

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
Departamento Acadêmico de Mecânica

PAULA DE ANDRADE SILVA
TIAGO ESTEVAM MARQUES

**MORFOLOGIA DO REVESTIMENTO PELO PROCESSO DE ARAME TUBULAR
UTILIZANDO TECIMENTO SEMIAUTOMÁTICO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CORNÉLIO PROCÓPIO

2014

PAULA DE ANDRADE SILVA
TIAGO ESTEVAM MARQUES

**MORFOLOGIA DO REVESTIMENTO PELO PROCESSO DE ARAME TUBULAR
UTILIZANDO TECIMENTO SEMIAUTOMÁTICO**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, apresentado à disciplina de Trabalho de Diplomação, do Curso Superior de Tecnologia em Manutenção Industrial – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, como requisito parcial para obtenção do título de Tecnólogo.

Orientadora: Prof^a. M^a. Émillyn Ferreira Trevisani Olivio

CORNÉLIO PROCÓPIO

2014

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
Departamento Acadêmico de Mecânica

TERMO DE APROVAÇÃO

**MORFOLOGIA DO REVESTIMENTO PELO PROCESSO DE ARAME TUBULAR
UTILIZANDO TECIMENTO SEMIAUTOMÁTICO**

Por

PAULA DE ANDRADE SILVA
TIAGO ESTEVAM MARQUES

Este Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) foi apresentado às 20h00min do dia 03 de dezembro de 2014, como requisito parcial para a obtenção do título de Tecnólogo no Curso Superior de Tecnologia em Manutenção Industrial, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, *Campus* Cornélio Procópio. Os candidatos foram argüidos pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho **APROVADO**.

Prof.^a. M^a. Émillyn Ferreira Trevisani Olivio
UTFPR – *Campus* Cornélio Procópio
(Orientadora)

Prof. Esp. Carlos de Nardi
UTFPR – *Campus* Cornélio Procópio
(Membro Titular)

Prof. Dr. Paulo César Moselli
UTFPR – *Campus* Cornélio Procópio
(Membro Titular)

*Prof. Me. Fernando Henrique de
Oliveira Camara*
UTFPR – *Campus* Cornélio Procópio
(Coordenador de TCC)

- O Termo de Aprovação assinado encontra-se na Coordenação do Curso -

Á Deus Pai, a Ele seja dada toda honra
gloria e todo o louvor.

Ás nossas famílias, que sempre nos
apoiaram e compreenderam nossos
esforços.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar gostaríamos de agradecer ao nosso Deus, o Alfa e o Omega, o principio e o fim de todas as coisas, a Jesus Cristo, fonte de toda misericórdia e ao Espírito Santo que tem nos iluminado a cada dia.

Aos nossos pais, irmãos e irmãs, eu Paula, gostaria de agradecer ao meu esposo Nilo, minha filha Nathalia, e eu Tiago gostaria de agradecer a minha esposa Ana Paula e a minha filha Ana Luiza, que foram as nossas fontes de incentivos e determinação para que este trabalho fosse realizado, e a toda nossa família que, com muito carinho e apoio, não mediram esforços para que chegássemos até esta etapa de nossas vidas.

Reverenciamos a nossa orientadora Prof^a. M^a Émillyn, pela sua dedicação e por toda ajuda dada, pelo incentivo e pela paciência na orientação, e também pela amizade, que tornou possível a conclusão deste trabalho de conclusão de curso.

Ao nosso co-orientador, Prof. Me. Celso Correia Alves, pela ajuda prestada, suporte técnico, também pelo convívio e pela compreensão, através deste gostaríamos de agradecer a instituição Universidade Tecnológica Federal do Paraná, pelos recursos e por todos os investimentos para que esse trabalho fosse realizado.

Aos nossos colegas de trabalho, Thiago, pelo corte das amostras, Mauricio, Lucas e Osvaldo, pelo suporte no ensaio de ultrassom.

A todos os professores do curso, de uma forma geral, que foram tão importantes na nossa caminhada acadêmica, e que de uma forma ou de outra contribuíram com o nosso trabalho.

Aos amigos e colegas, pelo incentivo e constante apoio, nas noites frias e congelantes de Cornélio.

Que os vossos esforços desafiem as
impossibilidades, lembrai-vos de que as
grandes coisas do homem foram conquistadas
do que parecia impossível.

Charlie Chaplin

RESUMO

SILVA, Paula de Andrade, MARQUES, Tiago Estevam, **Morfologia do revestimento pelo processo de arame tubular utilizando tecimento semiautomático**, Cornélio Procópio, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2014. 75p. Trabalho de Conclusão de Curso.

Este trabalho teve como objetivo estudar as características geométricas e morfológicas do cordão de solda obtido pelo processo de soldagem MIG/MAG, utilizando de arame tubular 410 NiMo MC, com tecimento semiautomático e utilizando corrente pulsada. A primeira etapa consistiu na realização de ensaios exploratórios para determinar os fatores de controle e seus níveis a serem utilizados na etapa posterior denominada de “experimentos definitivos”. Nos experimentos definitivos, para determinar o número de ensaios a serem realizados, optou-se pelo uso do método estatístico de Taguchi (planejamento robusto de experimentos), de forma a cumprir, com um reduzido número de ensaios, cujo objetivo foi obter a influência dos fatores de controle (parâmetros de soldagem) sobre as variáveis respostas (características geométricas dos cordões de solda). Foram escolhidos três fatores de controle com dois níveis cada: largura, passo e corrente, variando a corrente entre 200 A e 230 A, resultando num total de 4 ensaios. As soldagens foram realizadas na posição plana por simples deposição sobre chapas de aço ABNT 1020. Foi mantida constante a vazão do gás de proteção, a velocidade de alimentação e a DBCP. Após a soldagem os corpos de prova também foram submetidos a ensaios de ultrassom, macrografia, microdureza Vickers e análise morfológica no revestimento. Os resultados mostraram que os maiores valores de corrente utilizadas foram capazes de alterar significativamente a geometria do cordão de solda, aumentando a diluição e a penetração na soldagem de revestimento.

Palavras-chave: Arame tubular 410 NiMo. Revestimento. Corrente Pulsada. Tecimento.

ABSTRACT

SILVA, Paula de Andrade, MARQUES, Tiago Estevam, **Coating morphology by tubular wire process using semi-automatic damping**, Cornélio Procópio, Federal Technological University of Paraná, 2014. 75p. Work Completion of course.

This work aimed to study the geometric and morphological characteristics of the weld bead obtained by MIG / MAG welding process using tubular wire 410 NiMo MC, with semi-automatic weaving and using pulsed current. The first step consisted of exploratory tests to determine control factors and their levels to be used in the stage called "definitive experiments " In the final experiments to determine the number of tests to be performed, we opted for the use of the statistical method of Taguchi (robust design of experiments) , in order to comply with a limited number of tests , aimed to obtain the influence of control factors (welding parameter) on the response variables (geometric characteristics of the weld beads) . They chose three control factors each with two levels: Width, pitch and current by varying the current between 200 A and 230 A, resulting in a total of 4 tests. The welds were performed in the flat position by simple deposition on ABNT 1020 steel sheet was maintained constant flow of shielding gas, the feed rate and DBCP. After welding the samples also underwent ultrasound testing, macrograph, Vickers hardness and morphological analysis in the coating. The results showed that the highest current values were used to significantly alter the geometry of the weld bead by increasing the dilution and penetration welding in coat.

Key - words: Tubular wire 410 NiMo . Coating. Current Pulsed . Weaving .

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Soldagem MIG/MAG (esquemática).....	17
Figura 2 – Processo FCAW (esquemático)	18
Figura 3 – Diagrama de fabricação do arame tubular (esquemático).....	19
Figura 4 – Formato do arame tubular (esquemático)	20
Figura 5 – Zona termicamente afetada.	26
Figura 6 – Penetração (esquemático)	27
Figura 7 – Penetração total e Penetração Parcial	27
Figura 8 – Representação das dimensões geométricas das seções transversais dos cordões de solda	28
Figura 9 – Corrente Convencional Contínua	31
Figura 10 – Oscilograma de corrente ilustrando os instantes de destacamento da gota	32
Figura 11 – Equipamentos utilizados na soldagem.	36
Figura 12 – Manipulador robótico Tartilope V2.....	37
Figura 13 – Fonte de Soldagem – Inversal 450.....	37
Figura 15 – Tracionador de arame STA-20.....	39
Figura 14 – Foto tocha de Soldagem Automática – Tbi AUT 511	39
Figura 16 – Foto metal de base.....	40
Figura 17 – Arame Tubular ER 410 NiMo MC.....	41
Figura 18 – Foto cilindro de gás de proteção Ar – 2% O ₂	42
Figura 19 – Técnica da tocha	46
Figura 20 – Tecimento triangular.....	47
Figura 21 – Foto identificação das amostras.....	49
Figura 22 – Foto inspeção por ultrassom	50
Figura 23 – Serra fita Franho – FM 500	51
Figura 24 – Desenho esquemático extração das amostras	52
Figura 25 – Foto extração das amostras	52
Figura 26 – Foto lixadeira politriz APL – 4D	53
Figura 27 – Zona Termicamente Afetada	54
Figura 28 – Modelo esquemático das medições realizadas no AUTO CAD.	55
Figura 29 – Exemplo da divisão dos pontos de medição	56
Figura 30 – Exemplo dos pontos de medições.....	56
Figura 31 – Área de penetração e área de reforço.....	57
Figura 32 – Foto do microdurômetro	58
Figura 33 – Modelo esquemático dos pontos de medições de microdureza	68
Figura 34 – Pontos de realização de microdureza, CP 73 – A.....	69

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Especificação AWS para arames tubulares	22
Quadro 2 – Dados técnicos da fonte de soldagem Inversal 450	38

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição química das barras de aço ABNT 1020.....	40
Tabela 2 – Composição Química do arame tubular 410 NiMo MC	41
Tabela 3 – Parâmetros da corrente pulsada	43
Tabela 4 – Fatores de controle e níveis	45
Tabela 5 – Matriz ortogonal L4.....	45
Tabela 6 – Identificação das amostras.....	49
Tabela 7 – Largura dos cordões de Solda	59
Tabela 8 – Características do reforço do cordão de solda	61
Tabela 9 – Características da Penetração	63
Tabela 10 – Diluição e Ângulo de molhabilidade.....	65
Tabela 11 – Características pela corrente utilizada.....	68
Tabela 12 – Microdureza Vickers Hv 0,3.....	69

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Largura dos cordões de solda	60
Gráfico 2 – Altura do reforço	61
Gráfico 3 – Área do reforço	62
Gráfico 4 – Penetração Média.....	64
Gráfico 5 – Área de penetração	64
Gráfico 6 – Diluição Média de cada corpo de prova.....	66
Gráfico 7 – Ângulo de Molhabilidade.....	67
Gráfico 8 – Microdureza Vickers na horizontal.....	70

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	OBJETIVOS	13
1.1.1	Objetivo geral	13
1.1.2	Objetivo específico	14
1.2	JUSTIFICATIVA.....	14
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1	INTRODUÇÃO AO PROCESSO DE SOLDAGEM.....	15
2.2	SOLDAGEM MIG / MAG	16
2.3	SOLDAGEM COM ARAMES TUBULARES	17
2.3.1	Consumíveis.....	19
2.3.2	Gases de Proteção.....	22
2.3.3	Transferência do Metal.....	23
2.3.3.1	<i>Transferência por curto-circuito</i>	23
2.3.3.2	<i>Transferência globular</i>	24
2.3.3.3	<i>Transferência Spray</i>	25
2.3.4	Zona Termicamente Afetada - ZTA	25
2.3.5	Penetração	26
2.3.6	Características geométricas	28
2.4	REVESTIMENTO POR SOLDAGEM	29
2.5	TIPOS DE CORRENTES	31
2.5.1	Corrente contínua	31
2.5.2	Corrente pulsada	31
2.6	MÉTODO TAGUCHI / PROJETO ROBUSTO	33
2.6.1	Desenvolvimento do projeto robusto	34
3	MATERIAIS E MÉTODOS	35
3.1	EQUIPAMENTOS DE SOLDAGEM.....	35
3.1.1	Tartilope V2.....	36
3.1.2	Fonte de Soldagem	37
3.1.3	Sistema tracionador de arame.....	38
3.1.4	Tocha	39
3.2	METAL DE BASE	40
3.3	CONSUMIVEIS.....	41
3.3.1	Arame Tubular ER 410NiMo.....	41
3.3.2	Gás de proteção	42
3.4	VARIÁVEIS DE SOLDAGEM	42
3.4.1	Parâmetros da corrente pulsada	42
3.4.2	Experimentos iniciais	43
3.4.3	Planejamento dos experimentos definitivos.....	44
3.4.4	Técnica da tocha e tecimento.....	46
3.4.5	Condições e parâmetros de soldagem	47
3.5	SOLDAGEM DOS EXPERIMENTOS DEFINITIVOS.....	48
3.5.1	Identificações das amostras	48
3.6	CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS	50
3.6.1	Inspeção por ultrassom (US)	50
3.6.2	Caracterização microestrutural.....	51

3.7	MACROGRAFIA E MORFOLOGIA	53
3.7.1	Análise macrográfica	53
3.7.2	Morfologia do cordão de solda	54
3.8	MICRODUREZA	57
4	RESULTADO E DISCUSSÕES.....	59
4.1	RESULTADOS DE LARGURA	59
4.2	RESULTADO DE REFORÇO	60
4.3	RESULTADO DE PENETRAÇÃO	63
4.4	DILUIÇÃO E ÂNGULO DE MOLHABILIDADE	65
4.5	RESULTADOS POR CORRENTE.....	67
4.5	RESULTADOS DE MICRODUREZA.....	68
5	CONCLUSÃO.....	71
	REFERÊNCIAS.....	72
	ANEXO - A.....	75

1 INTRODUÇÃO

Dentre os processos de fabricação dos metais e ligas, o processo de soldagem é o que mais se desenvolveu nas últimas décadas. A soldagem pode ser aplicada em diversas áreas como, por exemplo, na construção de estruturas metálicas, nas indústrias químicas, farmacêuticas, alimentícia, petrolífera, espacial, etc., (CORRÊA, 2000).

A soldagem a arco elétrico com arames tubulares (FCAW - *Flux-cored arc welding*) é um processo que promove a união de metais pelo aquecimento destes através de um arco elétrico estabelecido entre a ponta do arame e a peça de trabalho, (MARQUES, 2007).

A soldagem de revestimento é empregada não somente na recuperação de peças de equipamentos desgastados, mas também na confecção de novos produtos e processos industriais. Na soldagem de revestimento o objetivo principal é obter um cordão com a menor diluição possível, obtendo-se na morfologia do cordão uma penetração pequena, a maior largura e reforço possível, para um melhor rendimento do processo.

Neste trabalho foi aplicado o processo de soldagem pelo processo de arame tubular (FCAW) por solda de revestimento e corrente pulsada, foram feitas análises à morfologia quanto à forma mais ampla a influência da variação do consumível em tecimento diferente com valores de corrente e tensões já pré-estabelecidos.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

Estudar as variáveis de influência no processo FCAW: corrente pulsada, o passo e largura do tecimento.

1.1.2 Objetivo específico

Serão analisados os seguintes itens:

- Morfologia do cordão: largura penetração e reforço;
- Diluição e ângulo de molhabilidade;
- Macrografia;
- Microdureza da zona fundida e da zona termicamente afetada.

1.2 JUSTIFICATIVA

As informações obtidas através deste trabalho servirão como base para o entendimento das características e aplicação do uso de revestimento com soldagem de tecimento ligados aos processos de fabricação e complementarão as informações existentes sobre a influência dos parâmetros de soldagem de tecimento no processo de arame tubular utilizando o arame 410 NiMo MC.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 INTRODUÇÃO AO PROCESSO DE SOLDAGEM

Diversos e complexos fenômenos estão envolvidos na íntima união dos materiais e, para compreendê-los, a análise deve ser iniciada pelos meios que permitem realizá-la. Entretanto, há competição entre os processos de união disponíveis, pois, para uma dada aplicação, é possível que vários possam produzir resultados tecnologicamente similares. Nesse caso, portanto, a escolha deverá recair sobre aquele que for mais econômico, (MACHADO, 1996).

A soldagem é sem dúvida a que mais se destaca devida principalmente, ao seu largo emprego e grande volume de atividades que envolvem. Neste caso, a união de dois materiais é realizada, ou através da fusão dos mesmos materiais em íntimo contato; ou pela fusão de ambos e adição de outro material fundido; ou ainda por contato destes materiais, na fase sólida ou semi sólida, (MACHADO, 1996).

Segundo Marques (2007), 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 à recuperação de peças desgastadas ou para a formação de um revestimento com características especiais. Diferentes processos relacionados com os de soldagem são utilizados para o corte ou para o recobrimento de peças. Diversos aspectos dessas operações de recobrimento e cortes são similares à soldagem e, por isso, muitos aspectos destes processos são abordados juntamente com esta.

A história da tecnologia da soldagem mostra uma permanente vocação para o uso pioneiro de descobertas, invenções e inovações vindas dos laboratórios científicos; mostrou sempre sua inquietude ante novas descobertas, num processo cada vez mais acelerado na procura de sua aplicação prática. Expressões como plasma, laser, robótica, antes entendida por poucos privilegiados, são hoje de uso corrente na indústria e pelos técnicos, (WEINER, 1992).

Os fenômenos envolvidos na transferência metálica são bastante complexos e por isso não são muito estudados, principalmente no da transferência metálica de eletrodos revestidos. O conhecimento desses fenômenos é de

fundamental importância para o melhor controle do processo de soldagem, obtenção de cordões de solda sem defeitos, diminuir a quantidade de respingos, prever a penetração do passe, avaliar a quantidade de calor transferida para o metal-base, controlar a distorção da estrutura soldada, etc. Cada processo de soldagem tem suas vantagens e limitações, e o adequado balanço dessas características irá determinar suas aplicações típicas, (TANIGUSHI, 1982).

2.2 SOLDAGEM MIG / MAG

A soldagem a arco de proteção gasosa (*Gas Metal Arc Welding – GMAW*) é um processo em que a união de peças metálicas é produzida pelo aquecimento destas com um arco elétrico estabelecido entre um eletrodo metálico nu, consumível, e a peça de trabalho. A proteção do arco e da região da solda contra contaminação pela atmosfera é feita por um gás ou mistura de gases, que podem ser inertes ou ativos. No Brasil o processo é conhecido como MIG (*Metal Inert Gas*) quando a proteção usada é inerte ou rica em gases inertes ou MAG (*Metal Active Gas*) quando o gás usado é ativo ou contém misturas ricas em gases ativos, (MARQUES, 2007).

A Figura 1 ilustra esquematicamente o processo de soldagem MIG/MAG, que normalmente é um processo semiautomático, em que a alimentação de arame (consumível) é feita mecanicamente, através de um alimentador motorizado e o soldador por sua vez é responsável pela iniciação e interrupção da soldagem, além de mover a tocha ao longo da junta, (MARQUES, 2007).

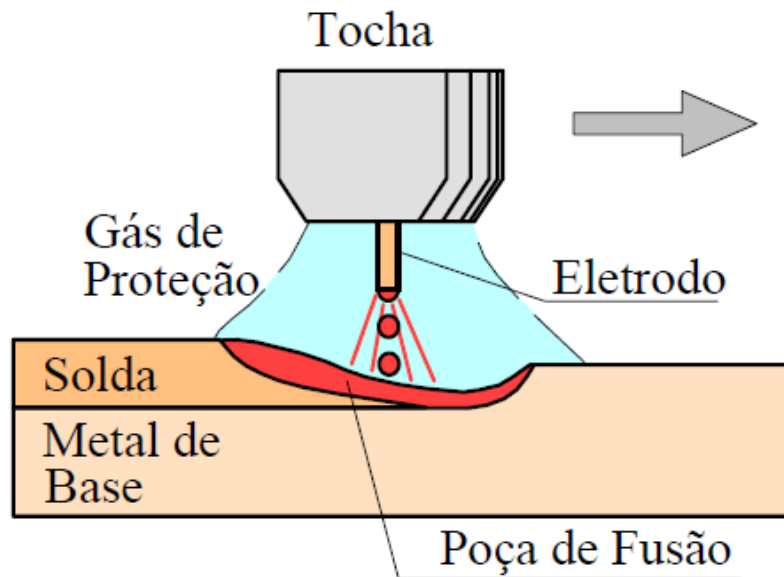


Figura 1 – Soldagem MIG/MAG (esquemática)

Fonte: Adaptado de MARQUES (2007 p. 234)

O processo de soldagem com proteção gasosa e eletrodo consumível (MIG / MAG), sempre utiliza metal de adição, possuindo uma maior taxa de deposição do que o processo de soldagem a arco com eletrodo revestido (ER) e do que o processo de soldagem a arco com eletrodo de tungstênio (conhecido no Brasil com TIG – *Tungsten Inert Gas*). A proteção da poça de fusão é feita através de um gás inerte ou não, alimentado continuamente durante a soldagem, (CORRÊA, 2000).

2.3 SOLDAGEM COM ARAMES TUBULARES

Segundo Marques, (2007), a soldagem com arame tubular (*Flux-Cored Arc Welding – FCAW*) é um processo que produz a união de metais pelo aquecimento destes com um arco elétrico estabelecido entre um eletrodo tubular, contínuo, consumível e a peça de trabalho. Neste processo, o arco elétrico se forma entre a peça e um tubo metálico – o qual é continuamente alimentado desde uma bobina. A poça de fusão assim produzida é envolvida por escória e gases resultantes de decomposição do fluxo, sendo que a Figura 2 ilustra esquematicamente esse conjunto, (MACHADO, 1996).

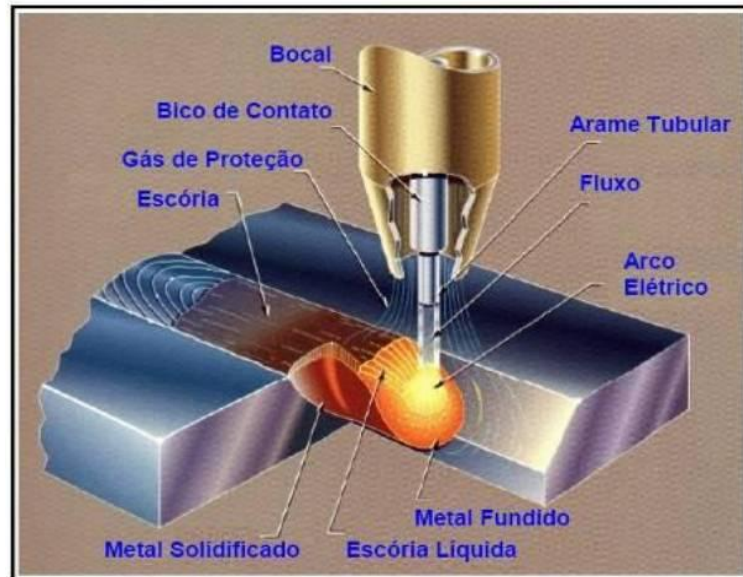


Figura 2 – Processo FCAW (esquemático)

Fonte: Adaptado de RODRIGUES (2007)

A soldagem com arames tubulares é normalmente um processo semiautomático e muito semelhante ao processo MIG/MAG, no que se diz respeito a equipamentos e princípios de funcionamento. Por outro lado, o processo tem suas semelhanças com a soldagem com eletrodos revestidos, do ponto de vista metalúrgico, (MARQUES, 2007).

A taxa de deposição do eletrodo tubular é elevada. Comparando com o eletrodo revestido, a mesma é cerca de duas vezes maior na posição vertical e seis vezes na horizontal/plana, alcançando até 11 kg/h. Os materiais normalmente soldados por este processo são os aços ao carbono, baixa liga; inoxidáveis e ligados, além de diversos tipos de revestimentos protetores, de maneira semiautomática, a mais usual, ou completamente mecanizada. Como a proteção é realizada somente pela escória, não é recomendável que esse tipo opere em “spray”, pois a área externa total das gotas aumenta muito e pode não correr a proteção das mesmas. Portanto, curto-circuito e globular são os modos de transferência mais usuais. Outrossim, de um modo geral, a qualidade das soldas realizadas por este método é inferior àquela quando gás auxiliar é empregado, devido principalmente à contaminação atmosférica, (GUERRA, 1996).

Além de operar em fontes convencionais, o arame tubular também pode soldar com corrente pulsada, (GUERRA & MACHADO, 1996).

2.3.1 Consumíveis

No processo de soldagem FCAW, o consumível de soldagem é um arame com forma de tubo metálico preenchido internamente por um revestimento com misturas de compostos minerais, que são adicionados com aglomerantes, segundo Marques (2007), os arames tubulares são fabricados, a altas velocidades, de muitos metros por segundo, a partir de fitas metálicas. Estes são deformados por roletes, até assumirem a forma de um “U”, sendo a seguir preenchido com material que formará o “recheio” do arame, fluxo de soldagem e/ou pó metálico. Em seguida a tira é fechada também por roletes, formando um tubo que passa por fieiras de trefilação, que diminuem seu diâmetro sucessivamente até o valor final desejado, enquanto o seu comprimento aumenta. O arame tubular é então bobinado, embalado, identificado e está pronto para ser comercializado. A Figura 3 mostra o diagrama de fabricação do arame tubular.

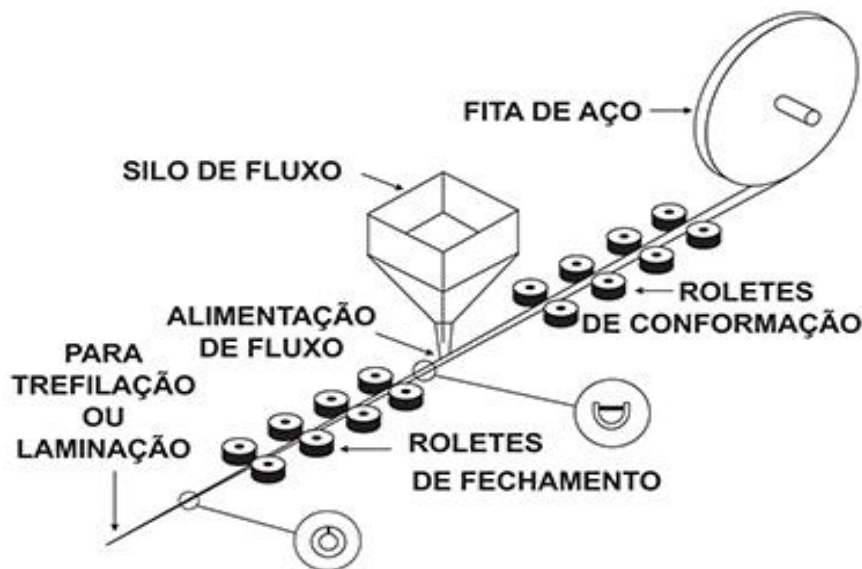


Figura 3 – Diagrama de fabricação do arame tubular (esquemático)

Fonte: MARQUES (2007 P. 260)

Segundo Machado (1996), no processo FCAW, o fluxo dentro do arame, conforme Figura 4, tem as seguintes funções:

- Desoxidar o metal de solda;
- Transferir elementos de liga;
- Aumentar a taxa de deposição, através do pó de ferro;
- Formar escória e gás de proteção produzido pela decomposição de alguns dos seus compostos;
- Estabilizar o arco;
- Estabelecer uma conveniente geometria ao cordão.

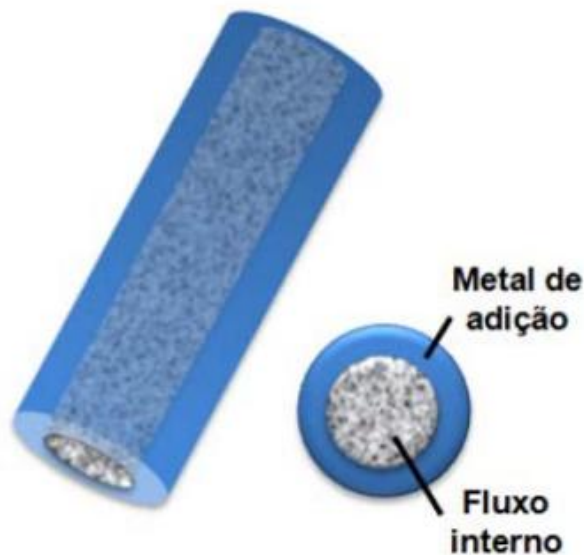


Figura 4 – Formato do arame tubular (esquemático)

Fonte: Adaptado de GOMES (2010)

E ainda o mesmo apresenta a vantagem de minimizar o contato de umidade com o fluxo e, portanto, deposita metal de solda com muito baixo hidrogênio. Os eletrodos para soldagem de aço não são geralmente recobertos com cobre (como no MIG) e, portanto, devem ser tomados cuidados especiais no seu armazenamento, (MACHADO, 1996).

Segundo Guerra e Machado (1996), quando o CO^2 é utilizado como gás de proteção, devem ser considerados os seguintes fatores, na formulação do fluxo e composição dos metais envolvidos:

- A sua tendência oxidante: isso acarreta diminuição da tenacidade do metal de solda, sendo que elementos desoxidantes devem ser adicionados. Entretanto, no arame tubular o nível de oxigênio do metal de solda, é via de regra, maior que nos processos por eletrodo revestido e arco submerso, sendo necessária a utilização de elementos de liga, tal como níquel, para alcançar ótima tenacidade.
- A possibilidade do CO_2 provocar porosidade: equilibrada pela adição de desoxidante ao fluxo, de forma que o oxigênio forme compostos sólidos que sobrenadem o metal fundido, no lugar de reagir com o carbono;
- A variação de carbono no metal de solda: a qual depende do carbono original do metal base e aquele do eletrodo. Se seu conteúdo for menor do que cerca de 0,05%, o metal de solda tende a absorver carbono. Entretanto, se o carbono for maior do que aproximadamente 0,10%, o metal de solda tende a perder carbono.

Um ponto a ser considerado, é aquele relativo à possibilidade de reduzir a massa do metal de solda necessária para preencher uma junta. Devido a este consumível produzir alta penetração, na soldagem com penetração adicional de gás, o nariz da junta pode ser aumentado. Igualmente, uma junta em “V”, que para soldagem por eletrodo revestido geralmente teria um ângulo de 60° , no eletrodo tubular é somente 45° , como consequência da mais longa extensão do eletrodo após o bico de contato. O mesmo ocorre, por exemplo, em soldas com penetração completa em filete, cujo ângulo do chanfro geralmente seria 50° ; no caso do eletrodo tubular, é reduzido para 35° . Isto pode significar sustância decréscimos nos custos diretos e tempo par realização do trabalho, (GUERRA & MACHADO, 1996).

Os arames tubulares são para soldagem são classificados pela AWS (*American Welding Society*), segundo as especificações mostradas no Quadro 1. Diversos fatores são considerados nesta classificação, entre eles: enchimento de pó metálico ou fluxo convencional, o uso de gás de proteção, tipo de corrente, posições de soldagem recomendadas, além da composição química e propriedades mecânicas do cordão obtido, (MARQUES, 2007).

Quadro 1 – Especificação AWS para arames tubulares

Especificação	Consumível
AWS A 5.9	Arames de aço inoxidável com pó metálico interno
AWS A 5.15	Armes para soldagem de ferro fundido
AWS A 5.18	Arames tubulares de aço carbono com pó metálico
AWS A 5.20	Arames tubulares de aço carbono com fluxo interno
AWS A 5.21	Arames para revestimento
AWS A 5.22	Arames tubulares para soldagem de aço inoxidável
AWS A 5.29	Arames tubulares de aço de baixa liga com fluxo interno

Fonte: MARQUES (2007)

2.3.2 Gases de Proteção

O processo de soldagem MIG/MAG requer um fluxo de gás em torno do conjunto metal de base / arame-eletrodo para produzir soldas com qualidade, principalmente por proteger a poça de fusão e gotas em transferência. Devido à esta função principal, o gás fornecido é denominado de proteção, apesar de também exercer efeitos adicionais (não menos importantes de que a função principal), como estabilizar o arco, controlar a operacionalidade e transferência metálica, influir sobre geometria, propriedades mecânicas e características metalúrgicas da solda. Engenheiro de soldagem deve ficar atento a estes efeitos colaterais para usá-los a seu favor. As principais funções do gás de proteção, que podem ser ativo ou inativo são proteger a poça de fusão, a ponta aquecida do eletrodo de oxidações e outras contaminações atmosféricas, além de ser um meio ionizante do arco elétrico. Para materiais de fácil oxidação o gás deve ser inerte quimicamente quando o gás ou uma mistura de gases utilizados não reagem de forma significativa com a poça de fusão de onde vem à denominação MIG, e pode ser ativo para aços, quando ocorre reação do gás com a poça de fusão, de onde vem à denominação MAG. O argônio e o hélio são exemplos de gases inertes e o oxigênio e o CO², dissociado no arco são exemplos de gases ativos, (CORRÊA, 2000).

2.3.3 Transferência do Metal

Segundo Machado (1996) o modo como o metal fundido se transfere desde o eletrodo para a peça, é determinada por complexas interações de forças, as quais em MIG são influenciadas pelos seguintes principais fatores:

- a) Natureza do gás de proteção;
- b) Polaridade e tipo (contínuo ou pulsado) da corrente;
- c) Densidade da corrente;
- d) Tensão;
- e) Extensão do eletrodo após o contato elétrico;
- f) Composição química e diâmetro do eletrodo;
- g) Características específicas da fonte de potência;
- h) Pressão do ambiente.

Segundo Modenesi (2002), modo de transferência influencia fortemente características operacionais do processo, por exemplo, como sua estabilidade, o nível de respingos, o formato do cordão e sua regularidade e a capacidade de fundir o metal de base. Como a forma de transferência obtida no processo FCAW depende dos parâmetros de soldagem e é muito sensível ao seu ajuste, à seleção adequada destes é fundamental para uma soldagem adequada com este processo.

2.3.3.1 *Transferência por curto-circuito*

A transferência por curto circuito é típica da soldagem com um pequeno comprimento de arco (menores valores de tensão de soldagem). Nesta transferência, o eletrodo toca periodicamente (entre cerca de 20 a 200 vezes por segundo) a peça, ocorrendo um curto circuito. Durante este, a corrente de soldagem se eleva rapidamente causando um aquecimento forte do eletrodo por efeito Joule, a sua fusão e a transferência de metal para a poça de fusão com a ruptura de uma

parte do eletrodo e a reabertura do arco elétrico. Esta forma de operação é muito usada industrialmente para soldagem de aços carbono com arames de menor bitola (0,6 a 1,2mm), com proteção de CO^2 e correntes relativamente baixas, para soldagem de juntas de pequena espessura e frequentemente fora de posição plana. A transferência por curto circuito é relativamente instável, com a geração de uma elevada quantidade de respingos, particularmente ao final de cada circuito. Existe, contudo, em geral, uma condição de menor instabilidade que ocorre quando a frequência de transferência (ou de curto circuito) é máxima. Esta condição pode ser obtida, com base no ruído emitido pelo processo, variando, em geral a tensão de soldagem. Outro fator importante para a estabilidade do processo na transferência por curto circuito é a taxa de crescimento (A/s) da corrente durante um curto circuito. Se a corrente se eleva de uma forma excessivamente rápida, o rompimento do arame ao final de um curto tende a ser explosivo e forma uma elevada quantidade de respingos. Se a corrente aumentar muito lentamente, o rompimento do arame pode não ocorrer e o processo de soldagem, se interrompe. Em geral, este fator é ajustado, em máquinas para a soldagem GMAW, através de um controle denominado “indutância”, (MONDENESI, 2002).

2.3.3.2 *Transferência globular*

Na transferência globular, as gotas de metal líquido, cujo diâmetro tende a ser maior que o próprio eletrodo, se destacam do eletrodo pela ação direta da gravidade, de uma forma similar a uma torneira gotejando, sem a ocorrência de curto circuito. Esta forma de transferência é característica da soldagem com baixa corrente (força magnética pequena) e elevada tensão (grande comprimento de arco). Na soldagem de aços com proteção de CO^2 , em que não existem condições para a transferência spray, a transferência globular ocorre também com correntes elevadas. A soldagem com esta forma de transferência tende a ser muito instável devido às perturbações causadas ao arco pelo destacamento de grandes gotas e a ocorrência de respingos, (MONDENESI, 2002).

2.3.3.3 *Transferência Spray*

A transferência spray ocorre na soldagem com mistura de proteção rica em argônio e com correntes suficientemente elevadas para que a força de origem magnética passe a controlar o processo de transferência. Esta forma de transferência tende a ser extremamente estável (desde que o arco seja suficientemente longo para prevenir a ocorrência de curto circuito) e não depende da força da gravidade. A necessidade de uma corrente elevada, contudo, restringe o seu uso para a soldagem de juntas de maior espessura e para a soldagem na posição plana (a poça de fusão tende a ter um volume e fluidez que dificultam o seu controle fora da posição plana). Atualmente com o desenvolvimento de máquinas de soldagem com controle eletrônico, a soldagem com corrente pulsada tem se tornado comum. Nesta forma de soldagem FCAW, a corrente varia periodicamente entre um nível eletado (corrente de pico) e um baixo (corrente de base). O valor e a duração da corrente de pico são selecionados de forma a causar transferência spray, enquanto que a passagem pela corrente de base permite a obtenção de um valor médio de corrente relativamente baixo. Desta forma, com a utilização de um equipamento mais sofisticado (e mais caro) pode-se soldar com a transferência spray (e com as suas vantagens) com um valor de corrente que permite a soldagem de juntas menos espessas e, também fora da posição plana, (MONDENESI, 2002).

2.3.4 Zona Termicamente Afetada - ZTA

Nenhuma solda por fusão pode ser realizada sem acumular um gradiente térmico no metal de base. A difusão de calor para o metal de base é fortemente influenciada pela temperatura da poça de fusão e pela velocidade de soldagem. Soldagem com alta potência e alta velocidade reduz o gradiente térmico, (MONDENESI, 2002).

Segundo Marques (2007), a região do metal de base (substrato) que tem sua estrutura e/ou suas propriedades alteradas pelo calor de soldagem é chamada zona termicamente afetada.

A zona termicamente afetada pelo calor (ZTA) é a região do metal de base (substrato) adjacente à zona fundida, (Figura 5). Esta região sofre um rápido ciclo térmico de aquecimento e resfriamento durante o processo de soldagem. Dependendo da severidade dos ciclos térmicos, a ZTA apresentará diferentes características metalúrgicas e propriedades mecânicas, (MONDENESI, 2002).

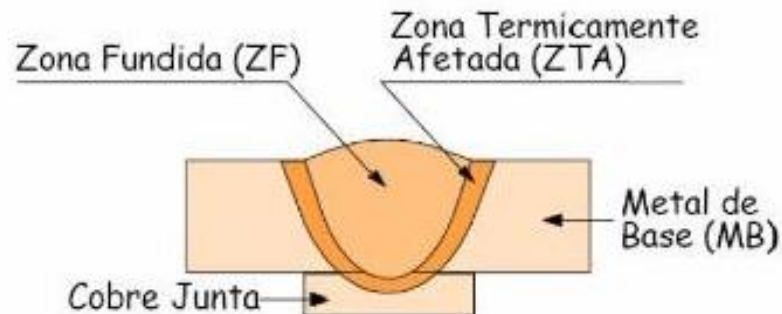


Figura 5 – Zona termicamente afetada.

Fonte: Adaptado de MONDENESI (2002)

2.3.5 Penetração

Penetração é à distância da superfície original do metal base ao ponto em que termina a fusão, medida perpendicularmente à mesma, (MARQUES, 2007). A Figura 6 ilustra esquematicamente a penetração na soldagem de revestimento.

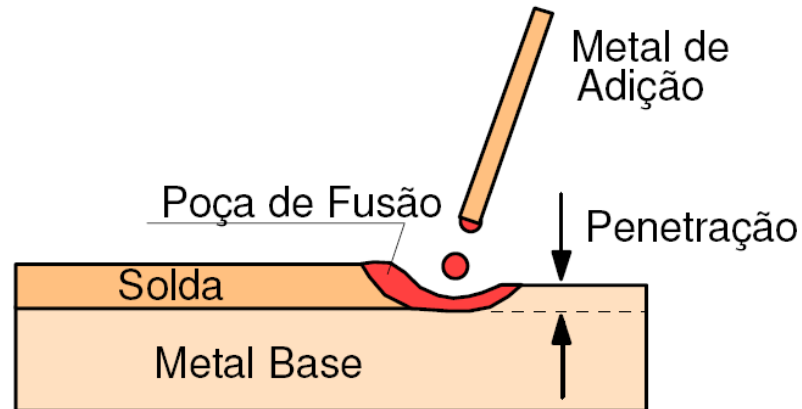


Figura 6 – Penetração (esquemático)

Fonte: Adaptado de MARQUES (2007)

Soldas em juntas de topo e ângulo podem ser de penetração total (penetração em toda a espessura de um dos componentes da junta) ou parcial. Soldas de penetração total apresentam um melhor comportamento mecânico, contudo, tendem a ser de execução mais difícil. Assim, quando o melhor desempenho destas não for necessário, o usual é se trabalhar com soldas de penetração parcial, (MARQUES, 2007). A Figura 7 mostra os dois exemplos.

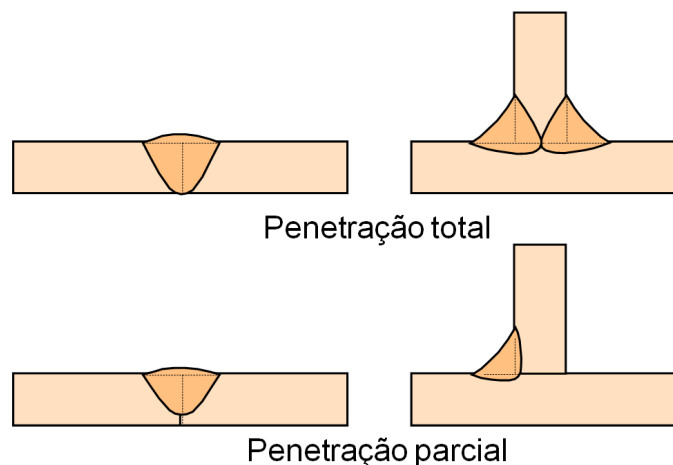


Figura 7 – Penetração total e Penetração Parcial

Fonte: Adaptado de MARQUES (2007)

2.3.6 Características geométricas

A geometria do cordão de solda afeta diretamente a complexidade do projeto e assim o custo de fabricação de estruturas soldadas e equipamentos mecânicos. As características geométricas do cordão de solda são a largura (L), o reforço (R) e a penetração (P) medidos a partir da seção transversal da solda, (CHAN et al., 1999). Conforme Figura 8.

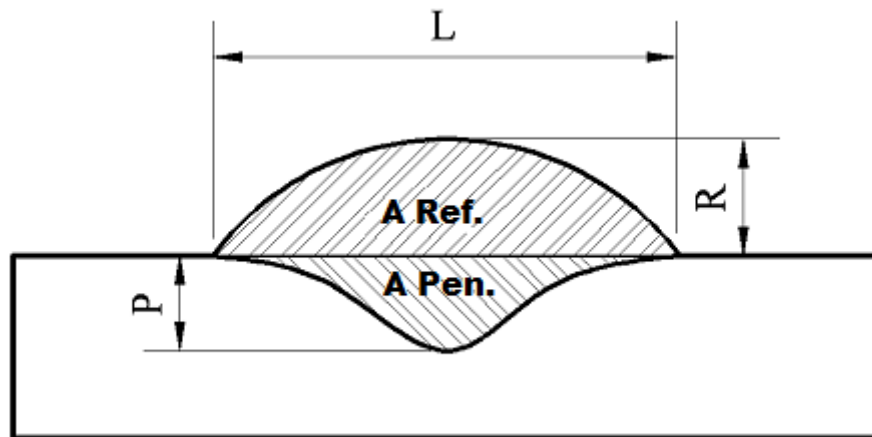


Figura 8 – Representação das dimensões geométricas das seções transversais dos cordões de solda

Fonte: Adaptado de PESSOA (2009)

Muitos estudos já foram feitos de forma a avaliar as características geométricas do cordão de solda e como estas são afetadas pelos parâmetros de soldagem. Vários resultados indicam que o perfil do cordão pode ser controlado pelos parâmetros de soldagem como corrente, tensão, velocidade de soldagem, gases de proteção, extensão e diâmetro do eletrodo, polaridade, espessura e composição da chapa, (CHAN et al., 1999).

A grande maioria dos pesquisadores ressalta que a largura do cordão é diretamente proporcional à tensão do arco e ao diâmetro do consumível e é inversamente proporcional à velocidade de soldagem. Por sua vez, a penetração é diretamente proporcional à concentração de energia e à pressão do arco elétrico sobre o material de base. Um grande número de problemas pode ser citado devido a

não adequação dos parâmetros de soldagem utilizados, acarretando muitas vezes em descontinuidades do cordão, como falta de fusão do metal depositado, porosidades excessivas, falta de penetração, acentuados reforços, diminuta largura do cordão, falta de preenchimento da junta entre outros, (NORRISH, 1992).

Determinar ótimas condições de soldagem para uma dada situação é uma tarefa muito complexa por causa do número de variáveis envolvidas. Extensivas tentativas são geralmente necessárias para fixar as variáveis na maioria dos casos. A habilidade para prever e controlar a geometria do cordão irá reduzir o número de tais tentativas e simplificar o processo, fixando na prática, os parâmetros de soldagem, (CHAN et al., 1999).

A diluição (D) também é uma característica geométrica importante, pois representa a parcela de metal de base que entra na composição da zona fundida (metal de solda). Para a maioria das aplicações (soldagens em aços de baixo carbono), a diluição é de pouca importância com relação ao comportamento da junta em serviço, porém, em algumas aplicações "especiais", como na soldagem de metais dissimilares e na soldagem de revestimentos, esta característica pode ser determinante no desempenho do componente, podendo inclusive favorecer falhas durante a operação do equipamento quando se tem elevada diluição. A diluição para um simples cordão pode ser calculada pela *Equação (1)*, (ZEEMAM, 1998).

$$D = A \text{ Pen.} / (A \text{ Ref.} + A \text{ Pen.}) \times 100\% \quad (1)$$

Onde:

A Ref. – Área do Reforço do cordão (Figura 8).

A Pen. – Área de Penetração do cordão (Figura 8).

2.4 REVESTIMENTO POR SOLDAGEM

Falhas prematuras em peças e/ou equipamentos por fenômeno de desgaste têm onerado as indústrias anualmente em centenas de milhões de dólares, seja por investimento na aquisição de uma peça nova, seja por recuperação da peça desgastada. O desgaste pode ser mantido dentro de certos limites aceitáveis, desde

que se tenha pleno conhecimento dos esforços a que a peça ou equipamento estarão submetidos e principalmente dos mecanismos de desgaste atuantes, (SOLDAGEM - SENAI, 1997).

Entre as finalidades do revestimento por soldagem podem-se citar: melhoria da eficiência do equipamento, mantendo cantos vivos nas bordas e arestas cortantes, redução no consumo de potencia mantendo a capacidade de corte, redução do custo da máquina e novas instalações possibilitando peças revestidas de baixo custo, recuperação de peças desgastadas sem necessidade de substituição, aumento da vida útil de instalações, peças e ferramentas diminuição do tempo de parada de equipamentos e melhores soluções nos projetos de máquinas com aplicação de materiais sobre um núcleo mais tenaz, (SOLDAGEM - SENAI, 1997).

A soldagem de revestimento é definida pela AWS como a deposição de uma camada de metal de adição sobre a superfície de outro metal com o objetivo de obter propriedades ou dimensões desejadas, (PHILLIPS, 1965b). Basicamente, este processo é empregado quando se deseja uma das seguintes aplicações:

- Prorrogação da vida útil de peças que não possuem todas as propriedades necessárias para uma dada aplicação;
- Recuperação de elementos afetados pelo desgaste ou corrosão;
- Criação de superfícies com características especiais.

Os revestimentos são geralmente depositados por processos de soldagem a arco elétrico ou gás combustível, (PHILLIPS, 1965b). Técnicas manuais, semiautomáticas ou automáticas podem ser utilizadas independentemente do processo empregado. Quanto aos materiais de adição, compostos na forma de eletrodos nus, eletrodos revestidos, bobinas de arames, pastas e pós são disponíveis em uma grande variedade. A adesão com o material de base ocorre pela fusão ou união metalúrgica.

2.5 TIPOS DE CORRENTES

2.5.1 Corrente contínua

A fonte de alimentação da corrente contínua mantém sempre a mesma polaridade, de forma que a corrente no circuito tem sempre o mesmo sentido. Abrevia-se corrente contínua por *CC* (ou, do inglês, *DC – Direct Current*). (MARKUS, 2004).

Segundo Corrêa (2000), a forma da onda de corrente contínua no processo MIG convencional está mostrada na Figura 9, sendo que a intensidade corrente (I_c) aplicada é constante durante todo o tempo de aplicação da mesma.

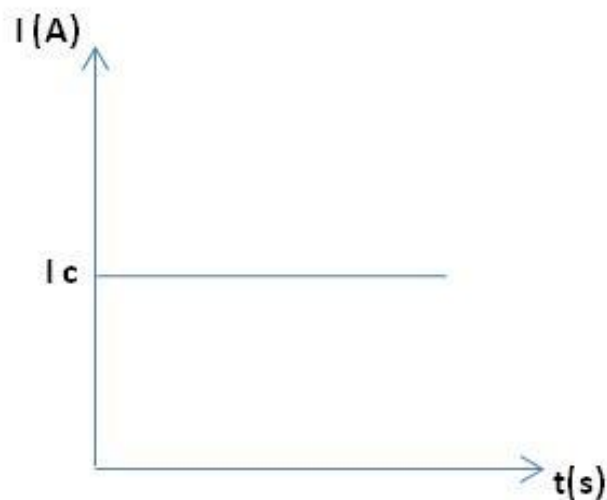


Figura 9 – Corrente Convencional Contínua
Fonte – CORRÊA - 2000

2.5.2 Corrente pulsada

A pulsação de corrente tem por objetivo permitir uma transferência goticular a baixas correntes médias. Neste modo de operação, um arco contínuo é mantido por uma corrente baixa durante certo período de tempo (corrente de base e

tempo de base). A corrente é então elevada a um alto nível por um curto espaço de tempo (corrente de pulso e tempo de pulso), forçando o destacamento da gota como se pode verificar na Figura 10. Devido à redução na energia média do arco, este processo é indicado para soldagens de chapas finas e para soldagens fora da posição, (MOTTA, 2002).

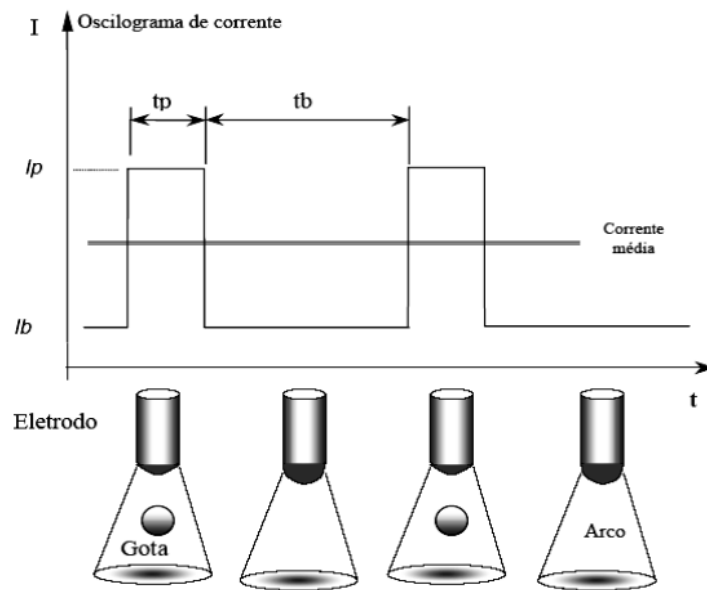


Figura 10 – Oscilograma de corrente ilustrando os instantes de destacamento da gota

Fonte: Adaptado de GOHR (2002)

Observa-se na Figura 10 que a corrente pulsada é uma onda periódica. Esta passa de um valor de fundo baixo (corrente de base, I_b) para um maior nível (corrente de pico, I_p) e seus respectivos tempos de duração, tempo de base (t_b) e tempo de pico (t_p). Nesta técnica as variáveis, intensidade da corrente de pico e o tempo de pico é que determinam a fusão do metal de adição noo metal de base, sendo que estas duas variáveis também proporcionam o destacamento da gota, que deve ser apenas de uma gota por pulso, para que se possa ter uma menor quantidade de respingos e uma melhor estabilidade do arco. A intensidade da corrente de base (I_b) proporciona a manutenção e a estabilidade do arco na soldagem e, em conjunto com o tempo de base, sustenta a ponta do eletrodo, dando estabilidade ao ânodo e cátodo, enquanto o tempo de base (t_b) proporcionará

oesfriamento da poça de fusão durante a soldagem, além de ocorrer a formação da gota neste período. A corrente média relacionada ao processo pulsado é obtida pela *Equação (2)*, (NORRISH, 1992):

$$I_m = (I_p \times t_p) + (I_b \times T_b) / (t_p + t_b) \quad (2)$$

Onde:

I_m é a corrente média, (A);

I_p é a corrente de pico, (A);

I_b é a corrente de base, (A);

t_p é o tempo de pico, (ms);

t_b é o tempo de base, (ms).

As vantagens desse processo são: (i) a redução de salpicos em relação à transferência por curto-circuito, (ii) a melhoria no controle da transferência metálica e (iii) o baixo aporte térmico à peça soldada, assim, obtendo cordões de solda com boa qualidade. Uma transferência satisfatória é conseguida pela escolha adequada dos parâmetros de pulso e de base que são determinados experimentalmente por tentativa e erro. Um princípio largamente adotado para a determinação dos parâmetros apropriados é escolher os que fornecem uma gota por pulso com destacamento no fim do pulso, obtendo-se assim uma transferência metálica uniforme, com um relativo baixo aporte térmico e uma melhoria no controle de material depositado na peça, (GOHR, 2002).

2.6 MÉTODO TAGUCHI / PROJETO ROBUSTO

Este método visa determinar as variáveis (denominadas de fatores) que mais influenciam a variabilidade do processo ou produto. O controle destes fatores garante a qualidade do processo/produto (menor variabilidade), além da otimização do seu desempenho. O método taguchi pertence a uma classe de abordagens que assegura a qualidade através do projeto, neste caso através da identificação e do

controle de variáveis críticas (ou ruídos) que fazem ocorrer desvios na qualidade do produto ou processo, (VIEIRA, 1996).

A técnica denominada projeto robusto, desenvolvida por Taguchi, é uma ferramenta poderosa na otimização de produtos ou processos e pode ser definida como um conjunto de conceitos, estratégias e métodos que utiliza o conhecimento existente de engenharia para realizar os seguintes benefícios, (ROSS, 1991):

- Melhoria da qualidade;
- Minimização do custo;
- Minimização do tempo de desenvolvimento.
- Estes benefícios são obtidos através da determinação e controle das variáveis (chamadas de fatores de controle).

2.6.1 Desenvolvimento do projeto robusto

Os níveis (valores) de fatores controláveis (parâmetros do projeto) são selecionados para minimizar os efeitos de fatores perturbadores nas características funcionais do produto, ou seja, determinam-se os níveis dos diferentes parâmetros que proporcionam ao produto as suas qualidades funcionais e que minimizam a perda de qualidade. Em outras palavras, procura-se estabelecer os níveis dos parâmetros do produto de modo que a característica de qualidade deste torne-se insensível ou robusta às fontes de variação (fatores de ruído), mantendo o valor médio da resposta sobre o valor objetivo de maneira consistente, obtendo alto desempenho e baixo custo, simultaneamente, (ROSS, 1991; VIEIRA, 1996).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para a realização dos experimentos práticos, foi utilizado o laboratório de soldagem e de ensaios da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, e para alcançar os objetivos do presente trabalho, foram utilizados os seguintes materiais e métodos:

- Equipamentos de soldagem
- Metal de base
- Consumíveis
- Variáveis de soldagem
- Soldagem dos corpos de prova
- Caracterização
- Macrografia e morfologia

3.1 EQUIPAMENTOS DE SOLDAGEM

Serão apresentadas a seguir as características operacionais dos equipamentos utilizados na realização das soldagens, como indicado na Figura 11.

Tartilope V2, para deslocamento automático da tocha de soldagem (1), uma fonte retificadora de soldagem trifásica com corrente máxima de 450A (2), Sistema tracionador de arame inversal, STZ-20 (3), Tocha de soldagem TBi AUT modelo 511 (4).

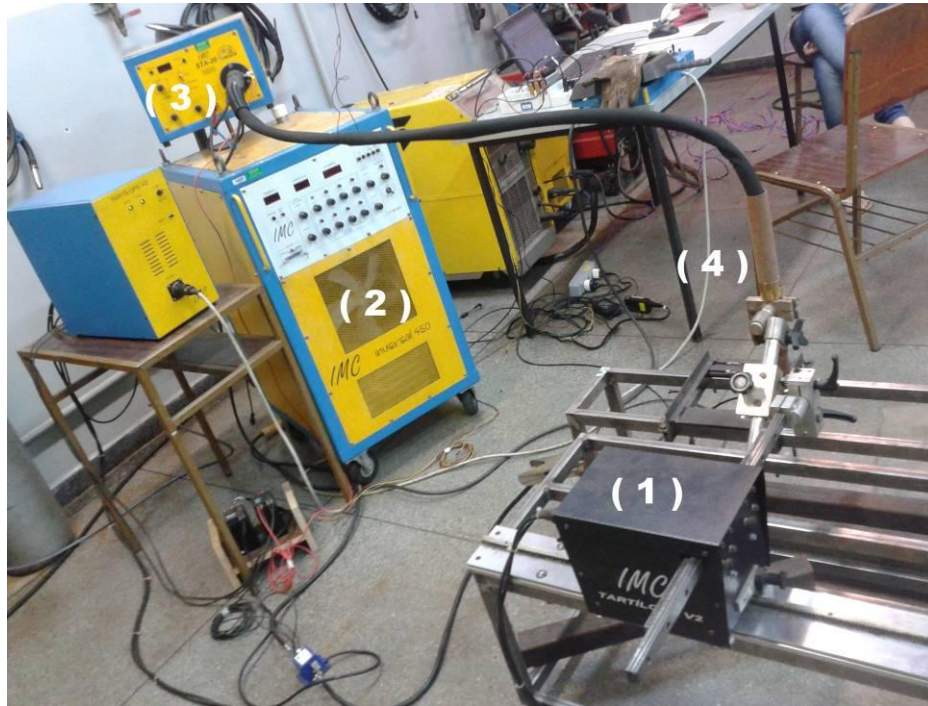


Figura 11 – Equipamentos utilizados na soldagem.

Fonte: Autoria própria. (2014)

3.1.1 Tartílope V2

O Tartílope V2 é um manipular robótico para soldagem que possui deslocamento automático com dois graus de liberdade (Figura 12), sendo o “eixo x” para a movimentação longitudinal, e o “eixo y” para movimentação transversal. Essa movimentação em dois graus de liberdade permite que o equipamento realize a soldagem usando tecimento, que se caracteriza pela movimentação oscilatória da tocha de soldagem em sentido transversal do deslocamento, (SPS, 2014).

Sua movimentação reproduz alguns dos movimentos que o soldador realiza naturalmente durante a soldagem. Dessa forma é possível a obtenção de melhores resultados como o preenchimento de juntas em um passe único, e também a realização de procedimentos de elevado desempenho para revestimentos, (SPS, 2014).



Figura 12 – Manipulador robótico Tartilope V2
Fonte: SPS (2014)

3.1.2 Fonte de Soldagem

A fonte de soldagem utilizada foi um retificador de soldagem trifásico modelo Inversal 450. A fonte de soldagem é semiautomática para soldagem MIG/MAG e para arames tubulares (FCAW), fabricada pela IMC, conforme Figura 13, (IMC, 2014).



Figura 13 – Fonte de Soldagem – Inversal 450
Fonte – IMC (2014)

Alguns dados deste equipamento são mencionados no Quadro 2.

Quadro 2 – Dados técnicos da fonte de soldagem Inversal 450

Dados Técnicos	
Corrente Nominal	280 A 100% FC
Corrente Máxima	450 A
Tensão em Vazio	68 V
Alimentação	220, 380, 440 V 3 ~
Dimensões	500 x 600 x 900 mm
Peso	170 kg

Fonte: IMC - 2014

3.1.3 Sistema tracionador de arame

O sistema tracionador de arame da Inversal, STA-20 (Figura 15), possibilita a alimentação de arame bobinado de diversos tipos, com velocidade regulada pelo usuário numa faixa de 1,10 a 20,00 m/min. Uma de suas principais características é a possibilidade de alimentação de arame com velocidade pulsada. Isto permite a realização de soldas com corrente pulsada, onde as velocidades de base e de pulso, reguladas pelo operador, são sincronizadas com as correntes de base e de pulso de forma automática. O STA-20 também oferece regulagem para rampas de aceleração e desaceleração do arame, melhorando as condições de início e término dos cordões de solda, (IMC, 2014).



Figura 14 – Tractionador de arame STA-20

Fonte: IMC (2014)

3.1.4 Tocha

Para a soldagem dos corpos de prova, foi utilizada uma tocha TBI AUT modelo 511, conforme figura 14, esta tocha é refrigerada a gás e a água, também é utilizada nos processos MIG/MAG, que trabalham numa faixa de 150A á 500A, com uma vazão de gás de 15 l/min e disponível para arames de 1 á 1.6mm de diâmetro, (TBI INDUSTRIES, 2014).



Figura 15 – Foto tocha de Soldagem Automática – Tbi AUT 511

Fonte – Autoria própria. (2014)

3.2 METAL DE BASE

Os corpos de prova que foram utilizados como metal de base são chapas de aço ABNT 1020 trefilados com 150 mm de comprimento, 63 mm de largura e 12 mm de espessura. A composição, segundo o fabricante, está na Tabela 1.

Tabela 1 – Composição química das barras de aço ABNT 1020.

Elemento	C	Mn	P	S
%	0,21	0,44	0,01	0,03

Fonte – ArcelorMittal - 2014

A Figura 16 ilustra o metal de base que será utilizado, já cortados nas medidas e prontos para serem colocados na estufa, para o pré-aquecimento de 150°.



Figura 16 – Foto metal de base

Fonte: Autoria própria. (2014)

3.3 CONSUMIVEIS

3.3.1 Arame Tubular ER 410NiMo

Para este trabalho foi utilizado o arame tubular (FCAW) do tipo "flux cored", de especificação SFCA 5.22 / ER 410 NiMo (similar ABNT ER410).

Este consumível é um inoxidável, que apresenta uma microestrutura constituída por martensita macia, com diâmetro de 1,2 mm, apresentado em rolos de arame de aproximadamente 15 kg, conforme Figura 17.



Figura 17 – Arame Tubular ER 410 NiMo MC

Fonte: ESAB (2014)

A composição química do arame tubular ER 410 NiMo MC se encontra na Tabela 2.

Tabela 2 – Composição Química do arame tubular 410 NiMo MC

Elemento	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo
%	0,03	0,4	0,8	12	4,9	0,6

Fonte: ESAB (2014)

3.3.2 Gás de proteção

O gás de proteção utilizado na soldagem dos corpos de prova foi o Ar - 2% O₂, abaixo a Figura 18 ilustra o cilindro de gás utilizado, com o seu fluxômetro indicando a vazão do gás de 15 l/min.



Figura 18 – Foto cilindro de gás de proteção Ar – 2% O₂
Fonte: Autoria própria. (2014)

3.4 VARIÁVEIS DE SOLDAGEM

3.4.1 Parâmetros da corrente pulsada

Os parâmetros da corrente pulsada foram obtidos através da equação 2, (pagina 30), onde se tem corrente de pico vezes tempo de pico somado a corrente de base vezes o tempo de base, tudo isto dividido pela soma do tempo de pico mais o tempo de base, os dados utilizados estão na Tabela 3.

Tabela 3 – Parâmetros da corrente pulsada

CP	I_m (A)	I_p (A)	t_p (ms)	I_b (A)	t_b (ms)	Freq (Hz)
73	200	350	10	162	40	20,00
74	200	350	10	162	40	20,00
75	230	350	10	200	40	20,00
76	230	350	10	200	40	20,00

Fonte: Aatoria própria (2014)

Para obter a corrente média (I_m) de 200 A foi utilizada corrente de pico (I_p) igual á 350 A, tempo de pico (t_p) igual a 10 milisegundos (ms) e corrente de base (I_b) igual a 162 A e tempo de base (t_b) igual á 40 milisegundos (ms), da mesma forma para se obter a corrente média (I_m) de 230 A foi utilizada a mesma corrente de pico e o mesmo tempo de pico, porém foi utilizado uma corrente de base maior com 200 A e com o mesmo tempo de base, a frequência utilizada foi igual a 20 Hz.

3.4.2 Experimentos iniciais

Para colocar em prática os parâmetros pré-estabelecidos, foram necessários à realização de alguns experimentos. Durante está etapa, foi realizada a soldagem de alguns corpos de prova, e foi verificado que seria necessário a realização de alguns ajustes, principalmente na frequência utilizada no tartilope, que dá à amplitude do tecimento, ou seja, o passo.

Ajustada a frequência como fora estabelecido, foi iniciada a soldagem, porém foi evidenciado que, para atender a proposta inicial, seria necessário diminuir o comprimento do revestimento, pois como este trabalho é sobre um revestimento, que tem por suas características, alta corrente, alta deposição de arame e solda de tecimento, que minimiza a dissipação de calor devido ao movimento, foi constatado que ao revestir o primeiro corpo de prova, o mesmo sofreu um grande aporte térmico e sofreu um “empenamento”, devido a sua espessura pequena, a proposta era revestir aproximadamente 100 mm de comprimento, foi optado então por revestir apenas 50 mm.

Neste trabalho os corpos de prova foram soldados na posição plana, sobre um dispositivo de fixação, com DBCP de 33 mm e temperatura de pré-aquecimento controlada.

3.4.3 Planejamento dos experimentos definitivos

Esta atividade consistiu em planejar o número de ensaios a serem realizados, onde se optou pelo uso do método Taguchi com a finalidade de reduzir a quantidade de ensaios.

Então, com base nos ensaios preliminares, foram identificados os fatores de controle e seus níveis mais influentes para obtenção da transferência metálica por corrente pulsada, bem como os fatores capazes de influenciar de forma significativa as características geométricas dos cordões de solda. Assim foi montada a matriz ortogonal L4, com 3 fatores e 2 níveis cada, cujos fatores de controle e seus respectivos níveis serão descritos a seguir:

- Corrente média utilizada (A)

A escolha deste parâmetro como fator de controle se deve à grande importância do comprimento do arco na estabilidade e no tipo da transferência metálica. Então, para avaliar o efeito da corrente com a fonte de soldagem operando no modo de tensão constante, foram selecionados dois valores; 200 A e 230 A, que correspondem aos Níveis 1 e 2 deste fator de controle respectivamente (Tabela 5).

- Largura do cordão

Este parâmetro foi escolhido como forma de controle devido a sua influência significativa sobre o perfil geométrico do cordão de solda. Assim para avaliar o efeito deste fator, que corresponde à largura do cordão de solda, foram escolhidas duas larguras, que foram de 30 mm e 40 mm, que estão na Tabela 5.

- Passo

O passo embora não tenha tanta influência na geometria do cordão foi escolhido, pois, este fator está diretamente ligado ao acabamento superficial do cordão, para isto foi utilizado passo de 7 mm e 9 mm, conforme indicado na Tabela 4.

Tabela 4 – Fatores de controle e níveis

Fatores de Controle	Nível	
	1	2
Corrente	200 A	230 A
Largura	30 mm	40 mm
Passo	7 mm	9 mm

Fonte: Autoria própria. (2014)

3.4.4 Matriz ortogonal L4

Foram feitas análises de forma mais ampla para verificar a influência da variação do consumível em tecimento diferentes com valores de corrente e tensões, porém foi aplicado o método estatístico de Tagushi, e o resultado foi uma matriz ortogonal (L4) conforme a Tabela 5. A sequência de soldagem foi feita somente na posição plana, com o corpo de prova posicionado em um dispositivo de fixação.

Tabela 5 – Matriz ortogonal L4

Corrente (A)	Largura (mm)	Passo (mm)
200	30	7
200	40	9
230	30	9
230	40	7

Fonte: Autoria própria.(2014)

Onde:

I_m – Corrente média, L – Largura do cordão de Solda, A – Passo do cordão de Solda.

3.4.4 Técnica da tocha e tecimento

Este parâmetro, embora não tenha influência na montagem da matriz ortogonal, tem influência significativa sobre o perfil geométrico do cordão de solda. A técnica utilizada, corresponde ao ângulo de inclinação da tocha em relação a um eixo perpendicular ao corpo de prova, contido num plano vertical que passa pelo eixo longitudinal do corpo de prova, foi adotado um nível onde, a tocha trabalha com uma inclinação de 90° ou normal. A Figura 19 ilustra a posição descrita acima.

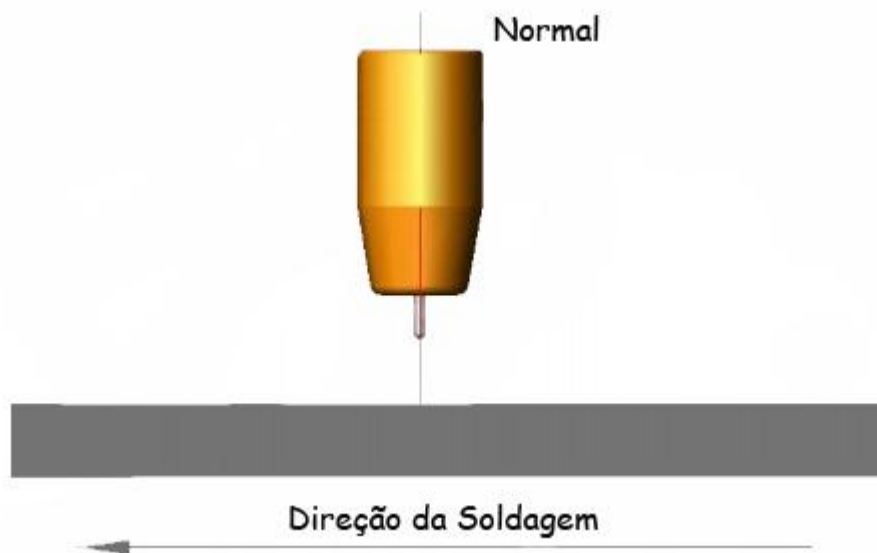


Figura 19 – Técnica da tocha

Fonte: Adaptado de PESSOA (2009)

O tipo de tecimento foi escolhido, pelo fato de ter forte influência no formato do perfil geométrico do cordão de solda. Foi adotada a técnica de soldagem com tecimento triangular, (Figura 20).

O tecimento triangular é caracterizado pelas variáveis; velocidade de soldagem, amplitude, freqüência e tempos de paradas. O dispositivo se move com velocidade constante no eixo x enquanto o eixo y oscila.

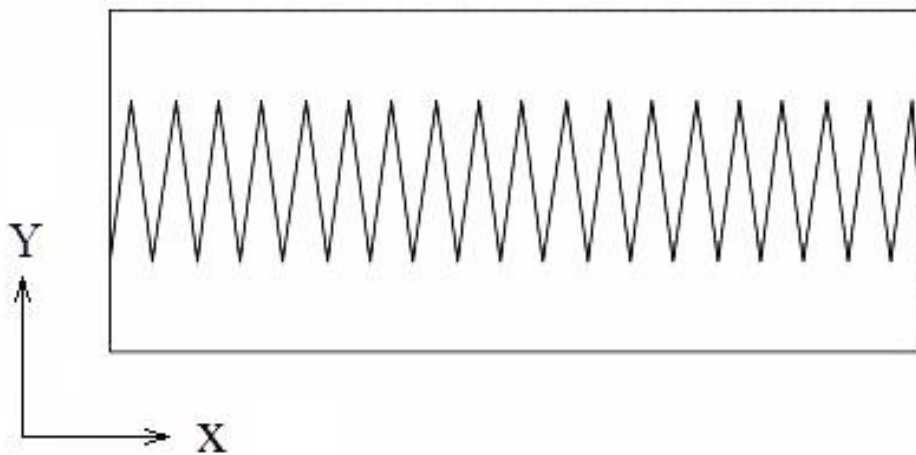


Figura 20 – Tecimento triangular

Fonte: Autoria própria. (2014)

3.4.5 Condições e parâmetros de soldagem

Para a realização de um bom revestimento uma das principais preocupações foi obter cordões uniformes, de bom aspecto superficial, isentos de falhas como mordeduras, falta de penetração, falta de fusão, trincas e porosidades. Para tanto foi analisada a melhor forma de realizar cada cordão de solda. Estas condições estão divididas entre os parâmetros relacionados diretamente com o processo de soldagem e os processos ligados diretamente ao deslocamento da tocha, os parâmetros relacionados diretamente com o processo de soldagem são;

- Tensão de soldagem;
- Velocidade de alimentação do arame
- Vazão do gás
- Distância bico de contato da peça – DBCP
- Ângulo de ataque da tocha.

Já os parâmetros que estão relacionados diretamente com o sistema de deslocamento da tocha são os seguintes;

- Velocidade de soldagem;
- Tipo de tecimento;
- Frequência de tecimento;
- Amplitude de tecimento.

3.5 SOLDAGEM DOS EXPERIMENTOS DEFINITIVOS

Com todos os parâmetros estabelecidos os corpos de prova foram pré-aquecidos a 200°C, na estufa MUFLA, após aquecimento os mesmos foram retirados e colocados no dispositivo de soldagem. As soldagens MIG/MAG foram realizadas na posição plana por deposição de tecimento, estando o eletrodo na polaridade positiva e com uma distância bico de contato da peça (DBCP) de 33 mm. Foram mantidas constantes a vazão do gás de proteção em 15 l/min e a velocidade de alimentação em 8,5 m/min. A temperatura de interpasse foi mantida a 150 °C, e controlado com termômetro infravermelho.

3.5.1 Identificações das amostras

Foram soldados 01 corpo de prova para cada parâmetro estabelecido, totalizando 04 corpos de prova, cada um com sua característica própria.

Cada amostra foi identificada quanto à corrente média, o passo e a largura do cordão, (Tabela 6).

Tabela 6 – Identificação das amostras

Corpo de Prova (CP)	Corrente (A)	Largura (mm)	Passo (mm)
73	200	30	7
74	200	40	9
75	230	30	9
76	230	40	7

Fonte: Autoria própria. (2014)

A Figura 21 mostra os corpos de prova após a soldagem, sendo identificados para a realização de ensaio de US e posteriormente para o corte das amostras.



Figura 21 – Foto identificação das amostras

Fonte: Autoria própria. (2014)

3.6 CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS

3.6.1 Inspeção por ultrassom (US)

Após a soldagem dos corpos de prova, foram realizadas inspeções por ultrassom (US) conforme mostrado na Figura 22, a fim de garantir a integridade do cordão de solda, bem como evidenciar possíveis trincas, poros, ou qualquer outra descontinuidade, que pudesse vir a causar algum problema na preparação da superfície. Para este ensaio foi utilizado o aparelho SIUI CTS-9006, com um cabeçote com duplo cristal de 4 MHz.



Figura 22 – Foto inspeção por ultrassom

Fonte: Autoria própria. (2014)

O laudo da inspeção foi aprovado conforme relatório de inspeção por ultrassom, (Anexo - A).

3.6.2 Caracterização microestrutural

Após a inspeção por ultrassom, os corpos de prova foram cortado em 4 partes, utilizando serra fita FRANHO – FM500, conforme o modelo da Figura 23.



Figura 23 – Serra fita Franho – FM 500

Fonte: FRANHO (2014)

Nesta etapa, foram retiradas duas amostras com aproximadamente 20 mm de largura para análise das características geométricas dos cordões de solda. A extração da 1ª amostra se deu a aproximadamente 5 mm do início do cordão de solda, e a extração da 2ª amostra se deu a 5 mm do final do cordão de solda de cada corpo de prova. A Figura 24 ilustra as regiões de onde foram extraídas as amostras.

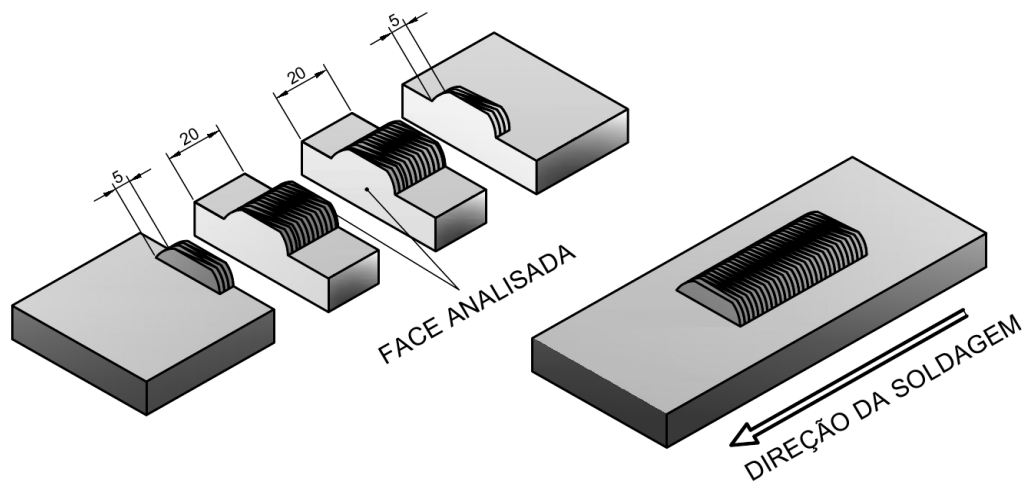


Figura 24 – Desenho esquemático extração das amostras

Fonte: Autoria própria. (2014)

A Figura 25 mostra os corpos de prova após serem cortados para a extração das amostras, que posteriormente foram analisadas, cada corpo de prova teve duas amostras retiradas.



Figura 25 – Foto extração das amostras

Fonte: Autoria própria. (2014)

Após o corte, cada corpo de prova foi lixado numa politriz modelo APL - 4D (Figura 26), sendo utilizada a técnica de lixamento manual com granulometria cada vez menor, mudando-se a direção em 90° no sentido horário em cada lixa subsequente até o desaparecimento dos riscos da lixa anterior. A sequência das lixas utilizadas no lixamento metalográfico foram 100 μm , 180 μm , 220 μm , 320 μm , 400 μm , 600 μm e 1200 μm , e seguida os corpos de prova foram polidos em politriz DP-10 da PANAMBRA, utilizando pano de polimento com diluição de Alumina 0,3 μm e Álcool Etílico. O ataque após o polimento foi realizado com reagente Nital a 4% durante 01 minuto, sendo em seguida as amostras lavadas em água corrente, depois lavadas com acetona e secas a seguir utilizando ar quente.



Figura 26 – Foto lixadeira politriz APL – 4D

Fonte: Autoria própria. (2014)

3.7 MACROGRAFIA E MORFOLOGIA

3.7.1 Análise macrográfica

Na análise macrográfica, foi verificada apenas a zona termicamente afetada (ZTA), ou seja, a região do metal de base (substrato) que tem sua estrutura

e/ou suas propriedades alteradas pelo calor de soldagem, que corresponde à região entre o substrato e o revestimento, onde ocorreu a fusão dos materiais, a Figura 27 indica a ZTA.



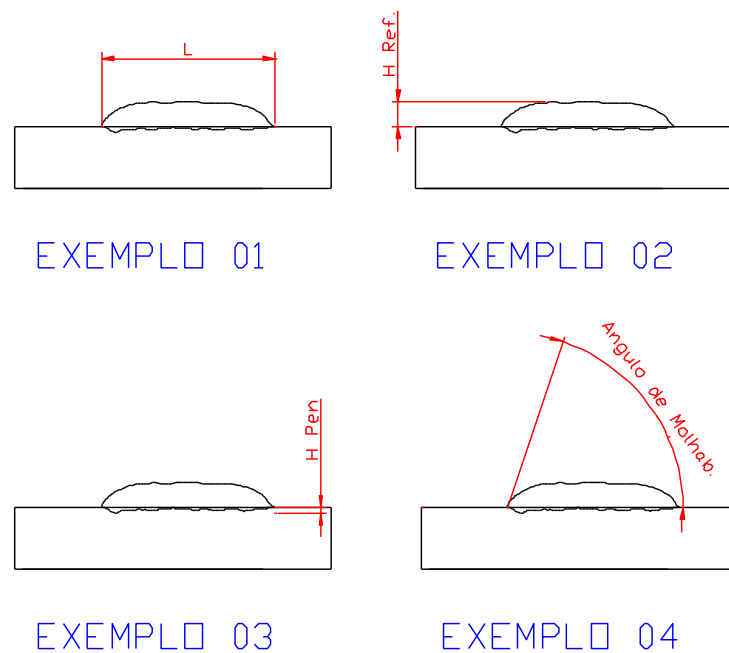
Figura 27 – Zona Termicamente Afetada

Fonte: Autoria própria. (2014)

3.7.2 Morfologia do cordão de solda

Na soldagem de revestimento de metais dissimilares, é interessante obter-se uma penetração e uma diluição pequena, porém o revestimento deve ter como principal característica uma boa resistência ao arrancamento, já o reforço e a largura devem ser o maior possível, para se diminuir a quantidade de passes a serem realizados.

Com intuito de analisar geometricamente cada cordão de solda, os corpos de prova foram fotografados e exportados para o Auto CAD, onde foram realizadas medições de reforço, penetração, ângulo de molhabilidade e diluição, conforme ilustrado na Figura 28.



**Figura 28 – Modelo esquemático das medições realizadas no AUTO CAD.
Fonte: Autoria própria. (2014)**

Onde expresso a letra “L” no exemplo 1, representa a largura do cordão de solda, o “H ref.” no exemplo 2, refere-se à altura do reforço, assim no exemplo 3 o “H Pen”, a altura da penetração, por fim o ângulo de molhabilidade no exemplo 4.

Para realizar as medições no auto CAD, foi utilizado o seguinte procedimento; a partir de uma medida conhecida, neste caso a espessura do material de base que é de 12 mm, fez-se uma correção de escala, ajustando a medida conhecida com a imagem hora importada para o software, em seguida a largura do revestimento foi dividida em seis partes, ou seja, cinco linhas, conforme ilustrado na Figura 29.

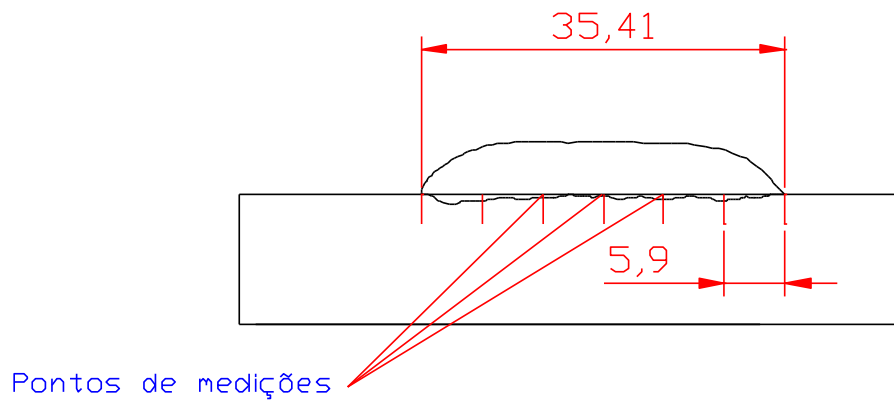


Figura 29 – Exemplo da divisão dos pontos de medição

Fonte: Autoria própria. (2014)

Para o exemplo acima, a largura do reforço foi dividida em 6 partes, conforme a *Equação (3)*.

$$35,41\text{mm} / 6 = 5,90\text{mm} \quad (3)$$

As medições foram realizadas somente nas três linhas centrais, tanto para o reforço quanto para a penetração, a Figura 30, ilustra onde foram realizadas as medições, posteriormente foram tiradas as médias desses pontos.

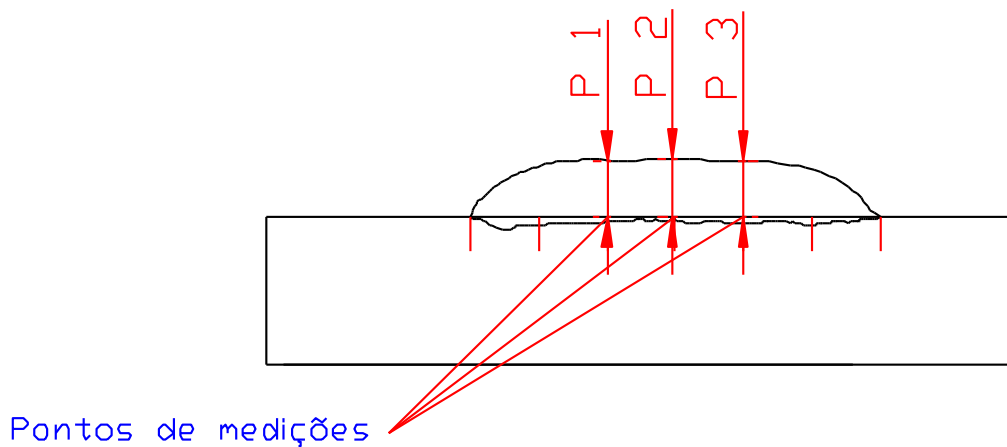


Figura 30 – Exemplo dos pontos de medições

Fonte: Autoria própria. (2014)

Para ser delimitada a área do reforço e área de penetração, utilizou-se de uma linha contínua, a partir daí, a parte superior da linha determina a área de reforço e a parte inferior a área de penetração, a Figura 31 indica as duas áreas. Com uma ferramenta própria do AUTO CAD foi obtido o valor em milímetros quadrados das áreas de penetração e de reforço.

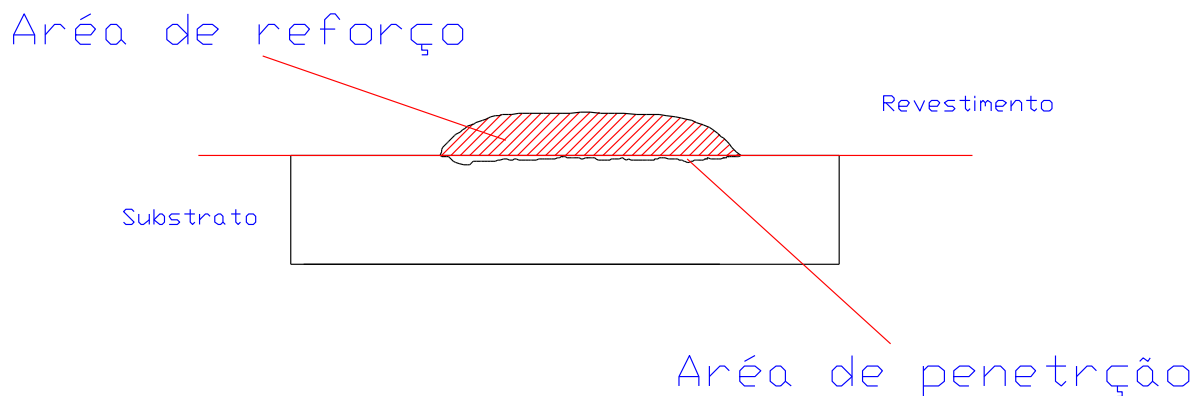


Figura 31 – Área de penetração e área de reforço

Fonte: Autoria própria. (2014)

3.8 MICRODUREZA

O ensaio de microdureza consiste na impressão de uma pequena marcação na superfície do material analisado, através de um penetrador com o formato de um losango, o resultado é adquirido pela análise desta marcação, que indica a medida de microdureza de todo o material ou apenas da área superficial. Em algumas situações práticas, ocorre a necessidade de determinação da dureza de pequenas áreas do corpo-de-prova. O ensaio de microdureza produz uma impressão microscópica e se utiliza de penetradores de diamante e cargas menores que 1kgf (GARCIA, 2000). Os corpos de prova foram lixados e polidos. Foram feitas medidas de microdureza segundo a norma NBR-6672, com carga de 300 gramas por 15 segundos. O equipamento utilizado foi o foi o HMV Shimadzu do Laboratório de Materiais e Superfícies (LAMATS) da UFPR (Figura 32).



Figura 32 – Foto do microdurômetro
Fonte: Adaptado de TREVISANI (2012)

4 RESULTADO E DISCUSSÕES

4.1 RESULTADOS DE LARGURA

Os resultados encontrados na medição de largura estão descritos na Tabela 7.

Tabela 7 – Largura dos cordões de Solda

Corpo de Prova Nº	Corrente (A)	Largura Proposta (mm)	Largura Obtida (mm)
73 A	200	30,0	35,41
73 B	200	30,0	35,95
74 A	200	40,0	44,87
74 B	200	40,0	44,26
75 A	230	30,0	37,72
75 B	230	30,0	36,40
76 A	230	40,0	46,31
76 B	230	40,0	46,56

Fonte: Autoria própria. (2014)

Com auxílio do Gráfico 1, pode-se visualizar que, nos corpos de prova 75 e 76, onde foram utilizadas correntes de 230 A, foi obtido a maior largura do cordão de solda, mesmo tendo larguras diferentes, o resultado foi maior devido à maior corrente utilizada.

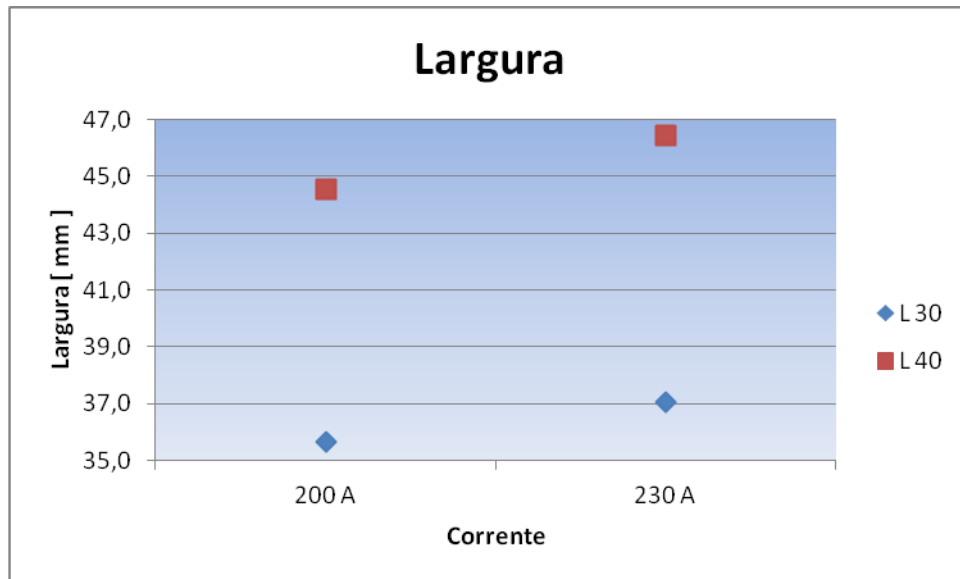


Gráfico 1 – Largura dos cordões de solda

Fonte: Autoria própria. (2014)

4.2 RESULTADO DE REFORÇO

Na soldagem, a altura do reforço é uma das características mais essenciais, pois quanto maior o reforço menos passes deveram ser realizados. Os reforços medidos foram descritos na Tabela 8 abaixo, observa - se a altura do reforço medido em 3 pontos (P1, P2 e P3), e também o reforço médio encontrado e a área de reforço no cordão de solda.

Tabela 8 – Características do reforço do cordão de solda

Corpo de Prova Nº	Autura do Reforço (mm)			Reforço Médio (mm)	Área do Reforço (mm ²)
	P 1	P 2	P 3		
73 A	4,49	4,54	4,37	4,37	132,51
73 B	3,96	3,95	3,81	3,81	108,25
74 A	3,15	3,29	3,02	3,02	115,21
74 B	3,50	3,58	3,60	3,60	137,75
75 A	4,00	4,20	4,24	4,24	125,74
75 B	4,40	4,45	4,35	4,35	129,09
76 A	3,34	3,34	3,29	3,29	119,36
76 B	3,21	3,67	3,50	3,50	128,00

Fonte: Autoria própria. (2014)

O Gráfico 2 ajuda a visualizar as características da altura do reforço do cordão de solda.

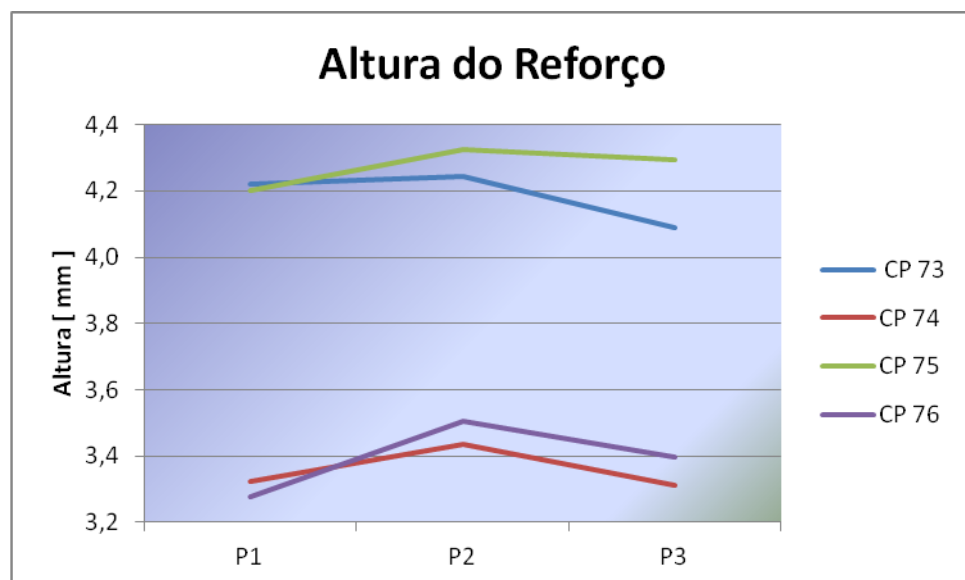


Gráfico 2 – Altura do reforço

Fonte: Autoria própria. (2014)

Conforme ilustrado acima no Gráfico 2, nota-se ver que os corpos de prova 73 e 75 tiveram sua altura de reforço superior aos corpos de prova 74 e 76,

mesmo sendo soldados com correntes diferentes, para os corpos de prova 73 e 75 respectivamente foram utilizadas correntes de 200 e 230 Amperes, porém a diferença na altura do reforço se dá pelo fato de, os dois corpos de prova terem a sua largura pré-definida com 30mm, ou seja, largura menor que as dos outros dois corpos de prova (CP 74 e CP 76) que tiveram sua largura pré definidas com 40mm, portanto para largura menor maior altura de reforço, ainda observa-se que com uma corrente maior se obtém um reforço ainda maior, que é o caso do CP 75.

Por outro lado pode-se verificar a área de reforço que esta representada no Gráfico 3.

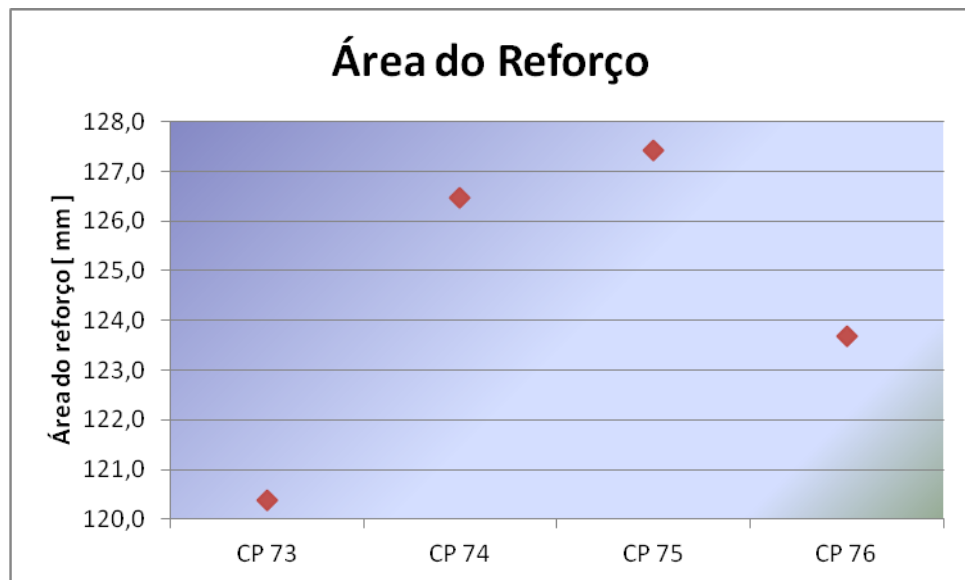


Gráfico 3 – Área do reforço

Fonte: Autoria própria. (2014)

O Gráfico 3 mostra que, o corpo de prova 75 teve a maior área de reforço em relação aos demais, logo se verifica também que, a sua maior área se deve o fato de sua corrente ter sido maior, sua largura ser pré definida em 30mm, o que proporciona uma menor área de deslocamento da tocha, o que resulta em maior quantidade de arame a ser depositado.

4.3 RESULTADO DE PENETRAÇÃO

Como citado anteriormente, na soldagem de revestimento quanto menor a penetração melhor, os resultados obtidos nas medições realizadas em AUTO CAD estão demonstradas na Tabela 9, verifica-se novamente a medição realizada em três pontos.

Tabela 9 – Características da Penetração

Corpo de Prova Nº	Autura da Penetração (mm)			Penetração Média (mm)	Área da Penetração (mm ²)
	P 1	P 2	P 3		
73 A	0,97	0,73	0,84	0,84	34,16
73 B	1,58	1,26	1,15	1,33	41,76
74 A	1,13	1,18	0,60	0,97	43,19
74 B	0,69	0,20	0,39	0,43	25,56
75 A	1,43	1,32	1,20	1,32	39,17
75 B	0,84	1,07	1,50	1,14	39,25
76 A	1,15	0,69	0,44	0,76	38,32
76 B	0,85	0,64	0,75	0,75	40,93

Fonte: Autoria própria. (2014)

Nota-se no Gráfico 4 que, novamente o corpo de prova 75 se destacou em relação aos demais, a penetração média no ponto 3, foi de aproximadamente 1,35 mm, resultado bem acima do corpo de prova 74, que apresentou 0,50 mm de penetração no ponto 3, porém para um bom revestimento precisa-se ter uma penetração menor possível, com isso, considerando que o corpo de prova 74 teve uma penetração pequena nos três pontos medidos, este se considera nessa questão ideal para soldagem de revestimento.

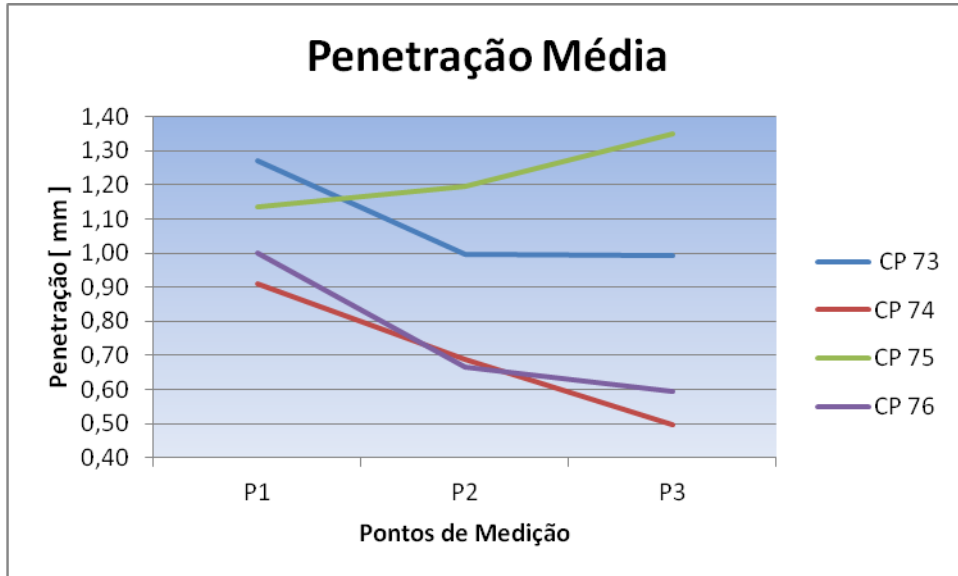


Gráfico 4 – Penetração Média

Fonte: Autoria própria. (2014)

O Gráfico 5 mostra os valores da área total de penetração de cada corpo de prova.

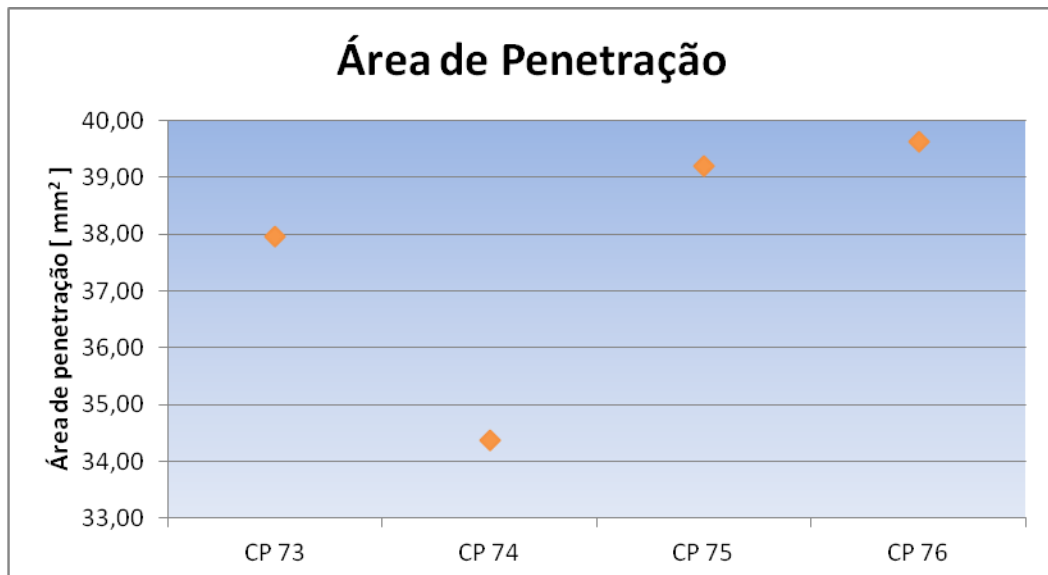


Gráfico 5 – Área de penetração

Fonte: Autoria própria. (2014)

Os corpos de prova que foram soldados com uma corrente maior obtiveram uma maior área de penetração, justificado pela maior temperatura obtida na poça de fusão, fazendo com que os dois materiais tivessem maior fusão.

4.4 DILUIÇÃO E ÂNGULO DE MOLHABILIDADE

Através da equação (1) (Pag. 26) citada anteriormente, foi calculada a diluição de cada revestimento, e também foi medido o seu respectivo ângulo de molhabilidade, conforme Tabela 10 abaixo.

Tabela 10 – Diluição e Ângulo de molhabilidade.

Corpo de Prova Nº	Diluição (%)	Ângulo de Molhabilidade (°)
73 A	<i>20,50</i>	<i>71</i>
73 B	<i>27,84</i>	<i>53</i>
74 A	<i>27,27</i>	<i>54</i>
74 B	<i>15,65</i>	<i>47</i>
75 A	<i>23,75</i>	<i>72</i>
75 B	<i>23,32</i>	<i>55</i>
76 A	<i>24,30</i>	<i>25</i>
76 B	<i>24,23</i>	<i>30</i>

Fonte: Autoria própria. (2014)

O Gráfico 6 mostra os valores percentuais de diluição de cada corpo de prova.

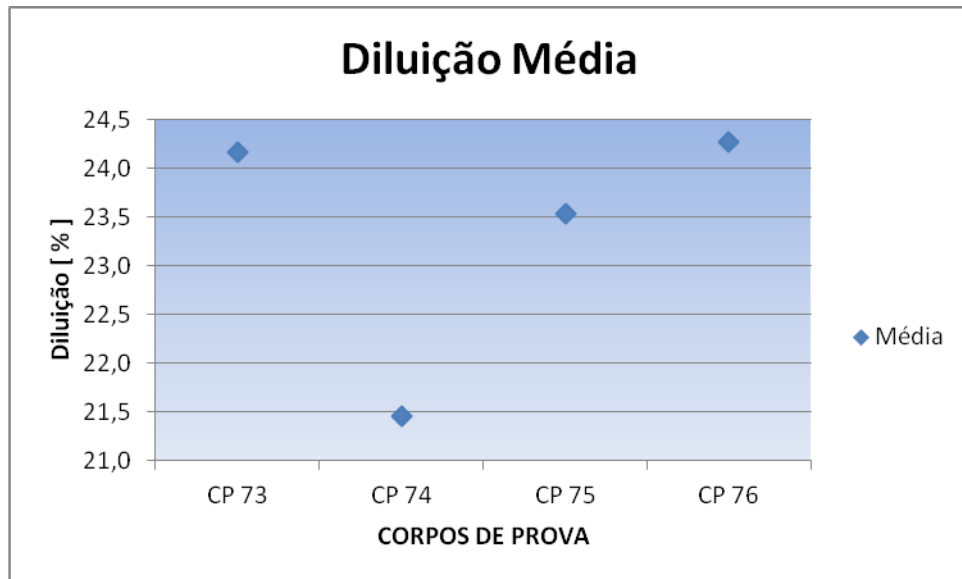


Gráfico 6 – Diluição Média de cada corpo de prova

Fonte: Autoria própria. (2014)

Observa-se no Gráfico 6 que, no corpo de prova onde foi aplicado à maior largura e menor corrente obteve-se uma menor diluição, para o corpo de prova 74 foi utilizado uma corrente de 200 A e uma largura de 40 mm, a mesma largura do corpo de prova 76, que por sua vez foi soldado com uma corrente de 230 A, diferença chegou a 2,81%, na diluição. Na soldagem de revestimento com metais dissimilares, a diluição é um fator extremamente importante, pois uma diluição excessiva poderia causar mudanças nas propriedades do aço.

O Gráfico 7 mostra o ângulo de molhabilidade de cada corpo de prova, medido através do AUTO CAD.

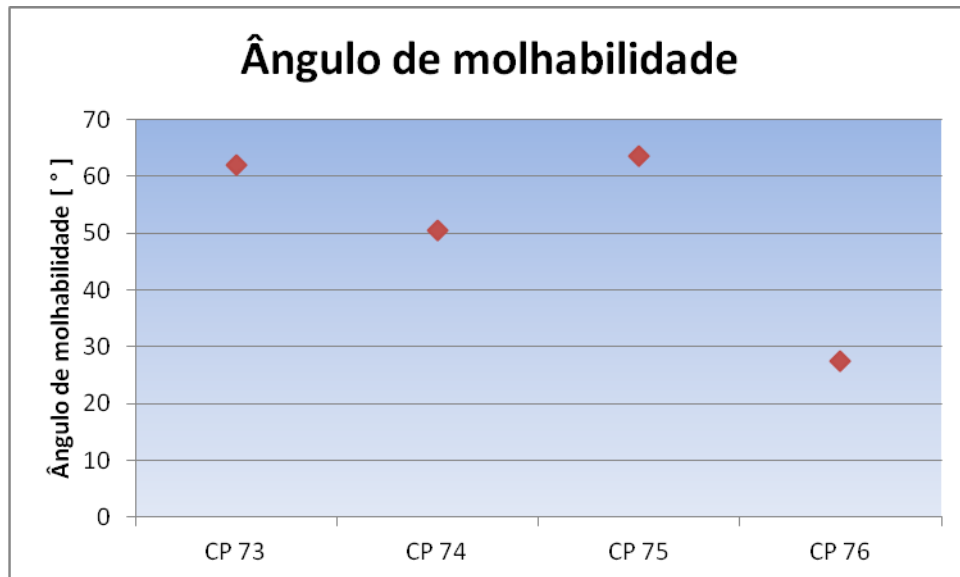


Gráfico 7 – Ângulo de Molhabilidade

Fonte: Autoria própria. (2014)

O ângulo de molhabilidade é um dado que está diretamente ligado a largura do cordão de solda, nos dois corpos de prova que foram soldados com uma largura menor observa-se um maior ângulo de molhabilidade, já o contrario ocorreu onde obteve uma largura maior, no caso do corpo de prova 76, o ângulo foi reduzido mais ainda pelo fato de se ter trabalhado com uma corrente mais alta.

4.5 RESULTADOS POR CORRENTE

Para que se obtive-se um verdadeiro parametro sobre qual a melhor corrente a ser utilizada, foi elaborada a Tabela 11, que mostra todos as características do revestimento pela corrente que foi utilizada.

Tabela 11 – Características pela corrente utilizada

CORRENTE (A)	Largura (mm)	Reforço (mm)	Penetração (mm)	Área do Reforço (mm ²)	Área da Penetração (mm ²)	Diluição (%)
200	40,12	3,77	0,89	123,43	36,17	22,81
230	41,75	3,83	0,99	125,55	39,42	23,90

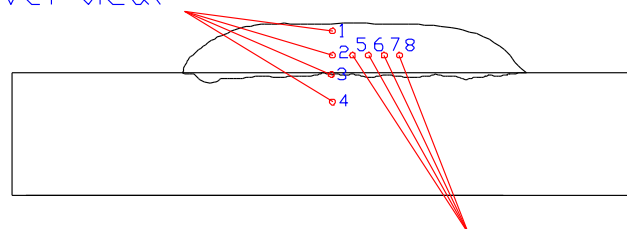
Fonte: Autoria própria. (2014)

Em todas as características analisadas, largura, reforço, penetração, área de reforço, área de penetração e diluição, obteve-se valores maiores nas amostras onde foi utilizado a corrente de 230 A, porém com valores bem próximos uns dos outros.

4.5 RESULTADOS DE MICRODUREZA

Foram feitas 8 medidas de microdureza na secção transversal do revestimento, 4 medidas na vertical e 4 medidas na horizontal, conforme ilustrado na Figura 33, para isso as amostras depois de lixadas, foram polidas. Foi utilizada uma carga de 300 gramas por 15 segundos.

Pontos na vertical



Pontos na horizontal

Figura 33 – Modelo esquemático dos pontos de medições de microdureza

Fonte: Autoria própria. (2014)

Na Figura 34 podem-se visualizar os pontos onde foram realizadas as medições de microdureza.

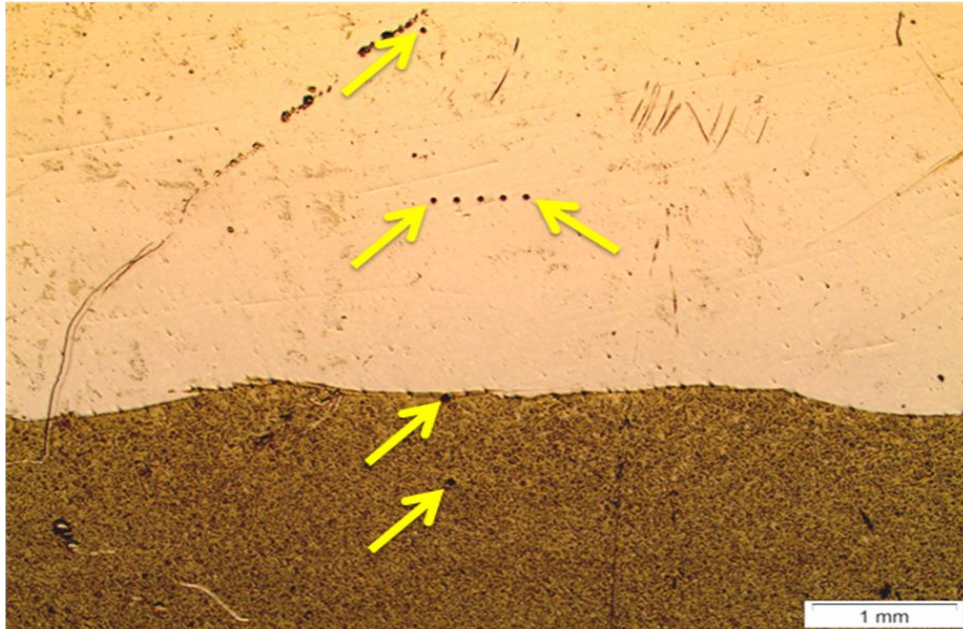


Figura 34 – Pontos de realização de microdureza, CP 73 – A
Fonte: Autoria própria. (2014)

As médias das medições de microdureza e os desvios padrão para as medidas da horizontal, que correspondem aos pontos 2, 5, 6, 7 e 8 encontram-se na Tabela 12, estes pontos foram selecionados para verificar a dureza do cordão e para a verificação da homogeneidade do mesmo.

Tabela 12 – Microdureza Vickers Hv 0,3

CP	MÉDIA	DESVIO PADRÃO
73	412,40	7,77
74	428,40	13,48
75	404,00	15,92
76	446,40	17,71

Fonte: Autoria própria. (2014)

O Gráfico 8 mostra como se comportaram as medidas de microdureza, na horizontal, nos pontos medidos.

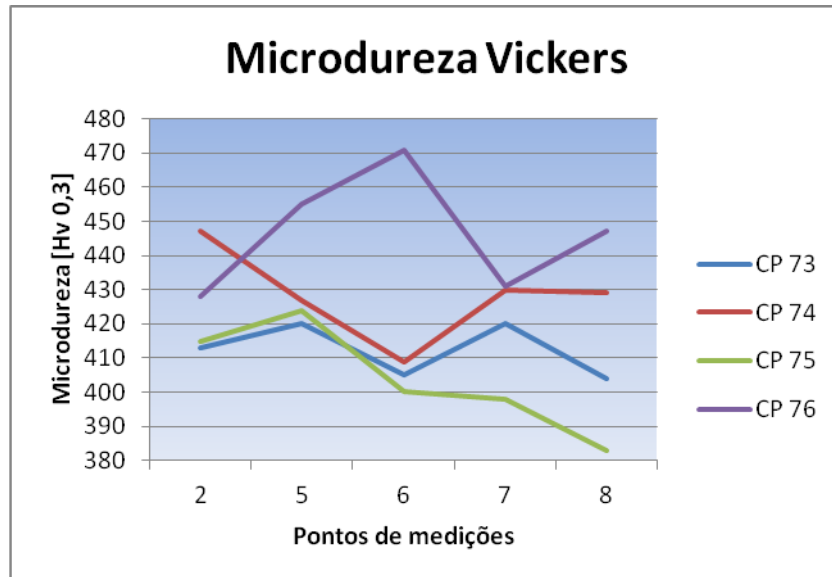


Gráfico 8 – Microdureza Vickers na horizontal

Fonte: A autoria própria. (2014)

Observa-se que em cada corpo de prova não há grande variação de dureza, e o desvio padrão é pequeno. Isso demonstra que a propriedade mecânica do cordão de solda é igual em todos os pontos.

Comparando todos os corpos de prova nota-se que não há grande variação entre eles, porém o corpo de prova com menor média de dureza foi o CP 75, este é considerado o melhor para a aplicação, pois é o menos frágil.

5 CONCLUSÃO

O estudo da morfologia do revestimento pelo processo de arame tubular utilizando tecimento semiautomático permitiu avaliar e selecionar os parâmetros ótimos para obtenção das características geométricas desejadas para soldagem de revestimento.

O processo de soldagem utilizando arame tubular, com método de transferência de corrente pulsada, proporcionou cordões de solda com uma baixa diluição, uma excelente altura de reforço e ótimas medidas de penetração, características ideais para a soldagem de revestimento.

Conclui-se também que com o aumento da corrente média, há um crescimento das características geométricas do revestimento, por exemplo, largura, penetração e reforço, conseqüentemente aumentando a diluição.

Por outro lado conclui-se que, com o aumento da corrente, não teve mudança significativa na microdureza do material.

Através de um estudo comparando todos os fatores que influenciaram a soldagem de cada corpo de prova, conclui-se que a melhor combinação de parâmetros, para obter-se uma maior largura de cordão, com uma maior altura de reforço é o corpo de prova 75, onde foi aplicado corrente de 230 A, com uma largura de 30 mm, este também apresentou o melhor resultado no ensaio de microdureza.

REFERÊNCIAS

ARCELORMITTAL – **Composição Química dos Aços ABNT 1020** - <<http://brasil.arcelormittal.com/pdf/quem-somos/guia-aco.pdf>>. Acesso em 17 de Nov. 2014.

BARBEDO, N. D. **Avaliação comparativa dos processos de soldagem GMAW e FCAW utilizando aço ASTM A-36 para verificar a soldabilidade, propriedades metalúrgicas e geométricas, e resistência mecânica**. 2011, 56 p. Dissertação (Mestrado em Projeto e Fabricação) - Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá.

CORRÊA, Celso Alves. **Aço Inoxidável Martensítico Aplicado em Revestimento pelo Processo MIG Pulsado e Convencional**, Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2000. 91p. Dissertação (Mestrado)

ESAB – **Processos de Soldagem, Arame Tubular**. Disponível em: <http://www.esab.com.br/br/por/Instrucao/processos_soldagem/soldagem_arames_tubulares.cfm>. Acesso em 05 de Jan. 2014.

FORTES, C. **Metalurgia da Soldagem**. Revisão 2004. Disponível em: <http://www.esab.com.br/br/por/Instrucao/biblioteca/upload/1901102rev0_ApostilaMetalurgiaSoldagem.pdf>. Acesso em 02 em Jun. de 2014.

GARCIA, A.; SPIM, J.A. & dos SANTOS, C. A. **Ensaio dos Materiais**: Livro, Editora: Livros Técnicos e Científicos, 2000.

GOMES, José Henrique de Freitas, **Análise e Otimização da Soldagem de Revestimento de Chapas de Aço ABNT 1020 com utilização de Arame Tubular Inoxidável Austenítico**. Itajuba. Universidade Federal de Itajuba, 2010. 136p. Dissertação (Mestrado)

INFOSOLDA - **Processos de Soldagem, Soldagem com Arame Tubular**. Disponível em: <<http://www.infosolda.com.br/artigos/processos-de-soldagem/358-soldagem-com-arames-tubular.html>>. Acesso em 05 de Jan. 2014.

IMC – **Fonte de Soldagem**. Disponível em: <<http://www.imc-soldagem.com.br/inversal.html>>. Acesso em 19 de Jun. de 2014.

IMC – **Tracionador de arame**. Disponível em: <<http://www.imc-soldagem.com.br/inversal.html>>. Acesso em 26 de Nov. de 2014.

MACHADO, I.G. Soldagem e Técnicas Conexas: **Processos**. Porto Alegre. Editado pelo Autor, 1996. Cap. 8.

MARQUES, P. V. et al. **Soldagem – Fundamentos e Tecnologia**, Belo Horizonte: Editora UFMG, 2009.

MARKUS, O. – Circuitos Elétricos – **Corrente Contínua e Corrente Alternada**, Editora Érica Ltda, 2004.

NORRISH, J., NIXON, J. **A history of pulsed MIG welding**, *Joining and Materials*, v.2, n.6, p.264 - 268, Jun 1989.

PESSOA, Antonio Rodolfo Paulino, **Revestimento de ligas de níquel pelo processo MIG/MAG com transferência por curto-circuito** / Pós-Graduação em Engenharia e Ciência de Materiais da Universidade Federal do Ceará., 2009. 145p.

PHILLIPS, A. L. **Welding Handbook**: Special Welding Processes and Cutting. London: American Welding Society, 1965b. 4. Vol. 3.

PRÓ END, módulo 5, **Processos de Soldagem**, Curso de Inspetor de Soldagem Nível 1.
VIEIRA, S.R.B., “Capítulo 4 – **O Método Taguchi**”; Dissertação, UFSC, Florianópolis. (1996).

RODRIGUES, Emanuel Rezende, **Influência de parâmetros do processo FCAW – G nas características da solda do Aço ASTM A-36**, 2009, Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 96p.

ROSS, P. J., **Aplicações das Técnicas Taguchi na Engenharia da Qualidade**. Makros Books do Brasil Editora Ltda, 333p. (1991)

SPS – **Sistema e Processo de Soldagem**, Tartilope <<http://www.sps-soldagem.com.br>>. Acesso em 05 de Jan. 2014.



TBi industries – **Tocha de Soldagem**, disponível em <<http://www.tbi-brasil.com/Produtos/TBi%20511-411.pdf>>. Acesso em 10 de Jun. 2014.

TREVISANI, E. F. **Avaliação de ligas de ni-al utilizadas como revestimento estáveis a altas temperaturas depositadas por aspersão térmica à chama pó**, Curitiba, Universidade Federal do Paraná, 2012. 97p. Dissertação (Mestrado).

UTFPR. **Normas para elaboração de trabalhos acadêmicos**. <http://www.utfpr.edu.br/documentos/normas_trabalhos_utfpr.pdf>. Acesso em 05 de Jan. 2014.

ZEEMAN, A. 1998, "**Diluição**", Soldagem e Inspeção, v. 4, n. 5, p. 14-46.

ANEXO - A

		RELATÓRIO DE INSPEÇÃO POR ULTRASSOM ULTRASONIC INSPECTION REPORT				Nº. REL / REPORT NR.:		FL. / SHEET:						
						0001/14		1/1						
Nº. C.P. / ORDER CONFIRMATION NR.:										N/A				
CLIENTE: CLIENT: PAULA DE ANDRADE SILVA / TIAGO ESTEVAM MARQUES					PROJETO: PROJECT: TRABALHO DE DIPLOMAÇÃO			O.P. Nº.: PRODUCTION ORDER: N/A						
EQUIPAMENTO: EQUIPMENT: CORPOS DE PROVA					Nº. DESENHO: DRAWING Nº: N/A			REV: REV.:						
PROCEDIMENTO DE INSPEÇÃO: INSPECTION PROCEDURE: N/A			CRITÉRIO DE ACEITAÇÃO: ACCEPTANCE STANDARD: ASME Seção VIII Div. 1 Ap. 12			PLANO DE INSPEÇÃO: INSPECTION PLAN: N/A								
RASTREABILIDADE DE JUNTAS: TRACEABILITY OF JOINT: N/A			APARELHO: APPARATUS: MITECH MDF500 B NR. REG.: JIM 4340 MT			BLOCO DE REFERÊNCIA: REFERENCE BLOCK: Bloco V1								
ACOPLANTE: COUPLANT: C. METIL		MATERIAL: MATERIAL: ABNT 1020 410NiMo MC		ESPESURA: THICKNESS: 12mm		CONDIÇÃO SUPERFICIAL: SURFACE CONDITION: ESCOVADA		TRATAMENTO TÉRMICO: HEAT TREATMENT: N/A						
CABEÇOTES UTILIZADOS / USEFULL CRYSTAL														
FABRICANTE		MODELO		Nº SERIE		GP		PT		GV				
MITECH		4Z10FG10ZL00		9101796		64		00		64				
CABEÇOTE		NORMAL		SE		45°		60°		70°				
POSIÇÃO		-		X		-		-		-				
1														
														
PEÇA Nº		PROCES. SOLDA		SINETE		REGISTRO DE DESCONTINUIDADES						LAUDO		
						Nº	CABEÇOTE	GANHO	LOCAL	COMPR.	PROF.	P.S.	TIPO	
73		FCAW		-		-	-	-	-	-	-	-	-	A
74		FCAW		-		-	-	-	-	-	-	-	-	A
75		FCAW		-		-	-	-	-	-	-	-	-	A
76		FCAW		-		-	-	-	-	-	-	-	-	A
LEGENDA / LEGEND: GP - GANHO PRIMÁRIO / GAIN PRIMARIO PT - PERDA DE TRANSFERÊNCIA / LOSS OF TRANSFER GV - GANHO DE VARREDURA / GAIN OF SWEEP PO - POROSIDADE / POROSITY FF - FALTA DE FUSÃO / LACK OF FUSION FP - FALTA DE PENETRAÇÃO / LACK OF PENETRATION TL - TRINCA LONGITUDINAL / LONG. CRACKING TT - TRINCA TRANSVERSAL / TRANSV. CRACKING IE - INCLUSÃO DE ESCÓRIA / INCLUSION OF DESCALE A - APROVADO / APPROVED R - REPROVADO / REPROVED REC - RECOM. EXAME COMPL. / RESP. OF EXAM. SUP.														
OBSERVAÇÕES / REMARKS: TIPO: SOLDAGEM DE REVESTIMENTO														
INSPEÇÃO / INSPECTION				CONTROLE DA QUALIDADE / QUALITY CONTROL				CLIENTE / CUSTOMER						
DATA / DATE:		ASSINATURA / SIGNATURE		DATA / DATE:		ASSINATURA / SIGNATURE		DATA / DATE:		ASSINATURA / SIGNATURE				
19/09/2014		Mauricio F. de Lima UT.N2 ASNT 3329		19/09/2014										