

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE MECÂNICA
ENGENHARIA INDUSTRIAL MECÂNICA

FERNANDO HENRIQUE PEREIRA

**ESTRUTURA DA GEOMETRIA DO CORDÃO DE SOLDA
UTILIZANDO ARAME TUBULAR E CORRENTE PULSADA**

TRABALHO DO CONCLUSÃO DE CURSO

CORNÉLIO PROCÓPIO
2015

FERNANDO HENRIQUE PEREIRA

**ESTRUTURA DA GEOMETRIA DO CORDÃO DE SOLDA
UTILIZANDO ARAME TUBULAR E CORRENTE PULSADA**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do Curso Superior de Engenharia Industrial Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Mecânico.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Cezar Moselli.
Coorientador: Prof. Ms. Celso Alves Correa.

CORNÉLIO PROCÓPIO
2015



Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Cornélio Procópio
Departamento Acadêmico de Mecânica
Curso de Engenharia Mecânica



FOLHA DE APROVAÇÃO

Fernando Henrique Pereira

Estrutura da Geometria do Cordão de Solda utilizando Arame Tubular e Corrente Pulsada

Trabalho de conclusão de curso apresentado às 15:50hs do dia 26/11/2015 como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro Mecânico no programa de Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. O candidato foi arguido pela Banca Avaliadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Avaliadora considerou o trabalho aprovado.

Prof(a). Dr(a). Paulo César Moselli - Presidente (Orientador)

Prof(a). Me(a). Celso Alves Correa - (Coorientador)

Engenheiro(a) Esp. Carlos De Nardi - (Membro)

Prof(a). Esp. Henrique Flávio Alves de Andrade - (Membro)

A folha de aprovação assinada encontra-se na coordenação do curso.

Primeiramente, não haveria vida sem Deus, então, dedico a Ele em primeiro lugar, e aos meus pais Aldo e Terezinha e irmão Ramon por me incentivar todos os dias e nunca me deixar desistir dos meus sonhos.

AGRADECIMENTOS

Tendo chegando ao fim deste trabalho tenho muito a agradecer, primeiramente a Deus pela forma que acredito que me conduziu durante os trabalhos que me permite executá-los da melhor forma possível.

Tenho que agradecer aos meus pais, que me ajudaram a passar por todos esses anos, e mesmo quando achava que era meu limite eles acreditaram em mim, e não deixaram eu desistir. E também por me apoiarem nas minhas decisões e nunca por nunca deixar de acreditar em mim.

Agradeço aos meus orientadores, tanto o meu orientador Doutor Paulo Cezar Moselli, quanto o meu coorientador Mestre Celso Alves Correa, e lógico a UTFPR – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, por possibilitar o uso dos laboratórios, e pelo tempo e paciência despendida a me ajudar em algumas questões que surgiram no desenvolvimento deste. Não devo esquecer os professores que passaram durante a graduação que sem eles não haveria este trabalho de conclusão de curso.

Não devo esquecer de agradecer, aos meus amigos que fiz em Cornélio Procópio, por fazer esses anos mais suportáveis longe dos familiares, e por graças a eles ter grandes e boas histórias para contar e rir. E também por sempre que precisei de um ombro ou uma ajuda, eles ficaram ao meu lado.

E não esquecendo da minha namorada, que sempre esteve ao meu lado com seu otimismo, me lembrando que não importa o que aconteça, no final sempre dará certo para aqueles que trabalham duro.

“A Máquina pode fazer a tarefa de 50 homens comuns. Máquina nenhuma é capaz de fazer o trabalho de um homem extraordinário” – Elbert Hubbard

RESUMO

PEREIRA, Fernando H. **Estrutura da geometria do cordão de solda utilizando Arame Tubular e corrente pulsada**. 2015. 70f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Industrial Mecânica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, 2015.

Neste trabalho foi realizada a soldagem de revestimento com arame tubular (Flux-Cored Arc Welding – FCAW) e corrente pulsada com intuito de obter as características da geometria do cordão de solda. Foi introduzida a Metodologia de Taguchi na qual se utiliza de métodos estatísticos para minimizar a quantidade de ensaios. As soldas foram realizadas em Aços 1020 trefilados, foram produzidos 4 corpos para que seja depositado a solda, as correntes utilizadas foram de 200A e 220A, após a soldagem os corpos de prova foram cortados em quatro partes e foram selecionadas duas amostras para realizar-se as seguintes medições: largura do cordão de solda, altura do reforço de solda, altura da penetração de soldagem, diluição e ângulo de molhabilidade. As medições tiveram auxílio de softwares para que se pudesse ter as mais precisas dimensões. Após se obter os valores destas medições foram analisados e determinados quais seriam os melhores parâmetros: qual das duas correntes seria a melhor a ser utilizada caso se necessite fazer uma soldagem de revestimento.

Palavras Chaves: Soldagem; Arame Tubular; Metodologia Taguchi; Revestimento.

ABSTRACT

PEREIRA, Fernando H. **Structure of weld size using Flux-Cored Arc Welding and Current Pulsed. 2015.** 70f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Industrial Mecânica) – Federal University Of Technology – Paraná, Cornélio Procópio, 2015.

In this work it was made the coating welding with cored wire (Flux-Cored Arc Welding – FCAW) and current pulsed with the propose to obtain the weld bead geometry features that would be obtained after the welding process. It was also introduced the Taguchi Methodology which is used statistics methods to lower exes with non necessaries works that can cause lost of material and time of service. The welds were performed in 1020 drawn steel. It was produced 4 bodies to be deposited the weld. the currents used were 200A and 220A. After the welding the proof bodies were cut in four parts. There were chosen two samples to be realized the follow measurements: weld bead width, weld reinforcement height, welding penetration height, dilution and wettability angle. In the measurements it was used computer software to have better occurrence. After to obtain these measurements values it was analyzed and set the better parameters: with one of the two currents should be better to use if it be necessary to make a coating welding.

Keywords: Welding ; Flux-Cored Arc Welding ; Taguchi methods; Coating.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema da fabricação do Arame Tubular.....	15
Figura 2 - Esquema da montagem do equipamento para soldagem com Arame tubular.....	18
Figura 3 - Seção transversal de uma solda de revestimento (esquemática).....	21
Figura 4 - Representação das dimensões geométricas das seções transversais dos cordões de solda.....	21
Figura 5 - Representação para cálculo da Diluição.....	22
Figura 6 – Tartilope V2.....	27
Figura 7 - Fonte retificadora de soldagem trifásica com corrente máxima de 450A.....	28
Figura 8 - Sistema tracionador de arame inversal, STZ-20.....	28
Figura 9 - Tocha de soldagem TBi AUT modelo 511.....	28
Figura 10 - Braço Robótico para tecimento do cordão de solda.....	29
Figura 11 - Fonte de Soldagem Inversal 450A.....	30
Figura 12 - Tocha de soldagem TBi AUT modelo 511.....	31
Figura 13 - Tracionador de arame STA-20.....	32
Figura 14- Serra FRANHO FM-335 utilizada na fabricação dos Corpos de Prova.....	33
Figura 15 - Jateadora de cabine de luvas.....	33
Figura 16 - Corpos de Prova fabricados prontos para serem soldados.....	34
Figura 17 - Arame Tubular ER 410 NiMo MC.....	35
Figura 18 - Gás de Proteção 98% Ar + 2% O ₂	35
Figura 19 - Técnica utilizada na tocha.....	39
Figura 20 - Tipo de tecimento utilizado (Triangular).....	40
Figura 21 - Identificação das Amostras.....	42
Figura 22 - Serra fita FRANHO – FM355 utilizado para corte das peças.....	43
Figura 23 - Ilustração da retirada dos corpos de prova.....	43
Figura 24 - Politriz modelo APL-4D.....	44
Figura 25 - Esquemática das medidas realizadas.....	45
Figura 26 - Exemplo dos pontos utilizados nas medições.....	46
Figura 27 - Área de penetração e Área de reforço.....	46
Figura 28- Resultado da Largura dos Cordões de Solda.....	47
Figura 29 - Reforço nos pontos P1, P2 e P3 no Corpo de Prova 2A.....	49
Figura 30 - Reforço nos pontos P1, P2 e P3 no Corpo de Prova 2B.....	50
Figura 31 - Reforço nos pontos P1, P2 e P3 no Corpo de Prova 3A.....	50
Figura 32 - Reforço nos pontos P1, P2 e P3 no Corpo de Prova 3B.....	51
Figura 33 - Reforço nos pontos P1, P2 e P3 no Corpo de Prova 4A.....	51
Figura 34 - Reforço nos pontos P1, P2 e P3 no Corpo de Prova 4B.....	52
Figura 35 - Reforço nos pontos P1, P2 e P3 no Corpo de Prova 5A.....	52
Figura 36 - Reforço nos pontos P1, P2 e P3 no Corpo de Prova 5B.....	53
Figura 37 - Penetração nos pontos P1, P2 e P3 no Corpo de Prova 2A.....	56
Figura 38 - Penetração nos pontos P1, P2 e P3 no Corpo de Prova 2B.....	56
Figura 39 - Penetração nos pontos P1, P2 e P3 no Corpo de Prova 3 ^a	57
Figura 40 - Penetração nos pontos P1, P2 e P3 no Corpo de Prova 3B.....	57
Figura 41 - Penetração nos pontos P1, P2 e P3 no Corpo de Prova 4 ^a	57
Figura 42 - Penetração nos pontos P1, P2 e P3 no Corpo de Prova 4B.....	58
Figura 43 - Penetração nos pontos P1, P2 e P3 no Corpo de Prova 5 ^a	58
Figura 44 - Penetração nos pontos P1, P2 e P3 no Corpo de Prova 5B.....	58

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição química do Aço ABNT 1020.	32
Tabela 2 - Composição Química do arame tubular 410 NiMo MC.	35
Tabela 3 - Parâmetros a serem utilizados nas soldagens	36
Tabela 4 - Variáveis Fixas utilizadas na soldagem.....	37
Tabela 5 - Tabela com níveis da Metodologia Taguchi.	38
Tabela 6 - Identificação parâmetros para cada ensaio.....	38
Tabela 7 - Identificação corpos de prova.	42
Tabela 8 - Largura dos cordões de solda	48
Tabela 9 - Altura do reforço de solda, reforço médio e área do reforço.	53
Tabela 10 - Altura da penetração da solda, penetração média e área da penetração.	59
Tabela 11 - Diluição e Ângulo de Molhabilidade	61
Tabela 12 - Características pela corrente utilizada.	63

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Corrente Convencional Continua.....	24
Gráfico 2 - Corrente Pulsada.....	25
Gráfico 3 - Largura dos cordões de Solda.....	48
Gráfico 4 - Altura do reforço do cordão de solda.....	54
Gráfico 5 - Área do Reforço.....	55
Gráfico 6 - Altura de Penetração	60
Gráfico 7 - Área de Penetração.....	60
Gráfico 8 - Diluição média de cada corpo de prova.....	61
Gráfico 9 - Ângulo de Molhabilidade	62
Gráfico 10 - Corrente (A) x Largura (mm).....	64
Gráfico 11 - Corrente (A) x Reforço (mm)	64
Gráfico 12 - Corrente (A) x Penetração (mm).....	65
Gráfico 13 - Corrente (A) x Área do Reforço (mm ²).....	65
Gráfico 14 - Corrente (A) x Área do Penetração (mm ²).....	66
Gráfico 15 - Corrente (A) x Diluição (mm)	66

LISTAS DE SIGLAS E ABREVIACOES

AWS - *American Welding Society*

FBTS – *Fundação Brasileira da Tecnologia de Soldagem*

FCAW - *Flux-Cored Arc Welding*

GMAW - *Gas Metal Arc Welding*

MAG – *Metal Active Gas*

MIG – *Metal Inert Gas*

ZTA – *Zona Termicamente Afetada*

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	15
2.1	PROCESSO DE SOLDAGEM ARAME TUBULAR	15
2.1.1	Consumíveis	15
2.1.2	Gases de Proteção	17
2.1.3	Transferência do Metal	18
2.1.4	Zona Termicamente Afetada – ZTA	20
2.1.5	Características Geométricas	21
2.2	REVESTIMENTO SOLDAGEM	23
2.3	TIPOS DE CORRENTE	24
2.4	MÉTODO TAGUCHI	25
3	MATERIAIS E METÓDOS	26
3.1	EQUIPAMENTOS PARA SOLDAGEM	27
3.1.1	Tartilope V2	29
3.1.2	Fonte de Soldagem	30
3.1.3	Tocha	31
3.1.4	Sistema Tracionador de Arame	31
3.2	– METAL DE BASE	32
3.3	– CONSUMÍVEIS	34
3.3.1	Arame Tubular ER 410NiMo	34
3.3.2	Gás de Proteção	35
3.4	– VÁRIAVEIS DE SOLDAGEM	36
3.5	– EXPERIMENTOS INICIAIS	37
3.6	– PLANEJAMENTOS DO EXPERIMENTOS DEFINITIVOS	37
3.6.1	Corrente	38
3.6.2	Largura do Cordão	39
3.6.3	Tecimento do Cordão	39
3.6.4	Condições e Parâmetros de Soldagem	40
3.7	– SOLDAGEM DOS EXPERIMENTOS DEFINITIVOS	41
3.7.1	– Identificação dos Corpos de Prova	41
3.8	– CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS	42
3.9	– MACROGRAFIA E MORFOLOGIA	44
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	47
4.1	– LARGURA DO CORDÃO DE SOLDA	47
4.2	– ALTURA DO REFORÇO	49
4.3	– PENETRAÇÃO	55
4.4	– DILUIÇÃO E ÂNGULO DE MOLHABILIDADE	61
4.5	– RESULTADOS GERAIS POR CORRENTE	63
5	CONCLUSÃO	67
	REFERÊNCIAS	68

1 INTRODUÇÃO

Denomina-se soldagem ao processo de união entre duas partes metálicas, usando uma fonte de calor, com ou sem aplicação de pressão. O resultado deste processo pode ser denominado solda. A soldagem tem uma grande importância em variados setores da indústria, pois no cotidiano utilizamos uma série de peças e objetos que passaram por algum processo de soldagem. (ESAB, 2015)

Atualmente, além dos processos de soldagem convencionais, pode-se incluir o processo de metalização como processo de revestimento. Como regra, os processos de soldagem são preferíveis para revestimentos quando se requer espessuras relativamente espessas do revestimento com alta tensão de aderência entre revestimento e peça. Os processos de metalização, por outro lado, são preferidos para revestimentos de espessura fina e aplicação de camadas duras com deformação mínima da peça. (FBTS, 2009).

Segundo INFOSOLDA, (2015), a seleção do processo de soldagem por revestimento é de grande importância tanto quanto a seleção da liga a ser soldada. As exigências de desempenho em serviços não são ditados somente pela seleção da liga, mas sofrem forte influência do processo de soldagem bem selecionado. Demais fatores técnicos que envolvem a seleção do processo, que inclui, mas não limita, as propriedades e a qualidade do revestimento, as características físicas da peça, as propriedades metalúrgicas do metal de base, a forma e composição da liga e revestimentos e a habilidade de quem for soldar. As condições econômicas e custos que também influenciam na seleção do processo final.

A aplicação de revestimentos protetores, com finalidades de engenharia, inicialmente era requerida para proteção de conjuntos e componentes mecânicos contra a corrosão. E devido ao avanço de pesquisas no desenvolvimento de novos materiais, atualmente, os revestimentos são utilizados também para elevar a resistência ao desgaste, a corrosão, isolamento térmico e elétrico e contra incompatibilidades químicas e biológicas e recentemente está sendo utilizado aplicando revestimentos para implantes. (CORRÊA, 2000)

Atualmente é objetivo de qualquer indústria a tentativa de reduzir desperdícios com matéria-prima. Estas indústrias acabam fazendo inúmeras otimizações na sua

produção e aproveitando o que for possível para se evitar gastos com desnecessários. O gasto com desperdício de material na indústria mecânica ainda acaba sendo um pouco excessivo podemos citar como exemplo os processos de usinagem ao se retirar material da peça acaba gerando cavacos, estes cavacos são materiais que vão acabar sendo jogados foras e não terão utilização. Mas, mesmo não sendo utilizado o valor do material que a indústria não conseguiu transformar em produto e que infelizmente se tornou cavaco acaba influenciando no preço do produto final. (INFOSOLDA, 2015).

Nos processos de soldagem, existem muitos custos envolvidos na sua concepção, gastos com laboratório para realização das soldas, custo com mão de obra de soldador qualificado, consumível, equipamento de solda, gases, metal base a ser soldado. Na tentativa de fazer uma solda acertando todos os parâmetros para que seja realizada de forma correta, podem-se gerar inúmeros corpos de prova e tentativas que talvez não surjam o efeito que se deseja. Na tentativa de minimizar os custos e tempo para sua realização é proposta a utilização de algum método que diminua drasticamente o número de amostras utilizadas para sua fabricação. (FBTS,2009)

Podemos tomar como exemplo se for necessário construir ou reparar turbinas Pelton, Francis e Kaplan em aço CA-6NM (Aço Inoxidável Martensítico Fundido) planejando que com o decorrer do tempo ela sofra certo desgaste causado pela sua utilização precise que seja feito um reparo. A empresa que for contratada para fazer este reparo pensará e tentará utilizar o mínimo material possível e no menor tempo possível, pois a maioria das turbinas fabricadas são de grandes dimensões e quando precisam de deslocamento acabam necessitando uma grande força tarefa para realizar, além de ser muito perigosa e inviável toda vez que se necessite manutenção, fazer sua retirada. Assim deve-se se pensar em alguma ferramenta que ajude a diminuir números de soldas e tempo para produzi-las. (GOUVEIA, 2013).

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 PROCESSO DE SOLDAGEM ARAME TUBULAR

A soldagem com arame tubular (*Flux-Cored Arc Welding – FCAW*) é definido como o 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 (MARQUES, 2009).

O processo por arame tubular foi desenvolvido visando unir as vantagens do processo MIG/MAG (semiautomático ou automático) com as do processo com eletrodo revestido (revestimento fusível formador de gases protetores, escória resultante de reações químicas benéficas na poça de fusão, adições de elementos de liga, etc.). Assim, o arame-eletrodo sólido do processo MIG/MAG foi substituído por um consumível composto que consiste num arame com configuração oca cujo núcleo é preenchido com fluxo (FBTS, 2009). O esquema de fabricação do arame tubular é apresentado na Figura 2:

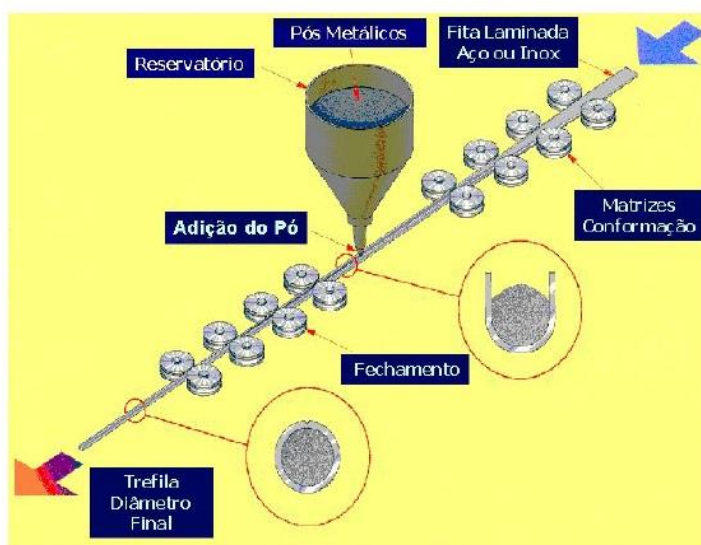


Figura 1 - Esquema da fabricação do Arame Tubular.
Fonte: FBTS (2009)

2.1.1 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

No processo FCAW, o fluxo dentro do arame, têm 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 (MACHADO, 1996).

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 (MACHADO, 1996).

Segundo a AWS - American Welding Society, existem diversas especificações de arame tubular (por exemplo, arame tubular de aço carbono, arame tubular de aço baixa liga, arame tubular de aço inoxidável). Estes critérios de classificação dos arames pertencentes às citadas especificações, consiste do uso ou não de proteção gasosa adicional estão detalhados na Tabela 1. (FBTS)

Especificação	Consumível
AWS A 5.9	Arames de Aço Inoxidável com pó metálico interno
AWS A 5.15	Arames para soldagem de Ferro fundido
AWS A 5.18	Arames Tubulares para 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

Quadro 1 - Especificação AWS para arames tubulares
Fonte: MARQUES (2007)

2.1.2 Gases de Proteção

O Arame Tubular auto protegido é quando a proteção do arco e da peça de fusão é feita unicamente pela combustão e decomposição do fluxo em pó (granular) contido no núcleo do arame. Arame Tubular com proteção adicional de gás é quando, além dos gases gerados pela queima do fluxo; é utilizado um gás adicional para a proteção, que flui através do bocal da pistola/tocha de soldagem, com vazão pré-regulada. Os gases normalmente utilizados são: CO₂ puro ou misturas (Argônio + 2% de O₂ e Argônio + 18 – 25% de CO₂). (FBTS)

A escória formada sobre o metal de solda possui as mesmas funções metalúrgicas daquelas vistas anteriormente nos processos de soldagem a arco com eletrodo revestido e também soldagem a arco submerso; aliada a essas funções, a escória promove um ótimo acabamento. Cabe ressaltar que a produtividade do arame tubular é significativamente superior à do eletrodo revestido devido a maiores densidades de corrente utilizadas e ao fato de que não é necessário parar com frequência para a troca de eletrodos. (MACHADO, 1996)

Os arames de maiores diâmetros e faixas mais altas de corrente elétrica têm-se no processo de soldagem a arco com arame tubular, em comparação com o processo MIG/MAG, maiores taxas de deposição, juntamente com boa penetração e também velocidades de soldagem mais elevadas. (MARQUES, 2009)

Os equipamentos de soldagem utilizados para arame tubular são similares aos utilizados no processo MIG/MAG, a Figura 3 mostra um esquema do equipamento para soldagem com arame tubular.

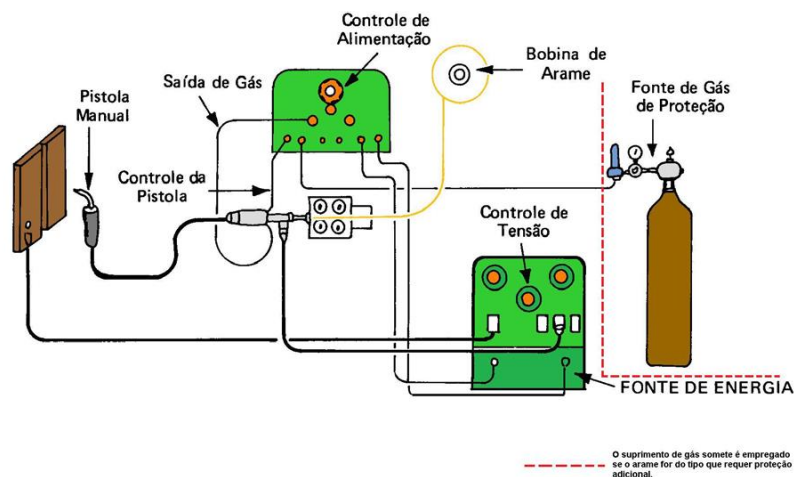


Figura 2 - Esquema da montagem do equipamento para soldagem com Arame tubular.

Fonte: FBTS (2009)

2.1.3 Transferência do Metal

De acordo com 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 têm influência são regidos pelos seguintes principais fatores:

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

2.2.3.1 Transferências por curto-circuito

As transferências por curto-circuito utilizam as menores faixas de corrente e diâmetros de arame, associadas ao arame tubular. É geralmente indicada para soldagem das secções finas e soldagem fora da posição plana. O constante processo de extinção e acendimento do arco provocam uma sequência de violentas separações das gotas de metais no momento das suas transferências, acarretando um nível excessivo de respingos de solda. A taxa de deposição no curto-circuito é a menor entre os tipos de transferência (FBTS).

2.2.3.2 Transferência Globular

A transferência globular é caracterizada pela formação de grandes glóbulos de metal fundido transferido para a poça por força gravitacional. Essa característica limita a aplicação de transferência globular somente em casos de soldagem na posição plana. A transferência globular ocorre com correntes mais baixas que as da transferência por spray (MONDENESI, 2002).

2.2.3.3 Transferência por Spray

A transferência por spray ocorre quando são estabelecidas altas intensidades de correntes altas tensões do arco em relação a um determinado diâmetro de arame. Dentre os gases ou misturas utilizadas, apenas o Argônio e as misturas gasosas de Argônio com teor de CO₂ variando entre 8 e 15%, permitem produzir este tipo de transferência metálica. Por produzir uma elevada taxa de deposição, a transferência por spray é restrita apenas à posição plana. Um problema gerado por este tipo de transferência metálica é a possibilidade de ocorrência de falta de fusão, devido ao jato metálico ser dirigido para regiões que não tenha sido suficientemente aquecida (FBTS).

2.2.3.4 Transferência por Arco Pulsante ou Pulsado

Existe ainda, da mesma forma que no processo MIG/MAG, uma derivação da transferência em spray, a transferência de arco pulsante ou pulsado, obtida pela pulsação da corrente entre dois níveis pré-estabelecidos: uma corrente de base baixa o suficiente para manter estável o arco elétrico e resfriar a poça de fusão e uma corrente de pico, superior à corrente de transição globular – spray. Por isso, a energia de soldagem é baixa, facilitando a soldagem com arames de grandes diâmetros fora da posição plana. Outro fator é a possibilidade do uso do spray em espessuras inferiores a do spray convencional (FBTS).

2.1.4 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 a poça de fusão (Figura 4).

Esta região sofre um rápido ciclos 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).

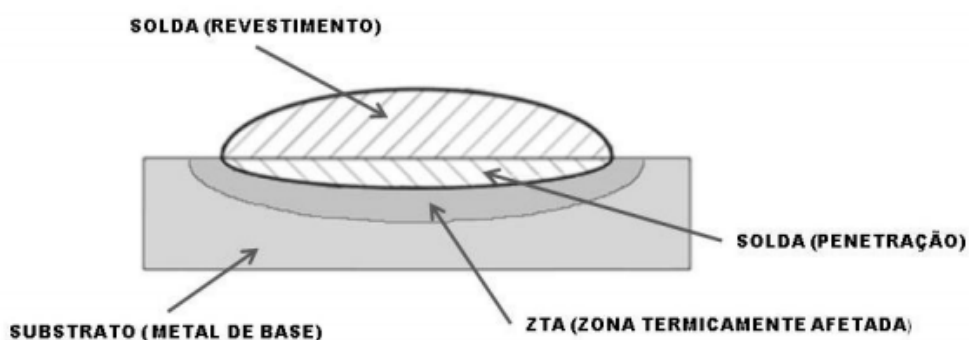


Figura 3 - Seção transversal de uma solda de revestimento (esquemática).
Fonte: SILVA (2014)

2.1.5 Características Geométricas

Segundo SILVA (2014), a geometria do cordão de solda afeta diretamente a complexidade do projeto e assim o custo de fabricação de estruturas soldadas e equipamentos mecânicos. Assim as suas características geométricas do cordão de solda são a largura (L), o reforço (R) e a penetração (P) que são medidos a partir da seção transversal da solda conforme a Figura 5.

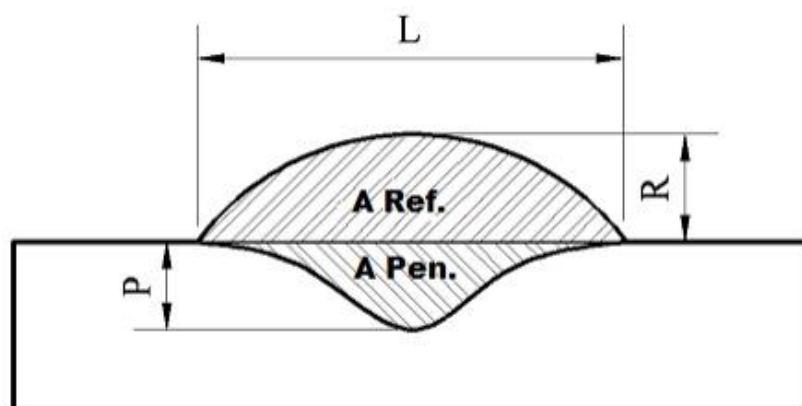


Figura 4 - Representação das dimensões geométricas das seções transversais dos cordões de solda.
Fonte: SILVA (2014)

A diluição (D) é também considerada uma característica geométrica importante, pelo motivo de representar 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 Figura 6 apresenta as áreas para cálculo de Diluição, e a mesma pode ser calculada através da Equação 1. (ZEEMAN, 1998)

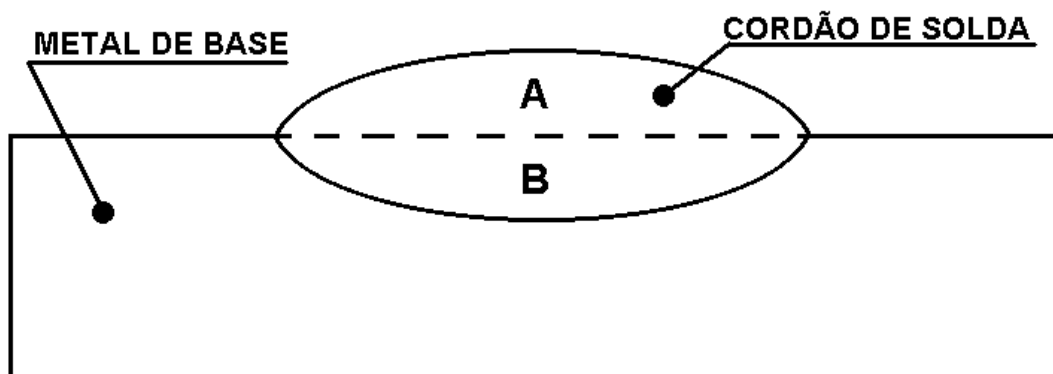


Figura 5 - Representação para cálculo da Diluição
Fonte: ZEEMAN (1998)

$$\text{DILUIÇÃO (\%)} = \frac{B}{A + B} \times 100$$

(1)

Onde:

A – Área do Reforço do cordão (Figura 6).

B – Área de Penetração do cordão (Figura 6).

A maioria dos pesquisadores ressaltam 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 (NORRISH, 1992).

Um grande número de problemas pode ser citado devido à 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).

Para pode se determinar quais serão as melhores condições de soldagem para uma dada situação é uma tarefa muito complexa por causa do número de variáveis envolvidas. Inúmeras tentativas são geralmente necessárias para fixar as variáveis na maioria dos casos (SILVA, 2014).

2.2 REVESTIMENTO SOLDAGEM

A soldagem de revestimento é definida pela AWS e por (PHILLIPS, 1965b), como sendo a deposição de uma camada de metal de adição sobre a superfície de outro metal com o objetivo de obter propriedades ou dimensões desejadas

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). Existem também as 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.

2.3 TIPOS DE CORRENTE

A fonte de alimentação da corrente contínua mantém sempre a mesma polaridade, de forma que a corrente no circuito tem sempre o mesmo sentido. A forma da onda de corrente contínua no processo MIG convencional está mostrada no Gráfico 1, sendo que a intensidade corrente (I_c) aplicada é constante durante todo o tempo de aplicação da mesma (CORRÊA, 2000).

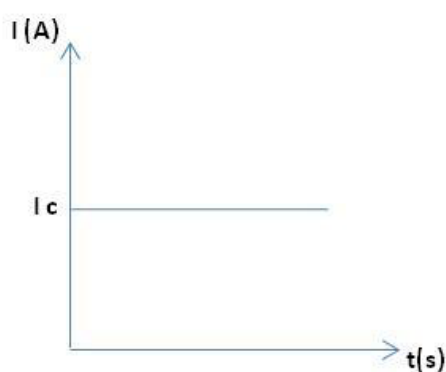


Gráfico 1 - Corrente Convencional Continua
Fonte: CORRÊA (2000)

A corrente pulsada tem por objetivo que se permita uma transferência goticular a baixas correntes médias. O modo de operação, um arco contínuo é mantido por uma corrente de baixa durante um período de tempo (corrente e tempo de base). Após isso, a corrente então é elevada a um alto nível por um curto espaço de tempo (corrente e tempo de pulso), que força o destacamento da gota. Devido à redução na energia média do arco, o processo se indica para soldagens de chapas finas e fora da posição (MOTTA, 2002). O Gráfico 2 demonstra como funciona a corrente pulsada.

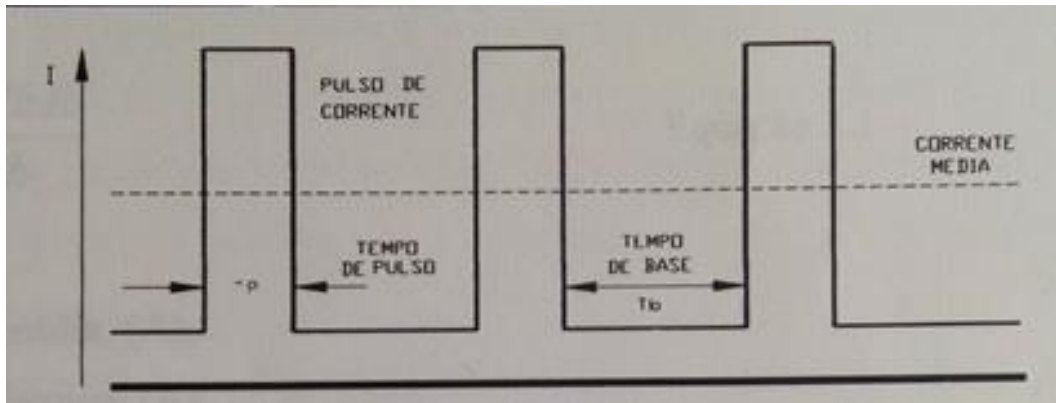


Gráfico 2 - Corrente Pulsada
Fonte: CORRÊA (2000)

2.4 MÉTODO TAGUCHI

O engenheiro e estatístico japonês Genichi Taguchi criou e aperfeiçoou uma metodologia que utilizava a aplicação de métodos estatísticos objetivando a orientação da qualidade dos produtos manufaturados. (VIEIRA, 1996)

Uma diminuição nos números de amostras de soldagem e corpos de prova para realização de uma solda com os parâmetros corretos tornam o processo de soldagem muito mais atrativo e econômico. Evitando assim gastos desnecessários com retrabalhos, com gasto de consumíveis, com corpos de provas que por não estarem nos padrões desejados acabam sendo descartados. (ROSS, 1991).

Essa metodologia visa à determinação das variáveis que mais podem influenciar e causar a variabilidade de processos ou produtos. Ao se conseguir controlar esses fatores garante-se a qualidade do processo/produto, além de se achar melhor desempenho. (VIEIRA, 1996)

Existe uma técnica denominada de projeto robusto, que foi desenvolvida por Taguchi que se tornou uma poderosa ferramenta para se aperfeiçoar produtos ou processos e pode ser definida como um conjunto de conceitos, estratégias e métodos que utiliza o conhecimento da engenharia para obtenção dos seguintes benefícios (ROSS, 1991):

- Em uma economia competitiva, a melhoria contínua da qualidade e redução dos custos é necessária para que se continue nos negócios;

- Um programa de melhoria contínua de qualidade inclui incessante redução na variação das características de desempenho do produto em relação aos seus produtos alvo;
- A perda de clientes devido às variações no desempenho do produto é aproximadamente proporcional ao quadrado dos desvios das características de desempenho de seu valor alvo. Portanto, uma qualidade se degrada rapidamente com um grande desvio do seu valor alvo;
- A qualidade final e o custo de um produto manufaturado são determinados por meios dos projetos de engenharia e do seu processo de manufatura;
- Experimentos estatisticamente planejados podem ser utilizados para identificar os valores parâmetros que reduza a variação do desempenho.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesse trabalho utilizamos para realização dos experimentos práticos os laboratórios 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
- Produção corpos de Prova
- Consumíveis
- Variáveis de soldagem
- Soldagem dos corpos de prova
- Caracterização
- Macrografia e morfologia

3.1 EQUIPAMENTOS PARA SOLDAGEM

Serão apresentadas a seguir as características operacionais dos equipamentos utilizados na realização das soldagens e suas respectivas imagens para identificação.

- Tartilope V2, para deslocamento automático da tocha de soldagem Figura 7;
- Uma fonte retificadora de soldagem trifásica com corrente máxima de 450A Figura 8;
- Sistema tracionador de arame inversal, STZ-20 Figura 9;
- Tocha de soldagem TBi AUT modelo 511 Figura 10;



Figura 6 – Tartilope V2.
Fonte: IMC (2015)



Figura 7 - Fonte retificadora de soldagem trifásica com corrente máxima de 450A.
Fonte: IMC (2015)



Figura 8 - Sistema tracionador de arame inversal, STZ-20.
Fonte: IMC (2015)



Figura 9 - Tocha de soldagem TBi AUT modelo 511.
Fonte: Autor (2015)

3.1.1 Tartílope V2

Inúmeras aplicações da soldagem têm apresentado atualmente uma necessidade de equipamentos de movimentação automática. Paralelamente a sofisticação nos processos de soldagem e corte de chapas metálicas tem exigido um grau de precisão e repetitividade além do que o soldador pode oferecer.

É neste contexto que está inserido o TARTÍLOPE V2, um sistema de movimentação com dois graus de liberdade que permite a mecanização de processos de soldagem e corte de chapas metálicas.

O Tartílope V2 é um manipular robótico para soldagem que possui deslocamento automático com dois graus de liberdade (Figura 11), 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. (IMC, 2015).

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. (IMC, 2015)

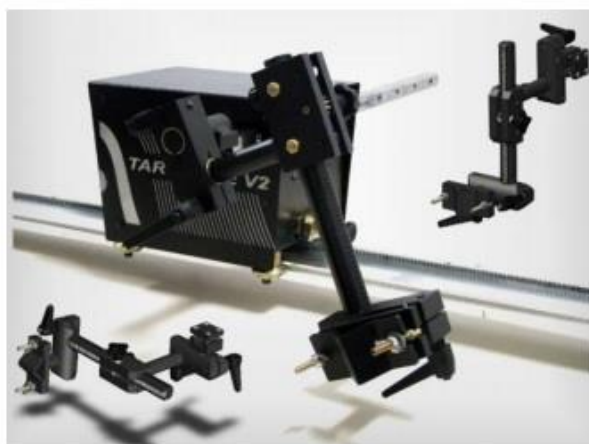


Figura 10 - Braço Robótico para tecimento do cordão de solda.
Fonte: IMC (2015)

3.1.2 Fonte de Soldagem

A fonte de soldagem que foi utilizada é um retificador de soldagem trifásico de modelo Inversal 450. A fonte de soldagem é semiautomática para soldagem MIG/MAG e para arames tubulares (FCAW), fabricada pela IMC, conforme Figura 12. (IMC, 2014)



Figura 11 - Fonte de Soldagem Inversal 450A.
Fonte: IMC (2015)

O sistema de alimentação de arame possui duas roldanas e faixa de velocidade do arame entre (1,5 – 25,0) (m/min). Alguns dados deste equipamento são mencionados na Tabela 2.

Dados Técnicos	
Tensão Nominal	220, 380 ou 440 V Trifásica
Tensão Máxima	68 V
Correntes	$I_{max} = 450A$
Alimentação	Contínua ou alternada (Constante ou pulsada)
Dimensões	0,5 x 0,6 x 1,2 m
Peso	170 kg
Circuito de Arrefecimento	3,5 litros de água destilada
Fator de Potência	0,95

Quadro 2 - Dados técnicos da fonte de soldagem Inversal 450
Fonte: IMC (2015)

3.1.3 Tocha

Na soldagem dos corpos de prova, se utilizou uma tocha TBI AUT modelo 511, mostrada na Figura 13, está tocha tem a característica de ser refrigerada a gás e a água, e sendo utilizada nos processos MIG/MAG, que trabalham numa faixa de 150A a 500A, e disponível para arames de 1 a 1.6mm de diâmetro. (TBI INDUSTRIES, 2015)



**Figura 12 - Tocha de soldagem TBI AUT modelo 511.
Fonte: Autor (2015)**

3.1.4 Sistema Tractionador de Arame

Foi utilizado o sistema tracionador de arame da Inversal, STA-20 (Figura 14), possibilita a alimentação de arame bobinado de diversos tipos, com velocidade regulada pelo usuário numa faixa de 1,10 a 20,00 m/min. (IMC, 2015)

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. Este sistema de tracionador de arame STA-20 também oferece uma regulagem para rampas de aceleração e desaceleração do arame, melhorando as condições de início e término dos cordões de solda. (IMC, 2015)



Figura 13 - Tracionador de arame STA-20
Fonte: IMC (2015)

3.2 – METAL DE BASE

O trabalho foi desenvolvido no material de base o aço ABNT 1020 trefilado, a composição química das barras são as seguintes segundo o fabricante (Tabela 3):

Tabela 1 - Composição química do Aço ABNT 1020.

Composição química das Barras aço ABNT 1020				
Elemento	C	Mn	P	S
%	0,21	0,44	0,01	0,03

Fonte: ArcelorMittal (2015)

Os corpos de prova que foram utilizados como metal de base são chapas de aço ABNT 1020 trefilados com 150 mm de comprimento, 65 mm de largura e 12mm de espessura.

Os corpos de prova foram cortados na Serra FRANHO FM-335, conforme mostrado na Figura 15 a seguir



**Figura 14- Serra FRANHO FM-335 utilizada na fabricação dos Corpos de Prova.
Fonte: Autor (2015)**

Após serem cortados para melhorar o aspecto visual e para retirar o material que se deposita na superfície do aço como algumas impurezas e oxidação se passou pela jateadora de cabine da oficina da UTFPR, conforme mostrado na Figura 16

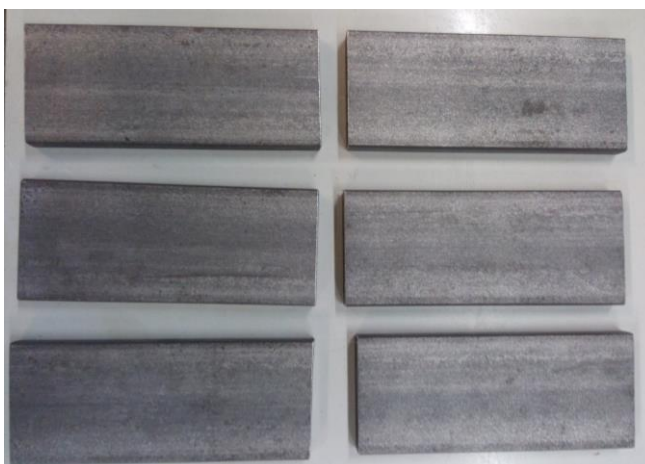


**Figura 15 - Jateadora de cabine de luvas.
Fonte: Autor (2015)**

Com este material foram fabricados 4 corpos de prova que foi utilizado no desenvolvimento dos experimentos necessários e para aplicação dos ensaios que se determinou através da Metodologia Taguchi.

Então, com base nos ensaios preliminares, se identificou 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.

A Figura 17 mostra o metal de base foi utilizado para ser soldado (corpos de prova), já cortados nas medidas e prontos para serem soldados.



**Figura 16 - Corpos de Prova fabricados prontos para serem soldados.
Fonte: Autor (2015)**

3.3 – CONSUMÍVEIS

3.3.1 Arame Tubular ER 410NiMo

Na soldagem foi utilizado o arame tubular, o consumível utilizado foi 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 1,2mm, apresentado em rolos de arame de aproximadamente 15 kg. A corrente para soldagem foi a Corrente Pulsada com polaridade Inversa. A Figura 18 a seguir ilustra o arame tubular utilizado no experimento.

3.4 – VÁRIAVEIS DE SOLDAGEM

Antes do início da confecção das soldas foi feita uma análise de forma mais ampla para se verificar a variação do consumível, gás de proteção, altura do bico de contato peça (DBCP), diferentes valores de correntes e tensões porem foi aplicado o Método Estatístico de Taguchi, que proporcionou uma matriz ortogonal (L4) conforme a Tabela 5. E as soldas foram apenas aplicadas na posição plana e os corpos de prova foram fixados e posicionados de modo não acontecer movimentação durante o tecimento do cordão de solda. .

Se definiu os parâmetros para a soldagem e foi colocado na Tabela 5 a seguir com os seguintes itens: Corrente Média (Im), Largura do cordão de solda (L) e passo do cordão de solda (P):

Tabela 3 - Parâmetros a serem utilizados nas soldagens

Parâmetros de Soldagem		
Corrente (Im)	200A	220A
Largura do cordão de solda (L)	30mm	40mm
Passo do cordão de solda (P)	6mm	8mm

Fonte: Autor (2015)

Na Tabela 6 podemos observar quais foram as variáveis que ficaram fixas durante a produção do revestimento de soldagem.

Tabela 4 - Variáveis Fixas utilizadas na soldagem.

Variáveis Fixas	Valores
Polaridade Eletrodo	CCEP
Gás	98% Ar + 2% O ₂
Vazão Gás	18 litros/minuto
Ângulo Tocha	90°
Posição Soldagem	Plana
Velocidade Alimentação Arame	8,5 metros/minuto
Corrente Pico	350 A
Tempo Pico	10 ms
Tempo Base	20 ms
Distância Bico Contato Peça (DBCP)	35mm
Tempo parada 1	0,1 segundo
Tempo parada 2	0,1 segundo

Fonte: Autor (2015)

3.5 – EXPERIMENTOS INICIAIS

Ao se iniciar os trabalhos na oficina colocamos em prática os parâmetros pré-estabelecidos, foram necessários à realização de alguns experimentos. Durante esta 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 dará à amplitude do tecimento, ou seja, o passo.

3.6 – PLANEJAMENTOS DO EXPERIMENTOS DEFINITIVOS

Consistiu em planejar quantos ensaios seriam necessários para produção dos corpos de prova para análise posterior, conforme já explicado a metodologia que foi

utilizada foi a Taguchi que tem o intuito de reduzir ao mínimo a quantidade de ensaios.

Utilizou-se o programa Minitab 16 para definição dos fatores 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 e montamos uma tabela de níveis conforme explicado na Tabela 7.

Tabela 5 - Tabela com níveis da Metodologia Taguchi.

Ensaio	Corrente Média (A)	Largura (mm)	Passo (mm)
1	Nível 1	Nível 1	Nível 1
2	Nível 1	Nível 2	Nível 2
3	Nível 2	Nível 1	Nível 2
4	Nível 2	Nível 2	Nível 1

Fonte: Autor (2015)

Assim foi montada a matriz ortogonal L4, cujos fatores de controle e seus respectivos níveis serão descritos e colocados os valores numéricos que foram utilizados no tecimento das soldas conforme Tabela 8:

Tabela 6 - Identificação parâmetros para cada ensaio.

Ensaio	Corrente Média (A)	Largura (mm)	Passo (mm)
1	200	30	6
2	200	40	8
3	220	30	8
4	220	40	6

Fonte: Autor (2015)

3.6.1 Corrente

A corrente utilizada foi de suma importância 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 220 A, que correspondem aos Níveis 1 e 2 deste fator de controle respectivamente conforme a Tabela 8.

3.6.2 Largura do Cordão

A largura do cordão como 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 30mm e 40mm, que serão detalhados na Tabela 8.

3.6.3 Tecimento do Cordão

A técnica da tocha e tecimento do cordão de solda, foi definida levando em conta a influência que determina sobre o cordão de solda a ser formado, tendo em vista foi o escolhida a técnica 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 (Figura 20). O tecimento a ser escolhido é o triangular.

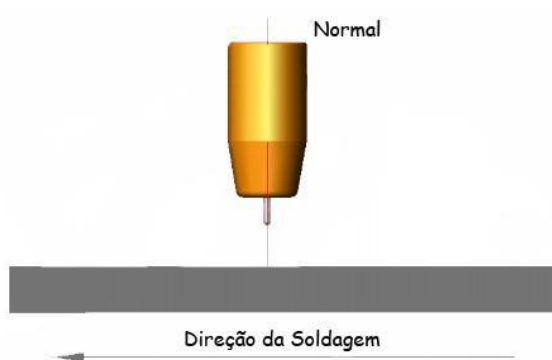


Figura 19 - Técnica utilizada na tocha.
Fonte: SILVA (2014).

O tecimento triangular é caracterizado pelas variáveis; velocidade de soldagem, amplitude, frequência e tempos de paradas. O dispositivo se move com velocidade constante no eixo x enquanto o eixo y oscila. A forma de tecimento foi escolhido, pelo fator de causar uma grande e forte influência no formato do perfil geométrico do cordão de solda (Figura 21).

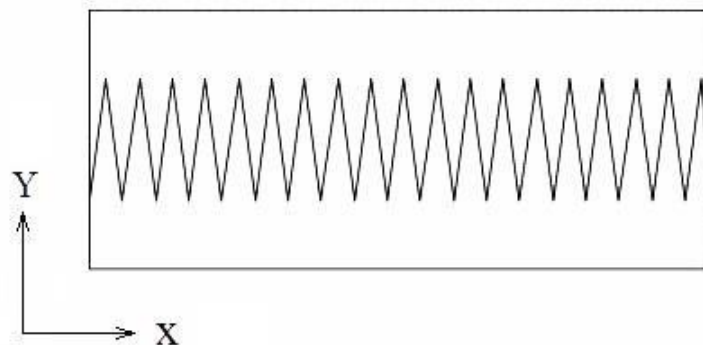


Figura 20 - Tipo de tecimento utilizado (Triangular).
Fonte: SILVA (2014)

3.6.4 Condições e Parâmetros de Soldagem

Para que se produza um revestimento de excelente qualidade uma das principais preocupações foi a obtenção de cordões uniformes, de bom aspecto superficial, isentos de falhas como mordeduras, falta de penetração, falta de fusão, trincas e porosidades

Pode se dividir estas condições de duas formas os parâmetros diretamente ligados com o processo de soldagem e os que sofrem influência ligados diretamente ao deslocamento da tocha na produção do revestimento.

A seguir foi relacionado os parâmetros diretamente com o processo de soldagem:

- Tensão de soldagem;
- Velocidade de alimentação do arame;
- Vazão do gás;
- Distancia bico de contato da peça – DBCP;

- Ângulo de ataque da tocha.

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

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

3.7 – SOLDAGEM DOS EXPERIMENTOS DEFINITIVOS

As soldagens 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 35mm.

Foram mantidas constantes a vazão do gás de proteção em 18 litros/minuto e a velocidade de alimentação em 8,5 m/min.

3.7.1 – Identificação dos Corpos de Prova

Foram soldados para cada parâmetro estabelecido 01 corpos de prova, o que totalizou no total 04 corpos de prova, assim cada um possui uma característica única. Eles foram classificados segundo a Tabela 9 a seguir, onde podemos identificar sua corrente media, o passo e a largura do cordão.

Tabela 7 - Identificação corpos de prova.

Corpo de Prova	Corrente Média (A)	Largura (mm)	Passo (mm)
2	200	30	6
3	220	40	6
4	220	30	8
5	200	40	8

Fonte: Autor (2015)

A seguir mostraremos os corpos de prova antes de passarem pelo processo de corte das amostras conforme Figura 22.

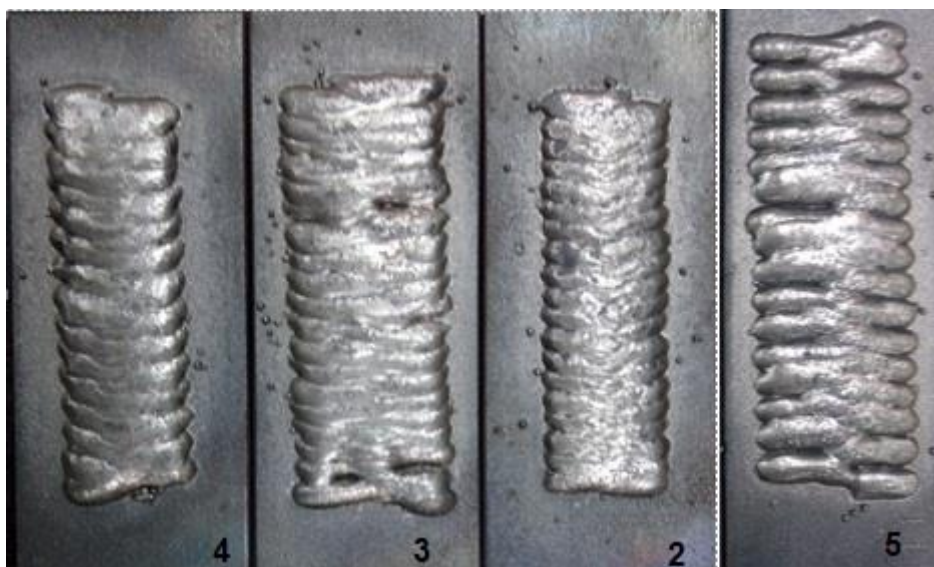


Figura 21 - Identificação das Amostras.

Fonte: Autor (2015).

3.8 – CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS

Após a soldagem os corpos de prova precisavam ser cortados de forma que pudéssemos fazer as análises macrográficas, com isto eles foram cortados em 4 partes com a serra fita FRANHO – FM 350 (Figura 23).



**Figura 22 - Serra fita FRANHO – FM355 utilizado para corte das peças.
Fonte: Autor (2015)**

Nesta etapa foram retiradas duas amostras com aproximadamente 30mm de largura para análise das características dos cordões de solda. A extração da primeira amostra ocorreu em aproximadamente 25mm do início do cordão de solda.

A Figura 24 ilustra 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 23 - Ilustração da retirada dos corpos de prova.
Fonte: Autor (2015)**

Após a etapa de corte, estes corpos de prova foram lixados na poltriz APL-4D, conforme a Figura 25.



Figura 24 - Politriz modelo APL-4D.
Fonte: Autor (2015)

A técnica de lixamento que se utilizou foi a manual aumentando a sua granulometria cada vez menor, foi mantida a direção de 90° no sentido horário em cada lixa subsequente até o total desaparecimento dos riscos da sua lixa que foi passada anteriormente.

A sequência de lixas usadas foi 220 μ m, 400 μ m, 600 μ m. O ataque após o polimento foi realizado com o reagente composto por 15ml de H₂O (água), 15ml de HNO₃ (ácido nítrico), 15ml de CH₃COOH (ácido acético) e 60ml de HCl (ácido clorídrico) durante 1 minuto e sendo em seguida as amostras lavadas em água corrente, depois lavadas com álcool e secadas utilizando o ar quente.

3.9 – MACROGRAFIA E MORFOLOGIA

Quando se utiliza a soldagem de revestimento de metais dissimilares, podemos obter uma penetração e uma diluição não muito grandes, mas o revestimento deve obter como grande característica, uma boa resistência ao arranchamento, já o seu reforço e a largura devem ser o maior possível, este com intuito de diminuir o número de passes necessários.

Para se analisar as imagens dos cordões de solda foram utilizados os seguintes programas, NI Vision Builder for Automated Inspection 2010 e o ImageJ. Pois após a captura das imagens dos corpos de prova eles foram exportados para

esses programas com intuito de realizar as medições de reforço, penetração, ângulo de molhabilidade e diluição (Figura 26).

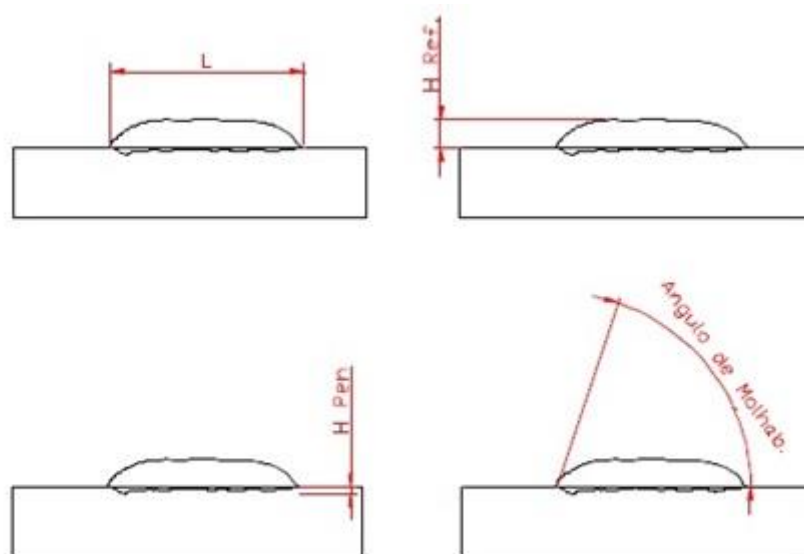


Figura 25 - Esquemática das medidas realizadas.
Fonte: Adaptado de SILVA (2014)

Onde expresso a letra “L” na primeira linha e primeira coluna, representa a largura do cordão de solda, o “H ref.” na primeira linha e segunda coluna, refere-se à altura do reforço, assim na segunda linha e primeira coluna o “H Pen”, a altura da penetração, por fim o ângulo de molhabilidade na segunda linha e segunda coluna.

As medições foram baseadas em medidas reais que eram fornecidas e foram passadas para software que apenas dimensionava o que era selecionado e passava para medidas em mm. A medida que foi tomada como padrão foi o comprimento dos corpos de prova que eram de 63,20mm e assim a cada nova imagem o programa calculava em base o que já sabia e dimensionava.

Para calcular a largura do reforço, dividimos em 6 partes iguais, conforme a Equação (2):

$$L/6 \quad (2)$$

Onde L seria a largura do cordão de solda, estas medidas foram realizadas para o reforço quanto para penetração, a Figura 27, acaba mostrando com mais clareza onde foram realizadas as medições e posteriormente tiradas as medias desses pontos.

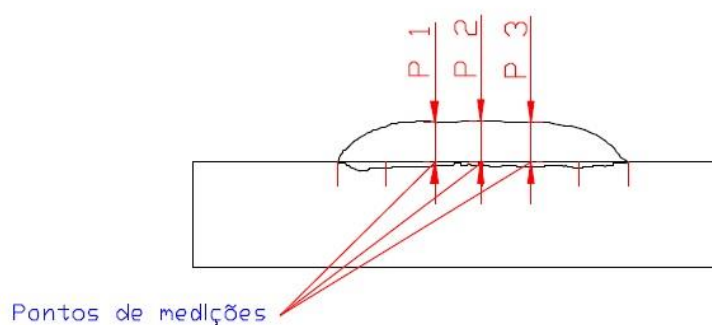


Figura 26 - Exemplo dos pontos utilizados nas medições.
Fonte: Adaptado de SILVA (2014)

Para de determinar qual seria a área do reforço e área de penetração, foi utilizado uma linha continua, e a partir disso, a parte superior da linha determinada à área de reforço e a parte inferior à área de penetração, a Figura 28 indica estas duas áreas acima explicadas.

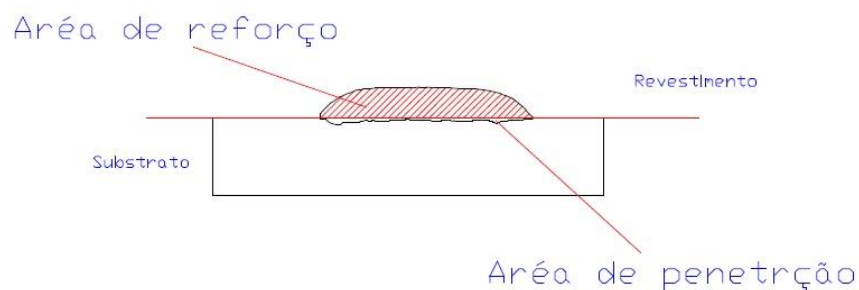


Figura 27 - Área de penetração e Área de reforço.
Fonte: Adaptado de SILVA (2014)

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 – LARGURA DO CORDÃO DE SOLDA

Na seção anterior foi adotado os tamanhos de largura para serem realizados os devidos revestimento para cada largura na qual foi soldado os corpos de prova, um com 30mm e outro com 40mm, e suas correntes 200A e 230A respectivamente.

Na Figura 29 a seguir, mostra o resultado da largura do cordão de soldagem com auxílio do software para cálculo das dimensões.

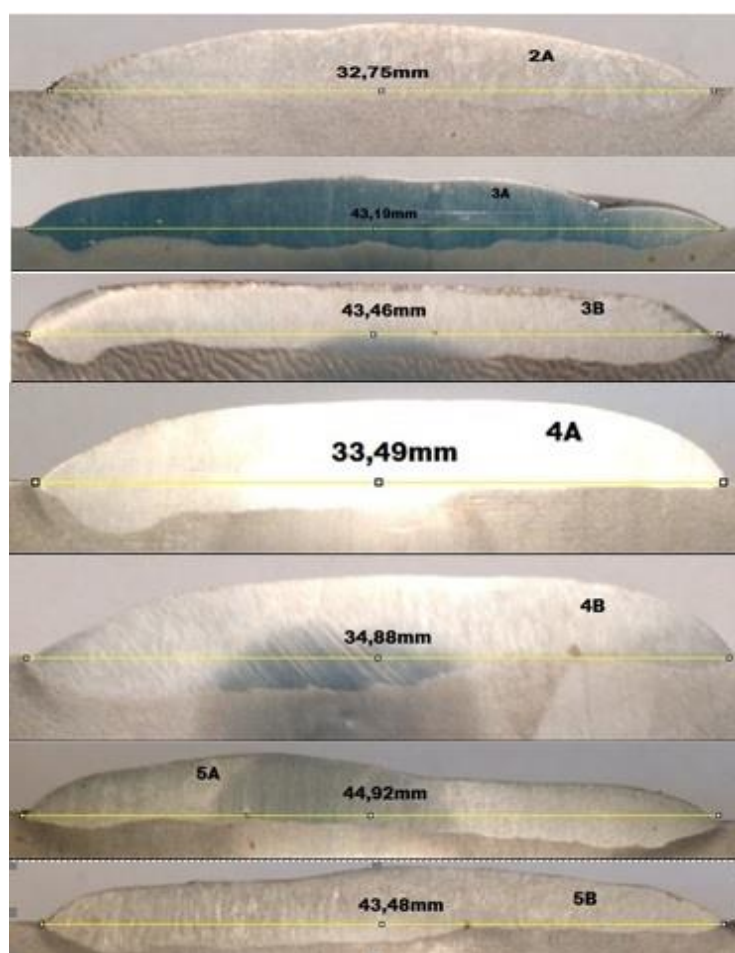


Figura 28- Resultado da Largura dos Cordões de Solda.
Fonte: Autor (2015)

Estes resultados foram descritos e explicados na Tabela 10 a seguir.

Tabela 8 - Largura dos cordões de solda

Corpo de Prova Número	Corrente (A)	Largura Proposta (mm)	Largura Obtida (mm)
2A	200	30	32,75
2B	200	30	34,2
3A	220	40	43,19
3B	220	40	43,46
4A	220	30	33,49
4B	220	30	34,88
5A	200	40	44,92
5B	200	40	43,48

Fonte: Autor (2015)

Para facilitar a visualização foi utilizado o Gráfico 3, para pode ter a melhor noção de quais foram as maiores e menores larguras do cordão de solda obtidos. Os corpos de prova 4B e 5A foram os que obtiveram as maiores larguras 34,88mm e 44,92mm respectivamente. E foram obtidos os menores valores para largura de cordão de solda nos seguintes corpos de prova 2A e 3A com os seguintes valores respectivamente 32,75mm e 43,19mm.

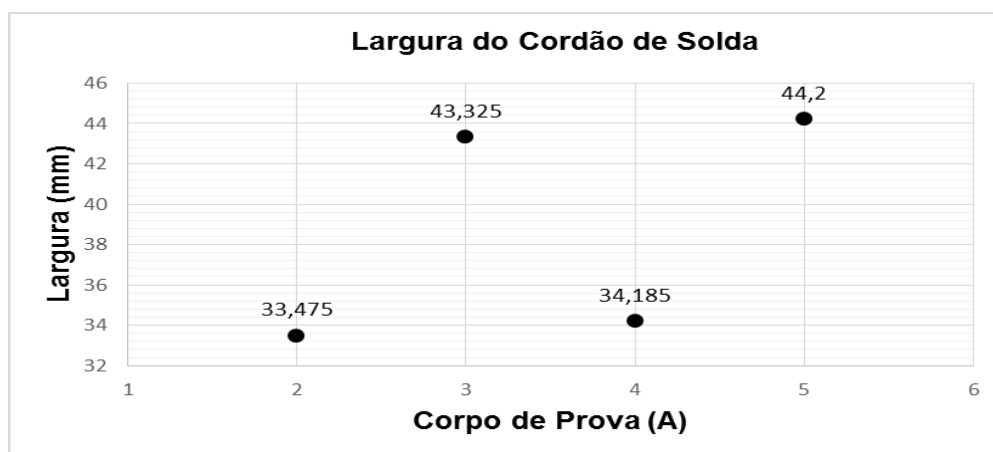


Gráfico 3 - Largura dos cordões de Solda
Fonte: Autor (2015)

4.2 – ALTURA DO REFORÇO

No processo de soldagem, a altura do reforço se torna uma das características mais essenciais, pelo motivo de que quanto maior for este reforço menor será o número de passes a se realizar. A seguir a Figura 30, Figura 31, Figura 32, Figura 33, Figura 34, Figura 35, Figura 36 e Figura 37 mostram os pontos de medição de altura de reforço, em cada figura a primeira imagem mostra a distância até o ponto P1 e o valor medido no P1, se repetindo para imagens que seguem abaixo que mede o ponto P2 e o valor medido no P2 e para finalizar mostra a distância até P3 e o valor que se encontra no P3.

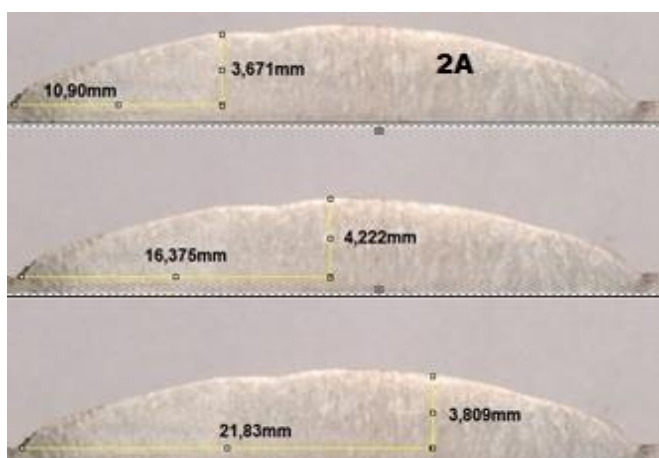


Figura 29 - Reforço nos pontos P1, P2 e P3 no Corpo de Prova 2A

Fonte: Autor 2015

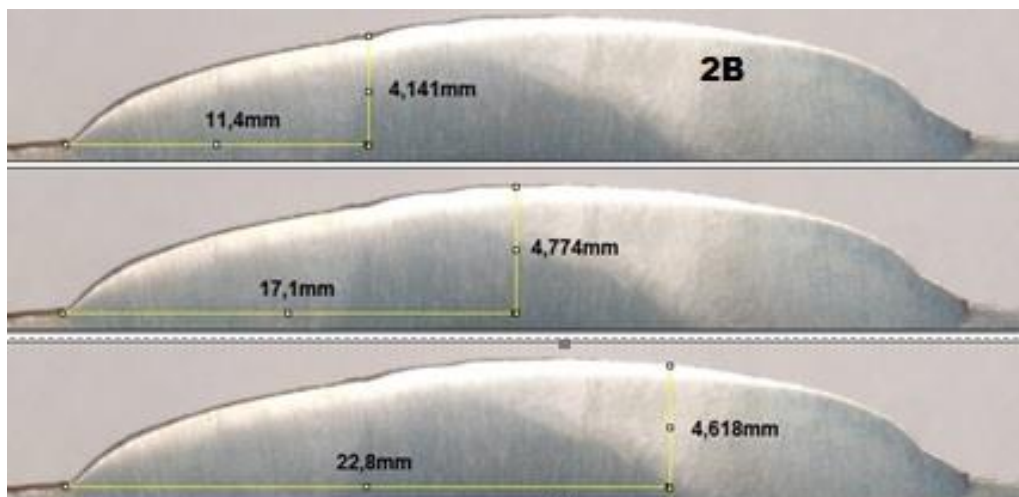


Figura 30 - Reforço nos pontos P1, P2 e P3 no Corpo de Prova 2B.

Fonte: Autor (2015)

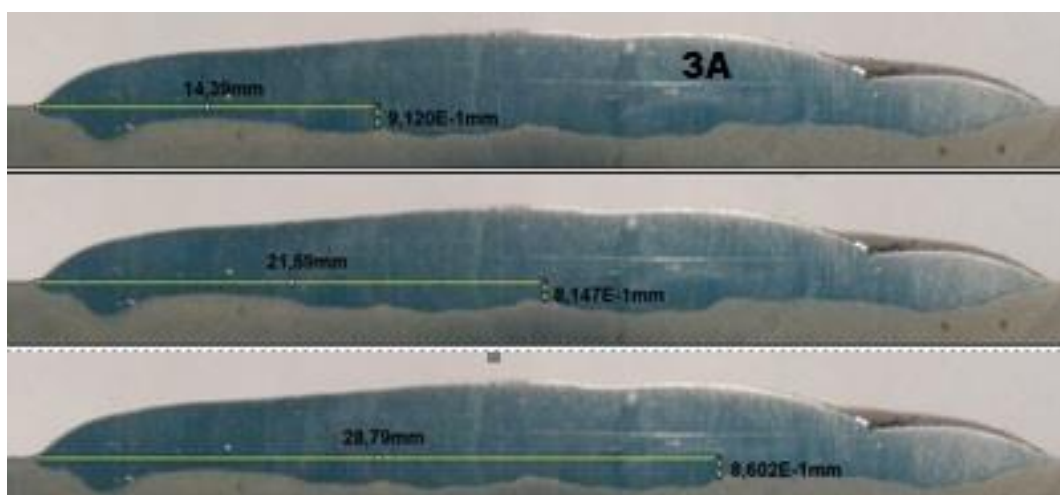


Figura 31 - Reforço nos pontos P1, P2 e P3 no Corpo de Prova 3A

Fonte: Autor (2015)

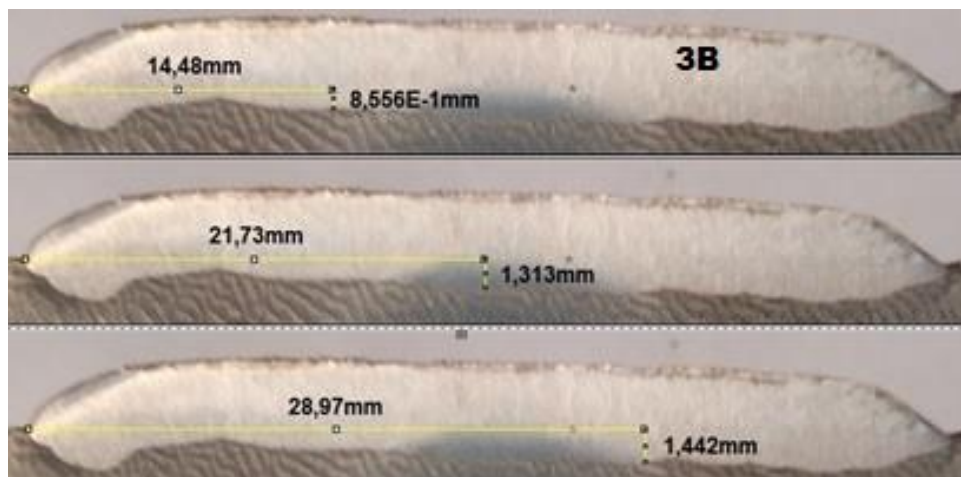


Figura 32 - Reforço nos pontos P1, P2 e P3 no Corpo de Prova 3B
Fonte: Autor (2015)

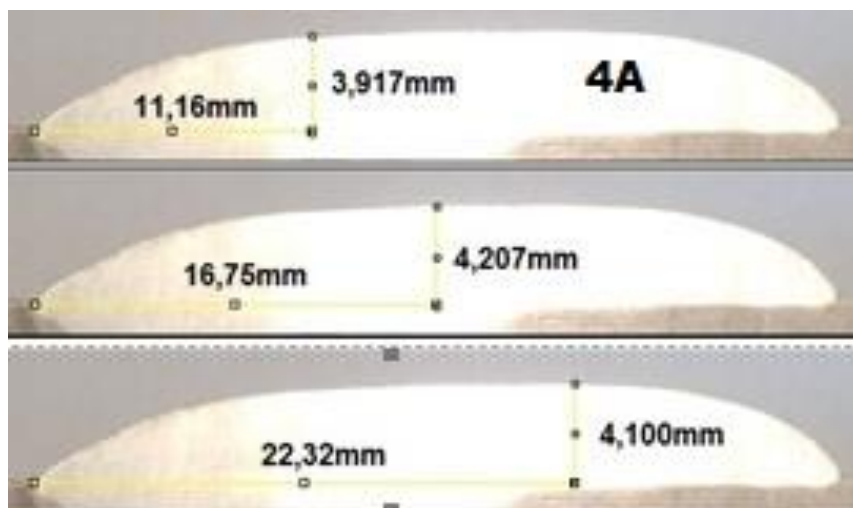


Figura 33 - Reforço nos pontos P1, P2 e P3 no Corpo de Prova 4A
Fonte: Autor (2015)

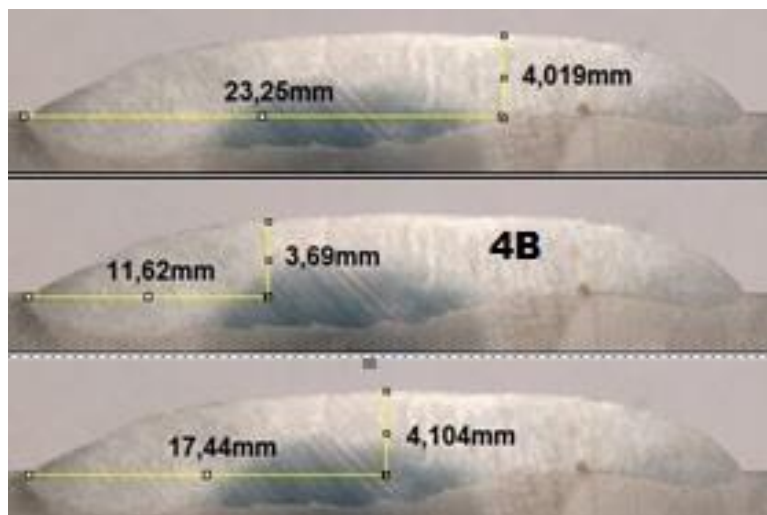


Figura 34 - Reforço nos pontos P1, P2 e P3 no Corpo de Prova 4B
Fonte: Autor (2015)

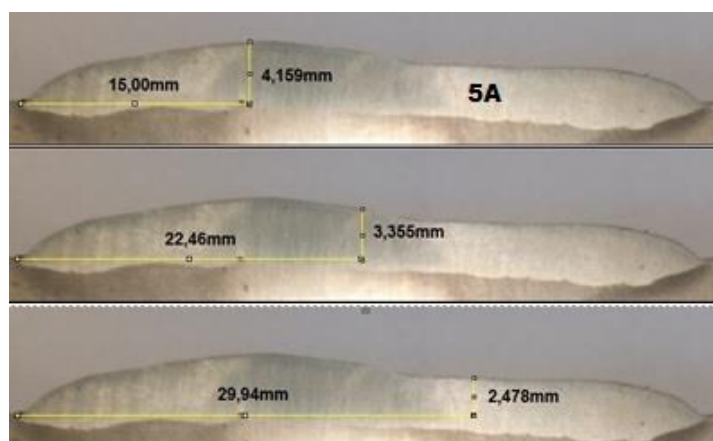


Figura 35 - Reforço nos pontos P1, P2 e P3 no Corpo de Prova 5A
Fonte: Autor (2015)

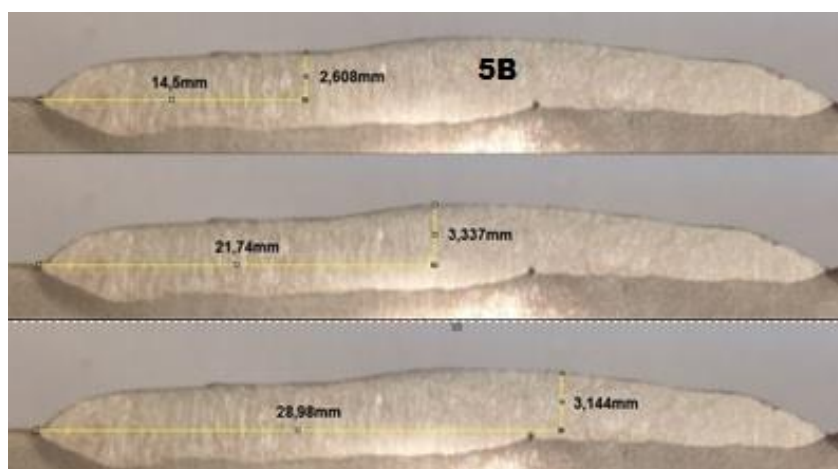


Figura 36 - Reforço nos pontos P1, P2 e P3 no Corpo de Prova 5B

Fonte: Autor (2015)

Estes reforços foram medidos conforme a Tabela 11 que segue abaixo, ela foi medida em três pontos (P1, P2 e P3), foi retirado a média entres os pontos para se encontrar o reforço médio e posteriormente encontramos a área de reforço no cordão de solda.

Tabela 9 - Altura do reforço de solda, reforço médio e área do reforço.

Corpo de Prova Número	Altura do Reforço (mm)			Reforço Médio (mm)	Área do Reforço (mm ²)
	P1	P2	P3		
2A	3,67	4,22	3,80	3,90	98,39
2B	4,14	3,29	3,23	4,51	117,50
3A	2,94	3,29	3,23	3,15	105,87
3B	3,46	3,19	2,99	3,21	126,42
4A	3,91	4,20	4,10	4,07	101,52
4B	3,69	4,10	4,01	3,93	105,09
5A	4,15	3,35	2,47	3,33	120,00
5B	2,60	3,33	3,14	3,02	111,98

Fonte: Autor (2015)

A seguir o Gráfico 4 auxilia na visualização das características da altura do reforço do cordão de solda.

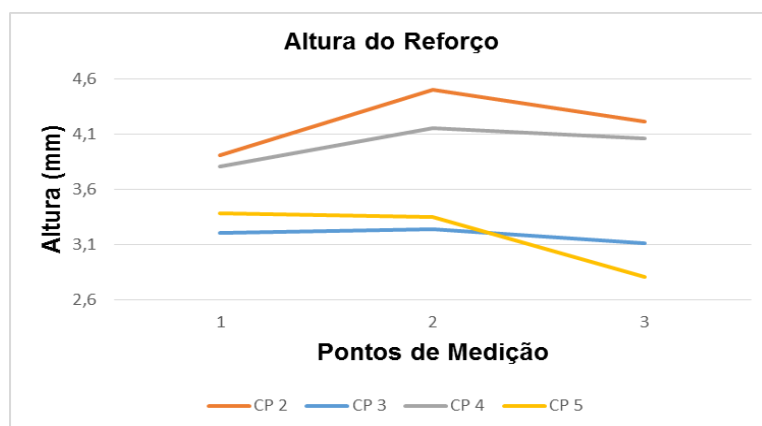


Gráfico 4 - Altura do reforço do cordão de solda
Fonte: Autor (2015)

Explicando o gráfico 4 acima, podemos notar que os corpos de prova 2 e 4 possuem as maiores alturas de reforço se comparados com os demais corpos de prova o 3 e 5, isto mesmo sendo soldados com correntes diferentes, pois nos corpos de prova 2 e 4 foram usadas a corrente de 200A e para os demais corpos de prova a corrente utilizada foi de 220A.

A diferença entre essas alturas pode ser explicada pelo motivo de que os corpos de prova têm a sua largura pré-determinada para 30mm, uma largura menor que as dos outros corpos de prova (CP3 e CP5) que foram definidas com 40mm, portanto assim podemos tirar a conclusão que uma corrente maior acaba acarretando um reforço maior, isto pode ser comprovado no corpo de prova (CP 2) que possui um reforço ainda maior que os demais.

No Gráfico 4 a seguir podemos verificar de forma mais clara a área de reforço, esta medida foi estimada levando em conta as medidas nos corpos de prova A e B, sendo calculada a média entre as medidas e sendo representada graficamente.

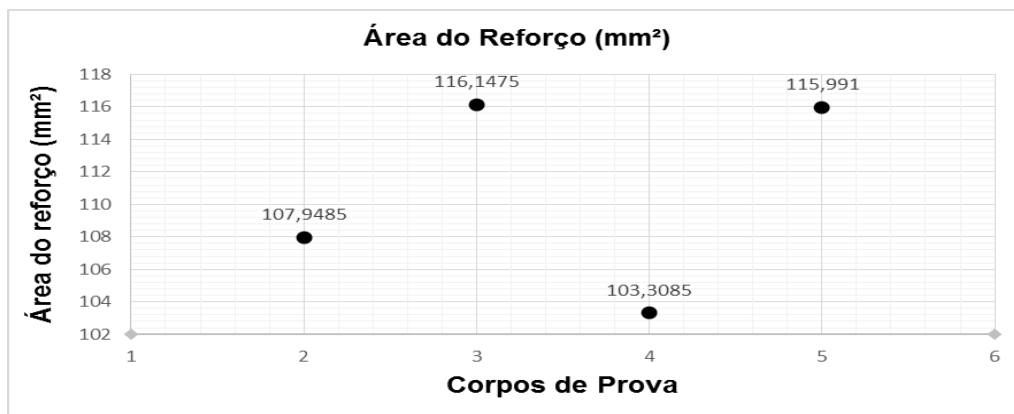


Gráfico 5 - Área do Reforço
Fonte: Autor (2015)

Este gráfico 5, mostra que o corpo de prova 3 obteve a maior área de reforço se comparado aos outros três, pode se concluir também que sua maior área se deve ao fato de sua corrente ter sido maior, foi pré-definida como largura 30mm, o que acarreta em uma menor área de deslocamento da tocha de soldagem, o que vai resultar numa quantidade maior de arame que vai se depositar durante o processo de soldagem.

4.3 – PENETRAÇÃO

Como nos casos anteriores o para se analisar as imagens dos cordões de solda foram utilizados os seguintes programas, NI Vision Builder for Automated Inspection 2010 e o ImageJ. As Figura 38, Figura 39, Figura 40, Figura 41, Figura 42, Figura 43, Figura 44 e Figura 45 que serão mostradas a seguir com os pontos de medição, em cada figura a primeira imagem mostra a distância até o ponto P1 e o valor medido no P1, se repetindo para imagens que seguem abaixo que mede o ponto P2 e o valor medido no P2 e para finalizar mostra a distância até P3 e o valor que se encontra no P3.

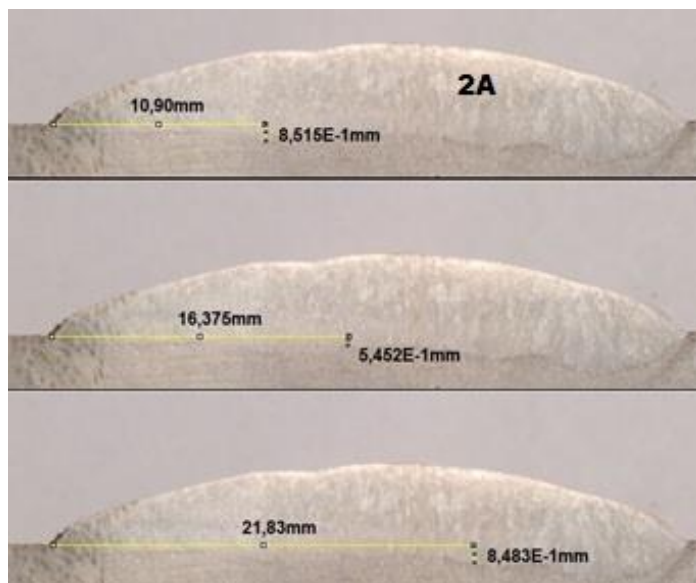


Figura 37 - Penetração nos pontos P1, P2 e P3 no Corpo de Prova 2A.

Fonte: Autor (2015)

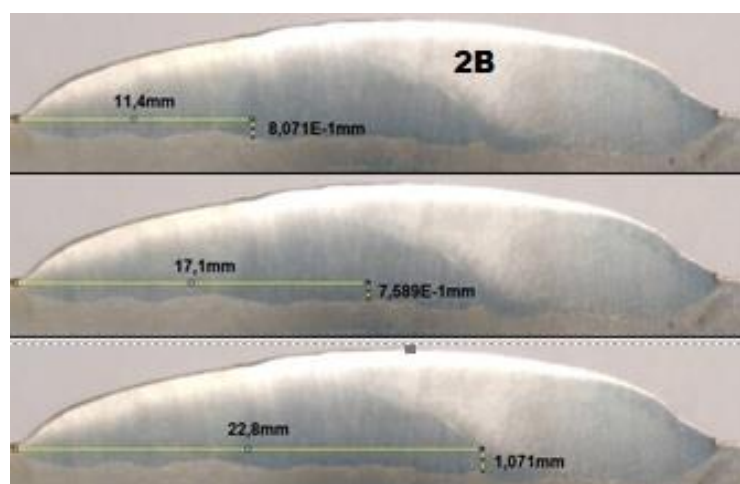


Figura 38 - Penetração nos pontos P1, P2 e P3 no Corpo de Prova 2B.

Fonte: Autor (2015)

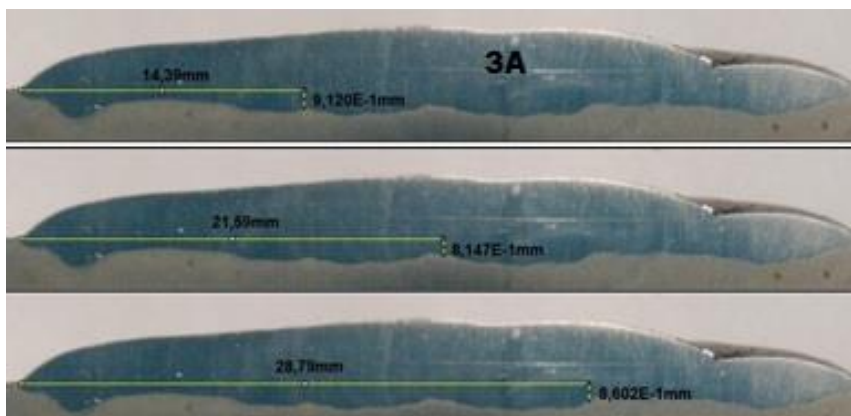


Figura 39 - Penetração nos pontos P1, P2 e P3 no Corpo de Prova 3^a
Fonte: Autor (2015)

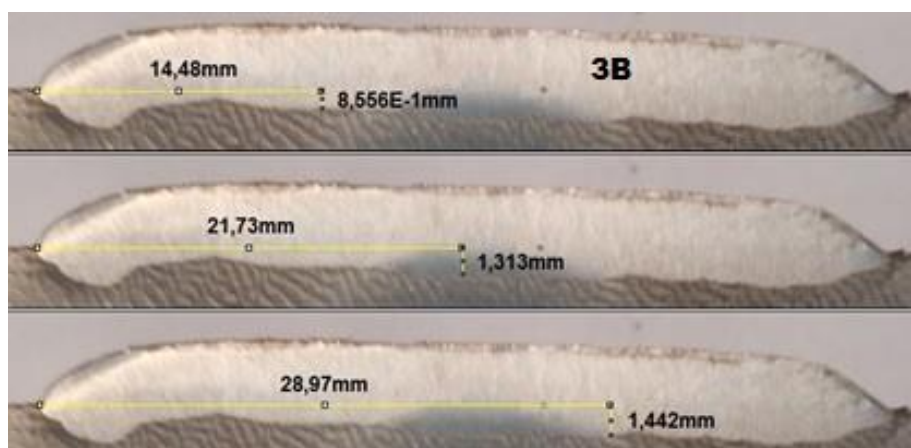


Figura 40 - Penetração nos pontos P1, P2 e P3 no Corpo de Prova 3B.
Fonte: Autor (2015)

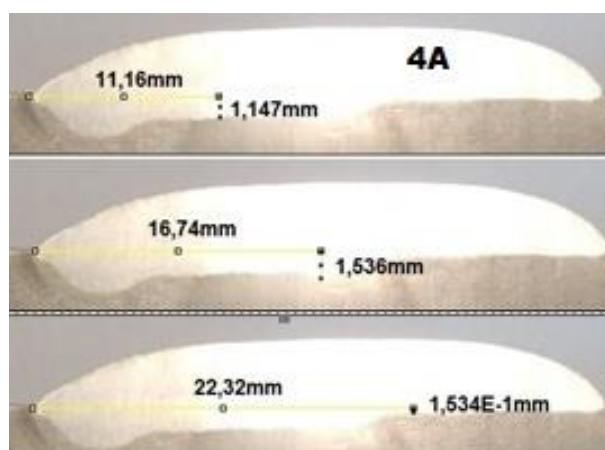


Figura 41 - Penetração nos pontos P1, P2 e P3 no Corpo de Prova 4^a.
Fonte: Autor (2015)

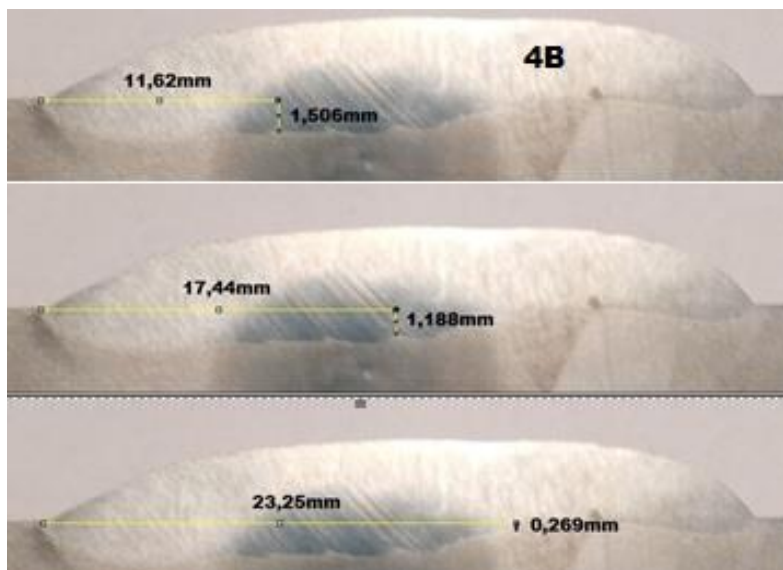


Figura 42 - Penetração nos pontos P1, P2 e P3 no Corpo de Prova 4B.
Fonte: Autor (2015)

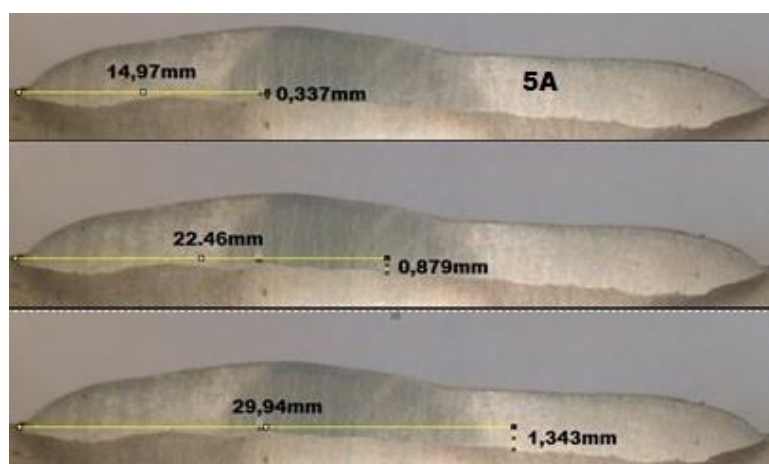


Figura 43 - Penetração nos pontos P1, P2 e P3 no Corpo de Prova 5ª.
Fonte: Autor (2015)

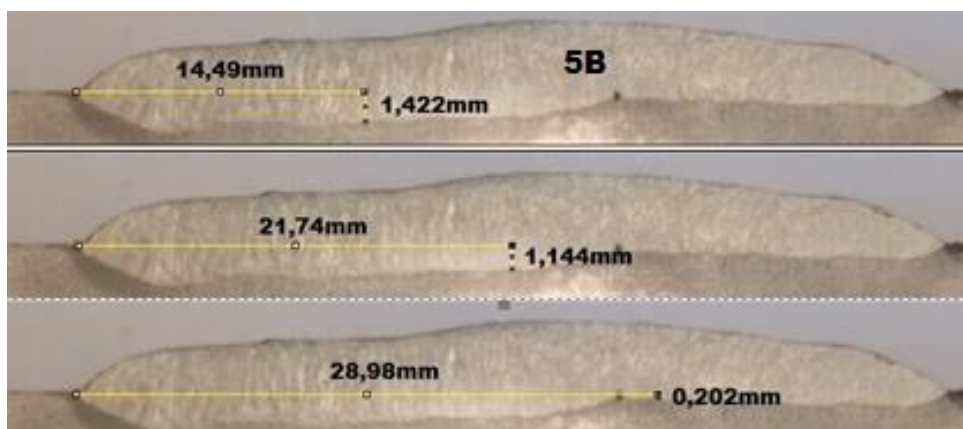


Figura 44 - Penetração nos pontos P1, P2 e P3 no Corpo de Prova 5B.
Fonte: Autor (2015)

Quando se vai soldar, o reforço de solda acaba se tornando uma das características mais essenciais, pois isto se deve ao fato de quanto maior for o seu reforço será necessário um número menor de passes a ser realizado. Estes reforços foram medidos e inseridos na Tabela 12 a seguir, pode se notar que foi medido em 3 pontos (P1, P2 e P3) e também o reforço médio encontrado e área de reforço no cordão de solda.

Tabela 10 - Altura da penetração da solda, penetração média e área da penetração.

Corpo de Prova Número	Altura da Penetração(mm)			Penetração Média (mm)	Área da Penetração (mm ²)
	P1	P2	P3		
2A	0,852	0,545	0,848	0,748	27,68
2B	0,807	0,759	1,071	0,879	38,86
3A	0,912	0,815	0,860	0,862	35,73
3B	0,856	1,313	1,442	1,203	50,15
4A	1,147	1,536	0,153	0,945	32,41
4B	1,506	1,188	0,269	0,987	36,61
5A	0,337	0,879	1,343	0,853	33,84
5B	1,422	1,144	0,202	0,922	43,94

Fonte: Autor (2015)

Para uma boa soldagem por revestimento deve-se obter a menor penetração possível, e se for considerarmos os dados obtidos na Tabela 12, podemos definir o melhor seria 2A, pois na sua penetração teve a menor penetração se for levado em conta os três pontos de medição.

A diferença entre o menor valor de penetração corpo de prova 2A e corpo de prova de maior penetração 3B é de 0,45mm aproximadamente. Se for considerado a média de todos os corpos de prova a penetração média obtida foi de 0,92mm.

A seguir é mostrado o Gráfico 6 da penetração média nos três pontos de medição.

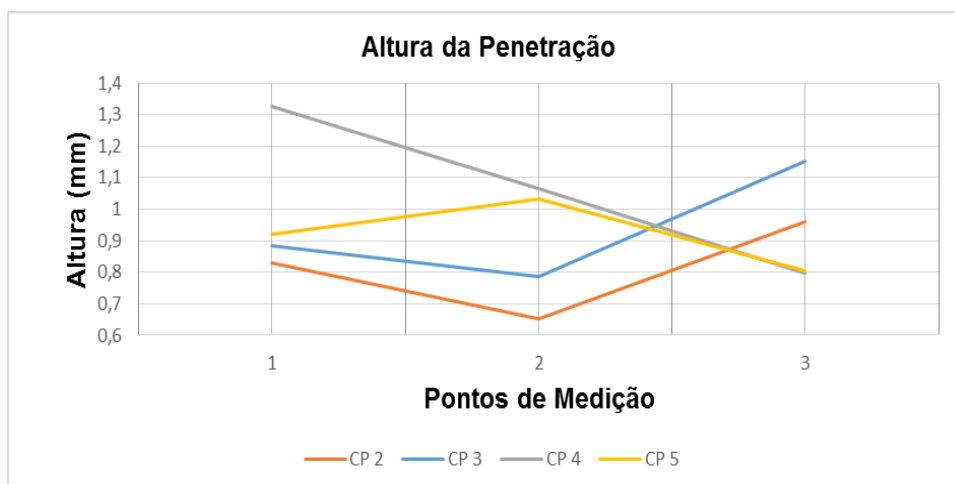


Gráfico 6 - Altura de Penetração
 Fonte: Autor (2015)

O Gráfico 7 que vem em seguida demonstra os valores da área total de penetração de cada corpo de prova.

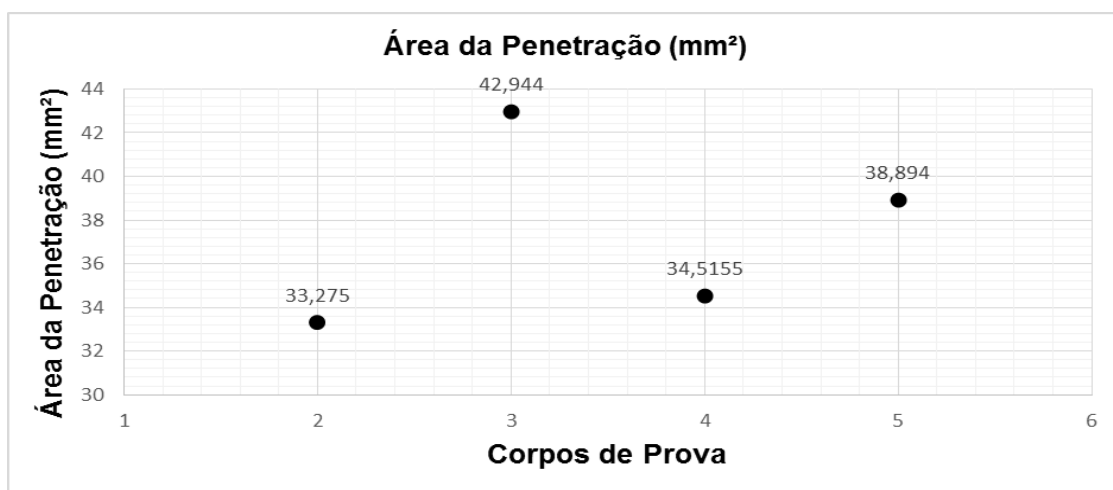


Gráfico 7 - Área de Penetração
 Fonte: Autor (2015)

Podemos concluir que os corpos de prova que se submeteram a soldagem com uma corrente maior obtiveram uma maior área de penetração, isto pode ser justificado pela maior temperatura obtida na poça de fusão, acarretando com que os dois materiais obtivessem uma maior fusão.

4.4 – DILUIÇÃO E ÂNGULO DE MOLHABILIDADE

No capítulo 2.2.1 Características Geométricas a diluição é explicada e mostrada na equação (1), assim na próxima Tabela 13 foi se calculado a sua diluição para cada revestimento. E também nesta Tabela 13 apresentamos o valor para o ângulo de molhabilidade.

Tabela 11 - Diluição e Ângulo de Molhabilidade

Corpo de Prova Número	Diluição (%)	Média da Diluição (%)	Ângulo de Molhabilidade (°)
2A	21,95	23,40	53,13
2B	24,85		42,32
3A	25,23	26,81	46,39
3B	28,40		65,55
4A	24,20	25,02	47,97
4B	25,83		30,10
5A	21,99	25,09	40,65
5B	25,18		39,17

Fonte: Autor (2015)

A seguir no Gráfico 8, mostra os valores percentuais de diluição para cada um dos corpos de prova.

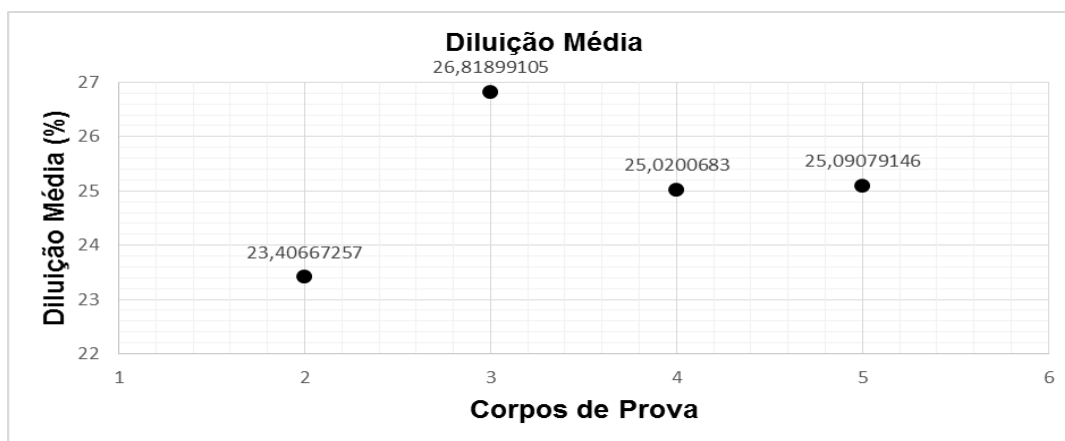


Gráfico 8 - Diluição média de cada corpo de prova

Fonte: Autor (2015)

Podemos tirar as seguintes conclusões a partir do Gráfico 8. O corpo de prova (CP2) onde foi aplicado a corrente de 200A e Largura de 30mm teve a menor diluição entre todos os corpos de prova, se compararmos com o corpo de prova (CP5) com a mesma corrente e apenas mudança na largura do cordão de solda a diferença entre essas diluições foi de 1,68%. Se compararmos os demais corpos de prova (CP 3 e CP4) que foram soldados com 220A e apenas variava-se a largura, esta diferença na diluição é de 1,79%. Este fator a diluição nas soldagens de revestimentos com metais dissimilares, se torna um fator de total e extrema importância, pois uma diluição excessiva acarreta uma possível mudanças nas propriedades do aço.

No Gráfico 9 é mostrado o ângulo de molhabilidade de cada corpo de prova.

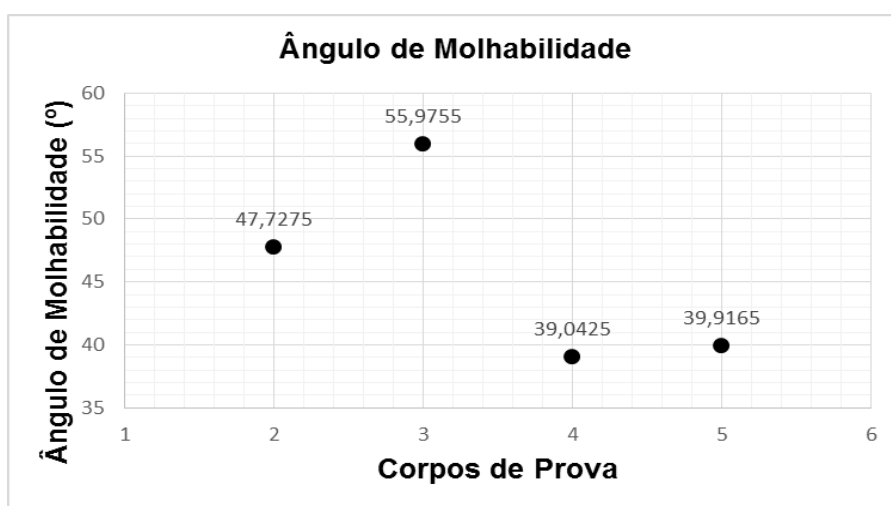


Gráfico 9 - Ângulo de Molhabilidade
Fonte: Autor (2015)

Este ângulo de molhabilidade é fator que está diretamente ligado a largura do cordão de solda, aqui notamos que em um dos casos onde a largura é maior acaba ocorrendo um ângulo de molhabilidade maior que os demais (CP3) a largura definida antes da soldagem foi de 30mm. Mesmo caso que ocorre no corpo de prova 5, que teve uma largura de 40mm deveria apresentar um valor um pouco maior. Isto pode ter ocorrido devido ter se trabalhar com uma corrente muito alta.

4.5 – RESULTADOS GERAIS POR CORRENTE

Como foram realizadas soldagens com duas correntes diferentes com intuito de suas características serem comparadas, afim de definir qual a corrente teria melhores características para revestimento entre as correntes utilizadas. Esta comparação pode ser vista na Tabela 14, que segue a seguir.

Tabela 12 - Características pela corrente utilizada.

Corrente (A)	Largura (mm)	Reforço (mm)	Penetração(mm)	Área do Reforço (mm²)	Área de Penetração (mm²)	Diluição (%)
200	38,83	3,69	0,85	111,96	36,08	24,24
220	38,75	3,59	0,99	109,72	38,72	25,91

Fonte: Autor (2015)

Analisando a Tabela 14, podemos notar que quase todas as características, largura, reforço, área do reforço são maiores para a corrente de 200A. As características penetração, área de penetração e diluição são maiores para corrente de 220A.

Foram confeccionados os seguintes gráficos a seguir para um melhor entendimento dos resultados por corrente. Foram produzidos os seguintes gráficos Corrente (A) x Largura (mm), Corrente (A) x Reforço (mm), Corrente (A) x Penetração (mm), Corrente (A) x Área do Reforço (mm²), Corrente (A) x Área de Penetração (mm²), Corrente (A) x Diluição (%).

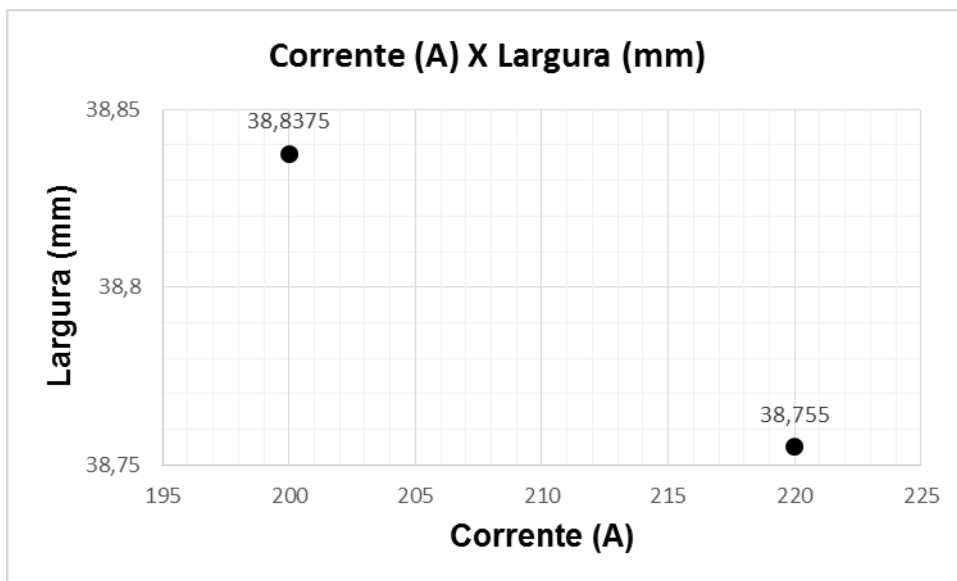


Gráfico 10 - Corrente (A) x Largura (mm)
Fonte: Autor (2015)

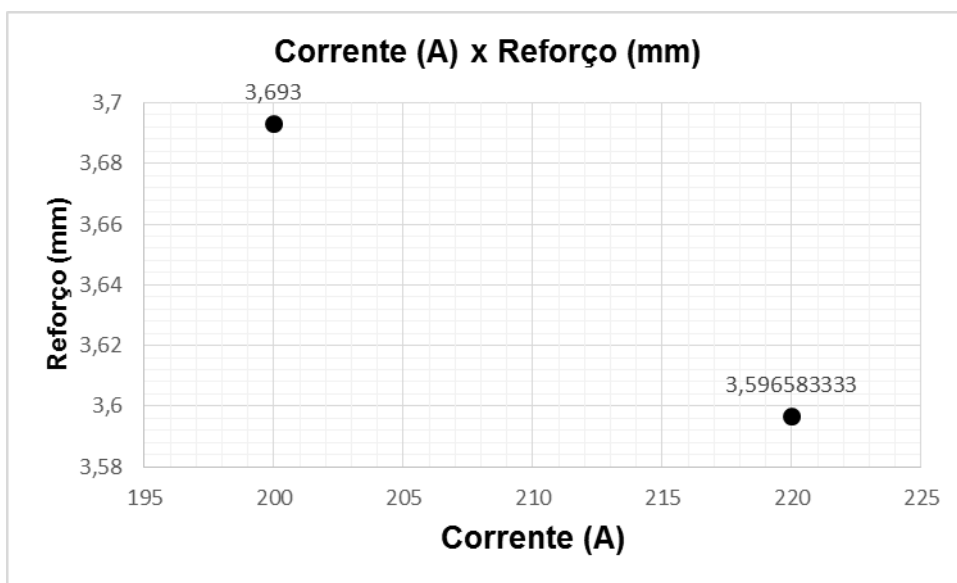


Gráfico 11 - Corrente (A) x Reforço (mm)
Fonte: Autor (2015)

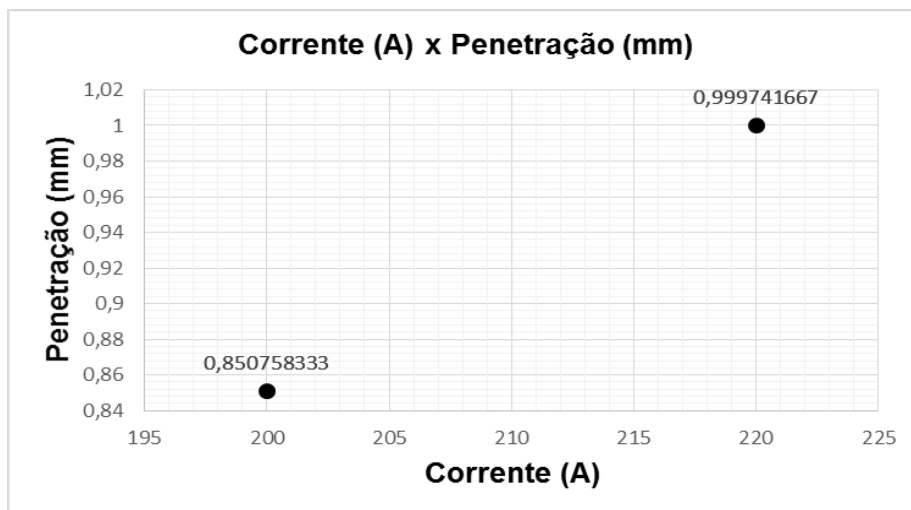


Gráfico 12 - Corrente (A) x Penetração (mm)
Fonte: Autor (2015)

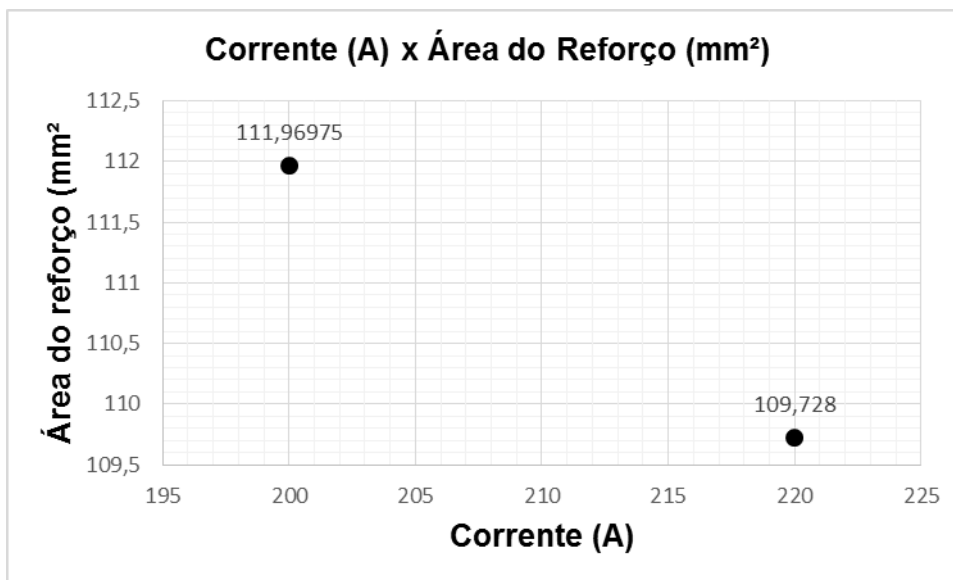


Gráfico 13 - Corrente (A) x Área do Reforço (mm²)
Fonte: Autor (2015)

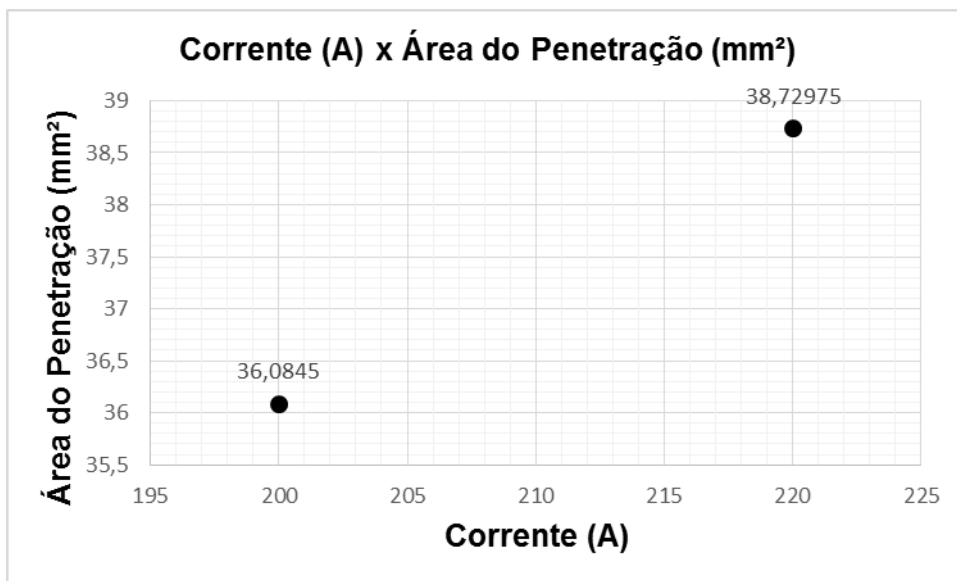


Gráfico 14 - Corrente (A) x Área do Penetração (mm²)
Fonte: Autor (2015)

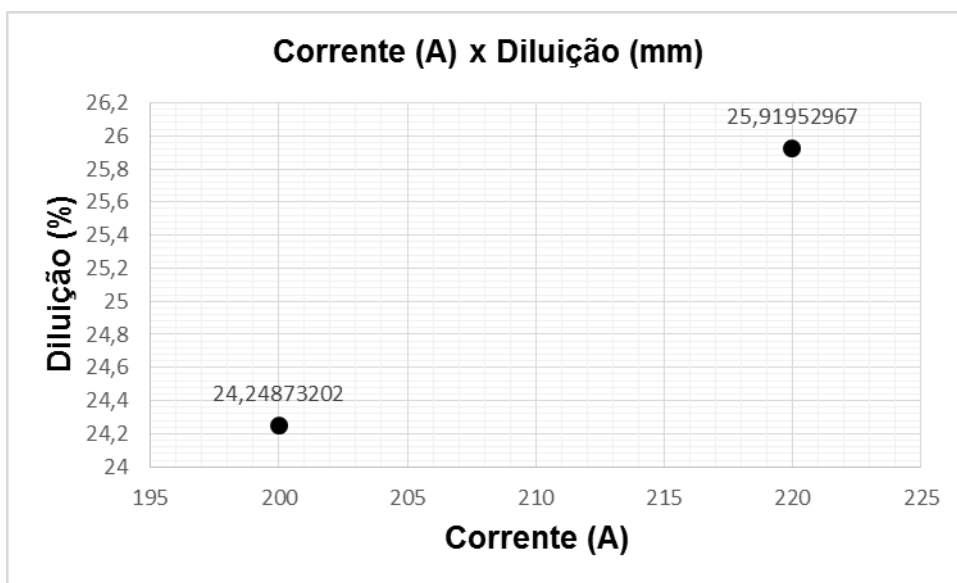


Gráfico 15 - Corrente (A) x Diluição (mm)
Fonte: Autor (2015)

5 CONCLUSÃO

Com o estudo da estrutura da geometria do cordão de solda utilizando soldagem com arame tubular e corrente pulsada, a morfologia do revestimento acabou permitindo a obtenção das características esperadas para este tipo de soldagem.

Ao se utilizar do processo de soldagem com arame tubular e a transferência de corrente pulsada, gerou cordões de solda com uma diluição razoável, a sua altura do reforço de solda foi considerada muito boa e excelente medidas de penetrações da solda e uma baixa diluição. Pois, estas são as características de uma boa solda por revestimento chegou a essas conclusões após as análises dos resultados.

Se aumentarmos a corrente média, houve um crescimento nos parâmetros como penetração e área da penetração, os demais parâmetros acabaram se tornando bem próximos, variando muito pouco entre as duas correntes quando comparadas.

Após a análise de todos os corpos de provas e fatores que causaram e influencia na sua produção, pode-se tirar a conclusão que a melhor combinação de parâmetros ocorreu no corpo de prova como maior largura de cordão, com maior altura de reforço, este seria o corpo de prova 4A, onde a corrente que aplicou foi de 220A, largura de 30mm, sua diluição média foi de 25,02% e altura de penetração média de 0,975mm e altura média do reforço de 4,07mm.

REFERÊNCIAS

ARCELORMITTAL – **Composição Química dos Aços ABNT 1020** - <<http://brasil.arcelormittal.com/pdf/quem-somos/guia-aco.pdf>>. Acesso em 17 de Abril. 2015.

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 7 de Abril. 2015.

FBTS. **Curso de Inspetor de Soldagem Nível 1**. Apostila do curso. Rio de Janeiro. Fundação Brasileira de Tecnologia da Soldagem, 2009.

GOUVEIA, Ruimar Rubens de et al. **Efeito da temperatura interpasse na microestrutura, tenacidade ao impacto e propagação de trinca por fadiga de uniões soldadas por GTAW do aço ASTM A743-CA6NM**. Soldag. insp., São Paulo , v. 18, n. 2, p. 127-137, June 2013.

IMC – **Fonte de Soldagem**. Disponível em: <<http://www.imc-soldagem.com.br/inversal.html>>. Acesso em 7 de Out. de 2015.

IMC – **Tartilope_v2-v2f_manual_usuario_(2006)**. Disponível em: Acesso em 10 de Set. de 2015.

IMC – **Tracionador de arame**. Disponível em: <<http://www.imc-soldagem.com.br/inversal.html>>. Acesso em 13 de Out. de 2015.

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 7 de Abril. 2015.

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.

MONDENESI, P.J. **Introdução à física do arco elétrico**. Belo Horizonte: EE-UFMG, 2002. Apostila. 141p.

MOTTA, M. F. **Aplicação do Processo MIG/MAG Pulsado com Duplo Arame e Potenciais Isolados em Soldagens de Revestimento**. 2002. 153 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002.

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

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

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

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. 70p. Trabalho de Conclusão de Curso.

TBi industries – **Tocha de Soldagem**, disponível em <<http://www.tbi-brasil.com/Produtos/TBi%20511-411.pdf>>. Acesso em 13 de Out. 2015.

UTFPR. **Normas para elaboração de trabalhos acadêmicos**. Acesso em 12 de Out. 2015.

VIEIRA, S.R.B., "Capítulo 4 – **O Método Taguchi**"; Dissertação, UFSC, Florianópolis. (1996).

WAINER, Emílio; BRANDI, Sérgio Duarte; MELLO, Fábio Décourt Homem de. **Soldagem**: processos e metalurgia. São Paulo: E. Blücher, 1992. 494 p.

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