e possíveis soluções (Novais, 2010)

| Causas | Possíveis soluções |
|---|--|
| Manipulação inadequada da tocha ou eletrodo: | <ul style="list-style-type: none"> – Distribuir o calor do arco em ambas às faces do chanfro. |
| Tocha descentralizada no chanfro durante a execução do passe de raiz. | <ul style="list-style-type: none"> – Centralizar a tocha corretamente no chanfro. |
| Inclinação excessiva da tocha para o lado. | <ul style="list-style-type: none"> – Corrigir a inclinação da tocha |
| Falta de acesso ao chanfro. | <ul style="list-style-type: none"> – Alterar o projeto da junta – Alterar a sequência de montagem, – Usar um bocal menor. |
| Tensão / Corrente muito alta – tipo de transferência | <ul style="list-style-type: none"> – Ajustar Tensão Corrente – evitar a transferência Globular. |
| Velocidade de soldagem muito alta | <ul style="list-style-type: none"> – Diminuir a velocidade de soldagem. – Ajustar aporte de calor a velocidade de soldagem |

QUADRO 3 - Penetração excessiva - Causas e possíveis soluções (Novais, 2010)

| Causa | Possíveis soluções |
|--|--|
| Excesso de corrente para a combinação eletrodo e gás de proteção. | – Ajustar corretamente a intensidade da corrente e/ou alterar o diâmetro do eletrodo. |
| Face da raiz e afastamento da junta inadequado para a combinação eletrodo e gás de proteção. | – Alterar desenho da junta ou ajustar convenientemente os parâmetros de soldagem durante a operação. |
| Comprimento livre do eletrodo (stickout) inadequado para o afastamento existente. | – Compensar adequadamente o stickout durante a soldagem. |
| Velocidade de soldagem inadequada para os parâmetros de soldagem ajustados. | – Ajustar convenientemente a velocidade de soldagem e ângulo da tocha durante a soldagem. |

QUADRO 4 - Porosidade – causas e possíveis soluções (Novais, 2010)

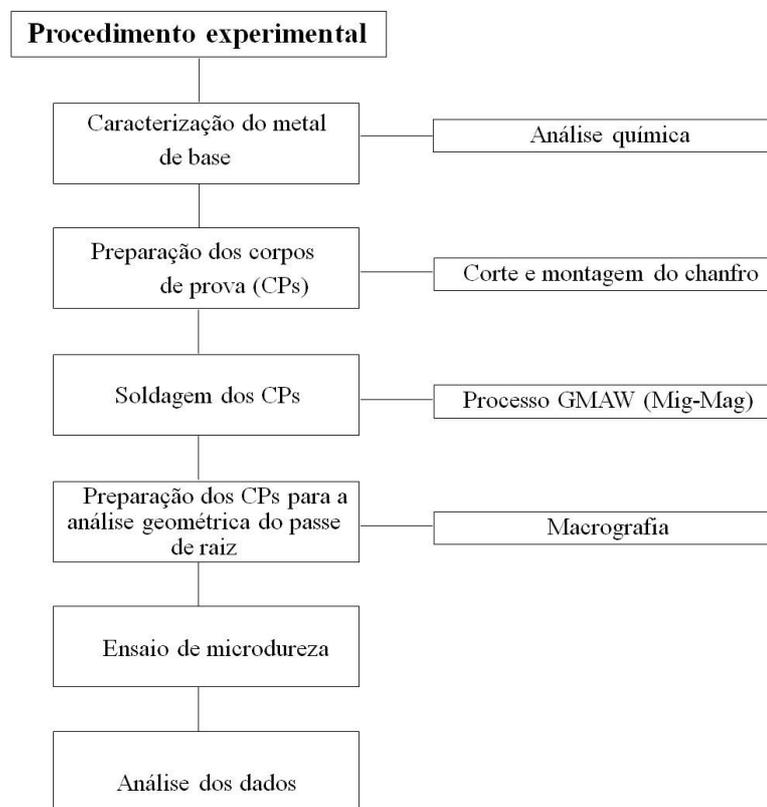
| Causas | Possíveis soluções |
|---|--|
| Pequena vazão do gás de proteção. | – Aumentar a vazão do gás de proteção. |
| Obstrução da saída do gás devido a quantidade de respingo no bocal. | – Limpar o bocal regularmente. |
| Turbulência devido a vazão excessiva do gás de proteção. | – Reduzir a vazão do gás de proteção. |
| Vento no local de soldagem. | – Proteger adequadamente a região de soldagem. |
| Arame-eletrodo oxidado ou sujo. | – Usar apenas arame-eletrodo limpo e seco. |
| Elevada velocidade de soldagem provocando proteção insuficiente. | – Reduzir a velocidade de soldagem. |
| Tocha muito afastada do metal base. | – Aproximar a tocha do metal base e, ao final do cordão, mantê-la sobre a poça de fusão até que solidifique. |
| Ângulo de deslocamento da tocha excessivo | – Diminuir convenientemente o ângulo. |
| Metal base contaminado (oxidação, graxa, óleo ou tinta). | – Aprimorar a limpeza do metal base. |
| Ajuste tensão e corrente inadequados (tensão elevada / corrente baixa). | – Ajustar convenientemente a tensão e a corrente de soldagem. |
| Contaminação do gás de proteção. | – Verificar periodicamente a vedação do sistema de gás de proteção e a qualidade do gás empregado. |
| Classe do arame-eletrodo inadequada para o tipo de gás de proteção empregado. | – Utilizar arame-eletrodo adequado ao tipo de gás empregado na soldagem. |
| Metal base com teor de S > 0,05% ou com alta quantidade de inclusões | – Utilizar metal base com teor de S < 0,05% e com pouca quantidade de inclusões. |

É importante ressaltar que 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 e é em geral caracterizado pela comparação das descontinuidades observadas ou propriedade medida com níveis estabelecidos em um código, projeto ou contrato pertinente. Assim, são considerados defeitos em uma junta soldada aquela que apresenta descontinuidades ou propriedades que não atendam ao exigido pelas normas vigentes. Juntas defeituosas, em geral, precisam ser reparadas ou mesmo substituídas (Modenesi 2001).

4 - METODOLOGIA EXPERIMENTAL

O trabalho experimental, conforme fluxograma mostrado abaixo e desenvolvido nesta pesquisa, foi dividido em seis etapas. A primeira etapa refere-se à caracterização do metal de base. A segunda etapa refere-se à preparação dos chanfros dos corpos-de-prova. A terceira etapa refere-se a soldagem dos corpos-de-prova a quarta etapa refere-se preparação dos corpos de prova para e à realização da análise metalográfica e a quinta refere-se ao ensaio de microdureza e última etapa refere - se a análise dos dados.

Os corpos-de-prova foram separados em 3 grupos sendo que o primeiro grupo foi para alterar a corrente de soldagem, no segundo grupo foi a alteração do DBCP (distância bico de contato peça) e no terceiro grupo foi feita a alteração do ângulo do chanfro. Para o primeiro grupo foram utilizados 7 níveis de corrente, para cada nível de corrente foram feitas 5 réplicas. Para o segundo grupo foram feitos 4 DBCPs diferentes e para cada DBCP foram feitos 3 réplicas. Para o terceiro e último grupo foram considerados 5 ângulos diferentes e para cada ângulo foram feitas 3 réplicas.



Fluxograma experimental da pesquisa

4.1 – CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL

O metal de base utilizado neste trabalho foi o aço ABNT 1020 laminado a quente. Este é um aço de baixo teor de carbono que possui boa resistência mecânica, boa ductilidade e apresenta boa soldabilidade, ou seja, na execução da solda, a fusão do material não causa transformação considerável de sua estrutura cristalina, motivo pelo qual é muito utilizado na indústria mecânica. A composição química especificada para o aço ABNT 1020 está apresentada na TAB. 4.1 (NBR 6006).

Tabela 4.1 – Composição química prevista para aço ABNT 1020

| Elemento | Carbono (C) | Manganês (Mn) | Silício (Si) | Fósforo (P) | Enxofre(S) |
|----------|-------------|---------------|--------------|-------------|------------|
| % min | 0,18 | 0,30 | 0,30 | - | - |
| % max | 0,23 | 0,60 | 0,60 | 0,030 | 0,050 |

Fonte: NBR 6006

4.2 - PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA (Cp)

- Corte da barra

Os corpos de prova para soldagem foram retirados das barras de aço empregando-se o processo oxi-corte mecanizado com o auxílio de um gabarito apoiado no metal de base de modo a garantir o ângulo 60 graus com a caneta de corte (FIG.4.1).



FIGURA 4.1 – Gabarito no metal base para a realização do corte.

Posteriormente ao corte, às faces dos biseis foram esmerilhadas com a utilização de uma esmerilhadeira manual. Durante esta etapa os ângulos dos biseis foram sendo ajustados e verificados com o auxílio de um transferidor simples de resolução de um grau. FIG.4.2.



FIGURA 4.2 – Preparação do bisel com ângulo de 30 graus em relação a perpendicular

- Montagem dos corpos de prova para soldagem

Para a montagem dos corpos de prova de soldagem foram utilizadas duas chapas com o bisel de 30 graus cada uma, chapas estas preparadas conforme descrito no item anterior. Estas duas chapas foram ponteadas nas extremidades com o processo de eletrodo revestido, mantendo-se um afastamento de 0,9 mm, conforme mostra a FIG. 4.3. Este ponteamto foi feito com o objetivo de iniciar e terminar a solda fora da chapa de teste, mantendo assim constante a abertura da raiz durante a soldagem e manuseio. O afastamento de 0,9 mm foi definido na fase dos testes preliminares por ser o que apresentou os melhores resultados de penetração.

Os corpos de prova para a soldagem final ficaram com as dimensões de 12,7 x 80 x 100 mm.

Com o objetivo de melhorar o contato elétrico com o cabo de retorno e garantir o não rompimento do ponteamto durante a soldagem, foi soldado em ambas as extremidades um apêndice com material similar ao metal de base a ser soldado.

De um lado da peça foi colocado um perfil com dimensões de 6,4 x 30 x 140 mm e do outro lado da peça foi colocado um aço trefilado com diâmetro de 4 mm x 20 mm (FIG.4.4).



FIGURA 4.3 – Montagem dos corpos de prova



FIGURA 4.4 – Montagem do apêndice no corpo de prova

Antes de fazer a soldagem, a carepa foi removida da superfície dos corpos de prova com auxílio de uma esmerilhadeira manual. Antes do início da operação de soldagem, o corpo de prova foi limpo com uma escova de aço para a remoção de eventuais contaminantes existentes.

4.3 - DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS DE SOLDAGEM

Em função da não disponibilidade de equipamentos específicos para a determinação precisa do modo de transferência metálica em curto-circuito, uma série de testes preliminares foram efetuados com a utilização dos parâmetros de soldagem da literatura, principalmente os

parâmetros do trabalho de Scotti (2009), com o intuito de se determinar as condições de soldagem deste trabalho tais como: corrente, tensão, velocidade de soldagem, velocidade de alimentação do arame, DBCP (distância bico de contato peça). Esses parâmetros deveriam atender aos requisitos de aspectos do cordão, de penetração e de largura do mesmo.

Após a definição dos parâmetros de soldagem para este trabalho, os mesmos foram verificados através de um programa específico desenvolvido por SANTANA, 2010 (Modelamento Matemático do Processo de Soldagem GMAW) para validar o modo de transferência metálica por curto-circuito (anexo I).

Todos os parâmetros operacionais utilizados nas soldagens deste trabalho estão detalhados na TAB.4.2.

4.4 – SOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA

A FIG. 4.5 mostra a montagem experimental utilizada para a realização dos testes de soldagem. Com a utilização desta montagem foi possível manter constante a velocidade de soldagem e a distância entre bico de contato e a peça de trabalho (DBCP) de acordo com cada grupo de soldagem. As soldas foram realizadas utilizando o processo de soldagem GMAW com a fonte de energia VI 475 da White Martins operando no modo tensão constante e alimentador de arame SWM-23.



FIGURA 4.5 – Montagem experimental utilizada para a realização dos testes de soldagem

TABELA 4.2: Parâmetros operacionais de soldagem

| PARÂMETROS DE SOLDAGEM CONSTANTES PARA TODOS OS TESTES | |
|---|----------------------------------|
| Metal de base | ABNT 1020 |
| Modo de operação | Tensão Constante |
| Velocidade de soldagem | 240 mm/min |
| Gás de proteção | Ar + 25%CO ₂ |
| Tensão em Vazio (média) | 21 V |
| Tensão de Soldagem | 16 V |
| Vazão do gás | 15 l/min |
| Tipo de arame | ER 70S6 |
| Diâmetro do arame | 1,2 mm |
| Afastamento | 0,9 mm |
| PARÂMETROS DE SOLDAGEM NOS TESTES VARIANDO A INTENSIDADE DE CORRENTE | |
| 190 A (3,50 m/min) | DBCP = 16 mm |
| 180 A (3,40 m/min) | |
| 170 A (3,36 m/min) | |
| 160 A (3,27 m/min) | |
| 150 A (2,99 m/min) | |
| 140 A (2,69 m/min) | |
| 120 A (2,32 m/min) | |
| PARÂMETROS DE SOLDAGEM NOS TESTE VARIANDO O ÂNGULO DO CHANFRO | |
| 60 ° | Corrente = 140 A DBCP = 16 mm |
| 58 ° | |
| 56 ° | |
| 54 ° | |
| 52 ° | |
| PARÂMETROS DE SOLDAGEM NOS TESTES VARIANDO O DBCP | |
| 14 mm | Corrente = 140 A |
| 16 mm | |
| 18 mm | |
| 20 mm | |

4.5 - PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA PARA ANÁLISE METALOGRÁFICA

Após a soldagem dos corpos de prova, os cortes das amostras para a análise metalográfica foram realizados através do procedimento usual, isto é, as mesmas foram cortadas com serra

de fita refrigerada conforme mostra a FIG. 4.6. Nesta etapa foram efetuados quatro cortes, dois no sentido longitudinal e dois no sentido transversal ao passe de raiz.

O resultado dessas operações gerou os corpos de prova com dimensões médias de 40 x 22 x 13 mm conforme mostra a FIG 4.7

Posteriormente estes corpos de prova foram lixados com lixas de diferentes granulometrias (#150, #240, #320, #400, #600). O ataque químico na superfície do cordão de solda foi conduzido por imersão no reativo Nital 5%. Os principais equipamentos empregados nos procedimentos descritos anteriormente foram: serra fita e lixadeiras Struers.



FIGURA 4.6 – Corte longitudinal ao passe de raiz efetivado na serra de fita refrigerada

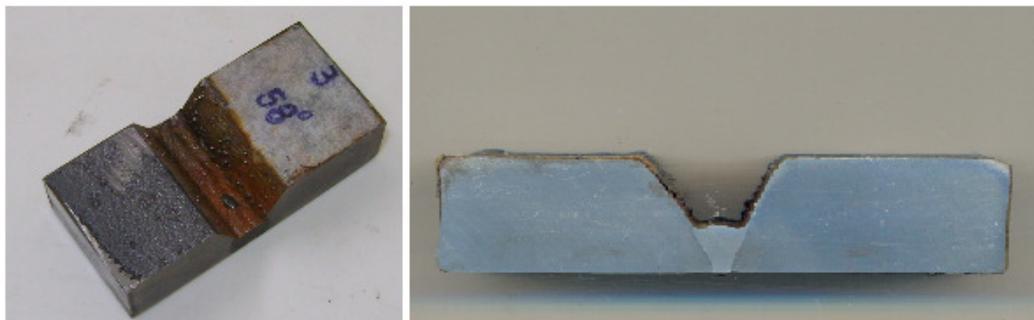


FIGURA 4.7 – Exemplo de corpo de prova gerado após todos os cortes na serra de fita

4.6 - ANÁLISE MACROGRÁFICA DOS CORDÕES DO PASSE DE RAIZ

Após todas as amostras serem escaneadas as imagens geradas foram transferidas ao programa de computador CAD 2010 para as medições das dimensões lineares (altura e largura) dos cordões além da área total depositada. A FIG.4.8 mostra esquematicamente os parâmetros medidos nas amostras com a utilização do CAD.

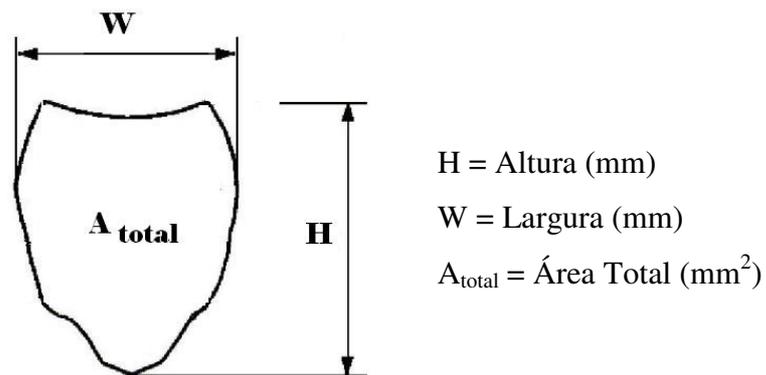


FIGURA 4.8 – Representação esquemática dos parâmetros geométricos considerados para a análise dos cordões de solda

4.7 - ENSAIO DE MICRODUREZA VICKERS

A microdureza Vickers envolve o mesmo procedimento prático que o ensaio Vickers, só que utiliza cargas menores que 1 kgf. A carga pode ter valores tão pequenos como 10g. A dureza Vickers se baseia na resistência que o material oferece à penetração de uma pirâmide de diamante de base quadrada e ângulo entre faces de 136°, sob uma determinada carga. O valor de dureza Vickers (HV) é o quociente da carga aplicada (F) pela área de impressão (A) deixada no corpo ensaiado. Essa relação, expressa em linguagem matemática é $HV = F/A$. A dureza Vickers é representada pelo valor de dureza, seguido do símbolo HV e de um número que indica o valor da carga aplicada. O tempo normal de aplicação da carga varia de 10 a 15 segundos. Quando a duração da aplicação da carga é diferente, indica-se o tempo de aplicação após a carga. Por exemplo, na representação: 440 HV 30/20, o primeiro número indica o valor da dureza, o segundo número indica a carga empregada e o último número indica que a carga foi aplicada por 20 segundos (ASTM E92-82).

Neste trabalho a avaliação da microdureza foi realizada em um corpo de prova para cada condição de soldagem (de 120 à 190 A) feita através do método Vickers utilizando o aparelho Micro Hardness Tester HMV-2 da marca Shimadzu (FIG. 4.9) com carga de 200 g conforme recomenda a norma ASTM E92-82, aplicado na seção transversal da solda em 9 pontos (FIG 4.10a) desde o metal de base até o centro da solda com distância entre medidas de 2,5 mm.

Com estas medidas foi possível obter um perfil de dureza ao longo desta seção transversal. É importante informar que para cada condição de soldagem foram conduzidos no mínimo três testes conforme mostra a FIG 4.10b.



FIGURA 4.9 – Aparelho utilizado para medição da microdureza



FIGURA 4.10– (a) Sequência dos pontos no cp(3)f1_140A para o teste de microdureza Vickers. (b) indentação gerada no referido corpo de prova

5 - RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados os resultados, análises e conclusões dos testes de soldagem realizados neste trabalho.

5.1 – RESULTADO DA COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO METAL DE BASE

A análise da composição química do material utilizado para a realização dos testes deste trabalho mostrou que ele está de acordo com referência técnica (TAB. 4.1). Os valores reais apresentados na TAB 5.1 são valores aceitáveis considerando os desvios-padrão por estarem próximos ao valor estabelecido na norma.

Tabela 5.1 – Composição química real aço ABNT 1020 utilizado neste trabalho

| Elemento | Carbono (C) | Manganês(Mn) | Silício(Si) | Fósforo (P) | Enxofre(S) |
|----------|-------------|--------------|-------------|-------------|------------|
| % real | 0,15 | 0,60 | 0,16 | 0,012 | 0,042 |

5.2 – RESULTADOS DOS TESTES DE SOLDAGEM

5.2.1 - Aspecto do cordão

Após a soldagem, todos os corpos de prova foram avaliados visualmente quanto à existência de descontinuidades no passe de raiz segundo a norma N-1738 da Petrobrás. As descontinuidades foram identificadas e quantificadas dimensionalmente, conforme o grupo a que pertencem (variação da intensidade da corrente, variação da DBCP e variação do ângulo do chanfro).

Foram identificadas após a inspeção visual as seguintes descontinuidades: falta de penetração, falta de fusão e penetração excessiva. Para simplificação do levantamento estatístico das descontinuidades encontradas nos corpos de prova, objeto do presente estudo, a falta de fusão foi computada como falta de penetração em uma das extremidades do passe de raiz. A penetração excessiva foi considerada uma penetração completa. Os dados obtidos estão apresentados na TAB. 5.2

TABELA 5.2 – Falta de penetração por grupo de estudo.

| Grupo | Corrente (Amperes) | Falta de penetração em 500 mm de comprimento | % |
|--|---------------------------|---|----------|
| Variação da intensidade da corrente (16 V) | 190 | 35 mm | 7 |
| | 180 | 285 mm | 57 |
| | 170 | 208 mm | 42 |
| | 160 | 120 mm | 24 |
| | 150 | 39 mm | 8 |
| | 140 | 40 mm | 8 |
| | 120 | 183 mm | 37 |
| Variação da DBCP (140 A e 16 V) | DBCP (mm) | Falta de penetração em 300 mm de comprimento | % |
| | 14 | 00 mm | 0 |
| | 16 | 40 mm | 13 |
| | 18 | 140 mm | 47 |
| | 20 | 29 mm | 10 |
| Variação do ângulo do chanfro (140 A e 16 V) | Ângulo (graus) | Falta de penetração em 300 mm de comprimento | % |
| | 60 | 25 mm | 8 |
| | 58 | 240 mm | 80 |
| | 56 | 175 mm | 58 |
| | 54 | 275 mm | 92 |
| | 52 | 262 mm | 87 |

As FIGs. 5.1 à 5.7 mostram os aspectos dos cordões e do passe de raiz para cada uma das condições de soldagem apresentadas na TAB 4.2.

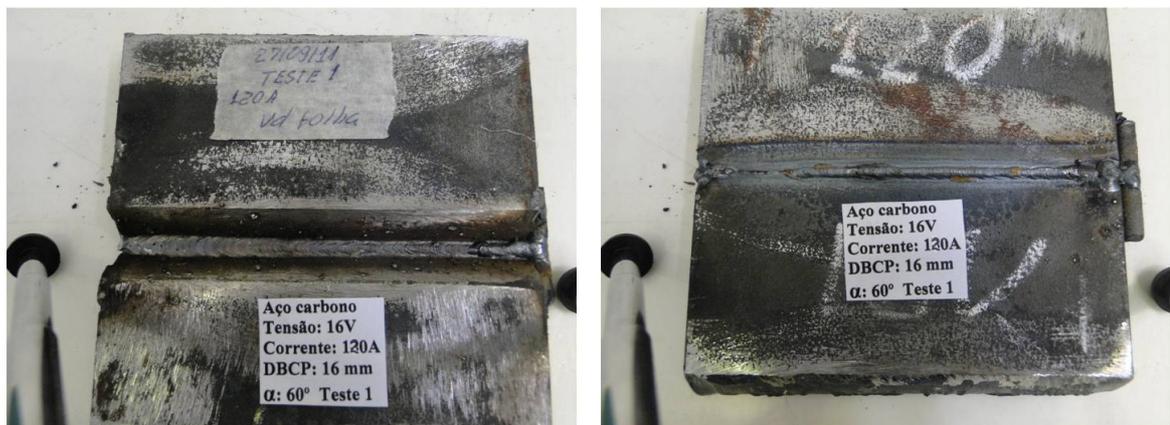


FIGURA 5.1 – Aparência do cordão de solda para a condição de soldagem: 120 A, 16V, DBCP de 16 mm, ângulo de soldagem 60°

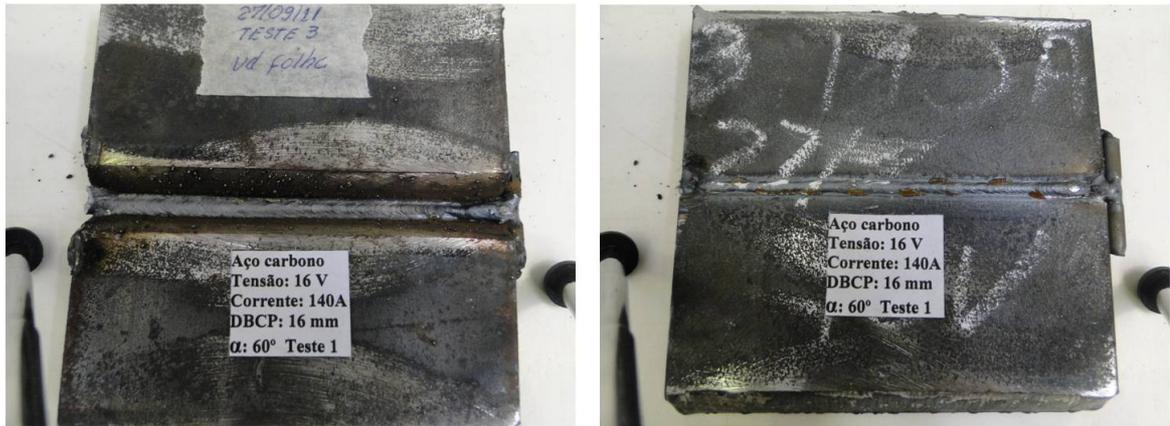


FIGURA 5.2 – Aparência do cordão de solda para a condição de soldagem: 140 A, 16V, DBCP de 16 mm, ângulo de soldagem 60°



FIGURA 5.3 – Aparência do cordão de solda para a condição de soldagem: 150 A, 16V, DBCP de 16 mm, ângulo de soldagem 60°

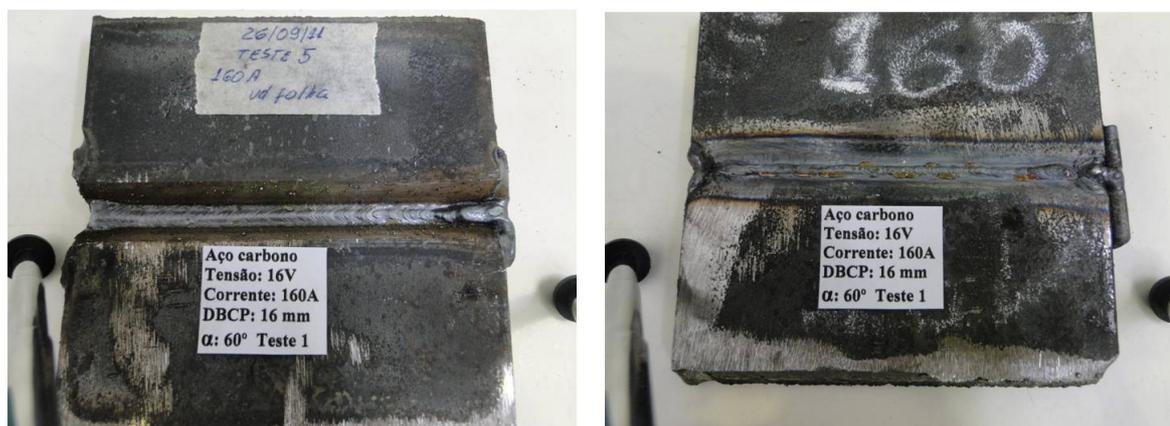


FIGURA 5.4 – Aparência do cordão de solda para a condição de soldagem: 160 A, 16V, DBCP de 16 mm, ângulo de soldagem 60°

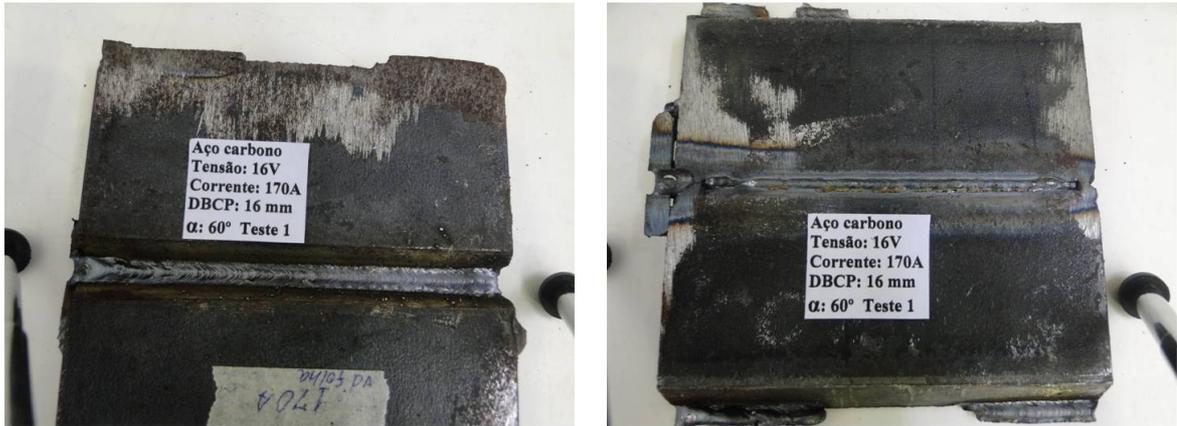


FIGURA 5.5 – Aparência do cordão de solda para a condição de soldagem: 170 A, 16V, DBCP de 16 mm, ângulo de soldagem 60°

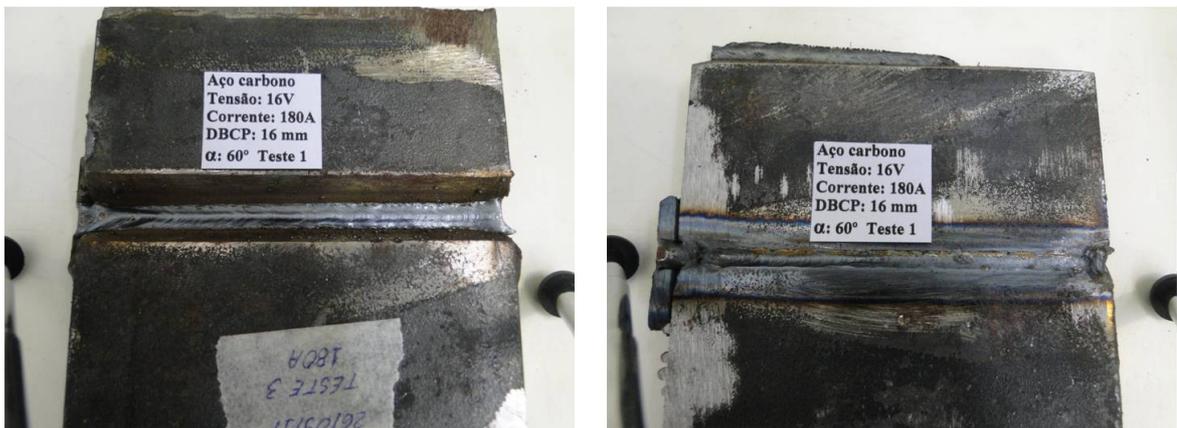


FIGURA 5.6 – Aparência do cordão de solda para a condição de soldagem: 180 A, 16V, DBCP de 16 mm, ângulo de soldagem 60°



FIGURA 5.7 – Aparência do cordão de solda para a condição de soldagem: 190 A, 16V, DBCP de 16 mm, ângulo de soldagem 60°

Após a análise visual dos cordões das FIGs. 5.1 à 5.7 as mesmas foram cortadas e preparadas conforme é mostrado na FIG. 5.8 para que fosse feito as análises metalográficas do perfil do cordão de passe de raiz.

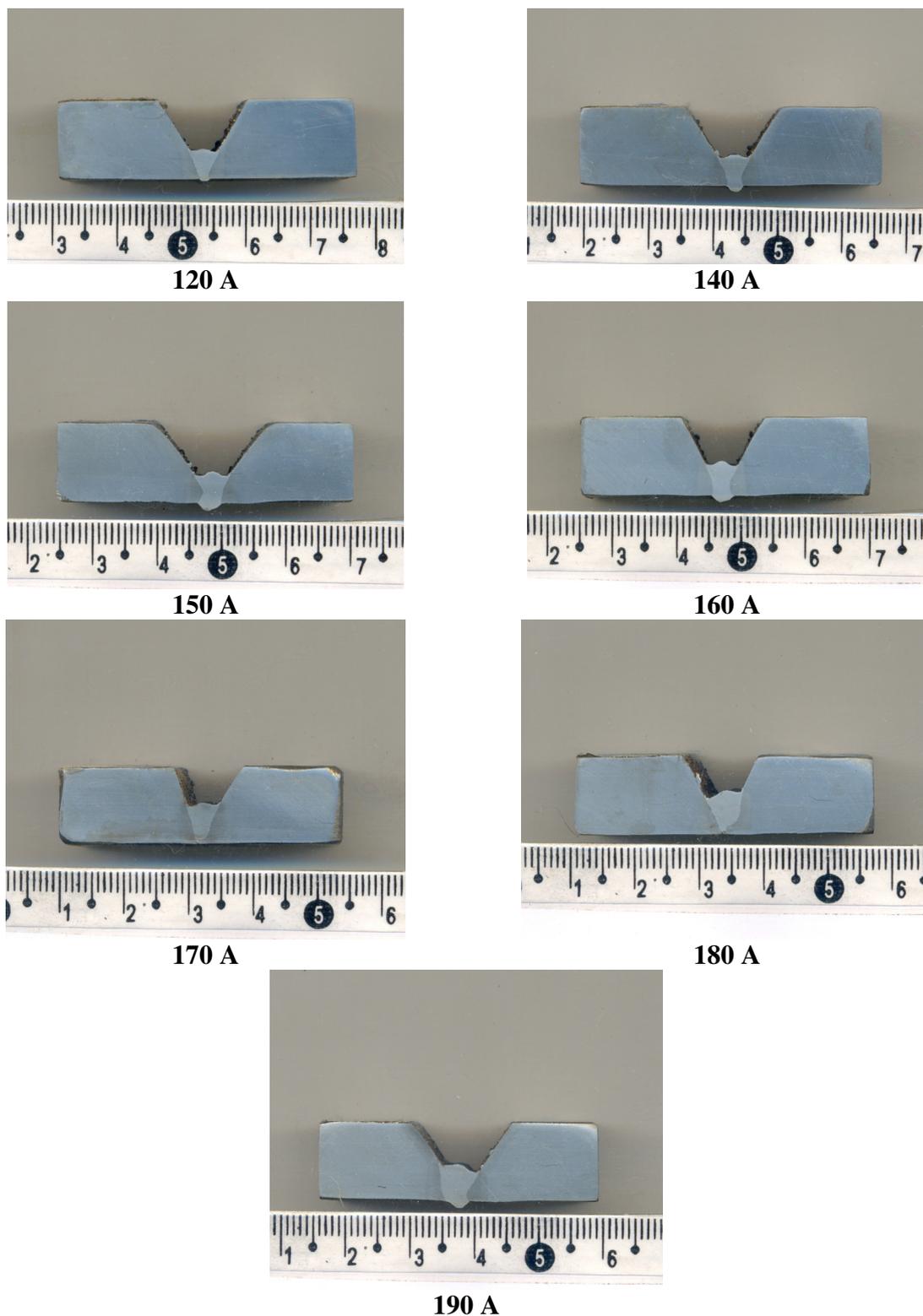


FIGURA 5.8 – Aparência do perfil de solda para cada corrente de soldagem com tensão de 16V, DBCP de 16 mm e ângulo de soldagem 60°

Em função dos resultados metalográficos de todos os testes apresentados neste trabalho ficou definido que os testes feitos com os parâmetros de soldagem (corrente de 140 A, ângulo de 60 graus, DBCP de 16 mm e velocidade de soldagem de 240 mm/min) apresentaram os cordões de melhor aparência. O que confirma a análise estatística apresentada na TAB.5.2.

A partir deste resultado foram feitos novos testes com a corrente de 140 A, porém alterando o ângulo de soldagem e a distância bico de contato peça com o objetivo de verificar a influência destes parâmetros no formato do cordão.

5.2.2 - Análise da influência da intensidade da corrente, DBCP e ângulo do chanfro sobre os parâmetros de soldagem do passe de raiz.

Os parâmetros de soldagem para as análises que serão apresentadas neste item foram: tensão de soldagem de 16 V, distância bico de contato peça (DBCP) de 16 mm e ângulo do chanfro de 60°. O anexo II registra os parâmetros geométricos (largura, altura e área depositada) de todos os corpos de prova.

a) Influência da corrente de soldagem na largura, altura e área depositada do cordão do passe de raiz.

Da análise dos gráficos mostrados nas FIG. 5.9, 5.10 e 5.11 que registram as alterações da largura, altura e a área depositada em função da mudança da intensidade da corrente de soldagem, respectivamente, comprova-se o que foi comentado no item 3.11b. Como era esperado confirmou-se que à medida que se aumenta a intensidade de corrente há um aumento na largura, altura e área depositada no cordão. Este efeito se dá em função do aumento do aporte térmico que é transferido para o metal base, bem como aumento na taxa de fusão do eletrodo que repercute diretamente na taxa de deposição final, em função da maior quantidade de metal fundido transferido à junta soldada.

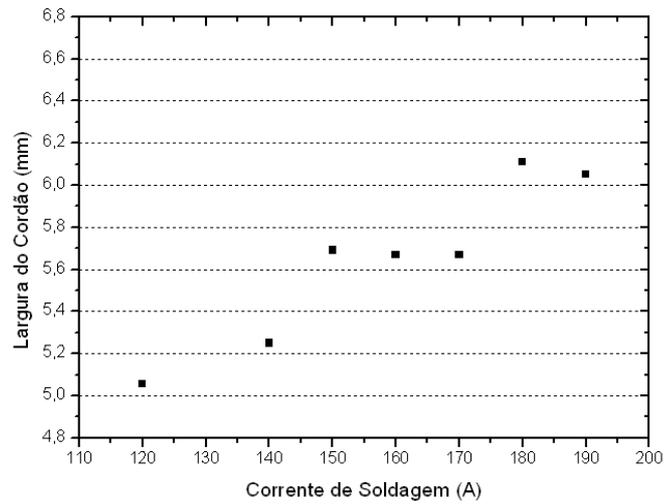


FIGURA 5.9 – Influência da corrente de soldagem na largura do cordão do passe de raiz

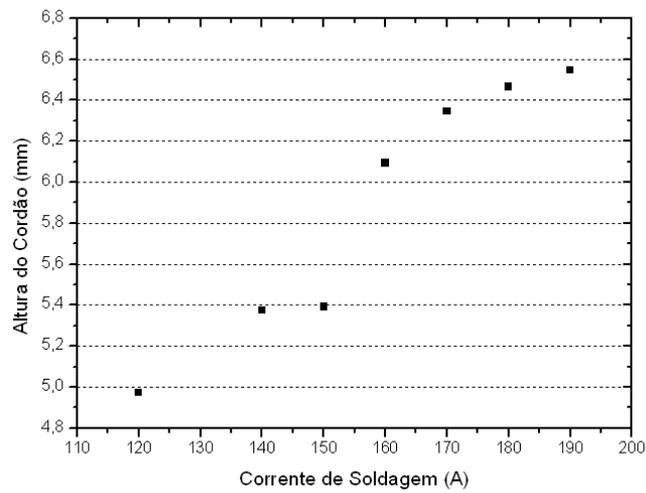


FIGURA 5.10 – Influência da corrente de soldagem na altura do cordão do passe de raiz

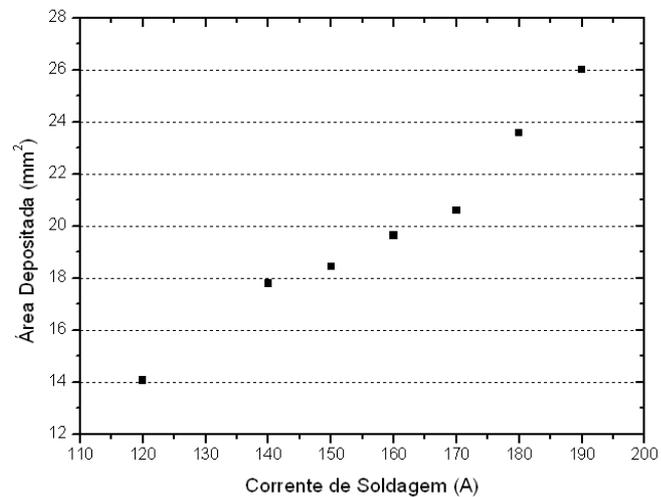


FIGURA 5.11 – Influência da corrente de soldagem na área do cordão do passe de raiz

b) Influência da distância bico de contato peça (DBCP) na largura, altura e área depositada do cordão do passe de raiz.

Ao se reportar ao item 3.11d e FIG. 3.17 que se refere aos efeitos da DBCP no processo GMAW bem como os gráficos apresentados nas FIG. 5.12 (largura), 5.13 (altura) e 5.14 (área depositada), verifica-se de modo geral que o experimento comprovou que ao se manter constante as condições de tensão do arco (16 V), intensidade da corrente do arco (140 A) e a velocidade de soldagem (240 mm/min), com a menor DBCP (14 mm) usada no experimento, têm-se um menor stickout e, conseqüentemente, um menor pré- aquecimento do mesmo por efeito Joule (menor resistência elétrica oferecida por ele). Conseqüentemente há uma redução na taxa de fusão e na taxa de deposição do eletrodo. No cordão de solda esta situação, de maneira geral, implica para uma menor largura, altura e área depositada. Mantido este raciocínio para os demais DBCPs (16, 18 e 20 mm), têm-se para cada um deles, respectivamente, valores maiores para os referidos parâmetros geométricos da solda, pois ao aumentar o DBCP aumenta-se o calor gerado nessa resistência elétrica adicional o que leva a um aumento proporcional, dentro de certos limites, da taxa de fusão do eletrodo e da taxa de deposição.

A TAB. 6.1 apresenta o resumo dos resultados encontrados das análises dos parâmetros geométricos com a variação da DBCP. Pode-se verificar com a análise, que a faixa de DBCPs utilizada neste trabalho não alterou substancialmente os valores da largura dos cordões, mas sugere que o aumento ou diminuição deste parâmetro gera variações proporcionais na altura e na área depositada no cordão. Acredita-se que essa variação seja em virtude do aumento ou diminuição do comprimento livre do eletrodo (stickout) que funciona como uma resistência elétrica adicional ao circuito de soldagem (itens 3.11b e 3.11d).

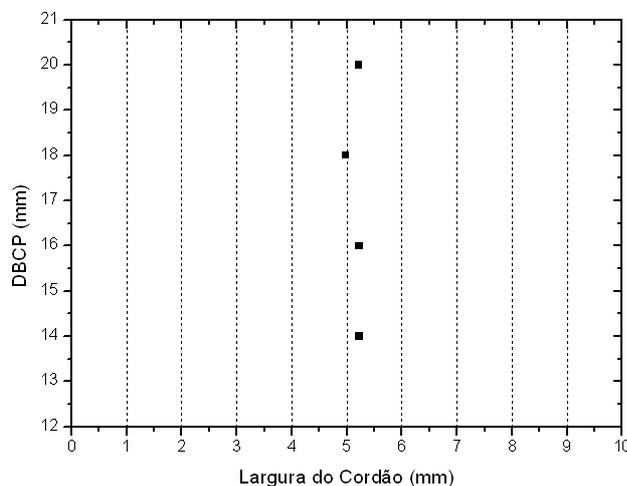


FIGURA 5.12 – Influência da DBCP na largura do cordão do passe de raiz

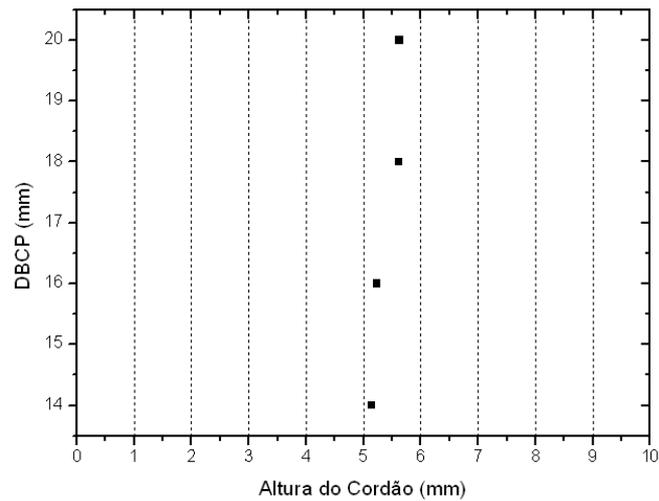


FIGURA 5.13 – Influência da DBCP na altura do cordão do passe de raiz

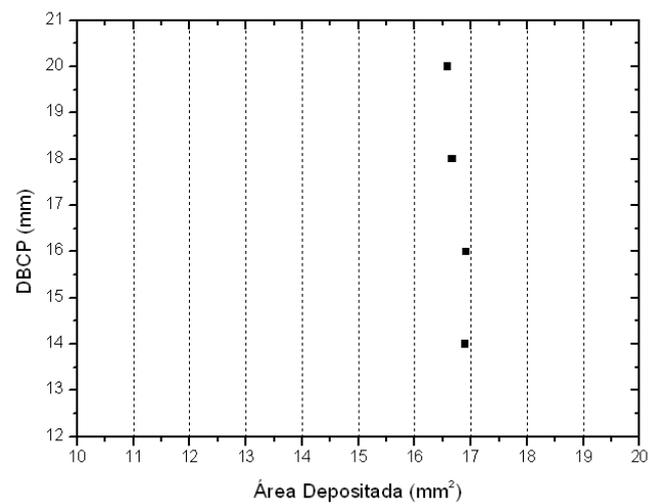


FIGURA 5.14 – Influência da DBCP na área depositada do passe de raiz

TABELA 6.1 - Resumo dos parâmetros geométricos com a variação da DBCP.

| DBCP (mm) | Largura (mm) | Altura (mm) | Área depositada (mm ²) |
|-----------|--------------|-------------|------------------------------------|
| 14 | 5,2 | 5,1 | 17,0 |
| 16 | 5,2 | 5,2 | 16,9 |
| 18 | 5,0 | 5,6 | 16,7 |
| 20 | 5,2 | 5,6 | 16,1 |

c) **Influência do ângulo do chanfro na largura, altura e área depositada do cordão do passe de raiz.**

Ao analisar os gráficos que registram as alterações da largura do passe de raiz em função ao ângulo do chanfro (FIG. 5.15), fica evidente que ocorreram modificações expressivas na largura do cordão, pois a mesma variou 0,4 mm (4,9 a 5,3) em um intervalo de 8° (60 a 52°).

Mantidos os parâmetros de soldagem constantes (tensão, corrente, velocidade de soldagem e DBCP), era de se esperar que com a redução do ângulo do chanfro ocorresse uma redução na largura do cordão, o que efetivamente aconteceu como pode ser observado na FIG.5.15 e no Apêndice 3, pois o valor da largura do cordão para 60° foi de 5,3 mm e o de 52° foi de 4,9 mm. Entretanto, para os valores intermediários (58, 56 e 54°) não ocorreram decréscimos proporcionais na largura do cordão.

Em relação à altura do cordão do passe de raiz, ao analisar os valores apresentados na FIG. 5.16, nota-se que ocorreu variação ainda maior do que aquela verificada na largura do cordão. Os dados registram uma variação de 0,8 mm (5,4 para 4,6 mm) no mesmo intervalo de 8° (60 a 52°). Era de se esperar que com a redução do ângulo do chanfro reduzisse também a altura do cordão, o que efetivamente aconteceu como pode ser observado na FIG.5.16 e no Apêndice 3, pois o valor da altura do cordão para 60° foi de 5,3 mm e o de 52° foi de 5,0 mm. Entretanto, para os valores intermediários (58, 56 e 54°) também não ocorreram decréscimos proporcionais na largura do cordão do passe de raiz.

Em relação à área depositada do passe de raiz, ao analisar os valores apresentados na FIG.5.17, nota-se que ocorreu uma variação de 3,7 mm² (16,9 para 13,2 mm²) no mesmo intervalo de 8° (60 a 52°). Era de se esperar que com a redução do ângulo do chanfro ocorresse também redução proporcional da área depositada o que de fato aconteceu como pode ser observado na FIG.5.17 e no apêndice 3, pois o valor da área depositada do cordão para o ângulo de 60° foi de 16,9 mm² e o de 52° foi de 13,2 mm². Todavia, para os valores intermediários (58, 56 e 54°) também não ocorreram decréscimos proporcionais na área depositada do cordão do passe de raiz.

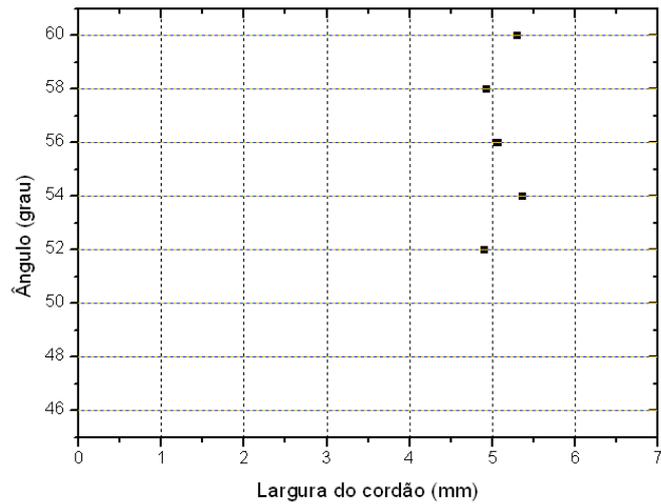


FIGURA 5.15 – Influência do ângulo do chanfro na largura do cordão do passe de raiz

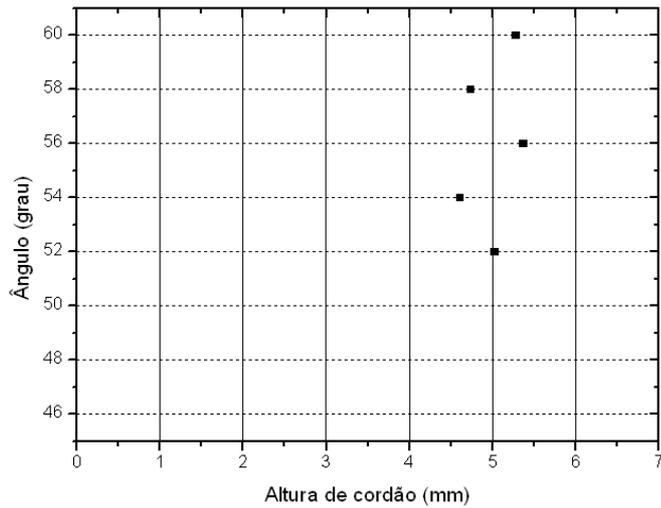


FIGURA 5.16 – Influência do ângulo do chanfro na altura do cordão do passe de raiz

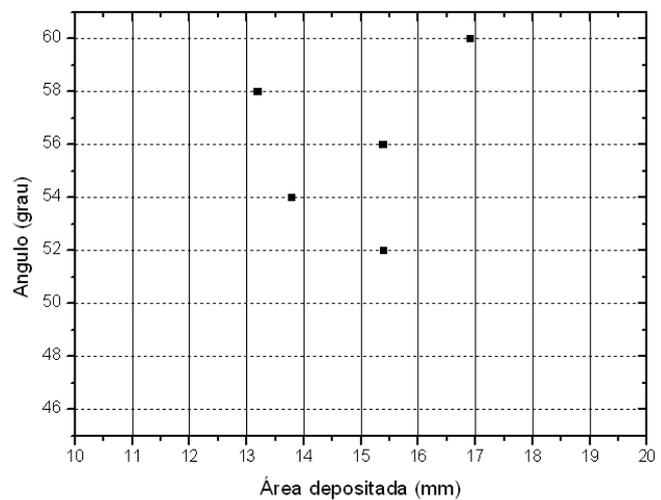


FIGURA 5.17 – Influência do ângulo do chanfro na área depositada do passe de raiz

A TAB. 6.2 apresenta o resumo dos resultados encontrados das análises dos parâmetros geométricos com a variação do ângulo do chanfro.

TABELA 6.2 – Resumo dos parâmetros geométricos com a variação do ângulo do chanfro.

| Ângulo (graus) | Largura (mm) | Altura (mm) | Área depositada (mm ²) |
|----------------|--------------|-------------|------------------------------------|
| 60 | 5,3 | 5,3 | 16,9 |
| 58 | 4,9 | 4,7 | 13,2 |
| 56 | 5,1 | 5,4 | 15,4 |
| 54 | 5,4 | 4,6 | 13,8 |
| 52 | 4,9 | 5,0 | 15,4 |

5.3 – RESULTADOS DO TESTE DE MICRODUREZA

Os testes de microdureza foram realizados conforme descrito no item 4.7. Os resultados apresentados no metal de base como recebido estão registrados no gráfico da figura 5.18.

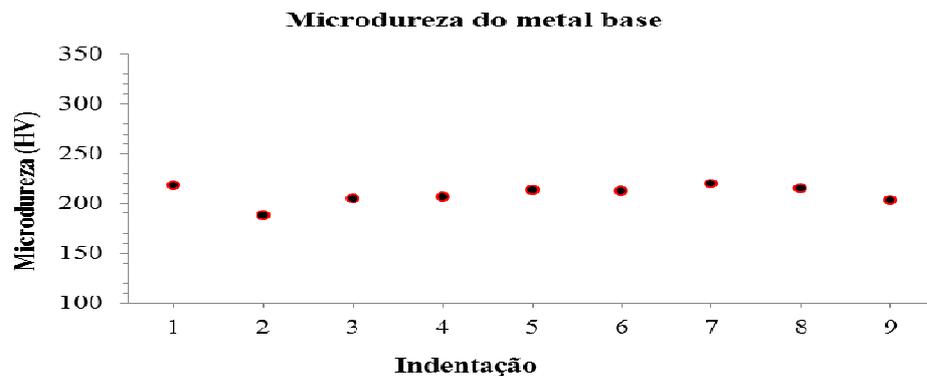


Figura 5.18 – Distribuição da microdureza no metal de base

No metal de base o valor médio da microdureza foi de 209 HV conforme pode ser verificado no anexo III. Os resultados da microdureza dos corpos de prova soldados nos quais se alterou somente a intensidade da corrente estão apresentados nas FIGs, 5.19, 5.20, 5.21, 5.22, 5.23, 5.24 e 5.25.

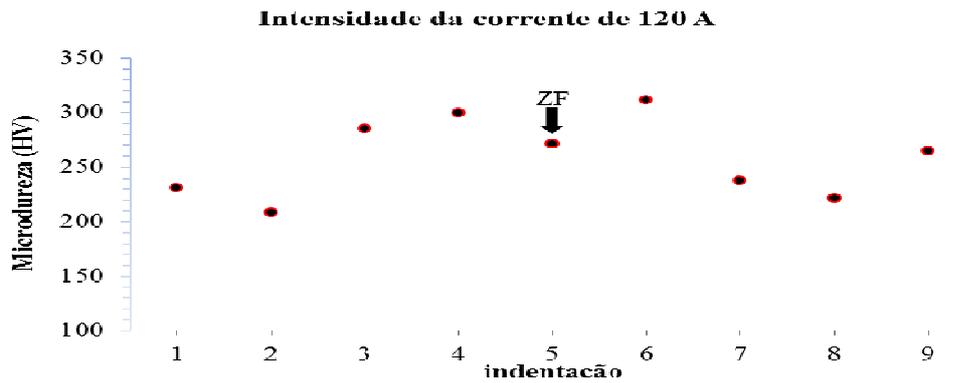


Figura 5.19 – Distribuição da microdureza no corpo de prova com intensidade de corrente de 120 A.

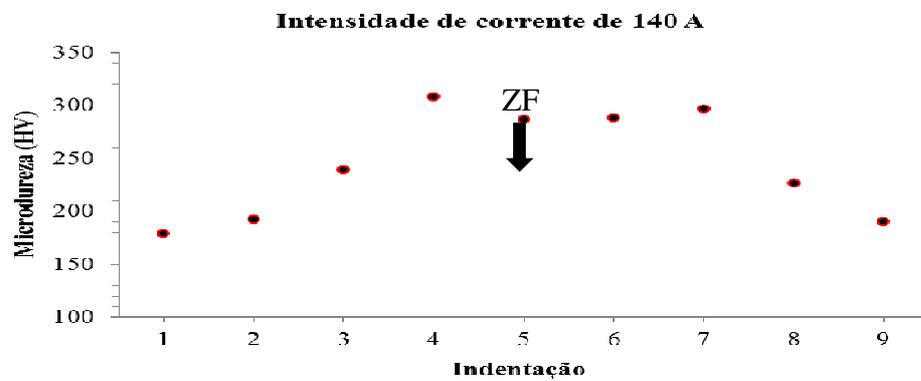


Figura 5.20 – Distribuição da microdureza no corpo de prova com intensidade de corrente de 140 A.

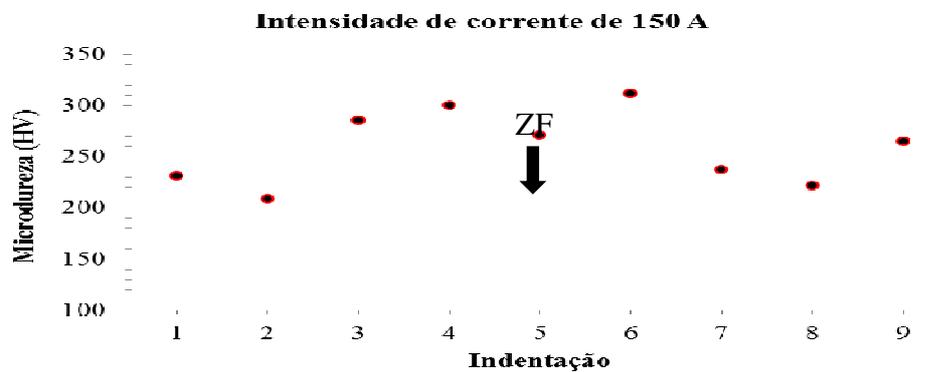


Figura 5.21 – Distribuição da microdureza no corpo de prova com intensidade de corrente de 150 A.

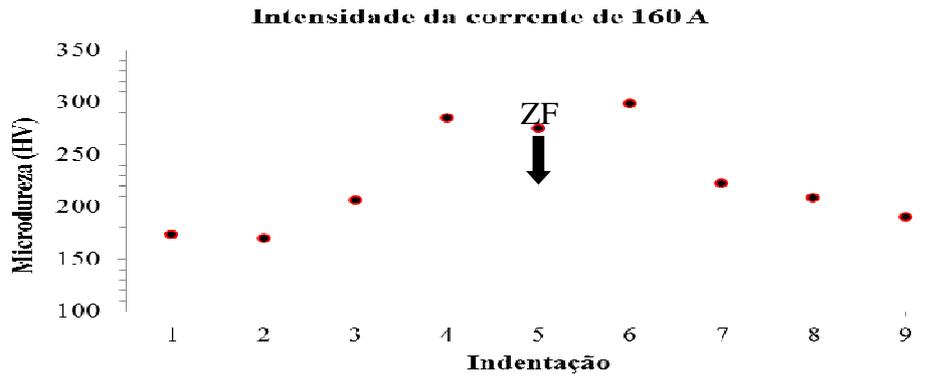


Figura 5.22 – Distribuição da microdureza no corpo de prova com intensidade de corrente de 160 A.

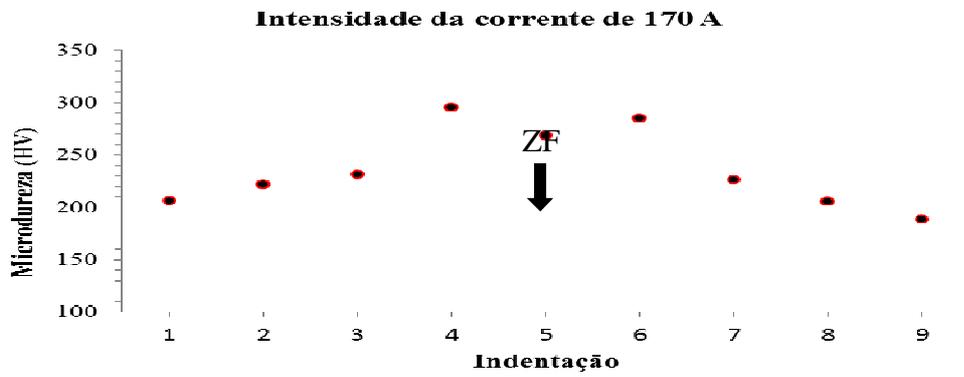


Figura 5.23 – Distribuição da microdureza no corpo de prova com intensidade de corrente de 170 A.

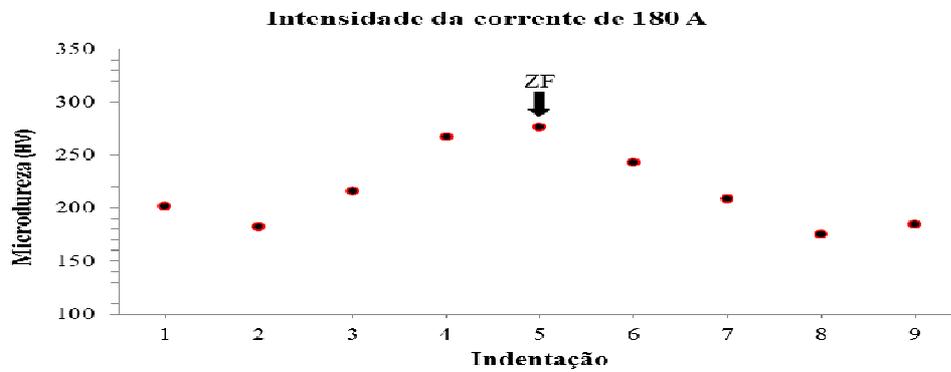


Figura 5.24 – Distribuição da microdureza no corpo de prova com intensidade de corrente de 180 A.

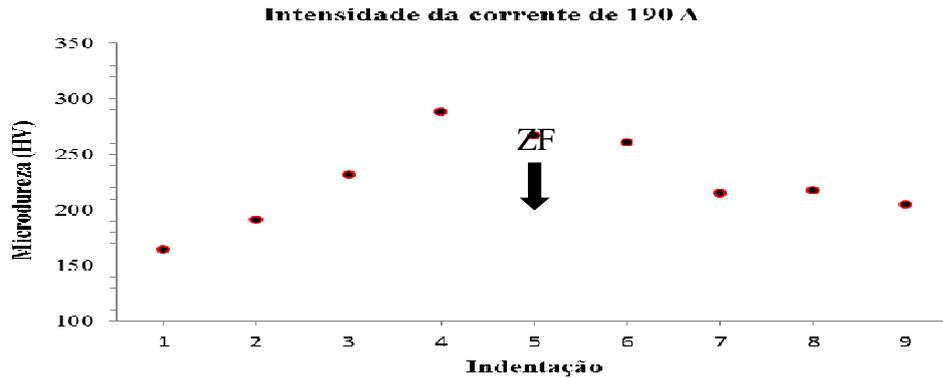


Figura 5.25 – Distribuição da microdureza no corpo de prova com intensidade de corrente de 190 A.

De maneira geral o valor da microdureza na zona fundida dos corpos de prova (ponto 5 - ZF) se apresenta menor que aqueles medidos na zona termicamente afetada pelo calor (pontos 4 e 6) e os demais pontos, tanto a esquerda (pontos 1, 2 e 3) quanto a direita (pontos 7, 8 e 9) os valores vão decrescendo de maneira gradual e contínua, o que já era esperado pelo baixo teor de carbono do metal de base.

O anexo IV apresenta o registro de todas as medidas de microdureza obtidas nos corpos de prova que sofreram alteração na intensidade da corrente de soldagem. O perfil médio da microdureza está registrado na FIG. 5.26 e o valor médio da microdureza das amostras foi de 238 HV.

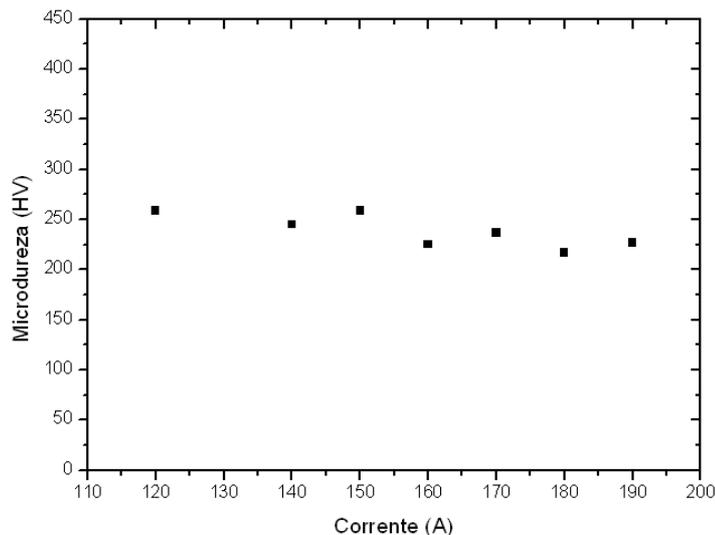


FIGURA 5.26 – Microdureza média dos corpos de prova com alteração da intensidade da corrente de soldagem

Considerando: (1) a sequência e localização dos pontos para obtenção da microdureza nos corpos de prova (FIG. 4.10a); (2) os valores apresentados na medição da microdureza do metal de base; (3) a média global de microdureza dos corpos de prova que sofreram alteração da intensidade da corrente de soldagem foi de 238 HV (FIG. 5.26), muito próxima da microdureza média do metal de base de 209 HV; (4) que o metal de base é um aço de baixo teor de carbono e apresenta boa ductilidade e soldabilidade; e (5) o pequeno aporte térmico calculado que variou de 360 J/mm (120 A) a 570 J/mm), pode-se concluir que durante o processamento, não devem ter ocorrido alterações estruturais relevantes que modificassem as propriedades mecânicas dos corpos de prova soldados.

6 - CONCLUSÕES

De acordo com os parâmetros de soldagem avaliados neste trabalho (distância bico de contato e peça de trabalho - DBCP, intensidade da corrente de soldagem e ângulo do chanfro) e considerando os resultados obtidos, pode-se concluir que:

- Após análise visual e dimensional dos corpos de prova soldados, os resultados sugerem que o processo GMAW convencional (fonte de tensão constante) e no modo de execução mecanizado, pode ser empregado para a realização do passe de raiz na posição plana.
- Conforme mencionado na literatura, os estudos feitos neste trabalho também mostraram que processo GMAW convencional é mais sensível às variações dos parâmetros de soldagem previamente estabelecidos, principalmente quanto se trata da intensidade da corrente no arco.
- O cordão do passe de raiz feito com o processo GMAW convencional (fonte de tensão constante) e no modo de execução mecanizado apresenta excelente acabamento superficial, além de penetração adequada tanto nas laterais do chanfro quanto na penetração propriamente dita.
- Os parâmetros geométricos do cordão de solda (largura altura e área depositada) são bastante influenciados pela intensidade da corrente de soldagem.
- A faixa das distâncias bico de contato peça de trabalho (DBCP) utilizadas neste trabalho não evidenciou alteração de forma substancial nos parâmetros geométricos do cordão de solda, mas pode-se observar que o aumento ou diminuição do DBCP gera variações proporcionais na altura e área depositada no cordão do passe de raiz.
- As alterações no ângulo do chanfro afetam fortemente os valores dos parâmetros geométricos do cordão do passe de raiz.
- Os resultados do ensaio de microdureza da zona fundida (ZF) não apresentaram alterações significativas com relação à microdureza do metal de base. Acredita-se que este comportamento se deve pelo fato do aço 1020 ter boa soldabilidade isto é, os constituintes microestruturais do metal de solda do passe de raiz são semelhantes aos constituintes do metal de base.

7 - SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Fazer testes de soldagem com variações maiores de abertura do ângulo do chanfro.
- Fazer testes de soldagem com outros modos de transferência metálica.
- Fazer testes preenchendo completamente a junta.
- Fazer testes de soldagem unilateral com suporte cerâmico

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMIN, M. **Pulsed current parameters for arc stability and controlled metal transfer in arc welding.** Metal Construction, p. 272-278, 1983.
- ANDRADE, S. T. **Mapeamento do processo mecanizado de soldagem unilateral FCAW com backing cerâmico aplicável no passe de raiz em aço carbono.** 2007 103f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.
- ASM, Handbook. **Welding, brazing and soldering.** USA, v.6, 1993.
- ASM, Handbook. **Welding, brazing and soldering.** USA, v.6, 1993.
- ASTM E92-82 – Standard test methods for Vickers hardness of materials. West Conshohocken, July 2001.
- AWS. **Gas metal arc welding.** Welding Handbook. 8.ed. Miami: AWS, v.2, 1991. p. 109-155.
- BÁLSAMO, P.S.S. **Desenvolvimento de um sistema sinérgico não linear para soldagem MIG pulsado de aço inoxidável.** 2000. 193 f. Tese (Doutorado em Materiais e Processos de Fabricação) – Faculdade de Engenharia Mecânica, UFU, Uberlândia, 2000a.
- BÁLSAMO, P.S.S. *et al.* **Development of an experimental technique for studying metal transfer in welding: Synchronized shadowgraphy.** Inst. J. for the Joining of Materials, v.12, n.1, 12p. 2000b.
- BARBOSA L. C. A. **Modos de transferências semi-automáticas para soldagem de passe de raiz.** Disponível em www.infosolda.com.br. Acesso em maio. 2011.
- CANTRELL, Roger E. **Ceramic weld backing evaluation,** Welding Journal, v. 61 p.27-34, march, 1982.
- CARY, H.B. **Modern welding technology.** 2. ed. New Jersey: Prentice Hall, 1998. 120Pp.
- COSTA, C. M. S. **Fenômenos de instabilidade do arco na soldagem GMAW com gases de baixo potencial de oxidação.** 2006. 149 f. Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Minas Gerais, 2006.
- DAVIES G. J.; GARLAND, J., G. **Solidification structures and properties of fusion welds.** The Metals Society Review, n. 196, v. 20, p.83-106. 1975.
- DEN OUDEN, G.; HEMANS, M.J.M. **Process behavior and stability in short circuit gas metal arc welding,** Welding Journal, v. 78, n. 4, p.137-174, apr. 1999.
- DOBIGMIES, A. A.. **Estudo do rendimento de deposição de material da soldagem GMAW em condições de transferência metálica por curto-circuito forçado.** 2008. 148 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – UFPR, Curitiba, 2008.

DUTRA, J.C. **Análise estatística de estabilidade de arco em soldagem MIG/MAG com transferência por curto-circuito.** In: Encontro Nacional de Tecnologia da Soldagem – ABS, 15, 1989, São Paulo. Anais. São Paulo: ABS, v.1, p.327-347, 1989.

DUTRA, J.C.; SCHNEIDER, C.A. e OLLÉ, L.F. **Banco de Ensaio para Estudo e Automação do Processo de Soldagem MIG / MAG.** anais 13o ENTS. 1987.

FERREIRA FILHO, D; FERRARESI, V.A. **Influência do tipo de gás de proteção e da distância bico de contato peça na transferência metálica do modo curto-circuito.** IN: XXXII Consolda, BH, 2006.

HILTON, D.E.; NORRISH, J. **Shielding gases for arc welding.** Welding e Metal fabrication, Cambridge, p.189-196, may/june. 1988.

JUNIOR, B. C. A. **Uso de oscilação magnética na transferência metálica preenchimento de passe de raiz com arame tubular.** 2010 81f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

KIM, Y.S; EAGAR, T.W. **Analysis of metal transfer in gas metal arc welding.** Welding Journal, Miami, v.72, n.6, p.269s-278s, june.1993.

LANCASTER, J.F. **Mass flow from electrode to the workpiece.** In: Welding Metallurgy, 4, 1987, London, 1987. p.21-26.

LANCASTER, J.F. **The physics of welding.** 2.ed. Pergamon Press, International Institute of Welding, 1986. 340p.

LESNEWICH, A. **Control of melting rate and metal transfer in gas shielding metal arc welding: part II - control of metal transfer.** Welding Journal, v.37, n.9, p.418s-425s, 1958. LINCOLN, Electric Company. **The procedure handbook of arc welding.** 12 ed. Cleveland, Ohio. 1973.

LIU, S. SIEWERT, T. A. **Metal transfer mode in gas metal arc welding: droplet rate,** Welding Journal, February, p52s-58s, 1989.

LUCAS, W. **Instrumentation for arc welding – process monitoring and power source validation.** Welding e Metal Fabrication, p. 413-420, nov/dec. 1994.

MACEDO, W. A.; PEREIRA, L. “**Estudo para implantação de soldagem unilateral ao arco submerso**”, anais 11º ENTS, 1985.

MACHADO, I.G. **Soldagem e tecnologia e técnicas conexas: processos.** Porto Alegre, 1996. 477p. editado pelo autor.

MALIN, V. **Root weld formation in modified refractory flux one-sided welding: part 1 – effect of welding variables.** Welding journal, vol. 80 pp. 217s- 226s, e part 2 – effect of joint geometry, Welding journal, vol. 80 pp. 227s-237s, September. 2001.

MARQUES, P.V.; MODENESI, P.J.; BRACARENSE, A. Q. **Soldagem –fundamentos e tecnologia.** Belo Horizonte: Editora UFMG, 2007. 362p.

- MERIAM, J.L.; KRAIGE, L.G. **Mecânica: estática**. 4. ed. Rio de Janeiro: LTC, 1999. p.360.
- MITA, T. *et al.* **Quantitative estimatives of arc satability for CO₂ gas shielded arc welding**. Welding international, n.2, 1988. p.152-159.
- MODENESI, P.J. **Introdução à física do arco elétrico e sua aplicação na soldagem dos metais**. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Metalurgia da UFMG, 2009. 141p.(Apostila).
- MODENESI, P.J. **Procedimento para obtenção de oscilogramas de corrente e tensão em soldagem**. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Metalurgia da UFMG, 2005. Apostila.
- MODENESI, P.J; COSTA, M.C.M.S. **Estudo de alguns parâmetros básicos de soldagem GMAW com transferência por curto-circuito**. Revista Soldagem e Inspeção, São Paulo, v.16, n.1, p. 012-021. Jan/mar 2011.
- MUIR, J. **Single side panel welding with ceramic tile backing**. Metal Construction , p.651-653, October, 1985.
- NASCIMENTO, A. D. **Uma contribuição ao estudo da soldagem MIG-CA**. 16º POSMEC, UFU. 2006.
- NBR 6006 – **Classificação por composição química de aços para construção mecânica**. Out. 1994.
- PATTEE, H.E; MEISTER, R.P; MONROE, R. E. **Cathodic cleaning and plasma arc welding of aluminum**. Welding Journal Research Supplement, p. 08, may. 1968.
- SANTANA, I.J. **Modelamento matemático do processo de soldagem GMAW**. 2010. 167 f. Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) – Universidade Federal de Minas Gerais , Belo Horizonte, Minas Gerais, 2010.
- SCOTTI, A. **A review on special metal transfer modes in gas metal arc welding**. RBCM-J. of the Braz. Soc. Mechanical Sciences, , v.XX, n.3, p. 465 –478, 1998.
- SCOTTI, A.; SOUZA, D. **Influência do aumento da distância bico de contato peça na estabilidade do processo MIG/MAG operand em curto-circuito**. 19º POSMEC - Universidade Federal de Uberlândia. 2009.
- SCOTTI, A; PONOMAREV, V. **Soldagem MIG/MAG: melhor entendimento, melhor desempenho**. São Paulo: Editora Artliber, 2008. 284p.
- SILVA, A.V. **Avaliação da soldagem GMAW de um aço ABNT 304 com misturas Ar-O₂-H₂ e Ar-O₂-N₂**. 1995. 140 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica) – Escola de Engenharia Metalúrgica e de Minas, UFMG, Belo Horizonte, 1995.
- SMITH, A.A. *et al.* **Characteristics of the short-circuiting CO₂ – shielding arc**. In: Symposium the Institute of Welding, 29,1962, London.p.76-91.

SOLOMON, H.D. **Fundamentals, of weld solidification.** Metals Handbook. ASM International, pp.45-54. 1992.

SOUZA, DANIEL; SCOTTI, A. **Metodologia para levantamento de mapas de transferência em soldagem MIG/MAG por curto-circuito.** 18^o POSMEC. UFU.2008.

SOUZA, DANIEL; VILARINHO, L.O. **Influência da regulagem de parâmetros de soldagem sobre a estabilidade do processo MIG/MAG operando em curto-circuito.** Revista Soldagem e Inspeção, São Paulo. v.16. n.1, p. 022-031. Jan/mar 2011.

SUBAN, M; TUSEK, J. **Methods for the determination of arc stability.** Journal of Materials Processing Technology, p. 430-437, 2003.

TWI Weld Center for materials joining technology. **Defects and imperfections in welds slag inclusion.** Disponível em www.twi.com.uk. Acesso em ago. 2012.

VAIDYA, V. **Shielding gas mixtures for semiautomatic welds.** Welding Journal, v.81, n.9, p.43-48, set. 2002.

VILARINHO, L.O. **Desenvolvimento e avaliação de um algoritmo alternativo para soldagem MIG sinérgica de alumínio.** 2000. 111f. Dissertação (Mestrado em Materiais e Processos de Fabricação) – Faculdade de Engenharia Mecânica, UFU, Uberlândia - MG, 2000.

WELDREALITY. **Soldagem em tubos usando o processo FCAW.** Disponível em: www.weldreality.com/fluxcoredpipewelding. Acesso em mar. 2011.

WITZ, G.; REVAZ B.; FLÜKIGER, R. **Heat transfer and marangoni effect in the electron discharge machining (EDM) process.** Reviews of Modern Physics, v. 67, pp.85-112. 1995.

ANEXO I

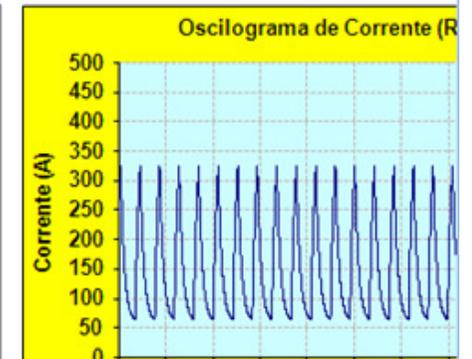
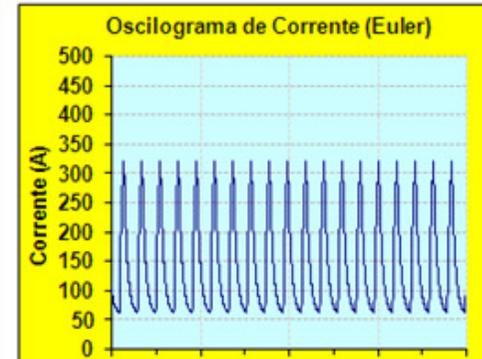
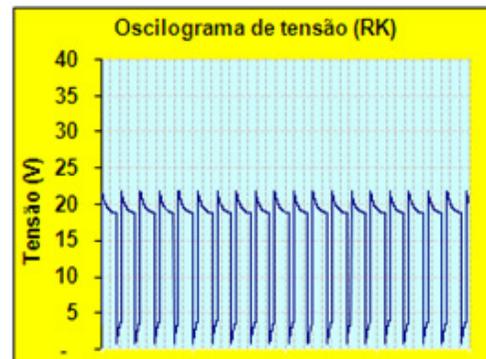
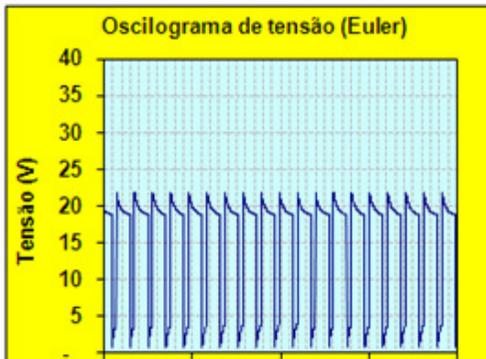
MODELO MATEMÁTICO PARA O PROCESSO DE SOLDAGEM GMAW

| Dados de entrada: | |
|------------------------------------|----------------|
| Diâmetro do arame: | 12 mm |
| Velocidade de alimentação (f): | 44 mm/s |
| Indutância arco (L): | 200 Vs/A |
| CTWD (h): | 16 mm |
| Indutância de curto-circuito (L): | 200 Vs/A |
| Tensão em vazio (V_0): | 21 V |
| Tensão em vazio (V_0): | 0,1 V |
| Gás de proteção: | Ar5%O2 |
| Vel. de deslocamento (v): | 39 cm/min |
| Material do arame | Aço carbono |
| Pertubação na transferência | Curto-circuito |
| Parâmetros para criar pertubação | 595 2 |
| Inserir parâmetros para pertubação | 0 0 |
| Diâmetro máximo da gota | 0,0 mm |

| Resultados Modelo dinâmico | |
|----------------------------|--------------------------|
| MODO DE TRANSFERÊNCIA: | Curto-circuito (ESTÁVEL) |

| CURTO-CIRCUITO | |
|--------------------------------|------------|
| Corrente média curto-circuito: | 147 A |
| Tensão média curto-circuito: | 15,2 V |
| Comp. arco curto-circuito: | 0,18 mm |
| Resistência arame: | 0,0091 Ohm |
| Frequência curto-circuito: | 48 Hz |
| GLOBULAR/SPRAY | |
| Corrente média goticular: | 147 A |
| Tensão média goticular: | 15,3 V |
| Comp. arco goticular: | 0,1 mm |
| Diâmetro da Gota: | 0,0 mm |

| OUTROS RESULTADOS | |
|-----------------------------|------------------------|
| Taxa de deposição: | 1,40 kg/h |
| Area seção transv./passada: | 7,7 mm ² /p |
| Velocidade de alimentação | 2,64 m/min |



ANEXO II

| DBCP de 14 mm | | | | |
|------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|---------------|
| Nome do arquivo | cp(1)f1_DBCP@14mm0001 | cp(2)f1_DBCP@14mm0001 | cp(3)f1_DBCP@14mm0001 | MÉDIAS |
| Fator de correção | 0,6120 | 0,6707 | 0,5482 | |
| Valor do ângulo (°) | 59,97 | 64,59 | 66,83 | 63,80 |
| Largura do cordão | 5,228 | 5,298 | 5,158 | 5,228 |
| Altura do cordão | 4,906 | 5,256 | 5,263 | 5,142 |
| Área depositada | 15,5504 | 16,5164 | 18,6505 | 16,9058 |

| DBCP de 16 mm | | | | |
|------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|---------------|
| Nome do arquivo | cp(1)f1_DBCP@16mm0001 | cp(2)f1_DBCP@16mm0001 | cp(3)f1_DBCP@16mm0001 | MÉDIAS |
| Fator de correção | 0,4964 | 0,6268 | 0,5794 | |
| Valor do ângulo (°) | 60,98 | 59,01 | 59,04 | 59,68 |
| Largura do cordão | 5,381 | 5,051 | 5,249 | 5,227 |
| Altura do cordão | 5,086 | 5,213 | 5,403 | 5,234 |
| Área depositada | 17,5769 | 16,6081 | 16,5493 | 16,9114 |

ANEXO II – continuação

| DBCP de 18 mm | | | | |
|------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|---------------|
| Nome do arquivo | cp(1)f1_DBCP@18mm0001 | cp(2)f1_DBCP@18mm0001 | cp(3)f2_DBCP@18mm0001 | MÉDIAS |
| Fator de correção | 0,5771 | 0,5981 | 0,5918 | |
| Valor do ângulo (°) | 62,02 | 61,67 | 59,07 | 60,92 |
| Largura do cordão | 4,933 | 5,133 | 4,865 | 4,977 |
| Altura do cordão | 5,597 | 5,794 | 5,472 | 5,621 |
| Área depositada | 17,5731 | 17,0781 | 15,3502 | 16,6671 |

| DBCP de 20 mm | | | | |
|------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|---------------|
| Nome do arquivo | cp(1)f1_DBCP@20mm0001 | cp(2)f1_DBCP@20mm0001 | cp(3)f1_DBCP@20mm0001 | MÉDIAS |
| Fator de correção | 0,5506 | 0,6002 | 0,6255 | |
| Valor do ângulo (°) | 63,12 | 61,12 | 54,92 | 59,72 |
| Largura do cordão | 5,1 | 5,395 | 5,142 | 5,212 |
| Altura do cordão | 5,821 | 5,685 | 5,377 | 5,628 |
| Área depositada | 16,5971 | 17,0561 | 16,0782 | 16,5771 |

ANEXO III

| Microdureza do metal base (HV) | | | | | | | | |
|--------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| indentação 1 | indentação 2 | indentação 3 | indentação 4 | indentação 5 | indentação 6 | indentação 7 | indentação 8 | indentação 9 |
| 217,71 | 187,605 | 204,869 | 206,643 | 212,935 | 212,098 | 219,639 | 214,896 | 203,134 |

| Valor MAX | Valor min | Média | S.t.d. |
|-----------|-----------|---------|---------|
| 219,639 | 187,605 | 208,837 | 9,76871 |

ANEXO IV

| Microdureza (HV) obtidas com a variação da intensidade da corrente | | | | | | | | | | |
|---|-----------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| corrente | corpo de prova | indentação 1 | indentação 2 | indentação 3 | indentação 4 | indentação 5 | indentação 6 | indentação 7 | indentação 8 | indentação 9 |
| 120 A | cp(3)f1_120A | 230,822 | 208,461 | 284,969 | 299,918 | 271,097 | 311,112 | 237,244 | 221,661 | 264,539 |
| 140 A | cp(4)f1_140A | 178,743 | 192,347 | 239,453 | 307,843 | 286,408 | 287,857 | 296,841 | 226,678 | 189,97 |
| 150 A | cp(4)f1_150A | 230,822 | 208,461 | 284,969 | 299,918 | 271,097 | 311,112 | 237,244 | 221,661 | 264,539 |
| 160 A | cp(5)f1_160A | 173,161 | 169,8 | 206,675 | 284,975 | 275,155 | 298,372 | 222,648 | 208,452 | 189,977 |
| 170 A | cp(1)f1_170A | 206,666 | 221,66 | 231,873 | 295,314 | 268,451 | 284,966 | 226,679 | 205,78 | 188,42 |
| 180 A | cp(4)f1_180A | 201,435 | 182,377 | 215,849 | 267,137 | 276,521 | 242,806 | 208,459 | 175,227 | 184,611 |
| 190 A | cp(4)f1_190A | 164,628 | 191,551 | 231,872 | 287,868 | 267,141 | 260,724 | 214,907 | 217,763 | 204,901 |

| Estatísticas | | | | | | |
|---------------------|-----------------------|------------------|---------------------|----------------|---------------|-----------|
| corrente | corpo de prova | Valor MAX | Valor min | Média | S.t.d. | CV |
| 120 A | cp(3)f1_120A | 311,112 | 208,461 | 258,869 | 36,1541 | 13,9661 |
| 140 A | cp(4)f1_140A | 307,843 | 178,743 | 245,127 | 50,9226 | 20,774 |
| 150 A | cp(4)f1_150A | 311,112 | 208,461 | 258,869 | 36,1541 | 13,9661 |
| 160 A | cp(5)f1_160A | 298,372 | 169,8 | 225,468 | 48,8239 | 21,6544 |
| 170 A | cp(1)f1_170A | 295,314 | 188,42 | 236,645 | 37,6035 | 15,8902 |
| 180 A | cp(4)f1_180A | 276,521 | 175,227 | 217,158 | 37,134 | 17,1000 |
| 190 A | cp(4)f1_190A | 287,868 | 164,628 | 226,817 | 39,2807 | 17,3182 |
| | | | Média Global | 238,422 | | |