



REVESTIMENTO INTERNO DE TUBO DE AÇO CARBONO COM SUPERLIGA
DE NÍQUEL 625 EMPREGANDO PROCESSO DE SOLDAGEM PPTAW

Daniel Adolpho da Silva Junior

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica e de Materiais, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Metalúrgica e de Materiais.

Orientador: João da Cruz Payão Filho

Rio de Janeiro
Agosto de 2016

REVESTIMENTO INTERNO DE TUBO DE AÇO CARBONO COM SUPERLIGA
DE NÍQUEL 625 EMPREGANDO PROCESSO DE SOLDAGEM PPTAW

Daniel Adolpho da Silva Junior

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO
LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA
(COPPE) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE
DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE
EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA METALÚRGICA E DE MATERIAIS.

Examinada por:



Prof. João da Cruz Payão Filho, Dr.-Ing.



Prof.^a Gabriela Ribeiro Pereira, D.Sc.



Prof. Sérgio Souto Maior Tavares, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

AGOSTO DE 2016

Silva Junior, Daniel Adolpho da

Revestimento Interno de Tubo de Aço Carbono Com Superliga de Níquel 625 Empregando Processo de Soldagem PPTAW/ Daniel Adolpho da Silva Junior – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2016.

XIII, 161 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: João da Cruz Payão Filho

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, 2016.

Referências Bibliográficas: p. 157-161.

1. Soldagem Plasma. 2. Revestimento de Materiais Metálicos. 3. PPTAW. I. Payão Filho, João da Cruz. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Metalúrgica e de Materiais. III. Título.

À Deus Jeová, à minha querida
esposa Nívia, aos meus pais e irmã e
amigos.

AGRADECIMENTOS

À Jeová Deus, que amorosamente criou os seres humanos e os ajuda até hoje em seus trabalhos permitindo que usem a ciência para o bem da humanidade.

À minha querida esposa Nívia Lycurgo Adolpho, que sempre dizia: "Tá estudando amor?"

Aos meus pais Daniel Adolpho e Marilene Rocha, minha irmã Vivian e meu cunhado Ricardo.

Ao meu grande amigo, professor e orientador, João da Cruz Payão Filho.

Ao meu amigo André Luís dos Santos Brites (in memoriam), que me auxiliou sobretudo na quantificação do teor de Fe nos ensaios de EDS me apresentando o pessoal da Química Analítica do CENPES.

Aos meus amigos do Centro de Pesquisas Leopoldo Miguez de Mello: Carlos Eduardo Chiapim, Almir Cardoso, Benedito Nogueira, Edilson Lopes, Marcus Vinicius, Eduardo Hippert, Ricardo Reppold que sempre me apoiaram nesta empreitada acadêmica.

Aos meus amigos do sistema FIRJAN: Maurício Ogawa, Lincoln Alves, Fernando Correia, Ramom Fonseca Ferreira, André Marques, José Geraldo, Suzana Peripoli.

Aos meus colegas de mestrado: Aline Raquel, Leury Pereira, Rodrigo Stohler brilhantes alunos que tive a honra de conhecer.

Aos meus amigos da Arcodynamics Equipamentos de Corte Plasma e Solda: Anderson Almeida, Alan Oliveira, Evandro Bento, Marcus Vinicius, Eduardo Almeida pelo apoio sempre que necessário.

Aos colegas da Victor Technologies: Bruno Lualdi, Fernando Lacerda, Antonio Leon e Mike Linehan.

Aos amigos da Tecmetal: Professora Annelise Zeemann, Guilherme Zeemann, Carlos Henrique Fontes.

À Andrés Toscanini e Ivan Cairão da empresa Comersul que forneceram todo o suporte para que esse trabalho fosse desenvolvido, fornecendo os consumíveis, e equipamento necessário aos testes.

Ao engenheiro Carlos Faggiani da empresa Nickel Alloys pelos comentários construtivos.

Ao consultor em processos de fabricação Jeferson Costa pelos comentários construtivos.

Ao engenheiro especialista Rod Webber da empresa Kennametal.

Aos colegas da UFSC: Régis Henrique, Raul Gohr, e professor Jair Carlos Dutra pelo pioneirismo em trabalhos com o processo de soldagem plasma pó.

À todos os voluntários da Associação Torre de Vigia de Bíblias e Tratados.

“Você já viu um homem que é habilidoso no seu trabalho? Ele tomará posição diante de reis...”

Provérbios 22:29

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

REVESTIMENTO INTERNO DE TUBO DE AÇO CARBONO COM SUPERLIGA
DE NÍQUEL 625 EMPREGANDO PROCESSO DE SOLDAGEM PPTAW

Daniel Adolpho da Silva Junior

Agosto/2016

Orientador: João da Cruz Payão Filho

Programa: Engenharia Metalúrgica e Materiais

O processo de soldagem de revestimento TIG arame quente é amplamente usado na indústria de óleo e gás para revestir peças e equipamentos submarinos sob a prerrogativa de ser a melhor solução contra a corrosão, porém, sua baixa taxa de deposição e alta diluição, inerentes do processo representam um problema para sua competitividade plena, Este trabalho apresenta o processo de soldagem plasma pó de arco transferido com apenas um único passe como a melhor opção para soldagem de revestimento em função de sua elevada taxa de deposição e baixíssima diluição. A taxa de deposição medida foi cerca de três vezes maior que a do processo convencional TIG arame quente, foram realizados medições de dureza e ensaios de líquido penetrante, cisalhamento, também medição de espessura do revestimento, avaliação semiquantitativa e qualitativa do teor de Fe (EDS e fluorescência de raios x), destacamos o baixíssimo teor de Fe quando comparado ao do TIG arame quente para a mesma espessura demonstrando desta forma a supremacia deste processo nesta aplicação.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

INTERNAL CLADDING IN CARBON STEEL PIPE WITH NICKEL SUPERALLOY
625 APPLYING WELDING PROCESS PPTAW

Daniel Adolpho da Silva Junior

August/2016

Advisor: João da Cruz Payão Filho

Department: Materials and Metallurgical Engineering

The welding process TIG hot wire is widely used in the oil and gas industry for cladding parts and subsea equipments under the prerogative being the best solution against corrosion, but the low deposition rate and high dilution inherent in this process pose a problem for their full competitiveness. This work presents the plasma transferred arc powder with just one pass as the best option for cladding because the high deposition rate and very low dilution. The deposition rate measured was about three times greater than the TIG hot wire conventional method, measurements were made of hardness and penetrant liquid test, shear, also thickness measurement of the cladding, semiquantitative, and qualitative assessment of the Fe content (EDS and x-ray fluorescence), we highlight the very low Fe content when compared to the hot wire TIG for the same thickness thus demonstrating the supremacy of the process in this application.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
2.1 Processo de soldagem TIG e suas variáveis.....	4
2.1.1 Características da corrente de soldagem.....	8
2.1.2 Distância do eletrodo à peça obra.....	9
2.1.3 Inclinação da tocha.....	10
2.1.4 Gases de proteção.....	10
2.1.5 Misturas Argônio-Hidrogênio.....	12
2.1.6 Equipamentos.....	12
2.1.7 Tochas utilizadas.....	15
2.1.8 Modos de abertura do arco.....	15
2.2 Eletrodo de tungstênio.....	19
2.2.1 Variação da ponta do ângulo do eletrodo de tungstênio.....	21
2.2.2 Afição do eletrodo de Tungstênio.....	22
2.2.3 Eletrodos de Tungstênio: Tecnologia atual.....	24
2.3 Metais de adição.....	26
2.4 Revestimento metálico pelo processo de soldagem GTAW hot wire, ou TIG arame quente.....	27
2.5 Processo de soldagem plasma (PAW).....	32
2.5.1 Aspectos gerais do processo de soldagem plasma.....	36
2.5.2 Equipamentos.....	38
2.5.3 Consumíveis.....	41
2.5.4 Gás de plasma.....	46
2.5.5 Gás de proteção.....	48
2.5.6 Gás de purga e proteção adicional.....	49
2.5.7 Polaridade e tipos de corrente.....	50
2.5.8 Modos operacionais.....	52
2.5.8.1 Microplasma.....	54
2.5.8.2 Melt-in.....	54
2.5.8.3 Keyhole ou buraco de fechadura.....	55

2.5.9	Parâmetros de soldagem.....	56
2.5.10	Vazão do gás plasma.....	56
2.5.11	Corrente do processo de soldagem plasma.....	57
2.5.12	Velocidade do processo de soldagem plasma.....	57
2.5.13	Diâmetro do orifício constritor (bico).....	58
2.5.14	Recuo do eletrodo (set back).....	59
2.5.15	Distância da tocha de soldagem plasma à peça.....	60
2.5.16	Vazão de gás de proteção.....	61
2.5.17	Ângulo da ponta do eletrodo.....	62
2.5.18	Adição de metal (velocidade de alimentação).....	62
2.6	Processo de Soldagem : PPTAW, PTA ou ainda PTAP.....	63
2.6.1	Equipamentos.....	66
2.6.6.1	Alimentador de pó e eficiência térmica do processo.....	69
2.6.2	Parâmetros elétricos.....	75
2.6.3	Gases do processo PTA.....	77
2.6.4	Parâmetros geométricos e dinâmicos.....	84
2.6.5	Substrato.....	86
2.6.6	Consumível: Granulometria do pó.....	86
2.6.7	Composição química.....	89
2.6.8	Escoabilidade.....	90
2.7	Poça de fusão e solidificação.....	90
2.8	Diluição.....	93
2.8.1	Parâmetros que afetam a diluição.....	99
2.8.2	Corrente elétrica.....	99
2.8.3	Diâmetro do metal de adição.....	100
2.8.4	Distância entre os cordões de solda.....	100
2.8.5	Oscilação da tocha.....	101
2.8.6	Posição de soldagem e inclinação de trabalho.....	102
2.8.7	O binômio taxa de deposição x diluição.....	103
2.9	Meio ambiente.....	107
2.10	Consumível: Superliga de Níquel 625.....	107
2.11	Alguns exemplos de aplicação do processo PTA	112
2.12	Revestimento por colaminação.....	113

2.13	Comparações entre o PTA e TIG.....	114
2.14	Custos associados ao processo PTAW ou PTA x TIG automático.....	115
3.	MATERIAIS E MÉTODOS.....	116
3.1	Materiais.....	116
3.2	Métodos.....	118
3.2.1	Inspeção Visual.....	122
3.2.2	Líquido penetrante.....	123
3.2.3	Ensaio de cisalhamento ASTM A265.....	123
3.2.4	Ensaio de corrosão ASTM G48.....	123
3.2.5	Microscopia.....	124
3.2.6	Dureza.....	124
3.2.7	EDS.....	127
3.2.10	Análise por fluorescência de raio X.....	127
4.	RESULTADOS.....	129
4.1	Inspeção Visual.....	129
4.2	Líquido penetrante.....	129
4.3	Ensaio de cisalhamento ASTM A265.....	130
4.4	Ensaio de corrosão ASTM G48.....	130
4.5	Microscopia e inspeção.....	131
4.6	Dureza.....	135
4.7	EDS.....	144
4.8	Análise por fluorescência de raios X.....	146
5.	DISCUSSÃO.....	147
5.1	Defeitos superficiais e ensaio mecânico de cisalhamento.....	147
5.2	Teor de Fe, dureza e corrosão	151
6.	CONCLUSÕES.....	155
7.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	156

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	157
--	------------

1. INTRODUÇÃO

A exploração e produção de petróleo e gás no Brasil exige a utilização de tubos que possuam, concomitantemente, alta resistência mecânica e elevada resistência à corrosão. Tubos de aço carbono ou baixa liga podem possuir alta resistência mecânica, mas não a resistência à corrosão exigida; tubos de aços inoxidáveis ou ligas de níquel, por outro lado, possuem a resistência à corrosão necessária, mas são extremamente caros, de modo que seu emprego é economicamente proibitivo. Assim, a melhor alternativa é o uso de tubos de aço carbono ou baixa liga revestidos (cladeados) internamente por soldagem com aço inoxidável ou liga de níquel.

Cladamento interno de tubo de aço carbono ou baixa liga é o revestimento por soldagem com metal dissimilar (figura 1.1). Seu objetivo é aumentar a resistência do material (tubo original, no caso deste projeto) à corrosão.

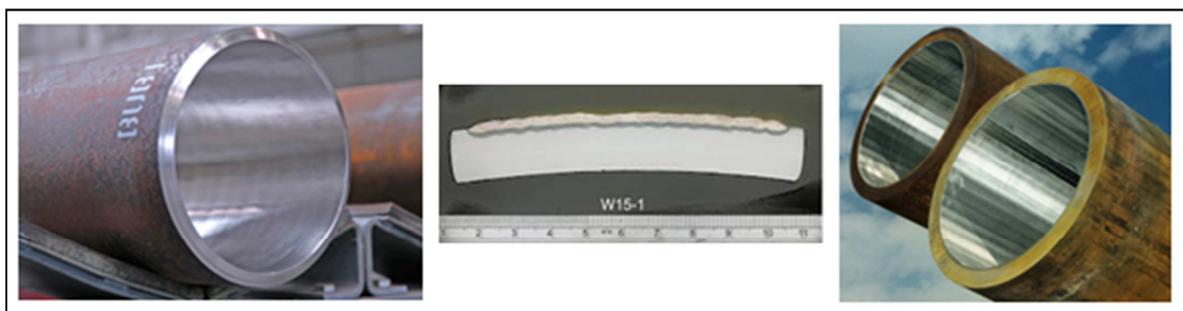


Figura 1.1: Tubos (esquerda e direita) e chapa (centro) de aço carbono ou baixa liga revestidos com liga resistente à corrosão.

Inúmeros processos são empregados na soldagem de revestimento (cladamento) interno de tubos de aço carbono ou baixa liga com liga resistente à corrosão (CRA – acrônimo em inglês de "Corrosion Resistant Alloy"), cada um deles com sua(s) vantagem(ns) e limitação(ões). Dentre estes processos, o GTAW (acrônimo em inglês de "Gas Tungsten Arc Welding"), também conhecido com TIG, empregando arame quente como metal de adição é o mais utilizado no mundo e, em particular, no Brasil. O processo de soldagem PTA (acrônimo em inglês de "Plasma Transferred Arc") com pó como metal de adição também conhecido como PPTAW (Plasma Powder Transferred ArcWelding), todavia, em virtude inúmeras características suas, parece ser bem mais vantajoso que o GTAW com arame quente, tanto no que diz respeito aos

aspectos técnicos e econômicos, como também aos relacionados ao meio ambiente e à saúde.

É muito importante que se obtenha, na soldagem de revestimento interno de tubo, simultaneamente: A menor diluição possível, ou seja, uma participação mínima do metal de base no revestimento, a maior taxa de deposição possível, ou seja, a fusão da máxima quantidade de metal de adição, a melhor estabilidade possível do arco elétrico, quando este é usado como fonte de calor, a espessura mínima desejada de revestimento resistente à corrosão com a soldagem de uma única camada, a menor distorção possível do tubo, uma zona afetada pelo calor no metal de base com a menor extensão possível, um revestimento o mais uniforme possível.

Como é impossível um único processo de soldagem ter todas estas características juntas, na prática emprega-se inúmeros processos no revestimento interno de tubos. Mais ainda, é muito difícil determinar que processo de soldagem, dentre os disponíveis, é o mais adequado para fazer certo tipo de revestimento, tendo em vista o controle de diluição como um dos critérios decisivos para o processo.

A maneira mais comum de controlar o efeito maléfico da diluição é o restringir a participação do elemento prejudicial no metal de solda (no presente projeto, o ferro), melhorando o seu desempenho. Quando se usa superliga de níquel 625 como metal de adição, deseja-se um teor máximo de 5% de ferro na última camada do revestimento. Assim, o teor de ferro permitido nesta liga foi ajustado para garantir boa resistência à corrosão, de modo que os consumíveis de soldagem de superliga de níquel 625 devem ter menos de 2% de ferro.

A superliga 625 (UNS N06625) é à base de níquel, cromo e molibdênio, elementos que lhe conferem alta resistência à corrosão em diversos meios. O metal de adição correspondente à superliga de níquel 625 é classificado como NiCrMo-3, de acordo como o ASME II parte C, SFA 5.14. A composição química nominal do metal de solda obtido com este consumível é 61%Ni, 22%Cr, 9%Mo e 3,5%Nb+Ta. Este metal de adição, usado na soldagem de ligas de níquel-cromo-molibdênio com elas mesmas (soldagem similar) ou de ligas de níquel com aços (soldagem dissimilar), é recomendado para aplicações a temperaturas de operação que vão das criogênicas a 540°C.

Segundo a Especificação 6A do Instituto Americano de Petróleo (API – acrônimo em inglês de "American Petroleum Institute"), o revestimento de liga resistente à corrosão sobre aço carbono ou baixa liga precisa ter espessura mínima de 3 mm, de modo que o teor de ferro na superfície do revestimento seja menor que 5%, o que garantiria, assim, sua resistência à corrosão.

Devido à(s) vantagem(ns) e limitação(ões) que um processo de soldagem tem em relação a outros, o revestimento de aço carbono ou baixa liga com liga resistente à corrosão é feito na prática com vários processos. Dentre eles, o GTAW com arame quente é o mais empregado no revestimento interno de tubos, justamente por ser considerado por muitos especialistas como sendo o mais vantajoso. Outro processo que pode ser utilizado com sucesso na soldagem de revestimento interno de tubos, em vista de suas características muito particulares, é o plasma empregando pó como metal de adição.

As vantagens e limitações do processo de soldagem de revestimento plasma pó (PPTAW ou PTA, anônimo mais conhecido), porém, são pouco conhecidas no mundo, em especial no Brasil, onde não existe histórico de revestimento interno de tubos com esse processo sendo o primeiro trabalho a utilizar a tocha HPI 350 do fabricante Kennametal da Alemanha, alguns dados obtidos nesse trabalho são inéditos. Assim, é bastante interessante estudar a viabilidade de sua aplicação com relação a aspectos técnicos, econômicos, ambientais e de saúde, principalmente na área de exploração e produção de petróleo e gás no Brasil, como no Pré-Sal, que apresenta condições muito específicas. Em virtude de algumas propriedades deste processo, espera-se que ele se mostre vantajoso, quando comparado com o processo de soldagem de revestimento com o GTAW com arame quente tendo como consumível o Inconel 625 (UNS N06625), não apenas pela alta taxa de deposição.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Processo de soldagem TIG e suas variáveis

O processo de soldagem plasma é um processo muito próximo do processo TIG (tungstênio inerte gás), ou GTAW (gas tungsten arc welding) conforme designação AWS, (American Welding Society), e para melhor compreensão do processo de soldagem de revestimento plasma pó (PPTAW ou PTA como é mais conhecido), iremos inicialmente abordar os processo de soldagem TIG, plasma e finalmente plasma pó.

A Soldagem Gas Tungsten Arc Welding (GTAW) ou, como é mais conhecida no Brasil, TIG (Tungsten Inert Gas), é um processo no qual a união é obtida pelo aquecimento dos materiais por um arco elétrico estabelecido entre um eletrodo não consumível de tungstênio e a peça. A proteção do eletrodo do arco elétrico e da poça de fusão é feita por um gás inerte, normalmente o argônio, ou mistura de gases inertes (Ar e He). Metal de adição pode ser utilizado ou não, a figura 2.1 mostra esquematicamente o processo.

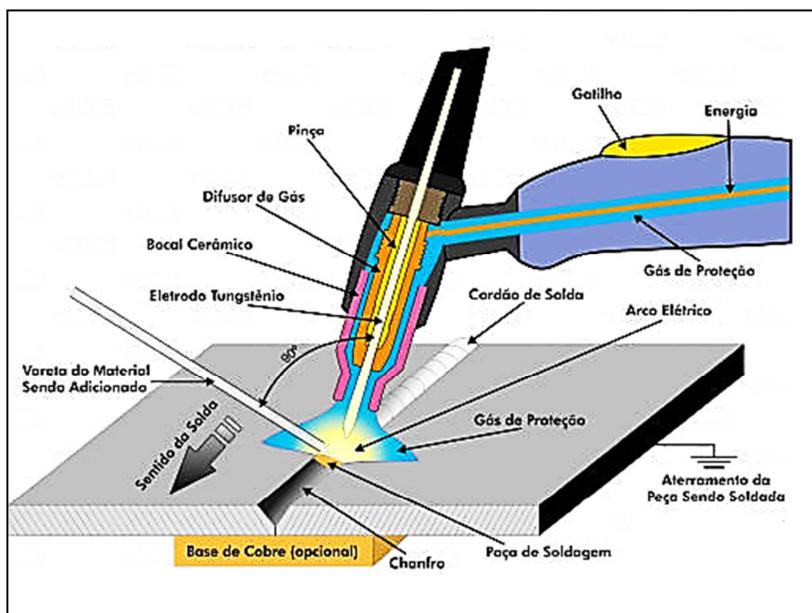


Figura 2.1: Processo de soldagem GTAW ou TIG (Adaptado de DBC guias tutorias, processos de soldagem).

Temos uma similaridade entre os processos TIG e plasma de soldagem, podemos à priori afirmar que o processo de soldagem plasma é o processo TIG com constrição do arco, eletrodo protegido, dois tipos de gases basicamente, ou que o processo TIG é o processo de soldagem plasma sem bocal de constrição, onde o gás de plasma e proteção são os mesmos.

O eletrodo de tungstênio é o mesmo e os gases utilizados são praticamente os mesmos, os metais de adição também são os mesmos, a soldagem pode ser autógena ou com adição.

Iremos considerar algumas particularidades do processo TIG, a princípio o efeito térmico e mecânico do arco elétrico, conforme figura 2.2.

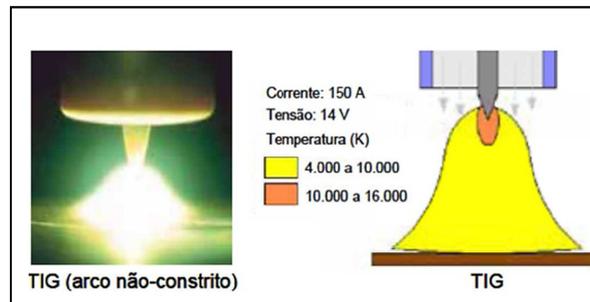


Figura 2.2: Representação do efeito térmico do arco não constrito no processo TIG (Adaptado de REIS, R.; SCOTTI, A, 2007).

Na figura 2.3, temos o gráfico referente à pressão do arco (efeito mecânico) na soldagem TIG com 100 amperes.

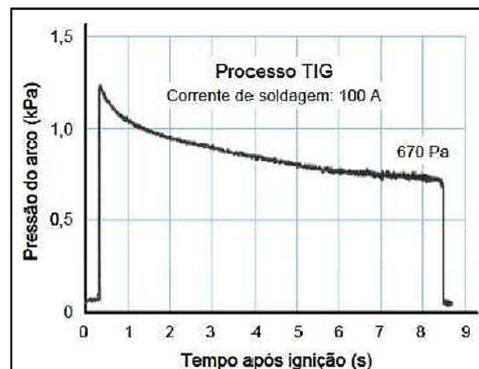


Figura 2.3: Gráfico relacionando pressão do arco x tempo de ignição (Adaptado de REIS, R.; SCOTTI, A, 2007).

Na figura 2.4 temos a representação do efeito da variação da distância tocha-peça bem como a distribuição de temperatura do arco, no processo de soldagem TIG.

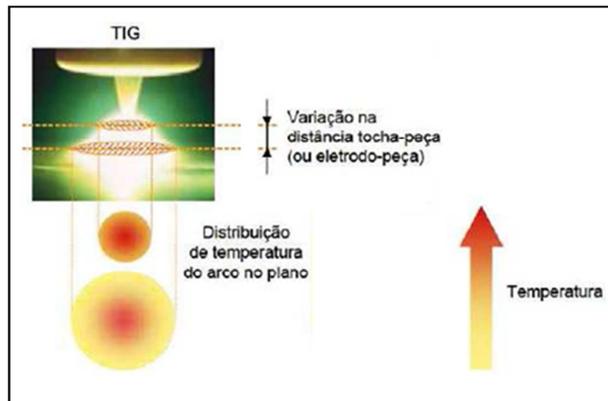


Figura 2.4: Representação do efeito da variação da distância tocha-peça bem como a distribuição de temperatura do arco no processo de soldagem TIG (Adaptado de REIS, R.; SCOTTI, A, 2007).

Na figura 2.5 temos a representação do efeito da constrição do arco no processo TIG com 200 amperes x distância do centro do arco.

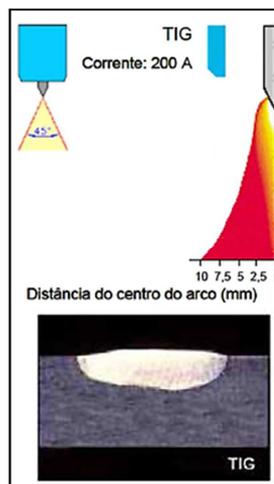


Figura 2.5: Representação do efeito da constrição do arco no processo TIG, com 200 amperes x distância do centro do arco (Adaptado de REIS, R.; SCOTTI, A, 2007).

Abaixo na figura 2.6, temos a representação do perfil da zona fundida e zona afetada pelo calor no processo TIG em função da constricividade do arco.

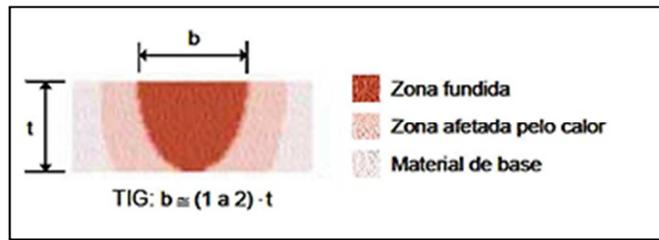


Figura 2.6: Representação do perfil da zona fundida e zona afetada pelo calor entre os processos TIG e soldagem plasma (Adaptado de REIS, R.; SCOTTI, A, 2007).

O processo TIG é considerado um dos processos de soldagem a arco de melhor qualidade. O processo é versátil e pode ser usado na forma manual (figura 2.7) ou semi-automatizado (figura 2.8), ou automático (figura 2.9), as tochas podem ser refrigeradas à água ou pelo próprio gás utilizado no processo. Um uso comum, para aços estruturais, é a execução de passes de raiz na soldagem de tubulações. A soldagem TIG é mais utilizada para aços ligados, aços inoxidáveis e ligas não ferrosas, os consumíveis podem ser em varetas ou bobinas de arame conforme será mais detalhado adiante em função de serem os mesmos do processo de soldagem plasma.



Figura 2.7: Soldagem TIG manual (Adaptado de Arcdynamics 2015).



Figura 2.8: Alimentador de arame utilizado no processo TIG semi-automático (Adaptado de CK Worldwide).

O processo TIG é bastante adequado à soldagem de peças de pequena espessura e aliado à eficiente proteção contra contaminação, à soldagem de materiais de difícil soldabilidade com ótimos resultados, a soldagem pode ser feita sem metal de adição

(chapas finas), processo de baixa taxa de deposição em soldagem manual: 1,3 kg / h, solda em todas as posições, solda praticamente todos os metais industrialmente utilizados, pouca geração de fumos, solda espessuras a partir de 0,2 mm, requer soldadores altamente qualificados, pode ser aplicado em juntas onde não é necessária a utilização do metal de adição (solda autógena), muito empregado em passes de raiz, produz soldas com ótimas propriedades mecânicas, ótimo acabamento, fácil automatização. (ISES SENAI, 2014).

2.1.1 Característica da corrente de soldagem

Para a soldagem TIG é requerida uma fonte de corrente constante podendo ser contínua, destinada à aplicação em aço carbono, inox ou corrente alternada destinada à soldagem de alumínio e suas ligas, conforme figura 2.9.

O tipo de corrente elétrica utilizada neste processo influencia a penetração de solda, a limpeza superficial dos óxidos da superfície do metal base e o desgaste do eletrodo de tungstênio.

Corrente Contínua Polaridade Direta (eletrodo negativo): É recomendada apesar de não proporcionar ação de limpeza. Com este tipo de corrente a penetração é profunda e o desgaste do eletrodo é minimizado. Aplica-se na soldagem da maioria dos metais, todos os tipos de aços, cobre e suas ligas, titânio, ou seja, metais onde não é necessária a limpeza dos óxidos superficiais.

Corrente Contínua Polaridade Inversa (eletrodo positivo): a ação de limpeza é eficiente, mas, o desgaste excessivo do eletrodo inviabiliza a aplicação deste tipo de corrente na prática;

Corrente Alternada: temos características intermediárias as anteriores. Este tipo de corrente, por promover média penetração e ação de limpeza satisfatória, é a indicada para a soldagem do alumínio, magnésio e suas ligas, metais onde a limpeza dos óxidos superficiais é fundamental na realização da operação de soldagem. Sempre que for utilizado este tipo de corrente, o ignitor de alta-frequência permanece acionado durante toda a operação de soldagem para estabilizar o arco elétrico.

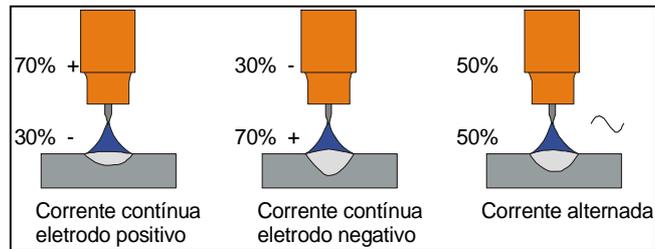


Figura 2.9: Característica da corrente contínua constante e alternada no processo TIG (Adaptado de ISES SENAI, 2014).

Corrente Pulsada (figura 2.10): Por ser pulsada e não constante no tempo, permite a produção de juntas com muito melhor qualidade porque, no mínimo, quando comparado com o TIG convencional, apresenta as seguintes vantagens: Utiliza menor energia de soldagem, melhora em muito o controle sobre a geometria do cordão, reduz a distorção, reduz a zona afetada pelo calor e a tendência à trinca de solidificação, através do refino de grão, melhora as propriedades mecânicas da junta.

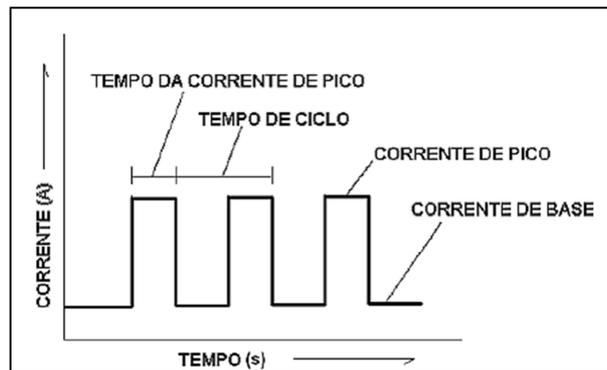


Figura 2.10: Característica da corrente contínua pulsada (Adaptado de Estudo da influência dos parâmetros de soldagem de revestimento resistente à corrosão na diluição pelo processo TIG modalidade arame quente; Relatório Técnico UFTPR, 2006).

2.1.2 Distância do eletrodo à peça obra

Esta variável controla a comprimento do arco elétrico. Quanto maior a distância do eletrodo à peça maior o altura e largura do arco elétrico. Com isto, maior área do metal base é aquecida resultando num cordão mais largo, conforme figura 2.11.

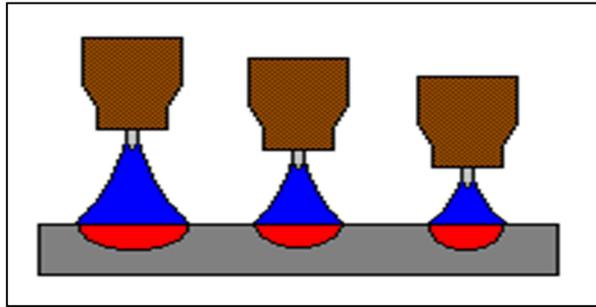


Figura 2.11: Efeito da variação da distância tocha peça sobre o perfil geométrico do cordão de solda (Adaptado de ISES SENAI, 2014).

2.1.3 Inclinação da tocha.

Soldando-se com inclinação positiva (puxando a solda), o arco elétrico atua diretamente sobre a poça de fusão, aumentando a penetração. Já, no sentido negativo (empurrando a solda), o arco elétrico incide sobre o metal de base frio, reduzindo a penetração da solda, conforme figura 2.12.

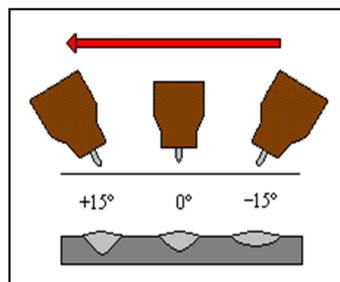


Figura 2.12: Efeito da inclinação da tocha sobre o perfil geométrico do cordão de solda.

2.1.4 Gases de proteção

Os gases utilizados neste processo devem ser inertes, daí a denominação TIG (*Tungstênio Inerte Gás*);

O fato de se usar um eletrodo não consumível impõe também a necessidade de se usar gases como atmosfera protetora, de forma que não se deteriore o eletrodo de tungstênio nas temperaturas de soldagem;

Desta forma, os gases mais utilizados são o argônio, hélio e misturas argônio-hélio e argônio-hidrogênio.

Inicialmente iremos considerar o gás Argônio: Devido às suas características não reativas e apresentar baixo potencial de ionização, é o gás mais utilizado na soldagem TIG; Proporciona uma fácil abertura de arco elétrico; Por causa da baixa condutividade térmica, a coluna de arco é constricta, gerando um perfil de penetração estreito e profundo, tipo taça; O argônio puro é mais usado em soldagens manuais de qualquer material; Quando a soldagem for mecanizada, as misturas argônio-hélio e argônio-hidrogênio apresentam maior produtividade.

Agora consideraremos o gás Hélio: A sua elevada condutividade térmica e potencial de ionização, produzem tensões de arco mais altas quando comparadas ao argônio, para mesmos valores de corrente. O arco é bem mais quente, aumentando o aporte térmico e a profundidade de penetração, e, em virtude de não apresentar constrição, o seu perfil é mais largo e arredondado.

O uso de hélio puro em soldagem TIG é preferido em relação ao argônio para soldagem de chapas mais grossas, especialmente em materiais que tenham alta condutividade térmica, ou também em soldas mecanizadas, onde possam ser desenvolvidas maiores velocidades de soldagem.

Fazendo uma breve comparação entre o gás hélio (He) e Argônio (Ar) temos: Melhor estabilidade do arco com Ar que com He, menor consumo de Ar, já que este é mais denso que o He, menores tensões de arco com Ar que com He, menor custo do Ar, maior penetração da soldagem com He que com Ar, maior facilidade na abertura do arco com Ar, melhor efeito de limpeza dos óxidos na soldagem com corrente alternada com Ar, possibilidade de uso de maiores velocidades com He. A figura 2.13 mostra o perfil do cordão de solda utilizando os gases Hélio e Argônio

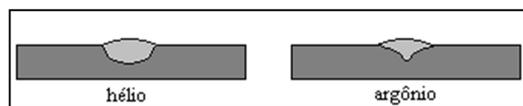


Figura 2.13: Perfil dos cordões de solda utilizando os gases Hélio e Argônio (Adaptado de ISES SENAI, 2014).

2.1.5 Misturas Argônio-Hidrogênio

O Hidrogênio é misturado ao Argônio, para melhorar as características térmicas, a atmosfera redutora produzida, melhora as condições de molhabilidade da poça de fusão e gera uma superfície de solda sem a presença de óxidos, as elevadas tensões de arco associadas ao uso do hidrogênio dificultam a abertura de arco elétrico, normalmente para a soldagem manual, o teor de Hidrogênio máximo é de 5%, enquanto para soldagem mecanizada é 10%, porém esse percentual pode chegar até 35%, com ganhos superiores a 50% na velocidade de soldagem, teores maiores que 35% causam porosidade no cordão de solda.

2.1.6 Equipamentos

Para a soldagem TIG é necessário que seja uma fonte de corrente constante, sendo contínua ou alternada (caso se deseja soldar alumínio), podendo ser convencional ou inversora (eletrônica). Abaixo, na figura 2.14, temos o esquema de um equipamento para soldagem TIG.

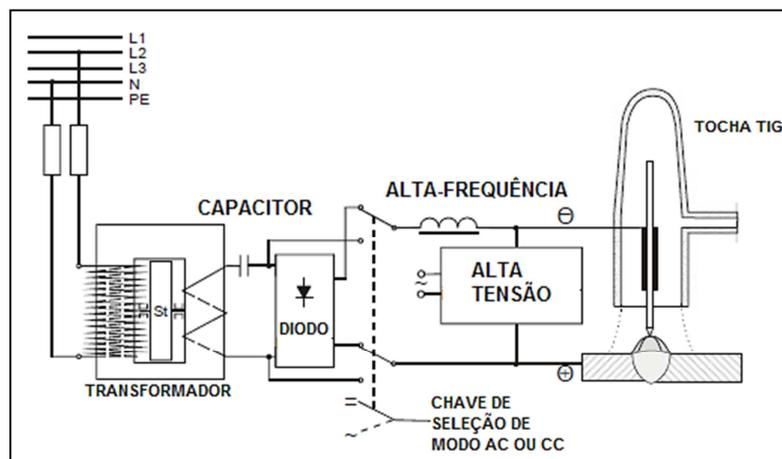


Figura 2.14: Esquema ilustrativo da máquina de solda referente ao processo TIG (Adaptado de Welding Institute RWTH, Aachen University, Welding Technology Welding and Cutting Technologies).

Sobre a fonte de corrente constante no que tange a característica estática de um arco, pode ser entendida como o comportamento da tensão de arco em função de variações de corrente para uma dada regulagem dos demais parâmetros de soldagem

como, por exemplo, gases utilizados, distância tocha-peça, recuo de eletrodo, diâmetro do bocal constritor.

O encontro da curva estática da fonte com a curva estática do arco define o ponto de trabalho do processo, conforme figura 2.15.

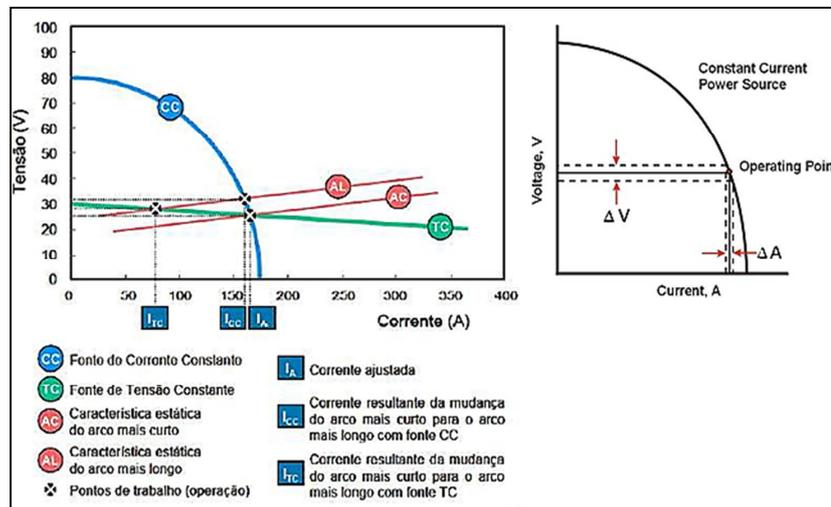


Figura 2.15: Efeito do comprimento de arco sobre a corrente de soldagem para fontes de corrente constante e tensão constante (Adaptado de REIS, R.; SCOTTI, A, 2007).

Usualmente equipamentos de soldagem chamados fontes inversoras ou eletrônicas de soldagem (figura 2.16), são as mais utilizadas atualmente neste processo devido ao controle eletrônico ser mais eficaz do que fontes eletromagnéticas (figura 2.17).



Figura 2.16: Fonte inversora ou eletrônica de soldagem utilizada no processo de soldagem TIG (Adaptado de Arcdynamics 2014).



Figura 2.17: Fonte retificadora de soldagem utilizada no processo de soldagem TIG (Adaptado de Arcdynamics 2014).

Na figura 2.18, temos uma representação completa de um equipamento completo de soldagem TIG, refrigerado à água.

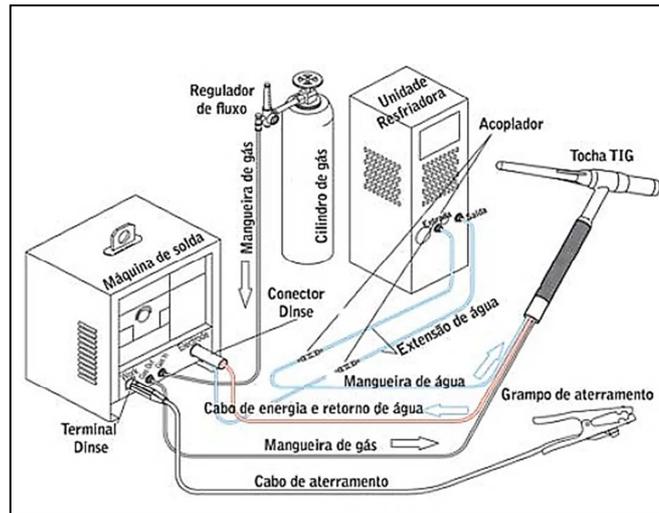


Figura 2.18: Representação dos equipamentos utilizados no processo de soldagem TIG, refrigerados à água (Adaptado de Arcodynamics 2015).

Já na figura 2.19, temos a representação dos equipamentos utilizados no processo de soldagem TIG refrigerados à gás.

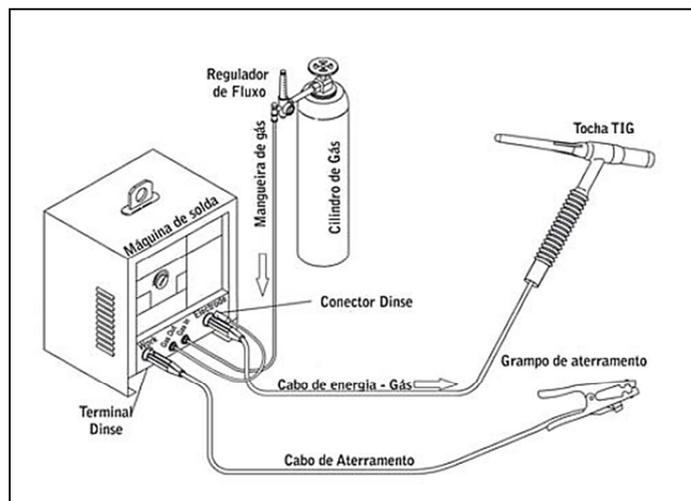


Figura 2.19: Representação dos equipamentos utilizados no processo de soldagem TIG, refrigerados à gás (Adaptado de Arcodynamics 2011).

2.1.7 Tochas utilizadas

Objetivando uniformidade no escoamento do gás utilizado no processo de soldagem TIG, utilizamos o gás lens (lente de gás), conforme figuras 2.20 e 2.21, onde em especial na figura 2.21 observamos o efeito no perfil de escoamento de gás, onde a coluna gasosa é uniforme.



Figura 2.20: Gás Lens (lente de gás) de diferentes diâmetros (Adaptado de Arcdynamics).

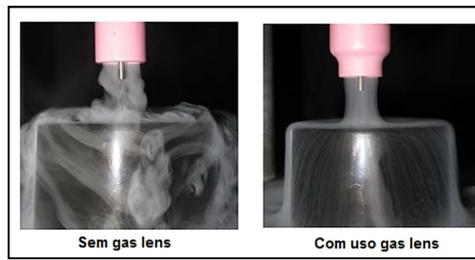


Figura 2.21: Perfil do fluxo de gás utilizado no processo de soldagem TIG sem o uso do gas lens à esquerda e com uso do gas lens, à direita (Adaptado de Pro Fabrication Techniques).

2.1.8 Modos de abertura do arco

No processo de soldagem TIG, o eletrodo fica exposto e temos 3 modos de abertura, são eles: Por alta-frequência (figura 2.22), por toque, (Lift Arc) mostrado na figura 2.23, por arranhão (Scratch) mostrado na figura 2.24.

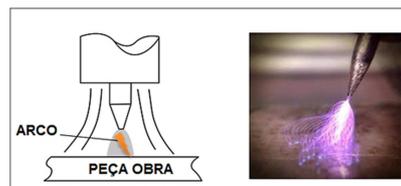


Figura 2.22: Modo de abertura de arco no processo TIG: alta-frequência (Adaptado de Arcdynamics 2015).

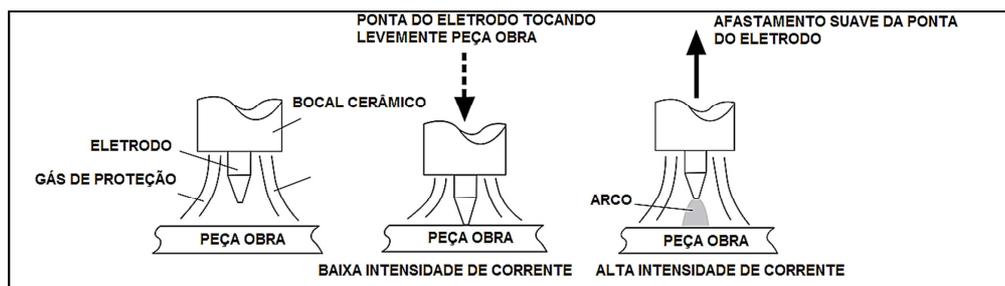


Figura 2.23: Modo de abertura de arco no processo de soldagem TIG por toque do tungstênio à peça obra (Lift), (Adaptado de Arcdynamics).

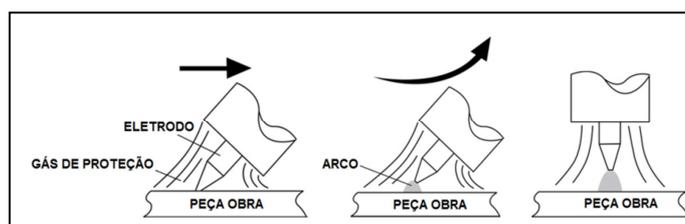


Figura 2.24: Modo de abertura de arco no processo de soldagem TIG por arranhão do tungstênio à peça obra (Scratch), (Adaptado de Arcdynamics).

Utilizamos o modo de abertura por alta-freqüência quando desejamos evitar o contato do eletrodo de tungstênio com a peça obra, é uma técnica empregada na soldagem de alumínio e suas ligas quando em função do uso da corrente alternada temos durante a inversão de polaridade a ação de limpeza no metal de solda rompendo os óxidos de alumínio (figura 2.25), porém, existe uma interrupção momentânea do arco (fontes convencionais com transformador eletromagnético), conforme figura 2.26 e também porque ao se tornar negativo, o eletrodo de tungstênio devido ao efeito termoiônico provê elétrons para a reignição do arco, imediatamente após ter passado pelo ponto de corrente zero.

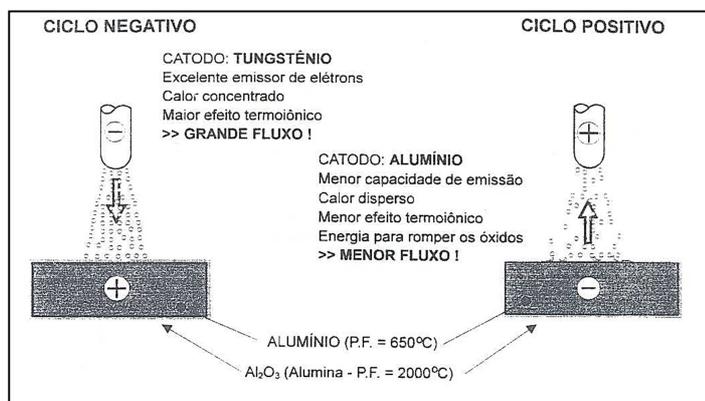


Figura 2.25: Ação de limpeza dos óxidos de alumínio em função da inversão de polaridade (Adaptado de Guimarães, A. S).

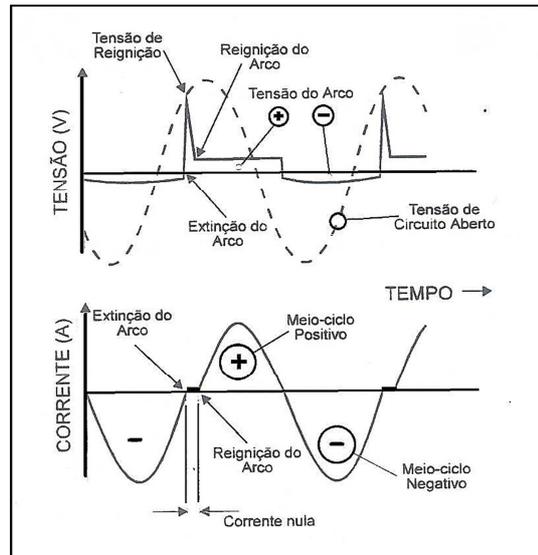


Figura 2.26: Forma de onda referente à tensão e corrente na soldagem TIG AC em equipamento convencional com transformador eletromagnético com interrupção momentânea do arco (fontes convencionais com transformador eletromagnético), (Adaptado de Adaptado de Guimarães, A. S).

Quando há inversão de corrente e o fluxo da mesma é oriundo do metal de base (mais difícil), pois a poça não poderá suprir elétrons até que um determinado nível de tensão seja atingido, o sistema “espera” até que a tensão no arco cresça de um valor tal que permita esta emissão.

Este problema na soldagem TIG AC é definido como retificação parcial, pode ser solucionado com uso de principalmente unidades de alta-frequência, com tensões da ordem de 3 a 5 kV e frequências de 350 kHz a 3 MHz, conforme figura 2.27.

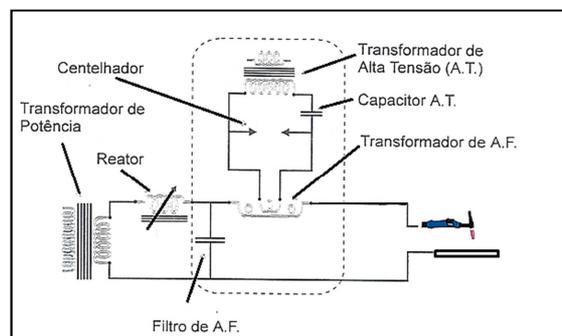


Figura 2.27: Esquema de máquina de solda com transformador convencional com unidade centelhadora (alta-frequência) (Adaptado de Welding Institute RWTH, Aachen University, Welding Technology Welding and Cutting Technologies).

Na figura 2.28 observamos o efeito da alta-frequência na região onde temos a corrente nula, a alta-frequência associada à alta tensão minimiza os efeitos da extinção inerente do arco.

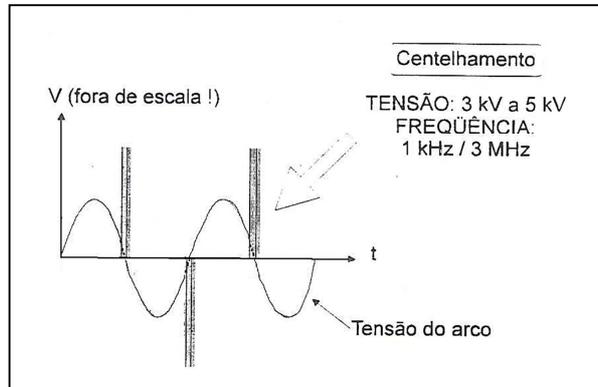


Figura 2.28: Efeito da alta-frequência sobre a região nula da corrente de solda.

Ainda sobre a aplicação da corrente alternada no processo TIG, temos em fontes inversoras ou eletrônicas de soldagem, o controle do tempo em que o eletrodo atua como anodo e catodo, esse recurso utilizado em onda quadrada (figura 2.29), não sendo senoidal como as oriundas de máquinas convencionais, é chamado de *Wave Balance*, ou seja, balanço de onda, onde a ação de limpeza e penetração é vista de maneira notória não apenas pela inversão do sentido da corrente de soldagem em onda quadrada, mas também, devido ao controle do tempo de permanência com base em percentuais específicos determinando o perfil geométrico do cordão de solda, conforme figura 2.30 mais especificamente.

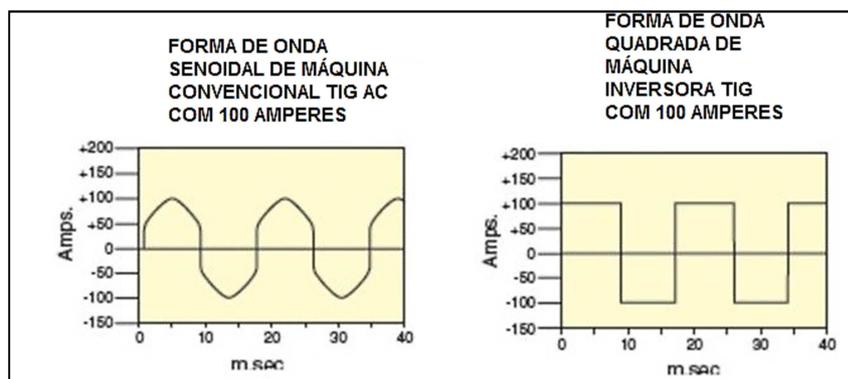


Figura 2.29: Diferença da forma de corrente de saída entre máquinas convencionais e inversoras de soldagem no processo TIG AC (Adaptado de Arcdynamics 2015).

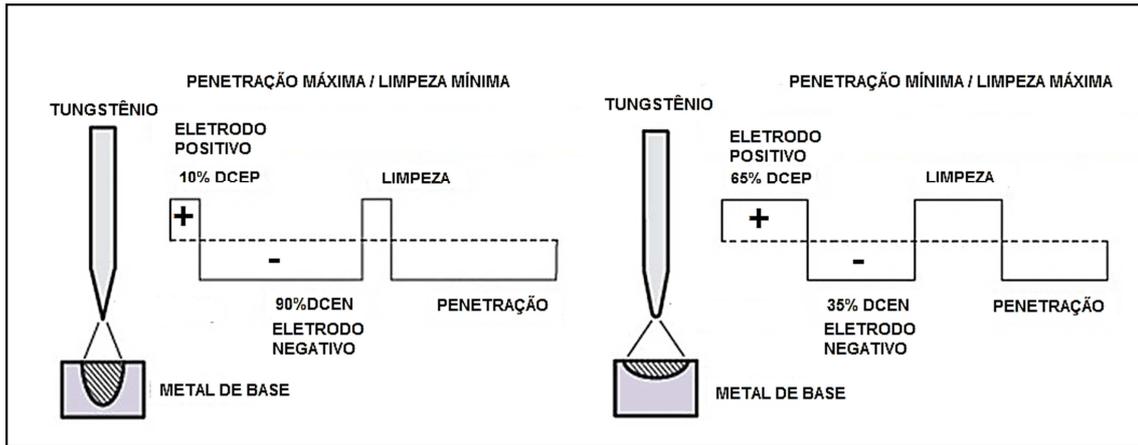


Figura 2.30: Característica do controle de balanço de onda no processo TIG AC
(Adaptado de Arcdynamics 2015).

2.2 Eletrodo de tungstênio

O tungstênio puro (W) é um elemento metálico de transição, ou seja, se distingue dos metais não pelas propriedades físicas, mas, sim pela estrutura eletrônica, os metais de transição têm seus elétrons de valência em mais de uma camada, o que lhes confere notável variabilidade de formação de óxidos, além de alto ponto de fusão (3410°C), que na presença de gases inertes ou redutores torna-se refratário.

Por outro lado se o meio for oxidante o W se deteriora facilmente em altas temperaturas. Esses eletrodos são varetas fornecidas em comprimento de 150-175 mm com diâmetros que variam de usualmente 0,5 mm – 10,0 mm de tungstênio puro ou com pequenas adições de óxidos de tório, zircônio, lantânio, cério ou ainda terras raras. As especificações destes eletrodos são definidas por normas como: ISO 6848, JIS Z 3233, ANSI/AWS A5.12 que identificam os eletrodos por códigos e através de tarjas coloridas em uma das extremidades, conforme figura 2.31.



Figura 2.31: Caixas de eletrodos de tungstênio (Adaptado de Carbografite).

A tabela 2.1 mostra a tabela com a especificação dos eletrodos de tungstênio segundo a norma ISO 6848, já na tabela 2.2 e 2.3 temos a especificação segundo a norma JIS Z 3233 e ANSI/AWS A5.12.

Designação	Composição (impurezas totais ≤ 0,1%)		Cor de identificação
	Aditivo óxido	Tungstênio	
WP		≥ 99,95 %	Verde
WT20	ThO ₂ : 1,7 - 2,2%	Balanço	Vermelho
WL15	LaO ₂ : 1,3 - 1,7%	Balanço	Dourado
WC20	CeO ₂ : 1,8 - 2,2%	Balanço	Cinza
WZ8	ZrO ₂ : 0,7 - 0,9%	Balanço	Branco
WL10	LaO ₂ : 0,9 - 1,2%	Balanço	Preto
WL20	LaO ₂ : 1,8 - 2,2%	Balanço	Azul claro
WT10	ThO ₂ : 0,8 - 1,2%	Balanço	Amarelo
WT30	ThO ₂ : 2,8 - 3,2%	Balanço	Violeta
WT40	ThO ₂ : 3,8 - 4,2%	Balanço	Alaranjado
WZ3	ZrO ₂ : 0,15 - 0,5%	Balanço	Marrom
WY20	YtO ₂ : 1,8 - 2,2%	Balanço	Azul

Tabela 2.1: Especificação de eletrodos de tungstênio segundo a norma ISO 6848
(Adaptado de REIS, R.; SCOTTI, A, 2007).

Designação	Composição (impurezas totais ≤ 0,1%)		Cor de identificação
	Aditivo óxido	Tungstênio	
YWP		≥ 99,95 %	Verde
YWTh-1	ThO ₂ : 0,8 - 1,2%	Balanço	Amarelo
YWTh-2	ThO ₂ : 1,7 - 2,2%	Balanço	Vermelho
YWL _a -1	La ₂ O ₃ : 0,9 - 1,2%	Balanço	Preto
YWL _a -2	La ₂ O ₃ : 1,8 - 2,2%	Balanço	Verde claro
YWC _e -2	Ce ₂ O ₃ : 1,8 - 2,2%	Balanço	Cinza

Tabela 2.2: Especificação de eletrodos de tungstênio segundo a norma JIS Z 3233.
(Adaptado de REIS, R.; SCOTTI, A, 2007).

Designação	Composição (impurezas totais $\leq 0,1\%$)		Cor de identificação
	Aditivo óxido	Tungstênio	
EWP		$\geq 99,95\%$	Verde
EWTh-2	ThO ₂ : 1,7 - 2,2%	Balanço	Vermelho
EWL _a -1.5	La ₂ O ₃ : 1,3 - 1,7%	Balanço	Dourado
EWL _a -1	La ₂ O ₃ : 0,8 - 1,2%	Balanço	Preto
EWZr-1	ZrO ₂ : 0,15 - 0,4%	Balanço	Marrom
EWCe-2	CeO ₂ : 1,8 - 2,2%	Balanço	Alaranjado
EWL _a -2	La ₂ O ₃ : 1,8 - 2,2%	Balanço	Azul
EWTh-1	ThO ₂ : 0,8 - 1,2%	Balanço	Amarelo

Tabela 2.3: Especificação de eletrodos de tungstênio segundo a norma ANSI/AWS A5.12 (Adaptado de REIS, R.; SCOTTI, A, 2007).

A adição dos elementos acima tem por objetivo aumentar a emissividade eletrônica, estabilidade do arco e durabilidade do eletrodo.

2.2.1 Variação da ponta do ângulo do eletrodo de Tungstênio

A influência da variação da ponta do eletrodo de tungstênio sobre o perfil geométrico do cordão de solda em função da menor constricção do arco é mostrada nas figuras 2.32 e 2.33.

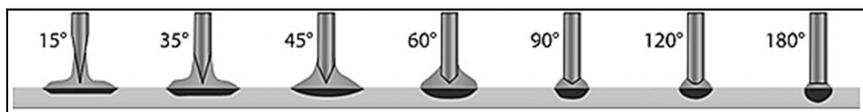


Figura 2.32: Efeito da variação do ângulo da ponta do eletrodo de tungstênio sobre o perfil do geométrico do cordão de solda (Adaptado de R-Techwelding Co).

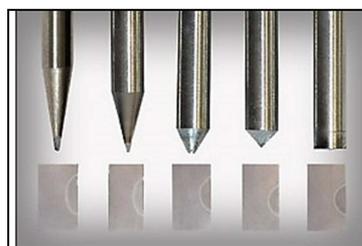


Figura 2.33: Efeito da variação do ângulo da ponta do eletrodo de tungstênio sobre o perfil do geométrico do cordão de solda (Adaptado de Profabrication Techniques).

Nas figuras acima, percebemos que um aumento do ângulo leva a uma diminuição no comprimento do arco, isso porque o arco busca um ponto de equilíbrio através da manutenção da área de emissão pela ponta do eletrodo, área esta compensada com a modificação de temperatura em função do volume da ponta, se o ângulo de ponta é aumentado, o arco tende a descer pela ponta para manter constante sua área de emissão, ou até aumentar um pouco, já que se espera uma ponta do eletrodo um pouco mais fria e vice-versa, conforme visto na figura 2.34.

Entretanto não está muito claro se um maior ângulo na ponta favorece a penetração, porque isso parece depender de vários fatores como: material, espessura da chapa, tipo e intensidade de corrente.

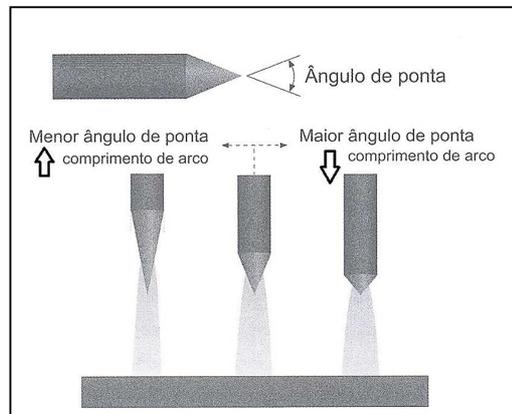


Figura 2.34: Modelo para explicar a variação do comprimento do arco em função do ângulo da ponta do eletrodo de tungstênio no processo TIG (Adaptado de REIS, R.; SCOTTI, A, 2007).

2.2.2 Afição do eletrodo de Tungstênio

Os afiadores devem permitir regulagem de posicionamento para deixar a ponta do eletrodo com ângulo desejado. Ainda com relação à afiação dos eletrodos é de suma importância que este procedimento independentemente da polaridade a ser utilizada na soldagem, seja feito na direção longitudinal, conforme figura 2.35 para evitar problemas na instabilidade do arco.

A afiação que deixa marcas circulares faz com que o arco fique pulando entre as posições de cada círculo conforme figura 2.36, alguns afiadores vêm com dispositivos

chamados de “pinças” que prendem o eletrodo de tungstênio durante a afiação facilitando o manuseio por parte do operador conforme figura 2.39.

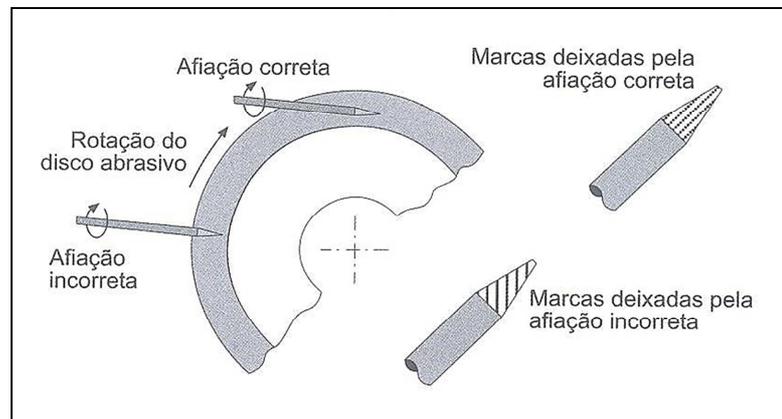


Figura 2.35: Ilustração da forma correta de afiar os eletrodos de tungstênio produzindo marcas longitudinais em contraste com a afiação incorreta que deixa marcas circulares (Adaptado de REIS, R.; SCOTTI, A, 2007).



Figura 2.36: Ilustração da forma incorreta e correta de se afiar o eletrodo de tungstênio e seu efeito sobre a estabilidade do arco (Adaptado de REIS, R.; SCOTTI, A, 2007).

Para efetuar a afiação dos eletrodos, são utilizados equipamentos especialmente desenhados para esta finalidade, os chamados afiadores de eletrodos, conforme a figuras 2.37.



Figura 2.37: Afiador de bancada de tungstênio sem extrator de pó, com pinça (Adaptado Carbografite).

2.2.3 Eletrodos de Tungstênio: Tecnologia atual

Nos Estados Unidos, um eletrodo de tungstênio com a seguinte composição: 98,34% de tungstênio, 1,3 -1,7 % de óxido de lantânio, 0,06-0,10% de óxido de zircônio, e 0,06-0,10% de óxido de ítrio apresentaram resultados extremamente positivos no quesito estabilidade de arco e tempo de duração em operação.

Abaixo temos a figura 2.38 mostrando o gráfico que relaciona o tempo de espera para abertura do arco com o número de aberturas do arco, comparando um eletrodo de tungstênio com 2% tório e o eletrodo desenvolvido pela empresa Astaras Welding Accessories, denominado E3.

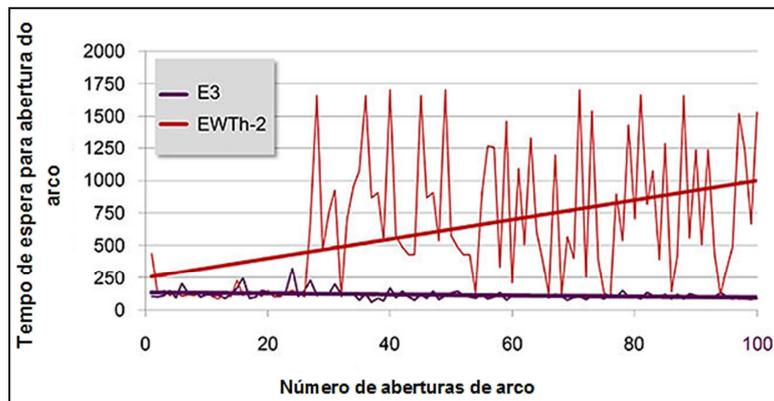


Figura 2.38: Gráfico relacionando o tempo de espera para abertura do arco com o número de aberturas do arco, comparando um eletrodo de tungstênio toriado 2% e o eletrodo desenvolvido pela empresa Astaras Welding Accessories, denominado E3 (Adaptado de E3 Tungsten, 2015).

A figura 2.39 mostra o efeito no ângulo da ponta dos eletrodos após 100 aberturas de arco mostradas, já na figura 2.40 a diferença na estabilidade da abertura do arco entre o eletrodo E3 e o eletrodo de tungstênio toriado 2%. Na figura 2.41 temos o gráfico que relaciona a densidade de corrente com a temperatura em Kelvin dos eletrodos de tungstênio com toriado 2%, zirconado 1% e tungstênio puro com o E3



Figura 2.39: Efeito no ângulo da ponta dos eletrodos de tungstênio E3 e o eletrodo de tungstênio com 2% de tório, depois de 100 aberturas de arco (Adaptado de E3 Tungsten, 2015).

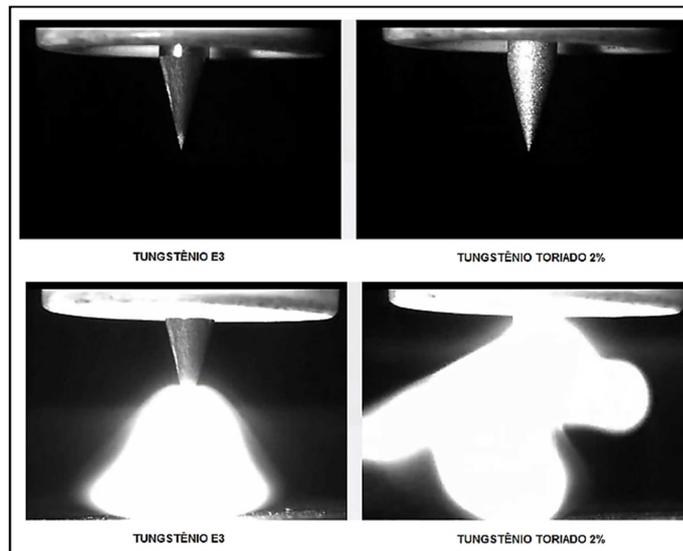


Figura 2.40: A diferença na estabilidade da abertura do arco entre o eletrodo E3 e o eletrodo de tungstênio toriado 2% (Adaptado de E3 Tungsten, 2015).

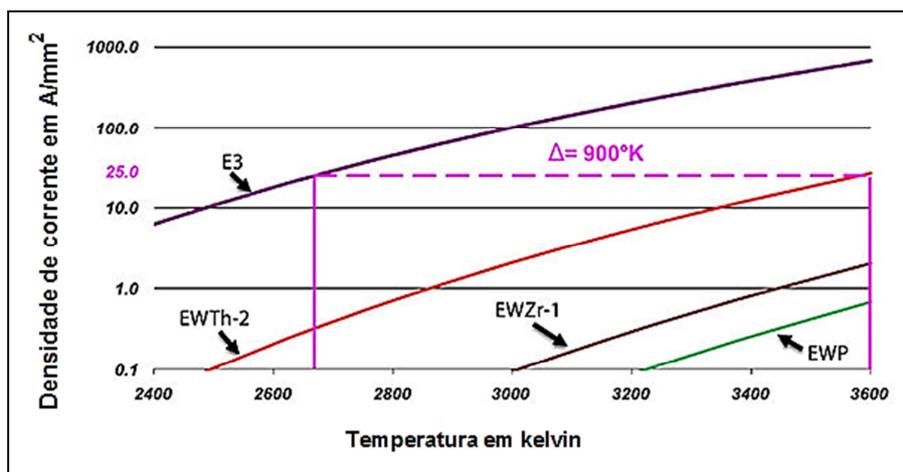


Figura 2.41: Comparativo da densidade de corrente x temperatura em Kelvin dos seguintes eletrodos de tungstênio: toriado 2%, zirconado 1%, puro e o E3 (Adaptado de E3 Tungsten, 2015).

2.3 Metais de adição

O processo de soldagem TIG é utilizado de forma autógena, ou seja, sem metal de adição, o uso deste recurso pode ser feito com a finalidade de melhorar a geometria do cordão (controle térmico da poça fundida e/ou preenchimento da junta), de introduzir elementos de liga (melhorar as propriedades mecânicas da junta) ou mesmo de reduzir o nível de porosidade no cordão de solda (adição de elementos desoxidantes).

Os metais de adição usados na soldagem plasma são os mesmos utilizados nos processos TIG e MIG/MAG, são fornecidos em forma de varetas ou bobinas conforme figura 2.42 e 2.43, sendo aplicados em processos manuais, semiautomáticos e automatizados.

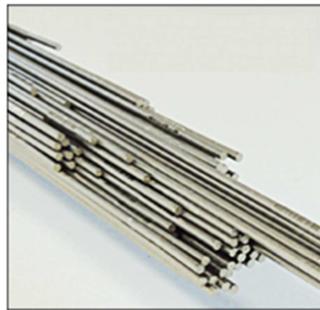


Figura 2.42: Varetas para soldagem TIG (Adaptado de Daiko Welding, 2015).



Figura 2.43: Bobinas para soldagem plasma (Adaptado de RioSoldas, 2016).

As especificações para metais de adição são definidas em normas como, por exemplo, na série ANSI publicada pela AWS, conforme tabela 2.44.

Código	Material
A 5.7	Cobre e suas ligas
A 5.9	Aços inoxidáveis
A 5.10	Alumínio e suas ligas
A 5.14	Níquel e suas ligas
A 5.16	Titânio e suas ligas
A 5.18	Aço-carbono
A 5.19	Magnésio e suas ligas
A 5.24	Zircônio e suas ligas
A 5.28	Aços de baixa liga

Tabela 2.44: Normas ANSI/ AWS para especificação de metais de adição (Adaptado de REIS, R.; SCOTTI, A, 2007).

2.4 Revestimento de superfície metálica pelo processo de soldagem GTAW Hot wire, ou TIG arame quente.

A soldagem de revestimento pode ser definida como a deposição de um metal de adição dissimilar na superfície de uma peça metálica para se obter propriedades que não são encontradas no material de base. De maneira geral, essas propriedades são diferentes das propriedades proporcionadas pelo metal de base. Essa soldagem visa geralmente um aumento na resistência à abrasão e/ou corrosão da peça soldada. (Relatório Técnico UFTPR, 2006).

As razões para se efetuar um revestimento de superfície por soldagem, podem ser classificadas de acordo com as características que serão proporcionadas pelo metal depositado e podem ser resumidas da seguinte maneira:

(A) Reconstrução do material de base para reparar a forma e ajustar as dimensões de uma peça;

(B) Amanteigamento de uma superfície de um metal de base com camadas de um material dissimilar, que servirá como camada de transição quando a junta subsequente for executada sobre a camada amanteigada.

(C) Revestimento do metal de base com a deposição de uma camada com composição química dissimilar, que proporcionará ao metal de base diferentes propriedades químicas, físicas e/ou metalúrgicas, tais como resistência à corrosão, propriedades magnéticas e elétricas.

Processos de soldagem a arco, tais como eletrodos revestidos (SMAW), MIG/MAG (GMAW), arco submerso (SAW), TIG (GTAW) são largamente utilizados para operações de revestimento por soldagem. Os processos de soldagem TIG e Plasma apresentam uma qualidade superior de revestimento se comparado aos demais processos citados, principalmente devido as suas características intrínsecas como alta estabilidade do arco, ausência de respingos e controle preciso das variáveis de soldagem e do gás de proteção.

Por exemplo, aplicação de revestimento através do processo de soldagem TIG, que é largamente usado em aplicações de reconstrução de precisão de peças de motores de aeronaves, onde a qualidade do metal de adição depositado é um item crítico. Sendo assim, os processos de soldagem TIG e Plasma podem produzir um excelente revestimento com uma grande variedade de ligas de materiais, porém as baixas taxas de deposição desses processos, se comparados com os processos MIG/MAG e de arco-submerso, limitam a aplicação desses processos na indústria.

Um meio de aumentar a taxa de deposição do processo TIG é a utilização da modalidade arame quente. Uma das principais características dessa técnica é que o metal de adição é aquecido perto do seu ponto de fusão e depositado diretamente na poça de fusão atrás do arco de soldagem formando a solda de revestimento. A outra característica dessa técnica é que o metal de adição é aquecido por efeito Joule através de uma fonte independente de corrente alternada. A fonte independente para o aquecimento do metal de adição com corrente alternada minimiza alguma interferência que possa existir com o arco de soldagem através do campo magnético gerado pelo fluxo de corrente no metal de adição.

O processo de soldagem TIG Automático Modalidade Arame Quente (GTAW HW) foi desenvolvido para conseguir elevar a taxa de deposição, alcançando-se valores comparáveis às taxas de deposição dos processos MIG e Arco Submerso. A Figura 2.45 ilustra esquematicamente este processo.

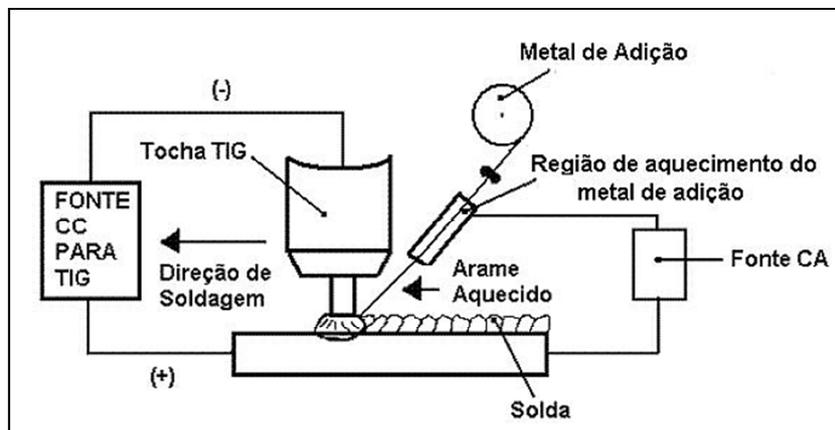


Figura 2.45: Esquema elétrico para o processo TIG modalidade Arame Aquecido (Adaptado de Estudo da influência dos parâmetros de soldagem de revestimento resistente à corrosão na diluição pelo processo TIG modalidade arame quente; Relatório Técnico UFTPR, 2006).

O sistema de arame quente é composto por um sistema de alimentação de arame que contém basicamente três componentes: um mecanismo de alimentação de arame, um controlador de velocidade e uma guia acoplada que introduz o arame diretamente na poça de fusão.

O arame é alimentado diretamente dentro da poça de fusão atrás do arco de soldagem em um ângulo de 40 a 60° com relação à tocha. O arame é aquecido por efeito Joule através de uma fonte de corrente alternada e voltagem constante. Os sistemas de alimentação de arame quente são usados para soldar aços inoxidáveis, aços carbono e baixa liga, ligas de cobre e ligas de níquel.

No processo de soldagem TIG arame quente a corrente pulsada envolve a variação de uma corrente de soldagem a partir de valores de uma corrente de base para uma corrente de pico ao longo do tempo.

As fontes de corrente pulsada permitem ajustes no tempo da corrente de pico e de base, além do ajuste nos níveis de corrente de pico e de base para permitir que uma onda de corrente apropriada para cada tipo de aplicação, conforme desejado.

Para soldagem TIG com corrente pulsada e utilização de metal de adição, obtém-se uma pulsação da poça de fusão, permitindo que a deposição de material seja uniforme e também que a poça de fusão seja menor, quando comparada com um processo TIG sem essa opção. A utilização desse tipo de corrente também tende a diminuir a zona termicamente afetada da solda realizada.

A Figura 2.46 apresenta uma representação esquemática de uma corrente pulsada. A figura mostra um gráfico de tempo por corrente. Pode-se observar que a corrente de pico indica os valores máximos de corrente enquanto que a corrente de base indica os valores mínimos. A figura também apresenta os tempos de corrente de pico e o tempo de um ciclo de pulso. É possível observar também que existe uma variação entre a corrente de base e de pico que se repete durante todo o processo.

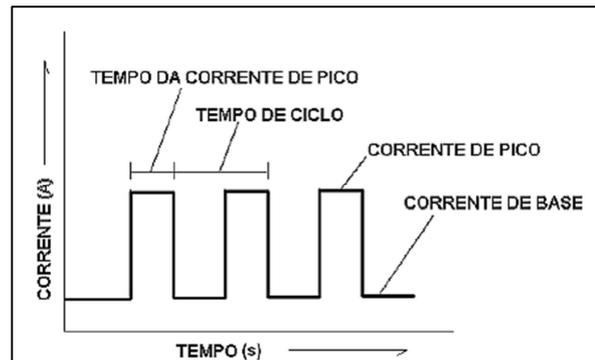


Figura 2.46: Representação esquemática da corrente pulsada utilizada na soldagem TIG arame quente (Adaptado de Estudo da influência dos parâmetros de soldagem de revestimento resistente à corrosão na diluição pelo processo TIG modalidade arame quente; Relatório Técnico UFTPR, 2006).

No caso do equipamento utilizado para soldagem de revestimento TIG arame quente a corrente de base é ajustada através do parâmetro denominado de background. O background é o valor da corrente de base representado em porcentagem com relação a corrente de pico, ou seja, por exemplo, com a utilização de uma corrente de pico na faixa de 250 A, a corrente de base com um background ajustado para 50% irá equivaler a 125A. Os tempos de pico e background são respectivamente os tempos em que a corrente permanece na corrente de pico e de base respectivamente, enquanto que os tempos de subida e descida são os tempos necessários para a corrente ir da corrente inicial para a corrente de pico enquanto que o tempo de descida é o tempo para corrente ir da corrente de pico para a corrente final. Nesse tipo de corrente, o valor da corrente de pico é de duas a dez vezes maior que a corrente de base. Essa combinação faz com que durante a soldagem um arco com características de alta corrente e baixos valores de aporte térmico seja alcançado.

A corrente de pico é responsável por proporcionar boa fusão e penetração, enquanto que a corrente de base é responsável por manter o arco e resfriar a poça de fusão do ponto de vista metalúrgico, a utilização da corrente pulsada proporciona uma estrutura mais fina e também maior agitação da poça de fusão durante a soldagem.

Com relação às soldagens de revestimentos, a utilização do processo de soldagem com corrente pulsada proporciona baixos valores de diluição. Outras vantagens são atribuídas a corrente pulsada, dentre elas podemos citar: a possibilidade de soldagem de materiais de pequena espessura e também uma menor distorção da peça devido ao menor aporte de calor fornecido a peça no processo de soldagem.

Por conseguinte, objetivando equalizar a taxa de deposição com a baixa diluição necessária ao processo de soldagem de revestimento por arame quente, utilizamos a corrente pulsada CC-, esse processo devidamente controlado se deve para evitarmos a corrosão.

O processo GTAW Hot Wire ou TIG arame quente tem ampla aplicação na fabricação destes equipamentos, as figuras 2.47, abaixo mostram as peças sendo revestidas e a figura 2.48 o equipamento utilizado para revestimento neste processo.



Figura 2.47: Peça sendo revestida pelo processo TIG hot wire, ou seja, TIG arame quente (Adaptado de Arcdynamics, 2016).



Figura 2.48: Equipamento Arc 05 PL, do fabricante Arc Specialties, utilizado para cladar, ou seja, revestir peças cilíndricas através do processo TIG arame quente (Adaptado de Arcdynamics Equipamentos de Corte Plasma e Solda, 2016).

2.5 Processo de soldagem plasma (PAW)

O termo plasma (quarto estado da matéria) designa um gás suficientemente aquecido a ponto de se tornar ionizado, conforme observado na figura 2.49, isto é, constituído de íons e elétrons livres, porém, em equilíbrio. Nesse estado, o gás deixa de ser isolante e passa a conduzir corrente elétrica. Quanto maior o grau de ionização (maior número de elétrons livres) do gás, maior a energia consumida para realizar o trabalho de ionização e maior será a temperatura do plasma (1000 30000K, dependendo do meio da corrente). (REIS, R.; SCOTTI, A, 2007).

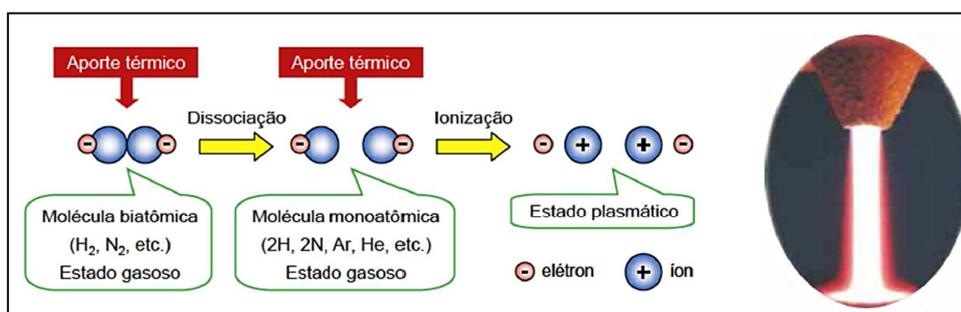


Figura 2.49: Esquema de transformação de um gás plasma (Adaptado de REIS, R.; SCOTTI, A, 2007).

Por isso, é comum encontrar na literatura a relação entre a temperatura e a capacidade de condução de corrente de um plasma, representada pela queda de sua resistividade elétrica. Como ilustra figura 2.50, quanto maior a temperatura, menor a resistividade elétrica do plasma (ou quanto mais energia absorvida, menor a resistividade elétrica). O plasma da soldagem a arco é, na verdade, formado também a partir de vapores metálicos e nem todo volume do arco é preenchido por íons e elétrons livres, existindo também átomos gasosos (não ionizados).

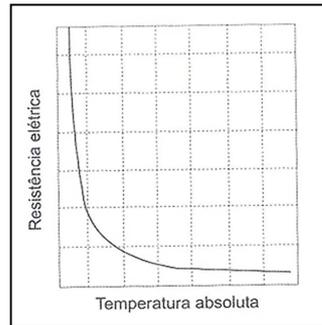


Figura 2.50: Representação esquemática do efeito típico da temperatura sobre a resistividade elétrica do plasma (Adaptado de REIS, R.; SCOTTI, A, 2007).

O processo de soldagem plasma, ou PAW conforme designação AWS utiliza justamente esta baixa resistividade para transferir uma alta intensidade de corrente (um arco elétrico) para as peças de trabalho, gerando calor e elevando a temperatura nas mesmas, possibilitando, assim, a fusão e, conseqüentemente, a coalescência de metais.

Além disso, esse processo impõe, através da geometria interna da tocha, uma constrição ao fluxo do plasma, aumentando muito a velocidade do mesmo (alta energia cinética) e concentrando o arco (energia térmica concentrada).

Este arco, que tem funções que vão além da térmica, como nos processos convencionais a arco, é normalmente denominado arco-plasma. A figura 2.51 mostra o aspecto típico do arco elétrico na soldagem plasma.

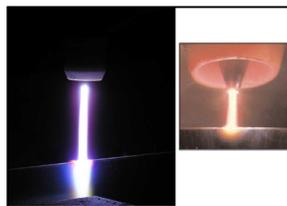


Figura 2.51: Aspecto típico de um arco (arco plasma) na soldagem a plasma (Adaptado de REIS, R.; SCOTTI, A, 2007 e Eutectic Castolin, 2015).

Assim, a Associação Americana de Soldagem (AWS, de American Welding Society), por exemplo, define o processo de soldagem plasma como:

O processo de soldagem a plasma é um processo de soldagem a arco que promove a coalescência de metais pelo aquecimento gerado a partir de um arco constrito, que pode ser aberto entre um eletrodo não consumível e a poça de fusão (arco transferido) ou entre o eletrodo e o bocal (bico) de constrição (arco não transferido). (REIS, R.; SCOTTI, A, 2007).

De uma maneira geral, pode-se dizer que a formação do cordão se deve se deve a dois efeitos, a saber: mecânico e efeito térmico, conforme figuras 2.52, 2.53 e 2.54 respectivamente.

Quanto ao efeito mecânico e sua influência na formação do cordão de solda, pode-se dizer que são atuantes dois mecanismos. O primeiro mecanismo é devido ao próprio jato de plasma impingindo sobre o metal líquido, que é a poça de fusão.

Os efeitos mecânicos são especialmente pronunciados em função da constricção do arco sendo de 6 a 10 vezes maior que a de um arco não constrito equivalente, neste caso referente à corrente de 100 amperes.

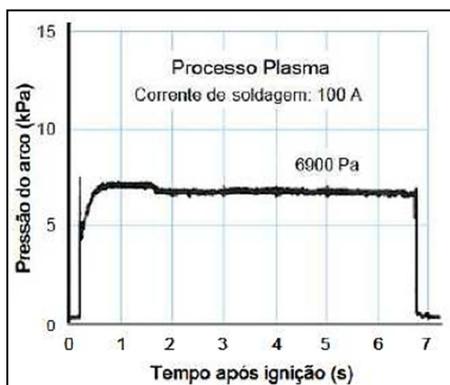


Figura 2.52: Gráfico relacionando pressão do arco (efeito mecânico) x tempo de ignição (Adaptado de REIS, R.; SCOTTI, A, 2007).

O impacto do jato faz com que o metal líquido seja empurrado para as margens da poça de fundida. Já o segundo mecanismo está relacionado à pressão exercida sobre a poça pela ação mecânica dos campos magnéticos criados pela corrente que é conduzida pelo arco. Assim, levando em conta esses dois mecanismos, pode-se esperar que maiores vazões de gás de plasma conduzam maior pressão (ação mecânica) sobre a

poça fundida. O efeito térmico se deve principalmente ao acoplamento o arco elétrico com o material da peça, que se dá através de uma região formada por manchas anódicas (pontos por onde os elétrons penetram no metal base).

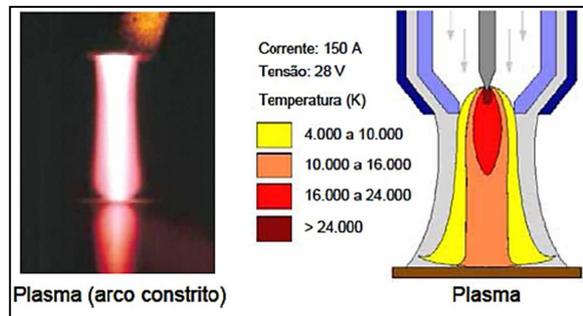


Figura 2.53: Ilustração do efeito térmico do processo de soldagem plasma (Adaptado de REIS, R.; SCOTTI, A, 2007).

Nestas manchas, que se movimentam seguindo o arco (levado pela tocha), devido à alta concentração localizada de corrente há uma grande queda de tensão e uma levada geração de calor. Este calor é transferido por condução para a peça, parte dele sendo usada efetivamente para fundir o metal de base e a parte restante sendo difundida para o material ao redor da zona fundida, mas sem concentração suficiente para elevar a temperatura da região a ponto de fundi-la.

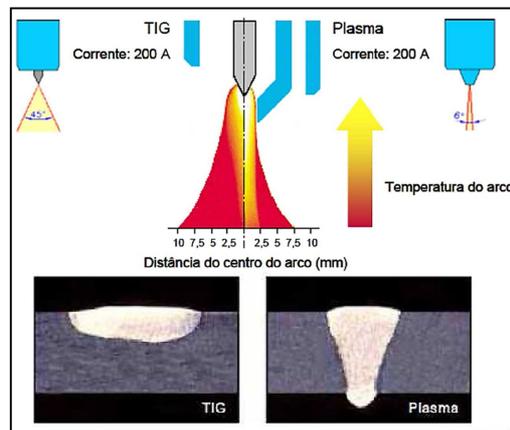


Figura 2.54: Ilustração do efeito térmico do processo de soldagem plasma oriundo da constrição do arco sobre a peça obra, resultando em maior volume fundido (Adaptado de REIS, R.; SCOTTI, A, 2007).

Quanto mais concentrado for o calor entregue à peça, ou seja, quanto menor for o diâmetro do arco no acoplamento com o metal de base, maior será a eficiência de

fusão que podemos conceituar como rendimento de fusão que é diferente de rendimento térmico, o rendimento térmico é a razão entre o calor transferido para o metal de base e a energia de soldagem, enquanto que o rendimento de fusão é a razão entre o calor efetivamente gasto na fusão e o calor transferido para o metal de base.

A figura 2.55 mostra, de maneira esquemática, a distribuição de temperatura que ocorre nos planos distintos dos arcos TIG e plasma, sendo que o espaçamento entre eles representa uma variação na distância tocha-peça (ou eletrodo-peça), o que leva a menores alterações na concentração do calor que ocorre por sobre a chapa.

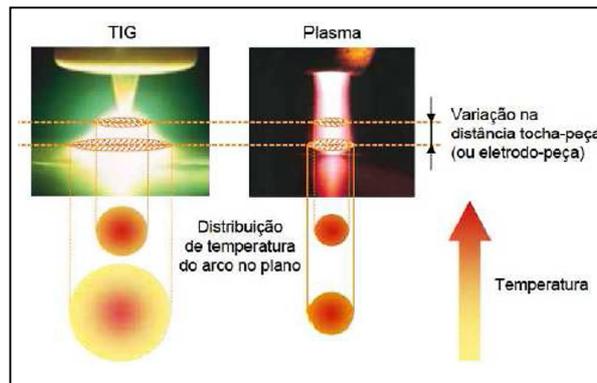


Figura 2.55: Esquema de distribuição de temperatura em planos de diferentes níveis dos arcos TIG e plasma (Adaptado de REIS, R.; SCOTTI, A, 2007).

Na figura 2.56 abaixo é mostrada a diferença do perfil de penetração entre um arco não constrito (TIG) e constrito (Plasma).

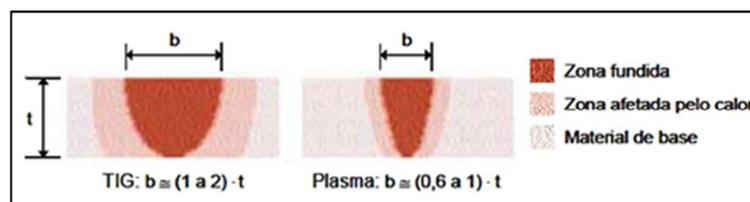


Figura 2.56: Diferença do perfil de penetração entre um arco não constrito (TIG) e constrito (plasma) (Adaptado de REIS, R.; SCOTTI, A, 2007).

2.5.1 Aspectos gerais do processo de soldagem plasma

Antes da transferência do arco para a peça obra temos o arco piloto que é a abertura de um arco de baixa intensidade de corrente entre o bocal constritor (bico) e

eletrodo de tungstênio, utilizando usualmente uma alta-frequência, esse arco piloto serve principalmente para atestar que os parâmetros e consumíveis foram dimensionados e ajustados corretamente, conforme figura 2.57.

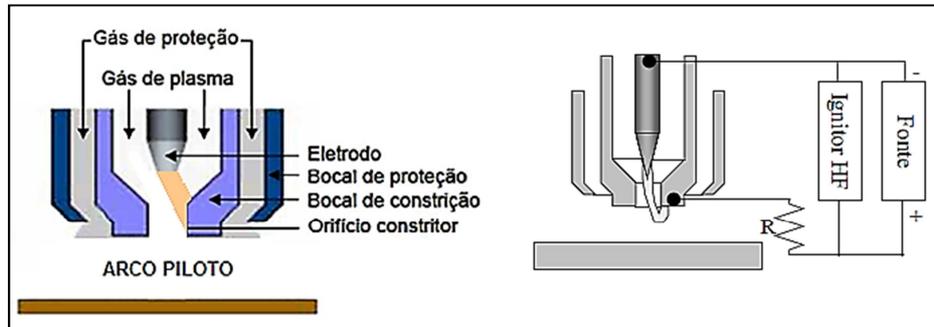


Figura 2.57: Abertura de arco piloto (Adaptado de Arcdynamics, 2014).

A figura 2.58 ilustra esquematicamente e de forma simplificada os detalhes de funcionamento do processo plasma. A formação do arco-plasma se dá da seguinte forma: um fluxo de gás (denominado gás de plasma, e normalmente, a baixas vazões, de 0,25 a 2,5 l/min) é direcionado continuamente para dentro da tocha, fluindo por uma cavidade na qual um eletrodo refratário inconsumível (normalmente de tungstênio) é concêntricamente posicionado.

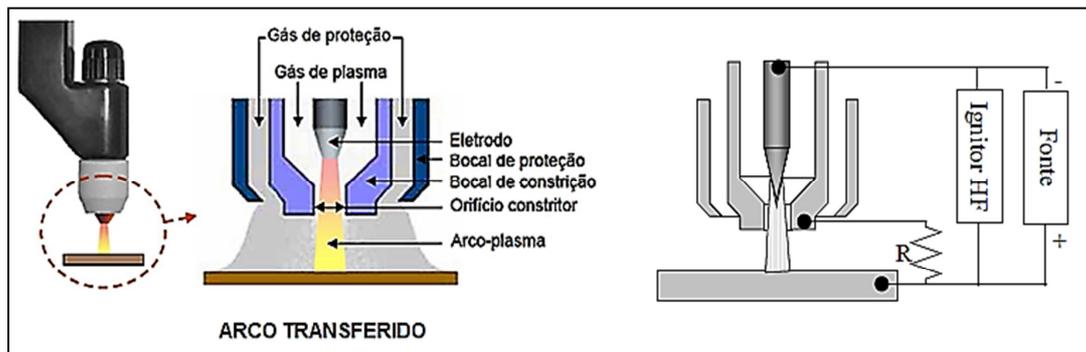


Figura 2.58: Uma tocha de soldagem a plasma (à esquerda), com detalhamento de seu funcionamento (à direita) (Adaptado de Arcdynamics, 2014).

Ao final desta cavidade existe um bocal com um furo de diâmetro menor do que o da cavidade, que constrixe a saída do gás. Ainda dentro da cavidade, o gás é aquecido pelo intenso calor gerado num arco previamente aberto (inicialmente entre o eletrodo e o bocal de constrição e, quando em regime, entre o eletrodo e a peça) e se ioniza, transformando-se em plasma. À medida que passa através do bocal (bico) de

construção, o arco-plasma é colimado de tal forma que o calor gerado fique concentrado em uma área relativamente pequena sobre a peça a soldar. Como o gás de plasma colimado é incapaz de fornecer adequada proteção à poça de fusão contra contaminação atmosférica, a proteção da solda contra o meio ambiente se dá, então, pelo fluxo de um outro gás (denominado gás de proteção) de forma concêntrica e externa ao jato de plasma. Vazões típicas para o gás de proteção situam-se na faixa de 10 a 30 l/min.

2.5.2 Equipamentos

O processo plasma, assim como o TIG, requer uma fonte com característica estática de sinal elétrico tipo corrente constante.

A figura 2.59 ilustra o esquema de um equipamento de soldagem com fonte de soldagem, módulo de controle, painéis de gás, cilindros e reguladores, tocha de soldagem.

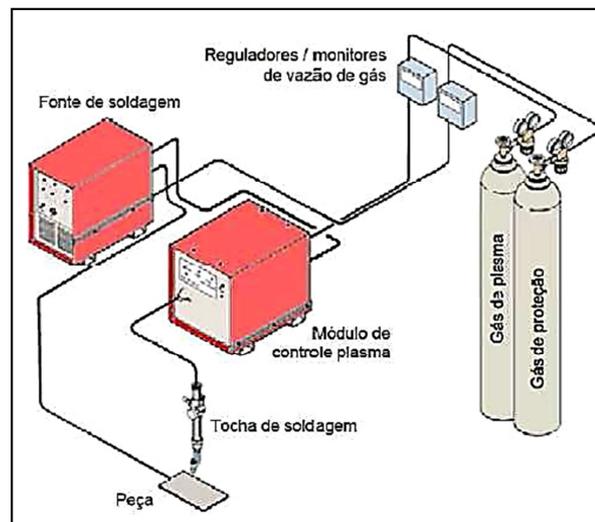


Figura 2.59: Sistema básico para soldagem plasma (Adaptado de REIS, R.; SCOTTI, A, 2007).

As tochas de soldagem são dispositivos que fazem a conexão entre a fonte à peça obra (figura 2.60), podendo ser manual ou mecanizada praticamente todo o processo de soldagem é em grande parte oriundo do desempenho da tocha, as tochas de soldagem plasma são usualmente refrigeradas à água, são fabricadas em alguns casos de

acordo com a faixa de corrente, na tocha de soldagem a parte mais complexa é a cabeça da tocha.



Figura 2.60: Tocha de soldagem plasma manual à esquerda e mecanizada à direita (Adaptado de Arcdynamics, 2014).

Já na figura 2.61 temos a apresentação dos componentes básicos de uma tocha de solda plasma.



Figura 2.61: Componentes básicos de uma tocha para soldagem plasma (Adaptado de Arcdynamics, 2014).

Indiferentemente à configuração, todas são refrigeradas à água. Esse tipo de refrigeração se faz necessário devido à alta intensidade de calor que é gerado dentro da tocha, se comparada aos que ocorrem nos demais processos de soldagem, e à baixa eficiência térmica do processo, que está entre 45 e 75%, ou seja, uma quantidade significativa de calor é absorvida pela tocha, para deixar mais claro, o termo eficiência do processo (η), ou rendimento térmico do processo, como também é conhecido, mede a relação entre a quantidade de calor absorvido pela peça obra (Q) e a energia fornecida pelo processo de soldagem ($E = UIt$, onde U e I são, respectivamente a tensão e corrente

de soldagem e t , o tempo de atuação da potência elétrica), ou seja, $nt = Q/E$, a parcela perdida vai para a tocha e meio ambiente.

Na soldagem plasma são necessários no mínimo dois fluxos de gás, sendo um deles o formador do arco plasma e o outro o gás de proteção, que evita a oxidação do cordão de solda e efetua a proteção do arco, em alguns casos um terceiro gás, o de purga pode ser usado na soldagem onde existe a penetração total de materiais reativos, também pode ser utilizado um gás de proteção adicional para proteger a parte posterior da poça, permitindo até um maior tempo de resfriamento do cordão.

Para fazer frente a esta demanda, é de fundamental importância uma base metrológica sólida, que permita a calibração dos instrumentos de medição utilizados no processo produtivo, dentre esses instrumentos de controle do gás citaremos os rotâmetros com escalas específicas e tipo turbina.

Para regular e monitor o fluxo de gás, normalmente são utilizados rotâmetros com escalas específicas para cada um dos gases, nos quais a regulagem se faz pela válvula de fluxo ao pé dos rotâmetros com monitoração visual, conforme figura 2.62 e 2.63.



Figura 2.62: Rotâmetros com escala graduada (Adaptado de Elan Equipamentos Industriais).



Figura 2.63: Rotâmetro à base de turbina (Adaptado de Labsolda UFSC, 1999).

Também podem ser empregados sistemas que não comprimam o gás como anemômetros de fio quente (de custo mais elevado) ou os chamados bolhímetros, que se baseiam na medição do tempo que uma bolha de sabão (ou detergente) ser arrastada por um determinado comprimento de um tubo de diâmetro interno conhecido, que dá passagem ao fluxo de gás, conforme figura 2.64.



Figura 2.64: Rotâmetro tipo bolhímetro (Adaptado de REIS, R.; SCOTTI, A, 2007).

2.5.3 Consumíveis

Assim como no processo TIG, na soldagem plasma é possível utilizar alimentadores de arame, em modo manual e sistemas automatizados.

Para o processo plasma, o que se requer de um eletrodo em termos de refratariedade, é a capacidade de manter a ponta afiada e de não se desgastar.

Apesar de não serem fundidos para fazer parte do cordão de solda, os eletrodos utilizados na soldagem a plasma sofrem desgaste.

Os eletrodos para soldagem plasma são os mesmos utilizados no processo TIG que foram descritos anteriormente bem como as varetas e bobinas.

A geometria da ponta do eletrodo de tungstênio é de extrema importância para o processo de soldagem plasma.

Uma forma de manter a ponta do eletrodo afiada durante a soldagem é por meio da seleção correta do tipo de eletrodo. A mistura de alguns óxidos, em quantidades pequenas com cerca de menos de 2% em volume facilita a emissão de elétrons por efeito termiônico, tanto que a temperatura de trabalho destes eletrodos dopados para uma dada corrente é menor se comparada à temperatura alcançada por eletrodos de tungstênio puro evitando assim que ocorra a deterioração da ponta do eletrodo.

No caso de soldagens em polaridade direta aplicadas em aço carbono e inox, os eletrodos topados com óxido de tório, lantânio ou cério são recomendados justamente pela capacidade de manter a ponta afiada e em ângulo. Além disso, a adição desses

componentes facilita a abertura do arco e confere maior estabilidade à soldagem. A tória é o de menor valor financeiro entre os três, mas, por se tratar de um material radioativo (a aspiração do pó durante a afiação é nociva à saúde), tem crescido o estímulo à substituição pelos lantanados ou cerinados.

Para aplicação em corrente alternada se recomenda eletrodos ligados com óxido de zircônio, componente que por facilitar a emissão termiônica, reduz a temperatura de trabalho do eletrodo, mas, sem conseguir evitar a fusão da ponta.

Quanto ao formato de extremidade da ponta do eletrodo, depende da polaridade a ser utilizada. Os eletrodos devem ser afiados com pontas cônicas em ângulos de 20° - 60° nas soldagens com corrente contínua, sendo essencial que tenham a forma rigorosamente concêntrica, para assim serem posicionados concentricamente no bocal de constrição, evitando assim o desgaste prematuro do eletrodo e problemas na formação de arco duplo, que é quando o isoladamente térmico e elétrico oriundo da camada de gás relativamente fria que não conduz eletricidade e situada entre a coluna do arco plasma e a parte interna do bocal de constrição (bico) é rompido, sendo causado por corrente excessiva, vazão insuficiente de gás plasma, contato acidental do bocal de constrição (bico) com a peça obra, conforme figuras 2.65 e 2.66.

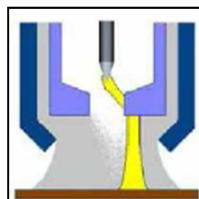


Figura 2.65: Esquema de formação de arco duplo (Adaptado de REIS, R.; SCOTTI, A, 2007).



Figura 2.66: Bocal (bico) de constrição à esquerda e após a formação de arco-duplo, à direita (Adaptado de REIS, R.; SCOTTI, A, 2007).

Os bocais de constrição são fabricados em cobre e suas ligas, para suportar o alto calor, além de contar com um isolamento térmico promovido pela camada de gás não ionizada em contato com a parede interna sendo refrigerados à água.

Os bocais de constrição podem ser com um único orifício conforme figura 2.67 ou com orifícios auxiliares conforme figura 2.68, os mais usados são aqueles com um único orifício por onde passa o arco e todo o gás de plasma, já os chamados multiorifícios são projetados para melhorar o controle da geometria do arco em altas correntes e fazem com que o arco apresente uma forma oval pelo resfriamento do plasma, mantendo assim um cordão mais estrito quando se solda com altas correntes, os orifícios devem ser orientados transversalmente a linha de soldagem.

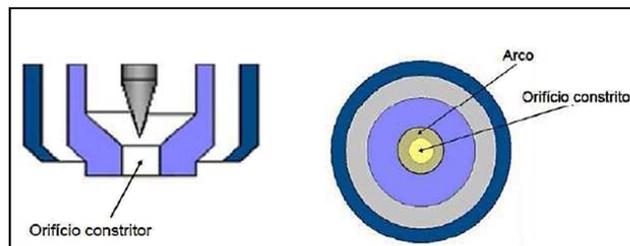


Figura 2.67: Bocal (bico) de constrição com orifício único (Adaptado de REIS, R.; SCOTTI, A, 2007).

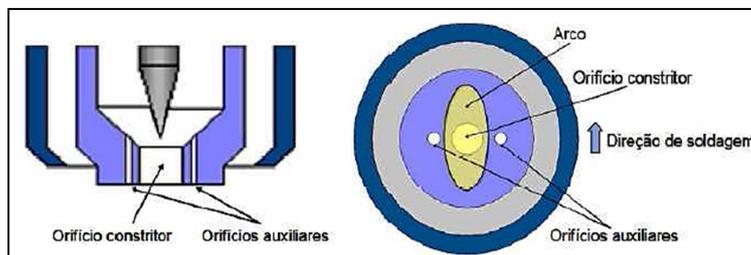


Figura 2.68: Bocal (bico) de constrição (bico) com orifícios auxiliares (Adaptado de REIS, R.; SCOTTI, A, 2007).

Os gases são de grande relevância para o processo, representam apenas de 2-3% do custo total de fabricação em soldagem, demonstrando que o custo não deve ser o fator preponderante em se tratando da escolha destes consumíveis.

Além dos gases plasma e de proteção, pode ainda ser utilizado o gás de purga e de proteção adicional, para materiais mais reativos, como aços inoxidáveis e alumínio e suas ligas, conforme ilustrado na figura 2.69.

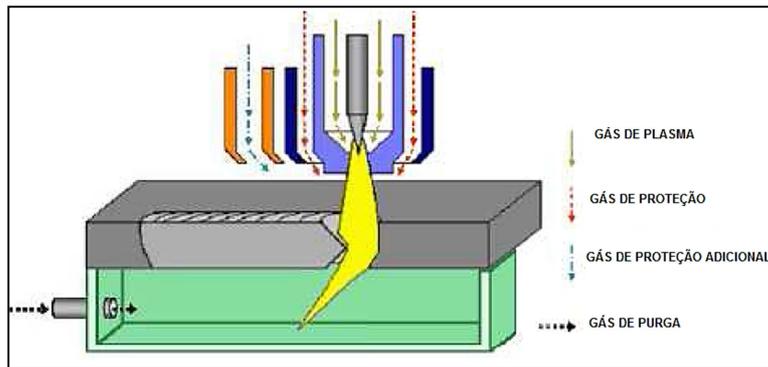


Figura 2.69: Vista em corte mostrando os gases utilizados na soldagem plasma
(Adaptado de REIS, R.; SCOTTI, A, 2007).

A seleção dos gases de plasma e proteção é feita em função do tipo de material a ser soldado.

As propriedades dos gases que podem ter influência no desempenho da soldagem a plasma são: a capacidade de transferência de calor em altas temperaturas e a reatividade desses gases.

A figura tabela 2.5 lista os principais gases utilizados nos processos de soldagem em geral e algumas de suas propriedades. Vale ressaltar que tais propriedades são muito dependentes da temperatura e pressão, e podem assumir no arco valores relativos bastante diferentes dos valores apresentados.

Gás	Peso molecular	D (kg/m ³)	PD (eV)	PI (eV)	CT (mW/m.K)	Cv (kJ/kg°C)	Reatividade
Ar	39,9	1,78	-	15,8	16,4	0,31	Inerte
H ₂	2,1	0,07	4,5	13,5	168,3	10,17	Redutor
He	4	0,18	-	24,6	142,6	3,11	Inerte
N ₂	28	1,16	9,7	14,5	24	0,74	Levemente redutor
O ₂	32	1,33	5,1	13,2	24,2	0,65	Oxidante
CO ₂	44	1,98	4,3	14,4	14,7	0,66	Levemente oxidante

D: densidade do gás a 0°C e 1 atm (densidade do ar atmosférico \cong 1,2);
 PD: potencial de dissociação; PI: potencial de ionização; Cv: capacidade específica de calor a volume constante a 21,1°C e 1 atm; CT: condutividade térmica a 0°C e 1 atm.

Tabela 2.5: Propriedade dos gases para soldagem (Adaptado de REIS, R.; SCOTTI, A, 2007).

Já na figura 2.70 temos como a condutividade térmica destes gases varia em função da temperatura (Adaptado de REIS, R.; SCOTTI, A, 2007).

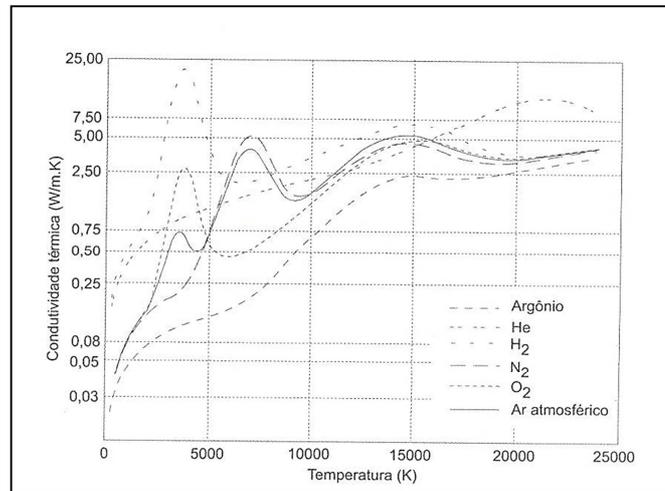


Figura 2.70: Variação da condutividade térmica dos gases utilizados em soldagem em função da temperatura (Adaptado de REIS, R.; SCOTTI, A, 2007).

O argônio é sem dúvida o gás mais utilizado na soldagem plasma, sendo usado tanto como gás primário (gás plasma) como secundário (gás de proteção), sendo os demais utilizados em mistura com o próprio argônio, em função de usarmos um eletrodo de tungstênio o gás deve ser inerte ou redutor.

Quanto ao gás de proteção, mesmo que raramente, é possível encontrar aplicações da soldagem a plasma em que são utilizados gases oxidantes que são as misturas com O₂ e /ou CO₂ ou CO₂ puro. Entretanto, é preciso cautela na seleção dos gases de proteção, pois, mesmo não tendo a função de formadores de plasma, eles afetam a formação da coluna de plasma após a passagem desta pelo bocal constrito r(bico), ainda que em menor escala do que o gás de plasma. Os gases de purga e de proteção adicional, pelo contrário, não afetam o arco e são selecionados em função de custos e da reatividade com o metal de base.

Os gases podem ser fornecidos em cilindros conforme figura 2.71, alguns com capacidade de 12m³ e já com composição definida, também podem se fornecidos em tanques e utilizando misturadores, conforme figura 2.72.



Figura 2.71: Cilindros de Argônio (Adaptado de REIS, R.; SCOTTI, A, 2007).

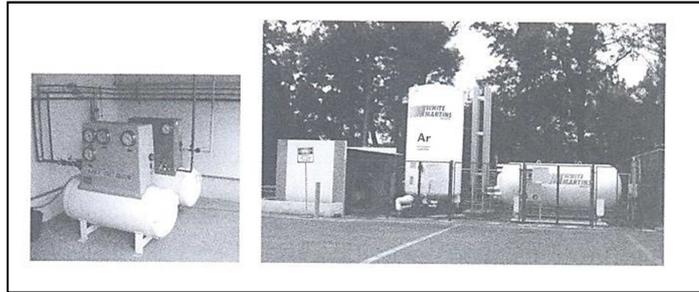


Figura 2.72: Misturador à esquerda e tanque à direita (Adaptado de REIS, R.; SCOTTI, A, 2007).

2.5.4 Gás de plasma

O gás de plasma é o gás responsável pela formação do arco-plasma, durante a soldagem, a cavidade da tocha na qual se encontra o eletrodo de tungstênio é continuamente alimentada com este gás, com baixa vazão de 0,25-2,5 l/min, não se recomenda extrapolar essa faixa porque com vazões acima do limite inferior podemos ter a formação de arco duplo e já acima, perturbações na poça de fusão.

Os gases mais utilizados são o argônio e misturas de argônio com hidrogênio e hélio, sendo o argônio preferido como gás de plasma graças ao seu baixo potencial de ionização, que garante um arco piloto confiável e uma abertura de arco mais segura, além disso, o argônio pode contribuir mecanicamente para a penetração devido à sua maior densidade em relação aos outros gases por isso gases menos densos devem ter sua vazão aumentada apesar de serem melhores condutores de calor.

As principais razões para adição de hidrogênio em especial no gás de proteção são a formação de uma atmosfera redutora, capaz de produzir um cordão de solda de aspecto limpo e maior foco do arco concentrando desta forma o plasma.

O hidrogênio possui maior condutividade térmica do que o argônio, reduzindo ainda mais o diâmetro da coluna de plasma, aumentando a densidade de corrente e a transferência de calor para a peça, por conseguinte, adições de hidrogênio ao argônio produzem um arco mais quente e mais eficiente em se tratando de transferência de calor para a peça, desta forma imprimindo maiores velocidades de soldagem, para uma determinada corrente, ou alcançando maior penetração conforme figura 2.73.

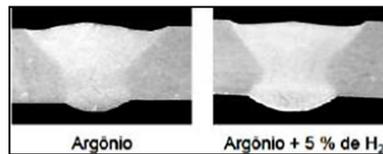


Figura 2.73: Influência do gás plasma sobre a geometria dos cordões (Adaptado de REIS, R.; SCOTTI, A, 2007).

A adição de hidrogênio ao argônio para aplicações na soldagem a plasma é limitada em até 15%, sendo que os gases comerciais geralmente contêm, no máximo, 10% deste elemento por uma questão de segurança. Maiores teores de hidrogênio tornam o processo de mistura perigoso, devido ao caráter combustível deste gás. Para casos nos quais o uso do hidrogênio seja contra indicado, o hélio pode ser utilizado devido ao efeito semelhante ao do hidrogênio não sendo usados em teores maiores que 10%. A figura 2.74 ilustra o comportamento da tensão em função do gás de plasma utilizado, a tensão de arco aumenta com adição de hidrogênio, principalmente devido ao consumo de energia necessário para atingir o estado de plasma e devido a maior condutividade térmica deste gás, porque quanto maior a perda de calor no arco, maior a tensão.

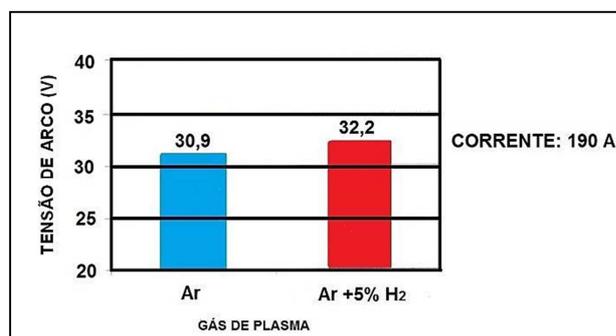


Figura 2.74: Efeito do gás de plasma sobre a tensão do arco (Adaptado de REIS, R.; SCOTTI, A, 2007).

2.5.5 Gás de proteção

O gás de proteção evita a contaminação do arco sobre a peça, formando uma barreira entre o conjunto arco poça de fusão e o ambiente.

Esse segundo fluxo de gás se faz necessário devido à baixa vazão de gás de plasma e as características operacionais, de turbulência, devido às altas velocidades do fluxo de plasma e geométricas, arco bem concentrado, não cobrindo toda a região da poça, próprias do arco no processo plasma.

Como o gás de proteção não entra em contato com o eletrodo, em algumas aplicações gases ativos podem ser usados para melhorar a molhabilidade da poça de fusão, sendo estes com adições de O₂ e CO₂, porém, atentamos ao fato de que devido ao acabamento superficial destes últimos serem inferiores ao acabamento superficial do hidrogênio, que é um gás redutor, os gases oxidantes são pouco usados, a figura 2.75 ilustra esta situação.

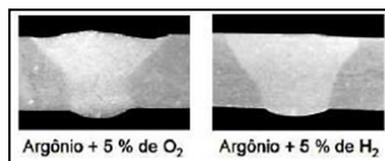


Figura 2.75: Influência do gás de proteção sobre a superfície dos cordões (Adaptado de REIS, R.; SCOTTI, A, 2007).

Apesar do potencial de dissociação do oxigênio ser um pouco maior do que o hidrogênio, o que poderia levar a um maior efeito de constrição e a uma maior tensão de arco, o hidrogênio apresenta uma condutividade térmica bem maior do que a do oxigênio, acentuando um pouco mais o efeito de constrição do arco e gerando, assim, uma tensão um pouco maior conforme figura 2.76.

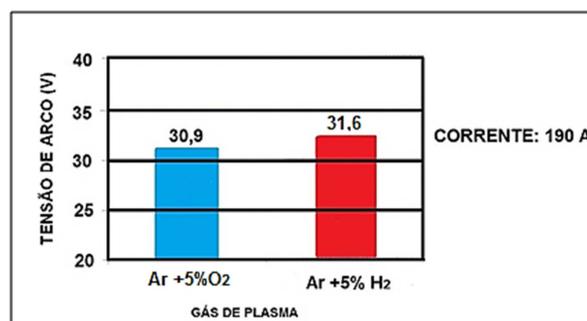


Figura 2.76: Efeito do gás de proteção sobre a tensão do arco (Adaptado de REIS, R.; SCOTTI, A, 2007).

2.5.6 Gás de purga e proteção adicional

Em situações nas quais a soldagem é efetuada com penetração total na junta ou mesmo nos casos de penetração profunda, é necessário proteger a raiz do cordão de solda contra a oxidação, principalmente em materiais reativos, como ligas de alumínio e aços inoxidáveis, para tanto o gás deve expulsar (deslocar) o oxigênio proveniente do ar atmosférico da região da raiz, dando lugar a um gás não oxidante ou mesmo redutor.

A maioria dos gases de purga consiste de nitrogênio com adições de hidrogênio ou de argônio com adições de hidrogênio, entretanto, a princípio qualquer gás utilizado em soldagem pode exercer a função de gás de purga, desde que o grau de afinidade com o material de base seja levado em consideração.

A figura 2.77 mostra aspecto da raiz com gás de purga e sem gás de purga, sendo esta uma soldagem com penetração total em aço inoxidável.

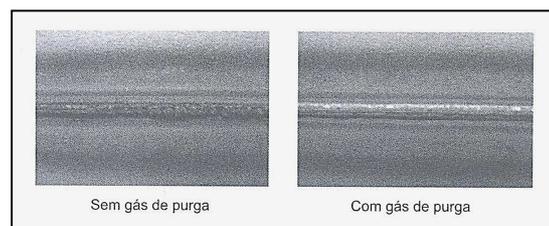


Figura 2.77: Aspecto da raiz de solda sem gás de purga e com gás de purga (Adaptado de REIS, R.; SCOTTI, A, 2007).

Para a eficiência do gás de purga devemos selecioná-lo adequadamente levando em consideração a densidade em função da posição do sistema de purga, por exemplo, se for feito de baixo para cima, devemos usar gases de baixa densidade, se for de cima para baixo, de alta densidade conforme gráfico apresentado na figura 2.78.

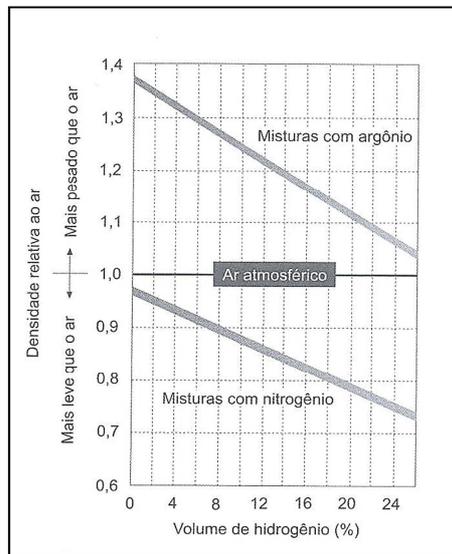


Figura 2.78: Densidade relativa ao ar atmosférico de misturas de Ar com H₂ e de N₂ com H₂ (Adaptado de REIS, R.; SCOTTI, A, 2007).

Além dos gases de purga, em algumas aplicações sobre tudo onde altas velocidades de soldagem estão envolvidas, utilizamos gás de proteção adicional para que o cordão de solda ainda excessivamente quente não fique exposto ao ar atmosférico, sua influência é mostrada na figura 2.79.

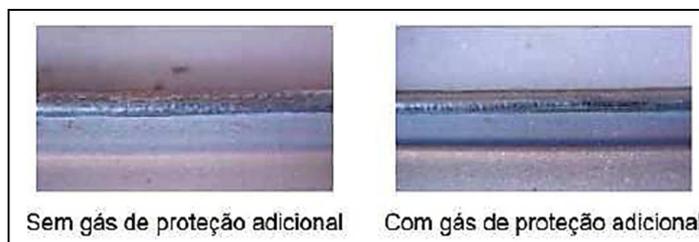


Figura 2.79: Influência da proteção gasosa adicional na soldagem a plasma de aço carbono, juntas em aresta (Adaptado de REIS, R.; SCOTTI, A, 2007).

2.5.7 Polaridade e tipos de corrente

Inicialmente se deve destacar que em soldagem a arco, como é caso do processo Plasma, a condução de corrente é feita predominantemente por elétrons, podendo desta forma desprezar a condução efetuada por íons.

Definindo tipo de corrente como o comportamento do sinal elétrico com o tempo, a soldagem plasma pode ser feita utilizando três tipos de corrente, como ilustrado na figura 2.80.

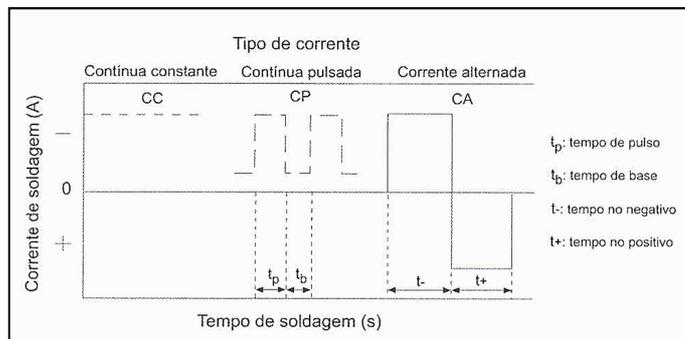


Figura 2.80: Esquema do comportamento dinâmico dos sinais que caracterizam os tipos de corrente utilizados na soldagem a plasma (Adaptado de REIS, R.; SCOTTI, A, 2007).

O tipo de corrente preferido para soldagem plasma é a corrente constante contínua (CC -) e com eletrodo conectado no polo negativo, situação chamada de polaridade direta, embora tenhamos corrente contínua constante com eletrodo no polo positivo (CC+), CA (corrente alternada) sendo mostrada com os demais tipos na figura 2.81, com inversão de polaridade ao longo do tempo, sendo esta última utilizada em soldagem de alumínio e suas ligas, bem como respectivo perfil de penetração. Na polaridade CC-, a emissão de elétrons necessária à existência do arco se dá no eletrodo, o fluxo de elétrons é no sentido do metal de base por um fenômeno denominado emissão termoiônica, ocorrendo em altas temperaturas emitindo espontaneamente elétrons; Tal fenômeno demanda pouca energia (baixa tensão para uma dada corrente) e conseqüentemente, aquece pouco o eletrodo. Esse tipo de corrente e polaridade se aplica para a soldagem de aços-carbono, de baixa liga e inoxidáveis.

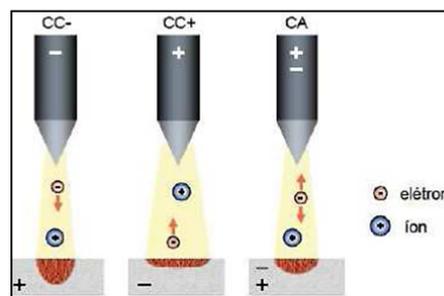


Figura 2.81: Polaridades direta (CC-), reversa (CC+), e alternada (CA) com seus respectivos perfis de penetração (Adaptado de REIS, R.; SCOTTI, A, 2007).

Existem algumas considerações a serem feitas em relação à polaridade sendo reversa e alternada, a primeira seria uma solução definitiva para a soldagem de materiais formadores de óxidos de alta fusão, mas, existem alguns problemas intrínsecos que a impedem de ser.

O primeiro problema existente no uso da polaridade reversa é o calor gerado na conexão arco-eletrodo. Quando o eletrodo é o receptor de elétrons gera-se mais calor na ponta do eletrodo do que quando o eletrodo é emissor (polaridade direta).

O segundo problema se refere ao fato da emissão de elétrons ser instável devido ao arco ter uma região de acoplamento com a peça menos concentrada, como consequência a penetração é menor para uma mesma intensidade de corrente.

E por fim o terceiro problema está vinculado à chamada autofagia invertida do arco em polaridade reversa, devido ao fato de que a emissão por campo é mais instável do que a emissão termiônica, para acontecer a emissão por campo (que é a emissão onde se demanda mais energia onde para uma mesma corrente sendo a tensão de arco maior na polaridade reversa) é preciso haver óxidos livres na superfície, mas, esse óxido inexistente devido ao efeito de limpeza catódica, desta forma o arco fica sempre procurando óxidos “frescos”, se tornando mais disperso e instável. Devido a essas características, a soldagem em polaridade reversa não é recomendada para soldas de qualidade.

Diante disso, a solução prática é a soldagem em corrente alternada, onde o tempo de reversão da polaridade é controlado por uma fonte eletrônica, tal controle é extremamente rápido mantendo a polaridade reversa em um valor de tempo em milissegundos bem menor do que o tempo da polaridade direta, uma vez que a polaridade reversa tem a função de limpeza, estabelecendo um patamar intermediário de penetração.

2.5.8 Modos operacionais

A soldagem plasma pode ser utilizada em três modos ou técnicas de operação: Microplasma, Melt-in e Keyhole, conforme a figura 2.82 ilustra.

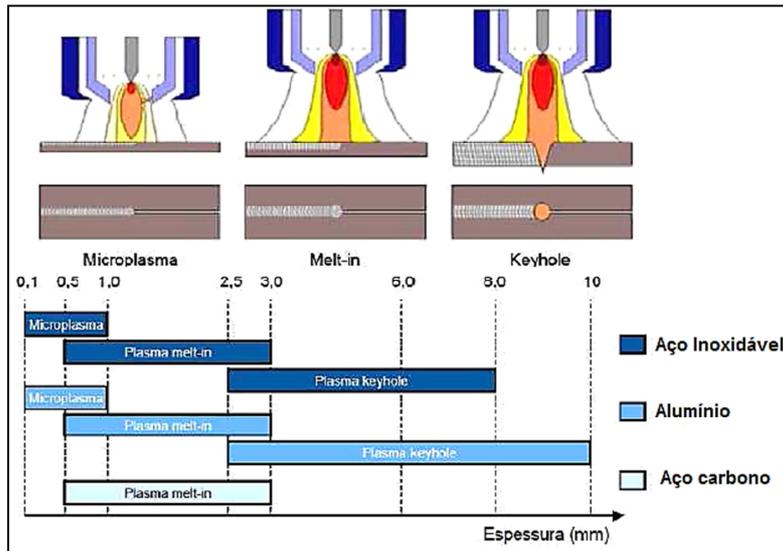


Figura 2.82: Faixas típicas de aplicação dos modos operacionais da soldagem a plasma em função do material e da espessura de chapa (Adaptado de REIS, R.; SCOTTI, A, 2007).

Na figura 2.83 temos a relação da vazão de gás plasma com diâmetro do orifício do bocal de constrição (bico) com a corrente de soldagem utilizada.

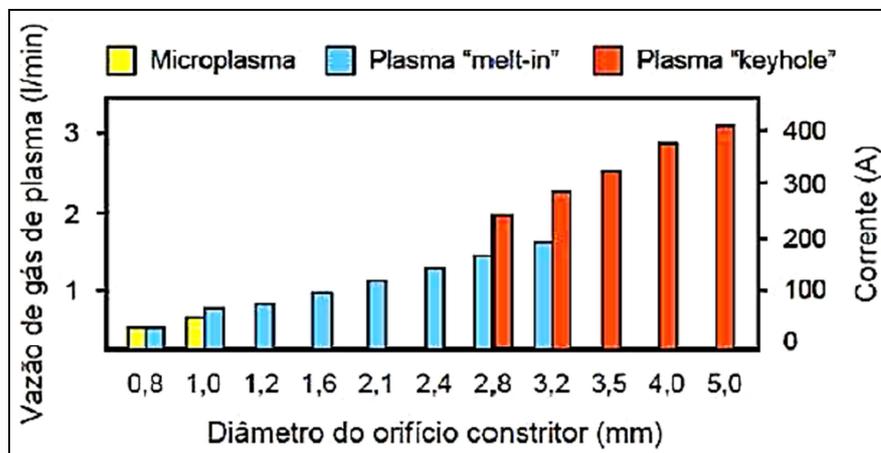


Figura 2.83: Relação entre vazão de gás plasma com orifício do bocal de constrição (bico) e corrente de soldagem plasma (Adaptado de REIS, R.; SCOTTI, A, 2007).

2.5.8.1 Microplasma

Caracteristicamente o micro plasma utiliza correntes de soldagem que vão desde 0,4 – 15 A, ocupando uma lacuna, em termos de nível de corrente, usualmente sem metal de adição, podendo ser usada de forma manual ou mecanizada ou ainda automatizada.

O controle em baixos níveis de corrente é possível pela característica estática do arco, sendo horizontal, garantindo um desempenho adequado, diferente do processo TIG onde pode ser observado que na faixa de 0 – 15 amperes, a característica estática do arco é bastante inclinada ocorrente instabilidade do arco, conforme figura 2.84.

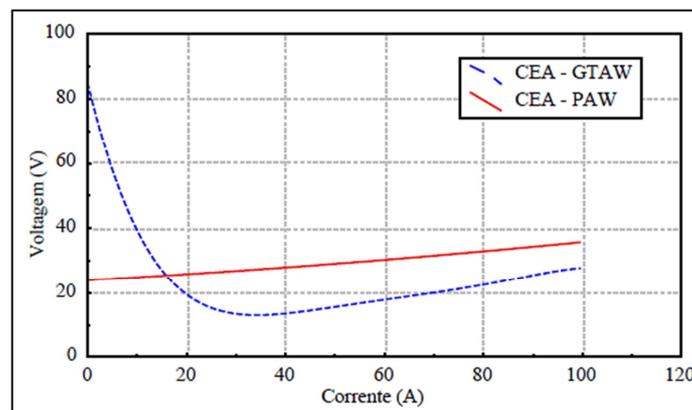


Figura 2.84: Características estáticas do arco GTAW (TIG) e PAW (Adaptado de REIS, R.; SCOTTI, A, 2007).

A técnica “microplasma” é utilizada para a soldagem de chapas finas, com espessuras variando entre 0,02 e 1 mm. O aumento da temperatura devido à constrição permite também selecionar condições que minimizem as distorções no conjunto soldado.

2.5.8.2 Melt-in

É apontada como uma técnica competidora direta do TIG, o custo aliado à complexidade do equipamento é uma boa explicação desta técnica não ter sido empregada largamente na indústria.

Nesta técnica, a vazão do gás é baixa e a força exercida sobre a poça de fusão é da mesma ordem daquelas de um arco aberto, entretanto, a característica de insensibilidade à distúrbios externos e a natureza direcional do arco são mantidas, permitindo um controle mais consistente da qualidade da solda.

2.5.8.3 Keyhole ou buraco de fechadura

Nesta técnica, os efeitos da pressão do arco e da concentração de energia sobre a superfície da poça de fusão, da ordem de 10^9 W/cm^2 criam condições para a formação de um pequeno orifício no ponto de incidência e que é mantido durante toda a operação de soldagem, assim o termo Keyhole é utilizado para designar uma técnica não convencional de soldagem, na qual o arco atravessa completamente a peça sendo soldada, formando um pequeno orifício em forma de funil. A poça de fusão estende-se através de toda espessura da junta e é mantida na posição pelas forças de tensão superficial do material fundido, conforme figura 2.85 e 2.86.

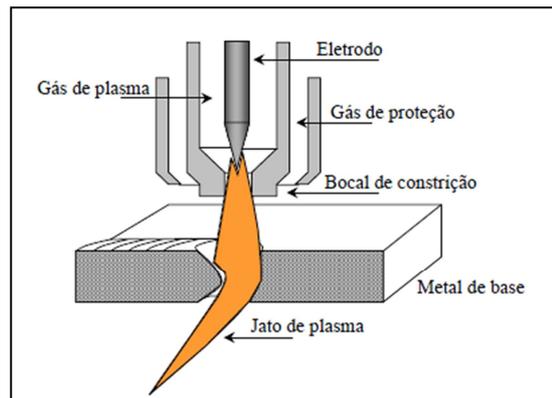


Figura 2.85: Esquema de soldagem a plasma com “Keyhole” (Adaptado de REIS, R.; SCOTTI, A, 2007).

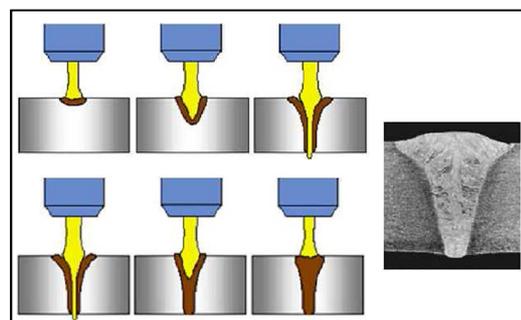


Figura 2.86: Modo operacional Keyhole (Adaptado de REIS, R.; SCOTTI, A, 2007).

2.5.9 Parâmetros de soldagem

Os principais parâmetros de soldagem plasma são: Vazão do gás plasma, corrente do processo de soldagem plasma, velocidade do processo de soldagem plasma, diâmetro do orifício constritor (bico), recuo do eletrodo (set back), distância da tocha de soldagem plasma à peça, vazão do gás de proteção, ângulo da ponta do eletrodo, adição de metal (velocidade de alimentação).

2.5.10 Vazão do gás plasma

A vazão do gás plasma é o principal parâmetro responsável pela energia cinética do arco e, conseqüentemente pela pressão que o arco exerce sobre a poça de fusão. Quanto maior for a vazão do gás plasma, maior será a pressão do arco e maior será a tendência de escavar o metal fundido, aumentando assim a penetração, conforme figura 2.87.

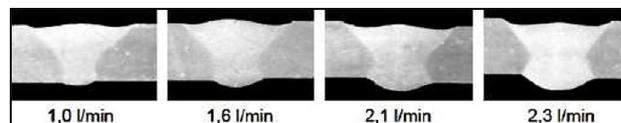


Figura 2.87: Influência da vazão de gás plasma (argônio) sobre a geometria dos cordões no processo plasma pelo modo Keyhole (Adaptado de REIS, R.; SCOTTI, A, 2007).

No processo de soldagem plasma, a vazão do gás plasma exerce grande influência na formação do arco e em sua distribuição térmica, conseqüentemente, essa vazão tem efeito sobre a tensão do arco durante a soldagem, conforme ilustra a figura 2.88.

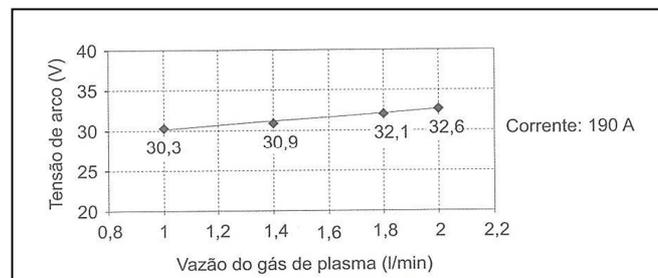


Figura 2.88: Efeito da vazão do gás plasma sobre a tensão do arco (Adaptado de REIS, R.; SCOTTI, A, 2007).

Dois fatores podem nos explicar a elevação, sendo eles o feito Pinch e a pressão que o arco exerce sobre a poça de fusão.

O primeiro se deve ao fato de termos uma redução no diâmetro da coluna de plasma em função da maior taxa de retirada de calor que ocorre nas camadas mais externas do arco, o segundo é que obviamente com maior pressão temos uma maior altura do arco em relação à peça obra aumentando a tensão.

2.5.11 Corrente do processo de soldagem plasma

Quanto maior a corrente, maior a largura e a penetração do cordão de solda, porém quanto maior a corrente, maior é o desgaste dos consumíveis e formação de arco duplo. A figura 2.89 abaixo mostra o efeito da corrente sobre a tensão do arco durante a soldagem.

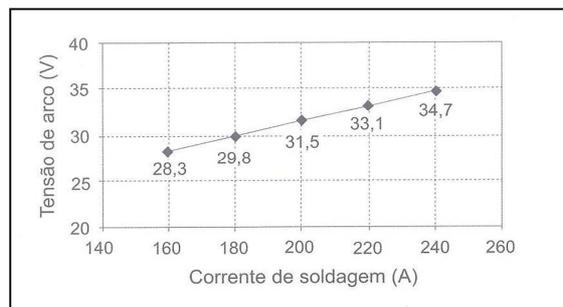


Figura 2.89: Efeito da corrente de soldagem sobre a tensão de arco (Adaptado de REIS, R.; SCOTTI, A, 2007).

Neste gráfico acima percebemos que ocorre um aumento significativo no valor da tensão quando se aumenta a corrente de soldagem.

2.5.12 Velocidade do processo de soldagem plasma

A velocidade de soldagem (velocidade longitudinal de deslocamento da tocha) exerce influência direta sobre a quantidade de calor transferida para a peça por unidade de comprimento, deste modo quanto maior a velocidade de soldagem se espera menores

quantidades de calor imposto e consequentemente menores volumes de cordão e níveis de penetração.

Já a operação em baixas velocidades, ou seja, maior calor imposto pode resultar em excesso de calor transferido para a peça e, consequentemente levar a formação de cordões sem conformidade geométrica.

Variações na velocidade de soldagem praticamente não alteram a tensão do arco conforme figura 2.90, entretanto pode ser que a tensão do arco tenda a diminuir ligeiramente com o aumento da velocidade de soldagem, já que uma maior parte do arco pode incidir sobre o material ainda sólido, tendendo a diminuir o comprimento real do arco; se o arco incidir mais sobre a poça fundida, ele tende a afundá-la, aumentando seu comprimento e consequentemente a tensão.

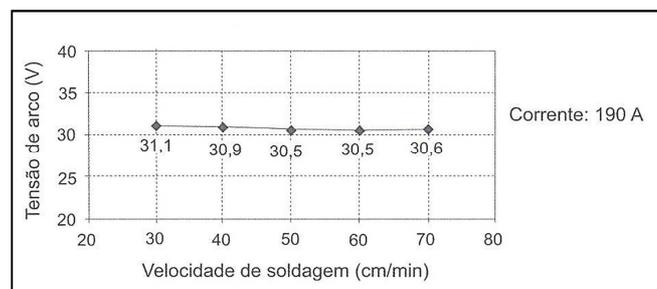


Figura 2.90: Efeito da velocidade de soldagem sobre a tensão do arco (Adaptado de REIS, R.; SCOTTI, A, 2007).

2.5.13 Diâmetro do orifício constritor (bico)

O bocal de constrição (bico) é o principal responsável pelo efeito de constrição física do arco e o diâmetro de seu orifício pode afetar consideravelmente a soldagem.

Porém, salientamos que quanto menor o seu orifício constritor, maior será o risco de desgaste. A redução do diâmetro do orifício constritor provoca aumento significativo na tensão do arco, basta relacionar o aumento da tensão do arco com o aumento da pressão que o arco exerce sobre a poça de fusão, fato decorrente da redução do diâmetro do orifício constritor.

A figura 2.91 mostra o efeito da variação do diâmetro do orifício constritor sobre a tensão do arco.

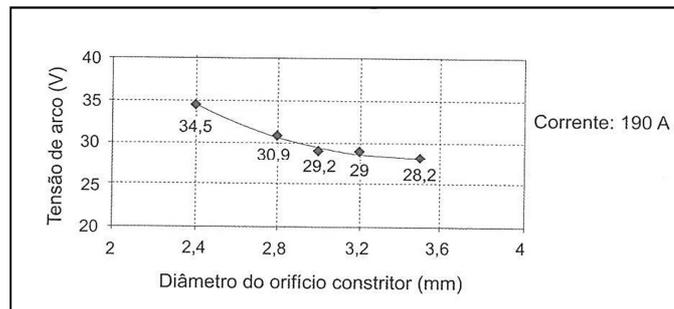


Figura 2.91: Efeito do diâmetro do orifício constritor sobre a tensão do arco (Adaptado de REIS, R.; SCOTTI, A, 2007).

2.5.14 Recuo do eletrodo (set back)

O recuo do eletrodo é definido pela distância entre a face externa do bocal e constrição (bico) e a ponta do eletrodo, conforme figura 2.92, a regulagem dessa distância atua sobre o grau de constrição do arco, influenciando em sua rigidez e no poder de penetração da poça.

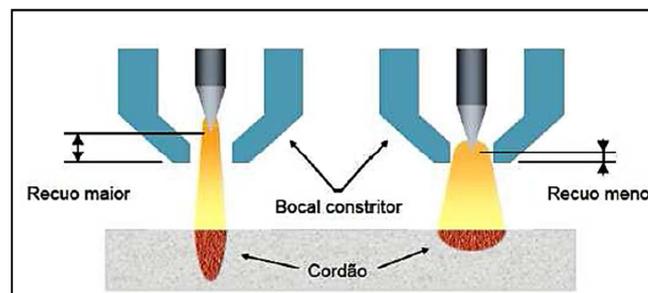


Figura 2.92: Esquema do efeito do recuo do eletrodo sobre a geometria dos cordões. (Adaptado de REIS, R.; SCOTTI, A, 2007).

Por afetar a constrição do arco, a alteração no recuo do eletrodo afeta o perfil do fluxo de plasma que incide sobre a poça de fusão, modificando a distribuição da força do jato sobre a poça (energia mecânica).

O aumento do recuo do eletrodo afeta a tensão de arco, tanto por aumentar diretamente o comprimento do arco como por modificar a distribuição de pressão e temperatura ao longo da coluna de plasma, conforme mostra a figura 2.93.

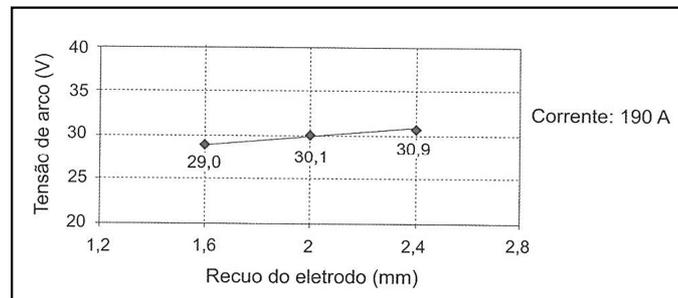


Figura 2.93: Efeito do recuo do eletrodo sobre a tensão de arco (Adaptado de REIS, R.; SCOTTI, A, 2007).

2.5.15 Distância da tocha de soldagem plasma à peça

Em relação à tensão de arco, como a distância tocha-peça é diretamente proporcional à tensão do arco, a mesma sofre alteração apesar de não relacionar a não influência da distância tocha peça sobre a geometria do cordão, a figura 2.94 mostra o efeito da distância tocha peça sobre a tensão de arco.

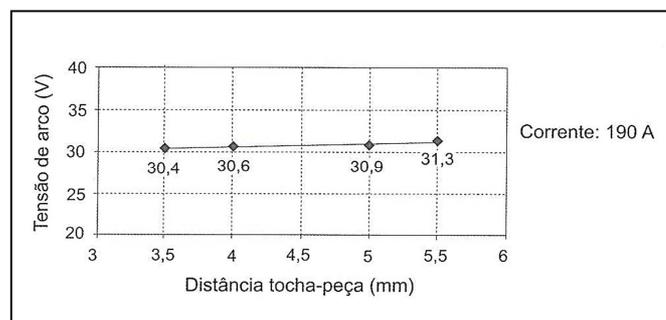


Figura 2.94: Efeito da distância bico peça sobre a tensão de arco (Adaptado de REIS, R.; SCOTTI, A, 2007).

Entretanto um aumento indiscriminado neste parâmetro impede a manutenção das características acima descritas, até pelo aumento da transferência de calor para o meio ambiente, o valor máximo utilizado para a distância tocha-peça é de cerca de 6

mm, apesar deste parâmetro influenciar menos o processo de soldagem plasma em relação ao TIG.

2.5.16 Vazão de gás de proteção

De uma maneira geral o efeito da vazão do gás de proteção sobre a geometria dos cordões de solda vai depender da condutividade térmica do gás utilizado. Para gases de baixa condutividade térmica, como, por exemplo, argônio puro ou argônio com pequenos percentuais de oxigênio, a tendência é que o perfil geométrico dos cordões não se altere conforme figura 2.95.

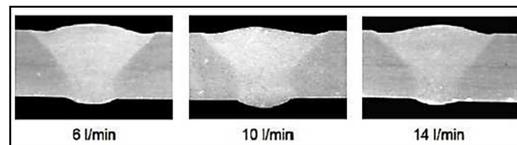


Figura 2.95: Influência da vazão do gás de proteção (argônio +5% oxigênio) sobre a geometria dos cordões no processo plasma pelo modo Keyhole. (Adaptado de REIS, R.; SCOTTI, A, 2007).

Com relação ao efeito da vazão do gás de proteção sobre a tensão do arco, depende da condutividade térmica do gás, sendo ao argônio, de baixa condutividade, a tensão do arco não é afetada, mas, caso sejam gases de alta condutividade térmica, espera-se variações significativas, conforme figura 2.96.

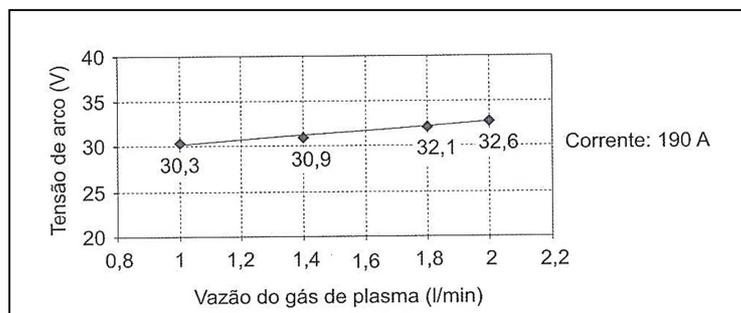


Figura 2.96: Efeito da vazão do gás de proteção (argônio) sobre a tensão de arco. (Adaptado de REIS, R.; SCOTTI, A, 2007).

2.5.17 Ângulo da ponta do eletrodo

O ângulo da ponta do eletrodo não exerce muita influência sobre o perfil geométrico do cordão e tensão do arco em função de o eletrodo estar enclausurado dentro do bocal de constrição (bico).

2.5.18 Adição de metal (velocidade de alimentação)

Até agora chamamos atenção para o fato de que nossas considerações se referiram ao processo de soldagem plasma sem metal de adição, particularmente a técnica Keyhole devido a sua maior expressividade nas indústrias. Porém, em casos onde a junta é preparada com chanfro e/ ou montada com abertura, o metal de adição deve ser utilizado para preencher o volume vazio decorrente do formato de preparação e / ou montagem, esse mesmo metal de adição é usado para aumentar a estabilidade da técnica Keyhole, por tornar a temperatura de fusão mais fria e, conseqüentemente, controlar melhor a tensão superficial e a viscosidade do metal líquido, sendo também utilizado em operações de revestimento que é exatamente o objetivo de nosso estudo. Na soldagem plasma, como a fonte de calor (o arco) é uma variável independente da quantidade de material depositado (até certo nível), para uma dada energia de soldagem (mesma regulagem de corrente e velocidade de soldagem), ao se aumentar a velocidade de alimentação com vareta ou arame, maior será o volume da poça, mas, menor será a penetração e a diluição do metal de adição no metal de base, muitas vezes desejável (existe uma velocidade de alimentação limite, acima da qual não haverá calor suficiente para fundir todo o material, causando defeitos de falta de fusão).

A figura 2.97 nos mostra a influência do metal de adição na geometria dos cordões obtidos por soldagem plasma mecanizada.

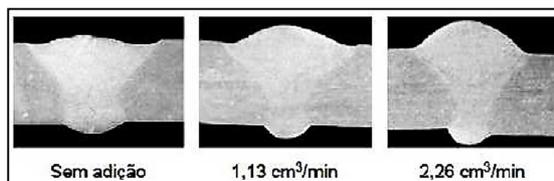


Figura 2.97: Influência da taxa de adição de material sobre a geometria dos cordões para uma velocidade de soldagem de 40 cm/min (Adaptado de REIS, R.; SCOTTI, A, 2007).

Vimos que em soldagens com adição de metal, quanto maior a taxa de adição que pode ser obtida com aumento da alimentação do arame ou aumento do diâmetro do arame, maior será o reforço, porém, os cordões tendem a ficar com menor penetração, raiz mais estreita, já que neste caso, é maior a retirada de energia (calor) da poça para promover a fusão do arame.

A figura 2.98 mostra o efeito da taxa de adição de metal sobre a tensão do arco, observamos que a tensão é praticamente independente da taxa de adição de metal, pois o metal depositado liquefeito tende a contornar o arco em direção à parte posterior da poça de fusão, onde a solidificação e a formação do reforço, por esse motivo, a tendência é que não ocorram alterações no comprimento real do arco e, conseqüentemente, variações na tensão.

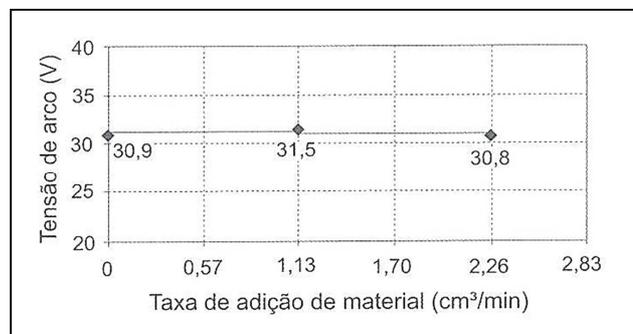


Figura 2.98: Efeito da taxa de adição de metal sobre a tensão de arco (Adaptado de REIS, R.; SCOTTI, A, 2007).

2.6 Processo de Soldagem: PPTAW (Plasma Powder Transferred ArcWelding), PTA (Plasma Transferred Arc) ou ainda PTAP (Plasma Trasferred Arc Powder)

Processo de Soldagem Plasma de Arco Transferido Alimentado com Pó (PTA) pode ser considerado uma derivação do Processo de Soldagem Plasma de Arco Transferido Alimentado com Arame (PTAW). Diverge deste pela natureza do material de aporte, uma vez que utiliza pó em vez de arame, e pela necessidade de um terceiro gás para o transporte do pó. Por utilizar metal de adição na forma de pó, o PTA tem sido utilizado somente para a deposição de algumas ligas atualmente disponíveis. Porém, num futuro próximo, pode-se aplicar na deposição de um amplo espectro de metais,

com composições facilmente variadas conforme as necessidades, uma vez que não é restrito à disponibilidade de ligas comerciais, como é o caso do arame.

A figura 2.99 exemplifique o perfil geométrico de um cordão de PTA com diluição mínima.

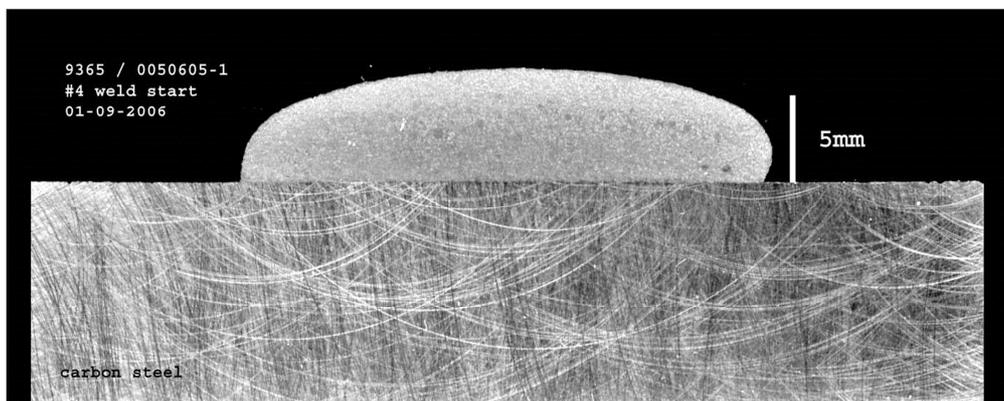


Figura 2.99: Perfil geométrico do cordão de solda do processo PTA (Adaptado de Comersul, Kennametal, 2014).

O surgimento do Processo Plasma de Arco Transferido Alimentado com Pó (PTA) é colocado sob óticas diversas por diferentes autores.

Apesar disso, existe certa congruência quanto à época na qual houve a apresentação pública do processo (início da década de 60) e ao seu criador, a Union Carbide Co. Mais precisamente, a citada empresa demonstrou o processo na 42ª Reunião Anual da AWS, o qual foi patenteado em 03/11/1961, sob a denominação “Procedimento e Aparato para Aporte de Pó Metálico, Depositado e Soldado com Plasma de Arco Transferido”. Porém, em outra fonte, a criação do processo remete à década de 50 e apenas o início de sua comercialização aos anos 60. É provável que essa fonte tenha se baseado na primeira patente de tocha Plasma, de 1953. Já no Japão foi a empresa Daido Steel quem obteve a patente do processo PTA, em 1973 (denominado por esta companhia de Plasma Powder Welding, PPW). Como primeiras aplicações, se faz alusão a revestimentos soldados de alta qualidade na indústria nuclear.

A partir de então o processo se difundiu. A designação mais disseminada é PTA (Plasma Transferred Arc). Segundo Dolles, que chama o processo de Plasma-Pulver-Auftragschweissen ou Plasma-Powder-Welding, o PTA-P se encontra na classificação

de Revestimento, subclassificação Revestimento do Estado Líquido ou Pastoso, da norma DIN 8580. Porém, variações de nomenclatura são encontradas: PPW, Powder Plasma Hardfacing, Powder Plasma Arc Welding (PPAW), Plasma Pulver-Auftragschweissen Plasma weld surfacing, Plasma Arc Powder Surfacing, Plasma Transmitted Arc, Plasma Transferred Arc wearfacing / hardfacing / wear surfacing.

No PTA utiliza-se gás inerte como gás plasma, que é forçado a passar pelo orifício do bico constritor, onde o eletrodo se encontra fixado concentricamente. O gás de proteção, que pode ser inerte ou ativo, passa por um bocal externo, concêntrico ao bico constritor, protegendo a solda e as regiões vizinhas da contaminação pelo ar atmosférico também se se utiliza geralmente argônio como meio de transporte do pó, sendo este gás chamado de gás de transporte ou de arraste. O pó é carregado mediante mangueiras flexíveis até o bico constritor, permitindo sua entrada no arco plasma em forma convergente. Na figura 2.100 abaixo, temos uma descrição detalhada do processo.

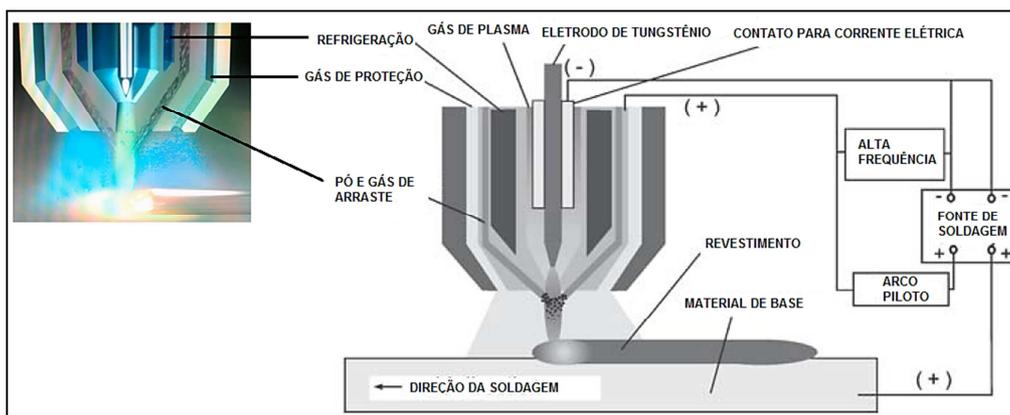


Figura 2.100: Descrição detalhada do processo de soldagem de revestimento plasma pó (Adaptado de Eutectic, 2015).

Como o eletrodo de tungstênio se situa no interior do bico constritor da tocha de soldagem, é impossível abrir o arco elétrico por contato, sendo por isto necessário usar um dispositivo para obter sua ignição, denominado de módulo plasma. Um ignitor eletrônico fornece picos de alta tensão entre o eletrodo de tungstênio e o bocal constritor, gerando uma pequena centelha nesta região. Desta maneira, com a passagem do gás de plasma, surge um arco elétrico de baixa intensidade entre o eletrodo de tungstênio e o bocal constritor, chamado de arco piloto (arco não transferido). Por sua vez, o arco piloto forma um caminho de baixa resistência elétrica entre o eletrodo de

tungstênio e a peça a ser soldada, facilitando o estabelecimento do arco principal quando a fonte de potência é acionada. Na prática, os parâmetros que controlam a qualidade da solda são a quantidade de metal de adição fornecida, a vazão dos gases (de proteção, de plasma e de transporte), a intensidade de corrente de soldagem, a distância do bico constritor à peça e a velocidade de soldagem.

2.6.1 Equipamentos

O processo PTA se permite explicar por suas partes constituintes.

A fonte calorífica utilizada no processo é um plasma térmico, ou seja, um gás caracterizado por estar pelo menos 1% ionizado estado no qual a energia fornecida ao gás dissociou gases moleculares e então, como para gases monoatômicos, quebrou os átomos em íons positivos e elétrons negativos, com temperaturas maiores que aprox. 7200° C e com boa condutividade térmica. (Nos processos de soldagem a arco o plasma assume um perfil de temperaturas consideravelmente mais altas, para o qual se atribuem diferentes valores de temperatura média, por exemplo, aproximadamente 16700° C). Para controlar essa energia, adequando-a ao processo PTA, é necessária uma fonte de corrente para o arco principal e uma fonte de corrente para o arco piloto (com ignitor de alta frequência para sua ignição) e uma tocha de soldagem refrigerada. Para viabilizar a adição de material, é necessário um aparato para armazenagem e alimentação do pó, como mostram as figuras 2.101 e 2.102, além dos gases do processo e seus respectivos reguladores (SILVA, R. H. G, 2010).

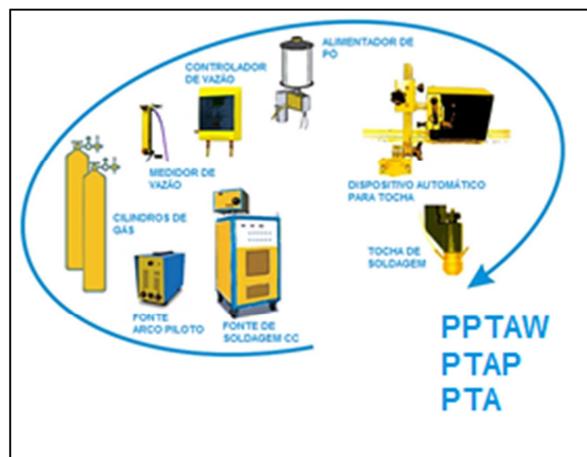


Figura 2.101: Composição do equipamento mecanizado de soldagem de revestimento plasma pó (Adaptado de SILVA, R. H. G, 2010).



Figura 2.102: Equipamento mecanizado de soldagem de revestimento plasma pó do fabricante Kennametal (Adaptado de Kennametal, 2016).

No processo de soldagem plasma com adição de pó para revestimento, utilizamos basicamente as mesmas fontes e gases do processo de soldagem plasma, porém citaremos com mais ênfase os dois componentes deste processo que mais se destacam face aos anteriores (soldagem plasma), o alimentador de pó e a tocha.

Devido à variedade de aplicações industriais do plasma, não há um desenho universal de tocha que atenda aos os requisitos de todas ao mesmo tempo. Uma tocha plasma industrial, que é um aparato eletroquímico e térmico capaz de transformar energia elétrica em energia térmica, deve ter flexibilidade, faixa de operação aceitável para cada situação, vida útil satisfatória do eletrodo e, para potências fornecidas ao arco de até 60 KW (caso do PTA) uma perda por refrigeração não maior que 50 %, são citadas perdas máximas de cerca de 20 % para o sistema de refrigeração, e que a finalidade essencial do projeto da tocha é produzir um arco estável e perfeitamente centralizado.

Como exemplos de aplicações industriais se têm: siderurgia, tratamento de lixo, corte e soldagem.

Os fundamentos construtivos das tochas PTA devem, portanto satisfazer os requisitos que tornem a aplicação industrial do processo técnica e economicamente viável e competitiva. Uma das questões a ser vista é a alimentação de material. A injeção de pó ao arco é uma das dificuldades do PTA. A distribuição das partículas

coaxialmente ao arco, ou através de orifícios concêntricos ao arco, em um ângulo determinado, resulta em limitação da granulometria utilizável e reduz a robustez do processo. É válido ter em mente que esta afirmação está contida num trabalho que fomenta outra forma de injeção do pó, através do eixo central da tocha. A alimentação de pó ao arco é de fato, um fator a ser cuidadosamente considerado, porém, com a evolução do processo e da fabricação dos pós, as limitações estão dentro de faixas aceitáveis industrialmente (SILVA, R. H. G, 2010).

O tipo de injeção afeta a forma do arco, relata-se que o arco, originalmente cilíndrico, passa a ter forma de um cone truncado, quando os jatos de gás de arraste se convergem antes da peça. Além disso, é introduzido o conceito de ponto focal da injeção de pó, que é a localização na qual diversos jatos de injeção de material se encontram, sob o bico constritor, independentemente do tipo de tocha. Quanto a essa característica, as tochas podem ser classificadas em três tipos: injeção externa, injeção interna e injeção central de pó.

A injeção externa de pó é a mais difundida comercialmente. Ela se caracteriza pelo fato de os orifícios injetores se encontrarem na superfície inferior do bico constritor. Dessa maneira, o material aportado viaja por determinado tempo fora do arco até adentrar o mesmo. O ponto focal será determinado pelo ângulo dos orifícios injetores em relação ao eixo do arco elétrico e pela distância dos primeiros ao segundo.

Na injeção externa de pó são sugeridas duas variações quanto ao ponto focal (ponto de cruzamento dos jatos de pó na coluna do arco). O trabalho trata de deposição de partículas duras (carbonetos, cerâmicas) em matriz metálica. A primeira versão prevê um projeto de tocha (ângulo de injeção) no qual o ponto focal do pó fica acima da poça de fusão, a cerca de meia distância do bico constritor. Ela é chamada codeposição, pois há alimentação conjunta de partículas duras e pó da matriz metálica. Para o caso de injeção de partículas, somente as partículas duras são alimentadas e a matriz metálica é o próprio substrato.

Nesta variação a tocha é projetada e posicionada de modo a focalizar o pó na superfície do substrato.

As tochas podem ser manuais ou mecanizadas, conforme figuras 2.103 e 2.104, em especial na figura 2.105, temos alimentação externa de pó.



Figura 2.103: Tocha de soldagem plasma pó com adição interna de pó consumível
(Adaptado de TBi).



Figura 2.104: Tocha de soldagem plasma pó com adição externa de pó consumível
(Adaptado de Process Welding).

Na figura 2.105, temos a ilustração dos consumíveis utilizados no modelo PL200 da tocha de soldagem plasma pó, do fabricante TBi.

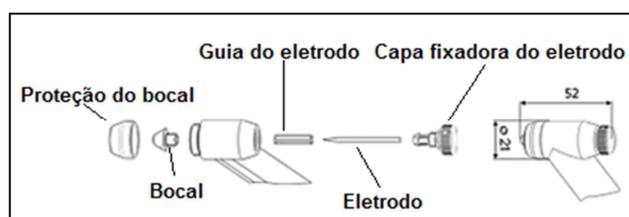


Figura 2.105: Consumíveis utilizados na tocha modelo PL200 do fabricante TBi
(Adaptado de TBi).

2.6.1.1 Alimentador de pó e eficiência térmica do processo

O alimentador de pó (designado no presente texto por ADP) é um componente fundamental nos equipamentos para o processo PTA. Ele é responsável pela dosagem volumétrica da liga metálica em pó a ser injetada no arco, através da tocha de soldagem e seu comportamento determina o grau de homogeneidade e repetitividade da alimentação de pó e, conseqüentemente, é fator de importância para a qualidade da solda. (SILVA, R. H. G, 2010).

Apesar de existirem no mercado vários princípios construtivos disponíveis, a literatura especializada em soldagem não aborda profundamente as características dos modelos usados nas pesquisas. As descrições fornecidas limitam-se a algumas constantes como o fato de a maioria dos equipamentos terem o ADP acima da tocha, sendo a maioria das aplicações na posição plana, e especificações quanto à forma e granulometria requeridas, sem citar o princípio de funcionamento.

Os transportadores de sólidos encontrados industrialmente em dois tipos gerais: volumétricos e gravimétricos. (SILVA, R. H. G, 2010).

Os dispositivos volumétricos trabalham com uma vazão em volume constante, enquanto os gravimétricos, de construção mais complicada, mantêm a vazão mássica constante. O segundo tipo é utilizado quando há grandes variações de granulometria, umidade e grau de compactação do sólido alimentado. No caso do PTA são utilizados os dispositivos volumétricos para a dosagem. Como exemplos desse tipo, existem os transportadores helicoidais (ou fusos transportadores), válvulas rotativas, mesa dosadora e válvulas gaveta. O mesmo livro também divide o Transporte Pneumático em direto (no qual o pó passa através de um ventilador que impele o fluido de arraste) e indireto (o pó não passa por um ventilador).

Como no processo PTA o pó deve ser carregado até a tocha, transporte pneumático do tipo indireto é utilizado, por exemplo, temos a figura 2.106 ilustrativa abaixo:

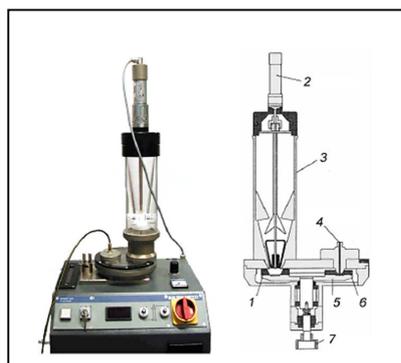


Figura 2.106: ADP tipo mesa dosadora, modificado em (1- coleta de pó pelo disco; 2- motor para o agitador; 3-silo armazenador; 4- flange para mangueira de saída de pó; 5- disco; 6- sucção do pó; 7- motor da mesa giratória (Adaptado de SILVA, R. H. G, 2010).

A figura 2.107 mostra uma configuração básica do bico constritor, assim como os parâmetros empregados no processo de soldagem de revestimento PTA. A distância

da ponta externa do bico constritor ao metal de base é denominada distância bico-peça (DBP); a da ponta do eletrodo à ponta externa do bico constritor, recuo do eletrodo (Rc). As características do arco elétrico são determinadas pelo Rc, responsável pelo grau de constrição e pela rigidez do jato plasma. De maneira geral, a tensão do arco plasma muda cerca de 2,4 V quando o Rc varia 1 mm. O Rc máximo e mínimo depende do tipo de tocha empregado; em certa tocha de soldagem plasma, por exemplo, ele pode variar entre 0,8 mm e 2,4 mm. À medida que se reduz o Rc, a largura do cordão de solda aumenta e a penetração diminui. Este efeito do Rc nas características geométricas do cordão de solda se deve à redução do efeito de constrição, resultando em maior área de incidência do arco elétrico sobre o substrato.

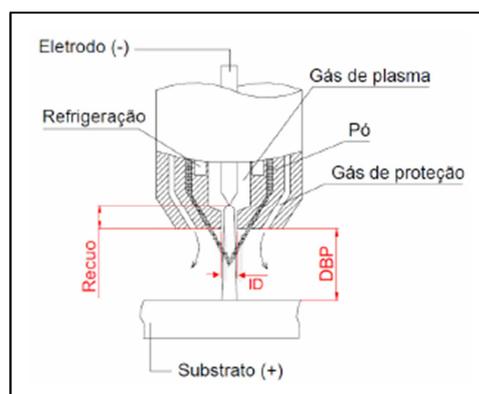


Figura 2.107: À esquerda : Desenho esquemático mostrando a distância bico-peça (DBP) e o recuo do eletrodo (Rc) na soldagem de revestimento com o processo plasma PTA (Adaptado de SILVA, R. H. G, 2010).

O bico constritor, onde o eletrodo fica confinado, é de cobre e tem um orifício central através do qual passam o arco elétrico e todo o gás de plasma. O diâmetro do orifício do bico constritor influencia bastante a qualidade do revestimento, pois ele determina a largura e a penetração do cordão de solda. Se a vazão de gás de plasma for insuficiente, a vida útil do bico constritor será menor, devido ao maior desgaste que ele sofrerá. A intensidade de corrente de soldagem diminui à medida que o diâmetro do orifício constritor diminui, visto que a temperatura do arco elétrico aumenta.

A influência da DBP sobre o revestimento depende do Rc e do diâmetro do orifício constritor; quanto maior o Rc e menor este diâmetro, maior será o efeito de constrição do arco, que fica mais concentrado. O Rc empregado quando se usa a técnica “melt-in” é pequeno, e o arco elétrico é cônico, por estar submetido a um pequeno grau de colimação.

A variação da DBP, mesmo dentro dos limites normais, altera as características do cordão de solda, assim como ocorre na soldagem GTAW, quando se altera a distância da ponta do eletrodo à peça. Desta maneira, quanto maior for a DBP, menor será a penetração e maior a largura do cordão de solda, devido ao aumento da área de incidência do arco elétrico sobre o metal de base. Para se ter um bom rendimento na soldagem de revestimento, a DBP deve ser de 10 mm a 15 mm; um valor acima desta faixa reduzirá significativamente a proteção gasosa. À medida que a DBP aumenta, a diluição diminui.

A característica chave que é creditada ao PTA, no entanto, é a constrição, ou colimação, do arco via bico constritor, originando vários outros diferenciais competitivos. Em relação ao processo TIG, por exemplo, a coluna do arco PTA é mais homogênea e menos divergente, indicando pressão de contração magnética auto induzida (como no “efeito pinch”) também maior e mais homogênea, (XIBAO, W.; WENYUE, Z., 2001). Alta taxa de fusão do pó é permitida, segundo, pela alta concentração de energia e pelo fato de que o pó é um formato de material que fornece maior área superficial de troca de calor no sistema, resultando em melhor aproveitamento da energia do arco para propriamente a fusão do material de adição. A melhor eficiência de fusão, também permite correntes menores e, então, menor aporte térmico. (MARCONI, M.; MARCONI, B, 2005).

Também é afirmado que o pó, ao entrar em contato com a peça, absorve calor da mesma resfriando-a em certo grau, o que pode ajudar a reduzir também a diluição. Adicionalmente, a maior densidade de corrente torna o arco mais rígido, reduzindo sua suscetibilidade a desvios oriundos de campos magnéticos ou elétricos externos. Quanto a este quesito, entretanto, foi verificado em que há um limite inferior de velocidade de soldagem para determinadas dimensões de peça e tipo de bico constritor, abaixo do qual acontece aquecimento excessivo, capaz de resultar em desvios no cordão de solda por sopro magnético. (DÍAZ, V. M. V, 2005)

Uma comparação ilustrativa da concentração de energia de vários processos de soldagem pode ser vista na Figura 2.108 (GEBERT, A. et al, 1996) e na tabela 2.6 as densidades de potência, mas, que são amplas e as tecnologias são flexíveis. (SILVA, R. H. G, 2010).

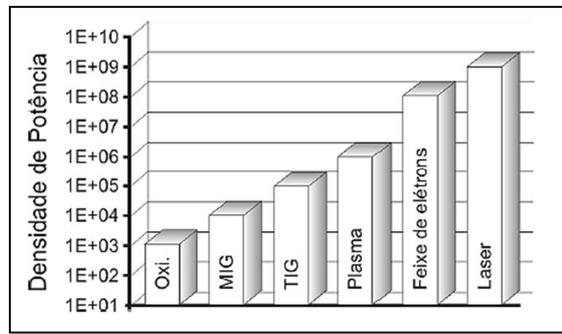


Tabela 2.108: Concentração de energia de diferentes processos de revestimento por soldagem, em W/cm² (Adaptado de SILVA, R. H. G, 2010).

Processo	Densidade de potência (W/cm ²)
TIG	10 ² - 10 ⁴
	10 ³ - 10 ⁴
MIG	10 ³ - 10 ⁴
Plasma	10 ³ - 10 ⁶
	10 ⁴ - 10 ⁵
Feixe de elétrons	10 ⁵ - 10 ⁸
	10 ⁶ - 10 ⁹
Laser	10 ⁵ - 10 ⁷
	10 ⁶ - 10 ⁹

Tabela 2.6: Fontes de calor e respectivas densidades de potência (Adaptado de SILVA, R. H. G, 2010).

A tabela 2.8 apresenta uma tabela contendo eficiências térmicas de diferentes processos de soldagem, os valores podem variar muito de acordo com as condições operativas presentes. Além disso, a eficiência de fusão seria uma informação mais importante. (MARCONI, M, 2002).

Eficiência térmica (quociente entre potência gerada no arco e absorvida pela peça) de vários processos de revestimento por soldagem (MARCONI, M, 2002).

Processo	Eficiência térmica η_t (%)
TIG	25 - 50
PTA	50 - 60
MIG	60 - 70
Eletrodo Revestido	65 - 85
Arco Submerso	95 - 98

Tabela 2.8: Eficiência térmica dos processos de soldagem TIG, PTA, MIG, eletrodo revestido, arco submerso (Adaptado de SILVA, R. H. G, 2010).

É possível encontrar também comparações das temperaturas de plasma alcançadas nos diferentes processos a arco (figura 2.109). Notadamente, se trata de uma comparação genérica ilustrativa, pois o autor também não fornece quaisquer parâmetros mantidos constantes (inclusive há evidente diferença nos comprimentos de arco).

Conclui-se que a intenção é também apontar maior constrição do arco, através da faixa de temperaturas superior do processo PTA.

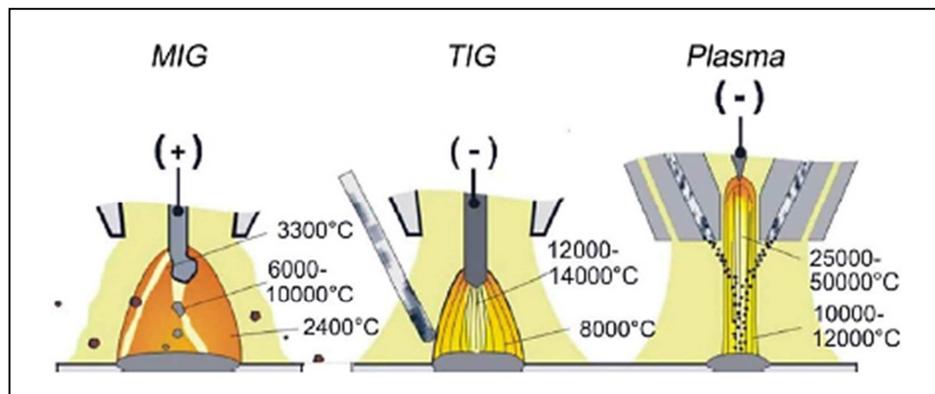


Figura 2.109: Comparação de temperaturas do arco para diferentes processos de soldagem a arco (Adaptado de SILVA, R. H. G, 2010).

Alta taxa de deposição é uma das vantagens do PTA mais difundidas no mundo da soldagem. Juntamente com a diluição, é citada como o parâmetro primordial na seleção de um processo de revestimento. Na verdade, existem outros aspectos, como a aplicação da peça trabalhada e os materiais envolvidos. Mas o fato de que, em outros processos de revestimento por soldagem a arco, maior taxa de deposição significa maior energia necessária e, em consequência, maior diluição, de fato joga a favor do PTA, que possui independência (dentro de uma faixa operacional) entre energia e aporte de material.

De maneira direta, sem maiores detalhes, a literatura enumera como vantagens do PTA: bom acabamento superficial, com menor índice de retrabalho, alta taxa de deposição, baixa diluição, alta densidade no depósito, ausência de porosidade, ausência de inclusões, alta variabilidade da liga a ser depositada (combinações de várias propriedades e possibilidade de fabricação de ligas que não podem ser produzidas em outra forma, sendo que alguns usuários misturam suas próprias ligas), e menor custo em geral do pó em relação a varetas e arames. Esta vantagem advém do fato de que a produção do pó é contínua: fusão, atomização e classificação granulométrica. Não é necessário trabalho mecânico ou corte, e muito pouco material é desperdiçado. A lista de vantagens se estende com: controlabilidade sobre a espessura da camada, alta velocidade, baixa suscetibilidade à falta de fusão, vazios e trincas, microestrutura mais refinada e baixo desperdício. A alta dinâmica da poça de soldagem, devida à alta

densidade de corrente, garante propriedades homogêneas em toda a seção do cordão de solda. Há de se citar o fato de que as ligas resistentes, mais caras, podem ser utilizadas somente nas superfícies solicitadas, sendo que o restante da peça pode ser fabricado em material menos nobre, de menor custo. (SILVA, R. H. G, 2010).

2.6.2 Parâmetros elétricos

A potência do arco principal, e conseqüentemente, o calor aportado à peça depende fortemente da corrente do arco principal. Os defeitos de soldagem advêm essencialmente de irregularidades no calor aportado à peça e à poça fundida. Na figura 2.110 é mostrada, a título de exemplo, uma relação entre aporte térmico à peça e corrente do arco principal, medido segundo metodologia calorimétrica de Marconi (MARCONI, M, 2002).

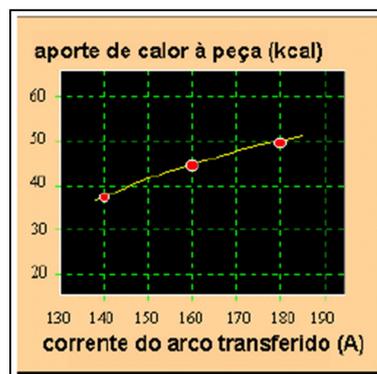


Figura 2.110: Relação entre aporte térmico à peça e corrente do arco principal
(Adaptado de MARCONI, M, 2002).

O efeito nocivo de correntes demasiadamente altas citado em é a maior suscetibilidade a trincas, o que pode ser resolvido por oscilação da tocha de soldagem (HUANG, X. et al, 1998) .O efeito nocivo também pode ser a vaporização do pó e conseqüente redução do rendimento de deposição. (DEUIS, R. L. et al, 1998) fusão do material de base. A influência da corrente sobre o calor transferido ao pó (medida por calorímetro rotativo) é modesta. Como esperado, há uma relação direta entre os parâmetros, mas o aumento da corrente resulta também em redução do tempo em que o pó fica no arco, recebendo calor deste. (SILVA, R. H. G, 2010).

Quanto ao PTA, o uso de corrente pulsada já propiciou soldas fora de posição e manipulação da seção transversal, penetração e forma do cordão, segundo [25], porém maiores detalhes de parâmetros ou aplicação não são fornecidos. De acordo com [46], a técnica traz vantagens tanto do ponto de vista metalúrgico como de processo e a maior delas (ou a origem dos benefícios) são os pulsos de alta corrente sem alteração no aporte térmico médio ao substrato. O autor do presente trabalho ressalva que o aporte térmico deve ser medido de maneira direta, por exemplo, por intermédio de calorímetros, pois há diferenças entre a eficiência térmica nos procedimentos e processos de soldagem que não podem ser desprezadas. (SILVA, R. H. G, 2010).

O maior refinamento do PTA em relação ao PTA-A é consequência de maior taxa de nucleação advinda de aglomerações de partículas de pó, menores que gotas transferidas do arame. (SILVA, R. H. G, 2010).

Seguindo a mesma linha, maior refinamento microestrutural no PTA pulsado em relação ao modo constante pode ser atribuído à formação de ainda menores aglomerações de partículas de pó que funcionam como núcleos, devido ação da pulsação de corrente. O maior superresfriamento da poça observado em soldagem pulsada permite que menores núcleos “sobrevivam” no banho líquido.

A figura 2.111 mostra a diferença de perfis entre os modos de transferência.

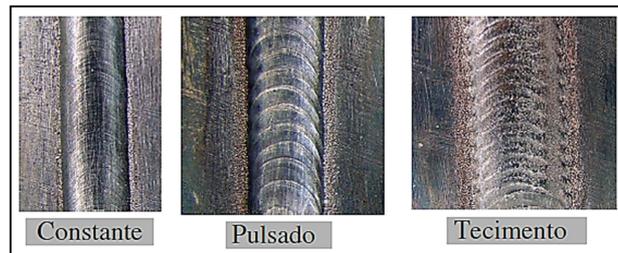


Figura 2.111: Diferença de perfis entre os modos de transferência de corrente constante, pulsado e tecimento (Adaptado de SILVA, R. H. G, 2010).

2.6.3 Gases do processo PTA

O processo de soldagem PTA aplica, fundamentalmente, três fluxos de gás que o caracterizam: gás de plasma, gás de proteção e gás de arraste de pó (figura 2.112). Os gases do processo podem ser manipulados para obtenção de diferentes temperaturas e entalpias no plasma, o que torna possível influenciar a densidade de energia, a penetração e a taxa de fusão (WAHL, W.; KRAUSKOPF, F, 1993). Espera-se encontrar influência também sobre a diluição e sobre o aporte de calor efetivo à peça, advindo tanto de aquecimento anódico, como de convecção e energia de recombinação de gases moleculares.

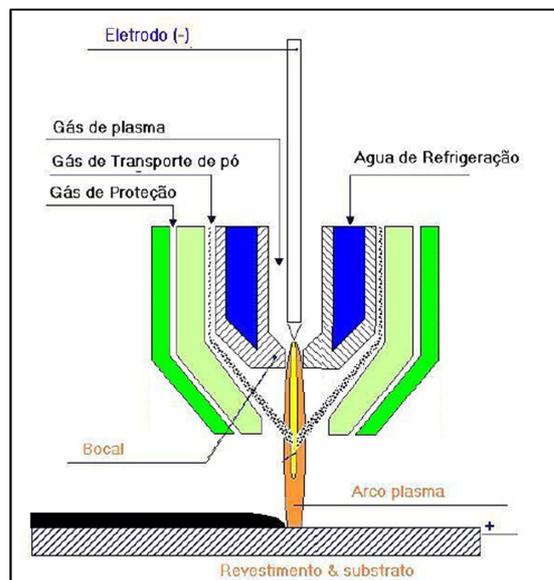


Figura 2.112: Gases presentes no processo PTA.

Quanto à escolha dos gases ou misturas a se utilizar em revestimentos soldados por PTA-P existe uma profusão de opções, assim como de efeitos desejados. A decisão depende dos materiais envolvidos e da tarefa a ser realizada. O gás de plasma, que envolve o eletrodo de tungstênio deve sabidamente ser inerte, sendo usualmente escolhido o Ar. (DOLLES, M.2002) foi realizada uma tentativa de adição de He no gás de plasma para verificação de possíveis influências. Como não foi possível acender o arco principal (nesse caso por pulsos de alta frequência entre o eletrodo e a peça), o autor exclui este gás (e suas misturas com Ar) de seus ensaios posteriores. (TUR, M, 1990) cita a utilização da mistura Ar 60 % / He 40 % sendo altamente recomendada para proteger as superfícies inferiores da tocha contra adesão de partículas semifundidas

do metal adicionado. A explicação do fenômeno se baseia no fato de que um plasma de maior temperatura (causado pela adição de He) fomenta a produção de um filme autorenovante de vapor metálico condensado e óxidos metálicos nas superfícies inferiores da tocha, o qual atua como barreira anti-adesiva entre as partículas de pó e a tocha. A utilização de um gás de proteção com H₂ (de propriedades redutoras) em sua composição está atrelada ao mecanismo. Imagina-se que a mistura com H₂ impeça deposição exacerbada de óxidos na tocha.

Para o gás de arraste se utiliza também a mistura de Ar e He.

Argônio (Ar) e misturas de argônio e hidrogênio (H₂) são comumente mencionadas como gás de proteção (DEUIS, R. L. et al, 1998), MARCONI, M.; MARCONI, B, (2005), reporta que uma porcentagem de 2% a 8% de H₂ é responsável por promover uma solda esteticamente mais limpa, devido à propriedade redutora deste gás. (HUANG, X. et al, 1998) o uso de Ar resulta em menor perda de elementos de liga no depósito. Mas o Hélio (He) também aparece em algumas pesquisas (DEUIS, R. L. et al, 1998) para alumínio. Para avaliação da influência do gás de proteção na pressão do arco sobre a poça e na densidade de corrente, foi lançado mão, em, de cálculos pelo método de elementos finitos por intermédio de software de modelamento e simulação (SCHNICK, M. et al, 2006), conforme figura 2.113. Devido ao alto calor específico e alta condutividade térmica do N₂ e devido ao alto potencial de ionização e alta condutividade térmica do He, esses gases provocam uma “focalização” do arco pelo resfriamento da superfície externa do mesmo. A maior densidade de corrente, no entanto, não se traduz obrigatoriamente em maior pressão sobre a poça (e consequentemente maior penetração), para o He, a viscosidade é relativamente alta para temperaturas entre 10000 K e 20000 K (aprox. 9700° C e 19700° C), o que resulta em baixa velocidade do jato plasma e consequente menor pressão sobre a poça.

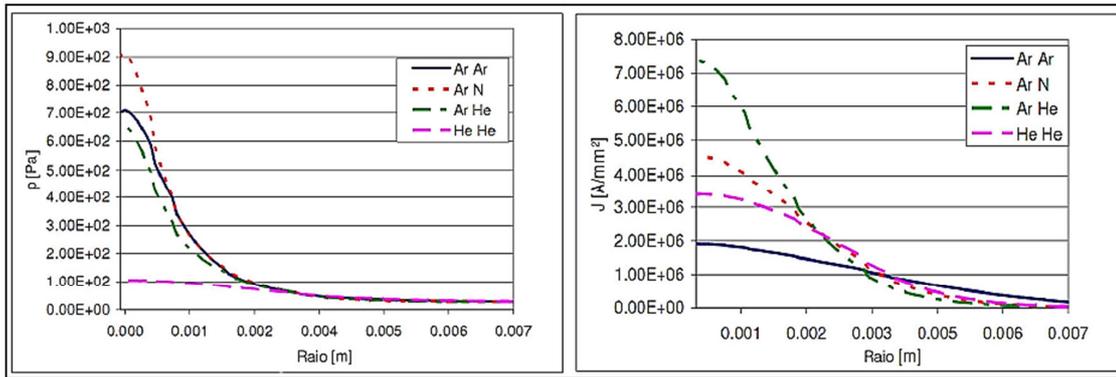


Figura 2.113: Influência da composição do gás de proteção sobre a pressão do arco e a densidade de corrente (Condições de simulação apresentadas: $I = 120 \text{ A}$, $V_{gpl} = 0,3 \text{ l/min}$, $V_{gprot} = 9,0 \text{ l/min}$, $DBP = 10 \text{ mm}$) (Adaptado de SCHNICK, M. et al, 2006).

A vazão do gás de transporte influi significativamente no rendimento de deposição e afeta na composição dos revestimentos. Quando a vazão de gás de transporte é muito elevada, o pó é transportado fora da coluna do arco plasma resultando num desperdício de pó. Geralmente, o gás de transporte consiste de argônio ou uma mistura de argônio/hidrogênio. Os efeitos da taxa de vazão de gás de transporte e a taxa de alimentação de pó sobre a qualidade dos depósitos são mostrados na figura 2.114. Nesta figura, a região operacional apresentada, é a região que possui as condições de soldagem que efetivamente possibilitam revestimentos de qualidade.

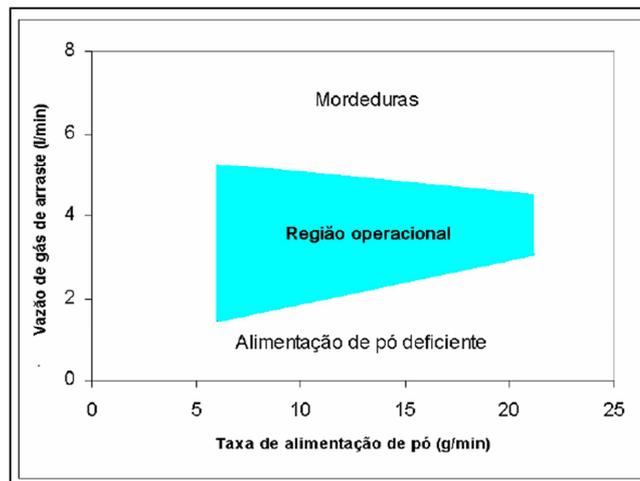


Figura 2.114: Relação entre a taxa de alimentação de pó e taxa de gás de arraste (Deuis et al, 1997).

Huang et al (1998) relatam que com vazões de gás de arraste muito elevadas, o fluxo se torna turbulento, permitindo a entrada de ar no arco plasma. O resultado final são depósitos com porosidades. Valores de vazão de gás de plasma muito elevados, produzem uma turbulência dentro do arco plasma, ao mesmo tempo em que aumenta a velocidade do jato plasma e, como consequência, aumenta a força do jato plasma sobre a poça fundida. Elevados valores da taxa de vazão de gás de plasma promovem a formação de poros e óxidos nos depósitos.

Vários autores relatam as vantagens da aplicação do tecimento na produção de depósitos em relação à soldagem sem tecimento (Kou, 1987; Hidaka et al, 1993; Barra, 1998). A principal vantagem do ponto de vista de processo está relacionada com a largura do cordão e, por outro lado, as vantagens do ponto de vista metalúrgico estão referidas aos menores valores de diluição. A técnica do tecimento pode ser aplicada por oscilação eletromagnética do arco ou de forma mecânica.

As condições anteriores eram relativas ao processo plasma normal, servindo como base para o conhecimento do comportamento do arco. Para o PTA em específico, a figura 2.115 mostra o estrangulamento das isoterma próximo à poça, em decorrência da injeção de gás de arraste / pó.

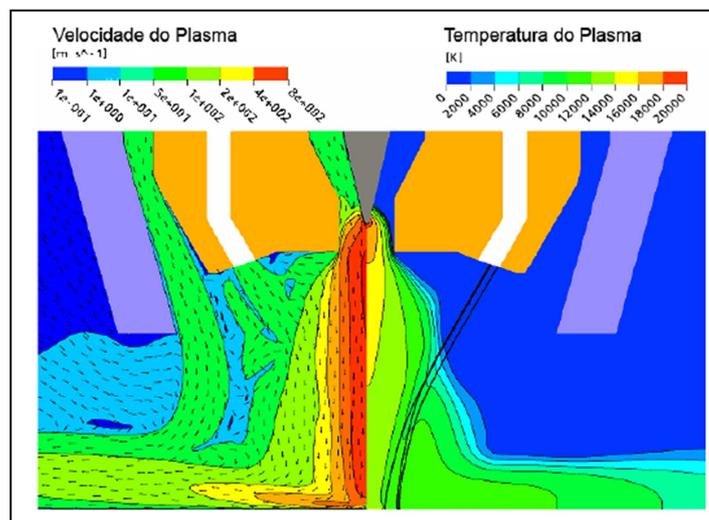


Figura 2.115: Modelo da tocha, perfis de velocidades e temperaturas do plasma para o processo PTA (Adaptado de SILVA, R. H. G, 2010).

Como gás de arraste de pó, o mais citado é Ar (MARCONI, M.; MARCONI, B, 2005), mas também se utilizam o nitrogênio (N₂) (WAHL, W.; KRAUSKOPF, F,

2005), o He (BEWLEY, J.G,1980) e mistura de Ar e H₂ (DEUIS, R. L. et al., 1998). He seria uma boa opção, segundo Dolles, para o gás de arraste devido ao seu alto potencial de ionização sem, entretanto, comentar o efeito benéfico disso (DOLLES, M, 2009) Mas a baixa densidade do He exigiria acréscimo de vazão para um carregamento consistente do pó, o que teria como consequência velocidade excessiva na sua saída em direção ao arco, perturbando-o. O autor coloca ainda o alto custo do He como agente inibidor de sua aplicação e recomenda mistura de Ar e H₂, por suas propriedades redutoras. Misturas com H₂ e He ou He puro são recomendadas, resultando em melhor acabamento (RAGHU, D.; WEBBER,1996). Estes gases resultam em maior potência de arco para a mesma corrente de soldagem e asseguram um arco suave e com boa molhabilidade. De qualquer maneira, o autor deixa claro que se podem manipular as misturas, as quais podem ser adequadas para ligas difíceis de soldar, que possuem baixa fluidez. (SILVA, R. H. G, 2010).

O aumento de vazão de gás de plasma resulta em maior rigidez do arco, mas o excesso traz maior penetração acompanhada de prejuízo ao acabamento superficial, e maior velocidade do jato plasma e turbulência, causando menor eficiência do gás de proteção, irregularidade no transporte do pó, poros e inclusão de óxidos, (SILVA, R. H. G, 2010).

Por intermédio de modelamento e simulação via software de elementos finitos, foi avaliado o comportamento da pressão do arco sobre a poça metálica para diferentes vazões de gás de plasma (SCHNICK, M. et al, 2006), como mostrado na figura 2.116.

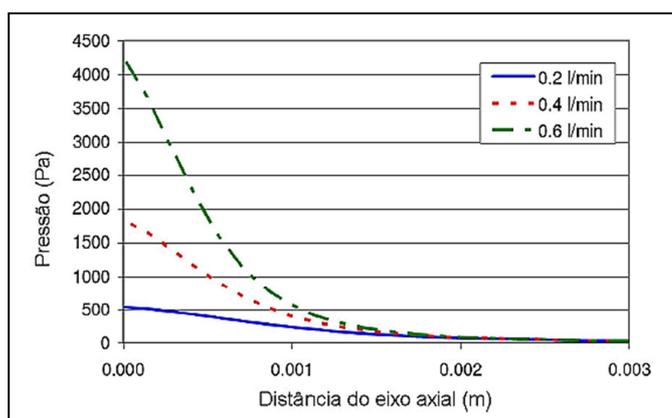


Figura 2.116: Relação entre a pressão sobre a poça e a vazão do gás de plasma em simulação por elementos finitos (Condições de simulação apresentadas: $I = 120$ A, $V_{gpl} = 0,3$ l/min, $V_{gprot} = 9,0$ l/min, $DBP = 10$ mm) (Adaptado de SILVA, R. H. G, 2010).

Segundo MARCONI, M. (2002) em consequência da redução da vazão de gás de plasma se obtém aumento do calor transferido ao bico constritor. Isto decorre do fato de que o invólucro de gás frio que isola a superfície do orifício constritor (como explicado anteriormente neste item) também se reduz juntamente com a velocidade do gás de plasma. (SILVA, R. H. G, 2010).

Sem citar outras condições, MARCONI, M, (2002) exemplifica uma redução de calor aportado ao bico constritor de 30 % com o aumento na vazão do gás de plasma de 1,5 l/min para 3,0 l/min. No mesmo trabalho se apresenta a figura 2.117, que mostra um alongamento das isotermas com aumento da vazão do gás de plasma (medições por espectrofotometria).

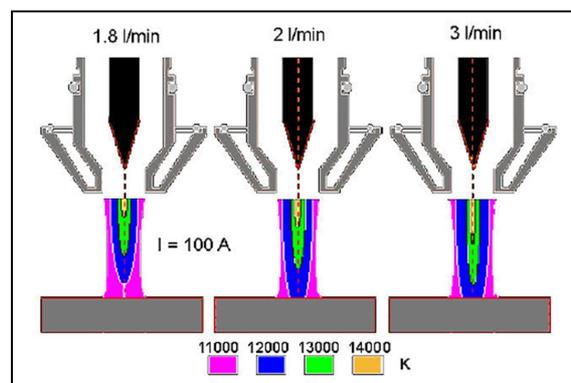


Figura 2.117: Distribuição radial da temperatura do arco, para diferentes vazões de gás de plasma (Adaptado de SILVA, R. H. G, 2010).

MATSUDA, F. et al, (1990) relata que um aumento na vazão de pó constringe e refrigera a coluna do arco, surgindo o *efeito pinch térmico* (não explicado detalhadamente no texto), resultando em penetração *finger shape* (e maior profundidade) devido à maior temperatura e velocidade do plasma, na soldagem de revestimento com carbonetos em pó (TiC, NbC, SiC) sobre liga de Al. Por outro lado, este mesmo efeito causa maior agitação da poça, expulsando gases e reduzindo porosidade.

Observa-se que tanto a vazão de pó quanto a vazão de gás de plasma, exercem grande influência sobre a diluição, conforme gráfico mostrado na figura 2.118.

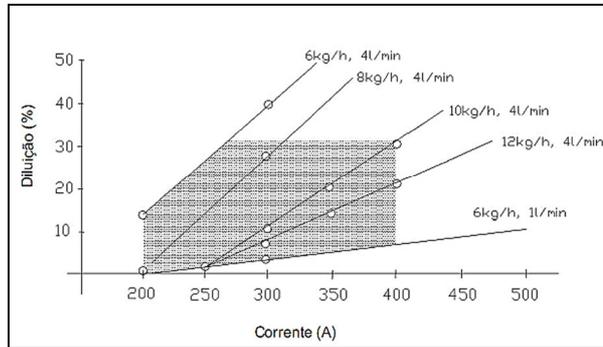


Figura 2.118: Diluição versus corrente do arco principal em diferentes vazões de pó e de gás de plasma (Adaptado de SILVA, R. H. G, 2010).

Para melhor visualização do efeito do He sobre os parâmetros de soldagem quando adicionado ao gás de arraste no processo PTA, o gráfico da figura 2.119 exprime a tensão e potência de soldagem relativos aos dados expostos na tabela 2.7. Nota-se um crescimento esperado de ambos os valores, que pode ser atribuído ao maior potencial de ionização do He (SILVA, R. H. G, 2010).

Ar			Ar+50%He			He		
Im* (A)	Um* (V)	Pm* (kW)	Im* (A)	Um* (V)	Pm* (kW)	Im* (A)	Um* (V)	Pm* (kW)
111,5	31,7	3,5	111,3	32,1	3,6	111,3	33,8	3,8
Vgprot (l/min)		Vga (l/min)	Vgpl (l/min)	Vs (cm/min)		DBP (mm)		
12,0 (Ar)		3,5	2,0 (Ar)	10,0		13,0		
Vmpo (g/min)		Øc (mm)	Re (mm)	Øe (mm)		Posição		
9,8		3,2	3,5	4,0		plana		
* valores medidos								

Tabela 2.7: Parâmetros de ensaios de soldagem para verificação da influência do gás He no gás de arraste de pó do processo PTA-P (valores medidos via SAP) (Adaptado de SILVA, R. H. G, 2010).

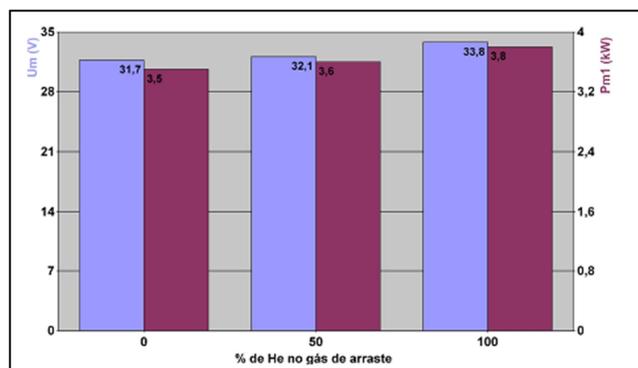


Figura 2.119: Variação da tensão e potência médias do arco principal em consequência da variação na composição do gás de arraste (Adaptado de SILVA, R. H. G, 2010).

2.6.4 Parâmetros geométricos e dinâmicos

O diâmetro do bico constritor juntamente com o recuo do eletrodo e a DBP (figura 2.120), DÍAZ, V. M. V. (2005) na tem papel importante no processo, considera que, para menores diâmetros constritores, a corrente do arco principal deve ser reduzida devido ao aumento da temperatura do arco, com a intenção de se evitar danificação do bico.

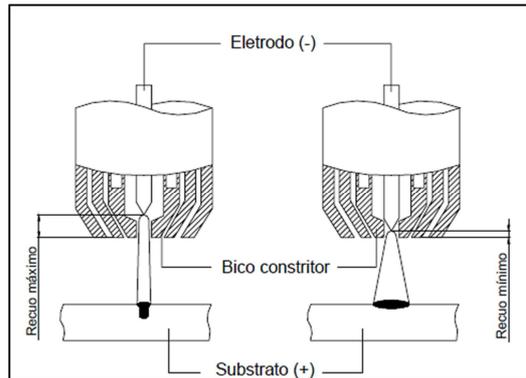


Figura 2.120: Representação esquemática da tocha PTA e influência do recuo do eletrodo sobre o perfil do cordão de solda (Adaptado de DÍAZ, V. M. V. 2005).

DÍAZ, V. M. V. (2005) também investigou o ângulo dos canais injetores, mas em relação à superfície inferior do bico constritor (figura 2.121). Um ângulo de 30° resultou em partículas não fundidas e falta de fusão nas laterais do cordão, o que não ocorreu para 60°. No último caso, o gás de arraste incide diretamente sobre a poça (maior distância focal, igualada à DBP), deslocando-a para as laterais e causando melhor fusão nestes pontos. O autor menciona resfriamento da poça pelo gás de arraste, o que, neste caso, contribuiria para maior penetração nas laterais do cordão. Outra hipótese seria a maior densidade de corrente nas laterais, causando também maior convecção, pois de fato há um achatamento do arco na direção transversal.

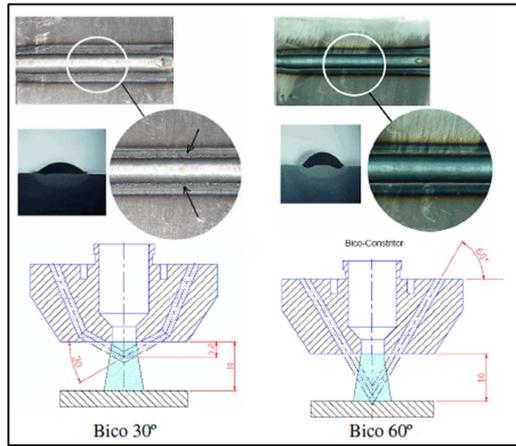


Figura 2.121: Efeito do ângulo dos canais de injeção de pó em relação ao bico constritor (Adaptado de DÍAZ, V. M. V, 2005).

DÍAZ, V. M. V. (2005) afirma que a largura do cordão está diretamente relacionada com o diâmetro do orifício constritor, maior calor é aportado à peça para menores diâmetros, devido à maior tensão do arco, e que a eficiência térmica não varia significativamente. (SOM, A. I, 2006).

É recomendado em que o diâmetro constritor (grau de constrição) deve ser controlado de modo que não haja sobreaquecimento do pó injetado (DESIR, J.L, 1983). Um valor de 4,8 mm foi considerado máximo para o diâmetro constritor, sem que haja comprometimento da abertura do arco piloto por pulsos de alta frequência e alta tensão. (DÍAZ, V. M. V, 2005)

Com o aumento da distância bico peça a penetração é reduzida o que pode ocorrer pelo afastamento da peça das isotermas de maior temperatura do arco plasma, provenientes do eletrodo, conforme figura 2.122.

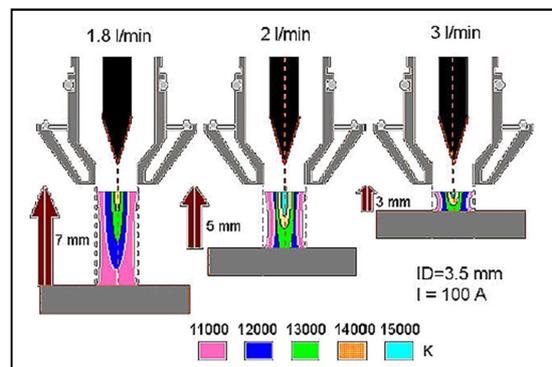


Figura 2.122: Regiões isotérmicas do arco, de acordo com variação da distância bico peça (ID = diâmetro do orifício constritor, I = corrente do arco principal) (Adaptado de SILVA, R. H. G, 2010).

No trabalho de Hallén et al (1991) são mostrados os resultados em relação à distância bico-peça para dois níveis: 15 e 20 mm. A Figura 2.123 mostra que à medida que aumenta a distância bico-peça o grau de diluição diminui.

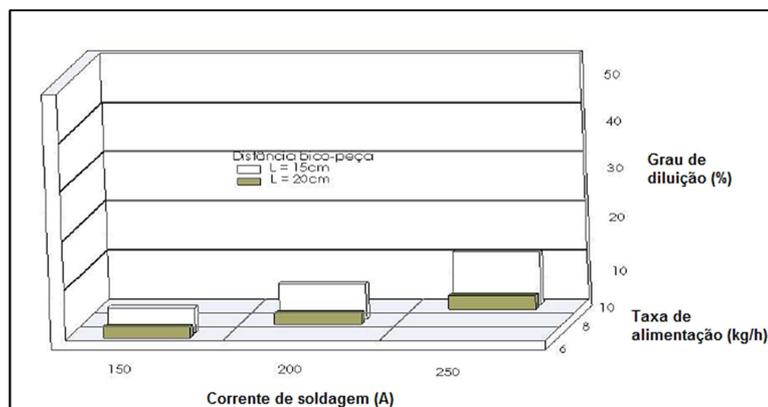


Figura 2.123: Efeito da diluição em função da distância bico-peça, corrente e taxa de deposição (Adaptado de Hallén et al, 1991).

2.6.5 Substrato

Um parâmetro raramente citado é a própria natureza do metal de base, ou substrato. Não obstante, há processos de revestimento convencionais que chegam a 20 % de diluição, demonstrando que a composição química do substrato é relevante para o desempenho do revestimento. (SILVA, R. H. G, 2010).

2.6.6 Consumível: Granulometria do pó

Ligas metálicas em pó para deposição por PTA devem apresentar determinadas características tecnológicas que tornem seu processamento viável. A primeira a ser colocada diz respeito à granulometria.

Sua determinação padronizada se faz através do peneiramento de 100,0 g de pó, em peneiras normalizadas de diversas aberturas de malha, e a separação estatística mássica, num histograma, de partículas de determinados diâmetros em torno de um valor médio. O exemplo da figura 2.124 mostra uma faixa granulométrica de 100 µm a 160 µm (SILVA, R. H. G, 2010).

No que tange ao processo de fabricação, existem a atomização e o trituramento. A atomização consiste na fusão da liga em um cadinho, seguida pela queda do metal líquido por um ou mais bocais verticais, conforme figura 2.125.

Esse veio líquido é rasgado por um violento jato de ar, água, vapor ou gases (inertes ou não). As gotas metálicas assim formadas solidificam durante a queda dentro de outro recipiente e são refrigeradas na sua base. Depois de secas, são peneiradas para separação.

A forma e distribuição dimensional das partículas podem ser reguladas pelos parâmetros de atomização, como temperatura, pressão, ângulo do jato e meio de atomização, sendo que se podem adicionar componentes que atuam na tensão superficial, estimulando a formação esférica. Para PTA é utilizado gás inerte, que também favorece a formação esférica. Neste caso a distância percorrida pela partícula até a solidificação é maior que no caso de atomização com água. Assim a tensão superficial tem tempo de atuar, fomentando o formato esférico, enquanto o jateamento com água resulta em solidificação muito rápida, o que mantém a forma irregular do grão (SILVA, R. H. G, 2010).

Material	Tamanho (µm)	Morfologia (MEV)
Cr	50 - 100	
Cu	43 - 50	
Ni	65 - 150	

Figura 2.124: Faixa granulométrica de 50 µm a 150 µm (Adaptado de SILVA, R. H. G, 2010).

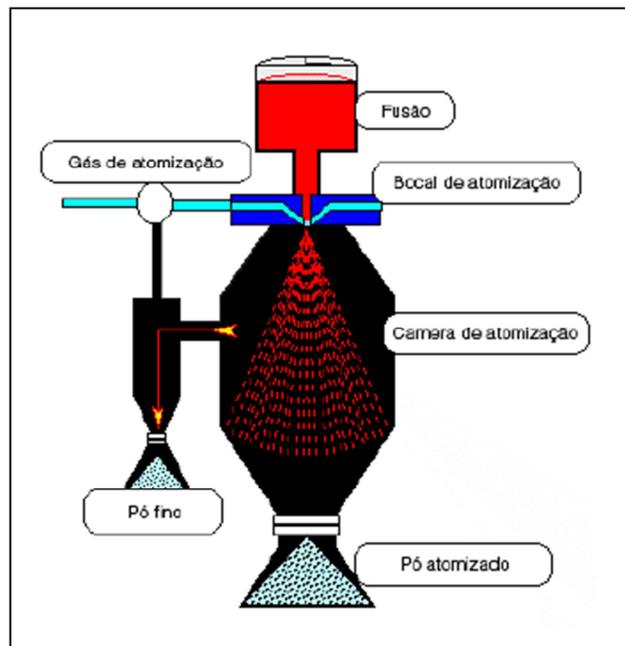


Figura 2.125: Esquema de fabricação do pó consumível, usado no processo de soldagem de revestimento plasma pó (Adaptado de SILVA, R. H. G, 2010).

Na figura 2.126, temos uma foto de uma tocha de soldagem de revestimento plasma pó expelindo pó consumível metálico.



Figura 2.126: Tocha de soldagem de revestimento plasma pó expelindo pó consumível metálico (Adaptado de SILVA, R. H. G, 2010).

Em relação à densidade do material, partículas muito leves sofrem um “espalhamento” no arco, como foi reportado para o caso de revestimento de alumínio com ligas duras, causando piora na proteção do gás sobre a poça metálica, prejudicando o acabamento superficial (SiC, com menor massa específica, obteve faixa mais estreita de tolerância da vazão do pó que TiC e NbC), (MATSUDA, F. et al, 1990). Assim, aparentemente, para ligas de menor densidade os valores de vazão de gás devem ser

verificados em caso de dano à qualidade da solda, com o intuito de melhorar a alimentação.

Geralmente, ao se abordar os pós para processamento por PTA, se fala em densidade aparente, que consiste no quociente entre a massa do pó e o respectivo volume ocupado, dependendo, portanto, não só da composição química, mas também da granulometria e morfologia (MARCONI, M. 2002).

Às condições de armazenagem de ligas em pó deve ser dada atenção, assim como é feito para arames e eletrodos revestidos. Neste campo, diferentes recomendações são fornecidas. Segundo SUN, Z.; HUANG, Z.H. (1998) e BEWLEY, J.G. (1978), um aquecimento dos pós em forno entre 120° C e 150° C garante a desumidificação.

2.6.7 Composição química

Sobre a composição química, temos alguns exemplos abaixo de trabalhos publicados sobre ligas utilizadas na soldagem PTA (SILVA, R. H. G, 2010)-, por exemplo:

Ligas de alumínio (KABATNIK, L, 2002);

Ferro e suas ligas (BEWLEY, J.G, 1980);

Cobalto e suas ligas (DESIR, J.L., 1983);

Níquel e suas ligas (WAHL, W; KRAUSKOPF, F, 1993); Carboneto de tungstênio em matriz metálica (DRAUGELATES, U. et al, 1995). WAHL, W.; KRAUSKOPF, F.(1993), chama atenção para a impossibilidade de utilização, para PTA, de pós de baixo ponto de vaporização, como Zinco, por causa das altas temperaturas do plasma (> 15000 K, aprox. 14700° C). BEWLEY, J.G. (1980), apresenta a limitação de soldagem por PTA à cerâmicos, óxidos, materiais refratários, materiais muito reativos como titânio, e alumínio. Quanto ao último material, no entanto, a informação vai de encontro à experiência de outros autores, como KABATNIK, L.(2002) e WAHL, W.; KRAUSKOPF, F. (1993).

2.6.8 Escoabilidade

A geometria do pó influencia a escoabilidade, tendo reflexos sobre a taxa de alimentação, de modo que pós atomizados a gás esféricos têm melhor escoabilidade. Para granulometrias muito baixas, entretanto, mesmo os esféricos possuem escoabilidade reduzida. Alguns valores de escoabilidade são apresentados na tabela da 2.8. (SILVA, R. H. G, 2010).

Faixa granulométrica	Escoabilidade
60 mesh a 325 mesh (45 μm a 250 μm)	9,5 a 13 seg/50g [13]
50 μm a 150 μm	14,0 a 14,6 seg/50g [94]
63 μm a 180 μm	14,8 a 15,5 seg/50g [94]
42 μm a 125 μm	14,4 a 15,0 seg/50g [94]

Tabela 2.8: Escoabilidade de pós para PTA-P, os valores podem variar de acordo com a composição química da liga (Adaptado de SILVA, R. H. G, 2010).

2.7 Poça de fusão e solidificação

A solidificação do metal líquido da poça de fusão ocorre de acordo com os fundamentos de solidificação, nas etapas de nucleação e crescimento as quais influenciam o desenvolvimento da microestrutura dos revestimentos (soldagem de materiais dissimilares).

Na soldagem, diferentemente da fundição, a poça líquida e a região sólido e líquido (*mushy zone*) são bem menores dificultando a penetração do metal líquido entre os braços secundários para promover a quebra das dendritas (ermo derivado da palavra grega **dendron**, que significa "árvore", pois o cristal ramificado resultante tem a aparência de um *pinheiro*), as quais são muito curtas e agrupadas densamente. (Bond, D., 2008), conforme figura 2.127 abaixo.



Figura 2.127: Formação de dendritas durante a solidificação da poça de fusão (Adaptado de Ciências dos Materiais, 2016).

A literatura afirma que, o processo PTA produz estrutura mais refinada quando comparada com outros processos de soldagem, o que torna as dendritas ainda mais curtas e agrupadas densamente. Mesmo que ocorra a quebra, os finos braços das dendritas, menores que as partículas atomizadas, teriam pouca chance de atuar como multiplicadores na estrutura cristalina, pois iriam ser refundidos. Portanto nos revestimentos obtidos pelo processamento PTA, os resultados sugerem que a etapa de crescimento não é preponderante na obtenção do refinamento da microestrutura e sim a etapa de nucleação (Bond, D., 2008).

Além da nucleação heterogênea a partir dos grãos do substrato, existe ainda mais um mecanismo que permite a nucleação dentro da poça fundida. Por causa da convecção, da temperatura da poça de fusão e também da agitação promovida pelo jato de plasma, as pontas das dendritas podem ser quebradas, e estes fragmentos se tornam núcleos para crescimentos de novos grãos no interior da poça fundida. Este fenômeno é interessante do ponto de vista das propriedades mecânicas, pois ele promove um refinamento maior do depósito e/ou cordão (DOS SANTOS, R.L.C, 2003).

Ainda sobre o refinamento da microestrutura e partindo da premissa que nosso consumível é em pó e de tamanhos que variam de $45\mu\text{m}$ até $180\mu\text{m}$, analisaremos o impacto destas partículas na poça de fusão, ou melhor, a influência do material atomizado na solidificação.

Dependendo da massa das partículas e da intensidade de corrente utilizada no processo, estas são evaporadas (1), fundidas e aquecidas (2), fundidas (3), fundidas

parcialmente (4) ou aquecidas (5). A faixa de granulometria dentro de cada uma dessas fases depende dos parâmetros de processamento e claro da composição química do material, conforme figura 2.128 abaixo.

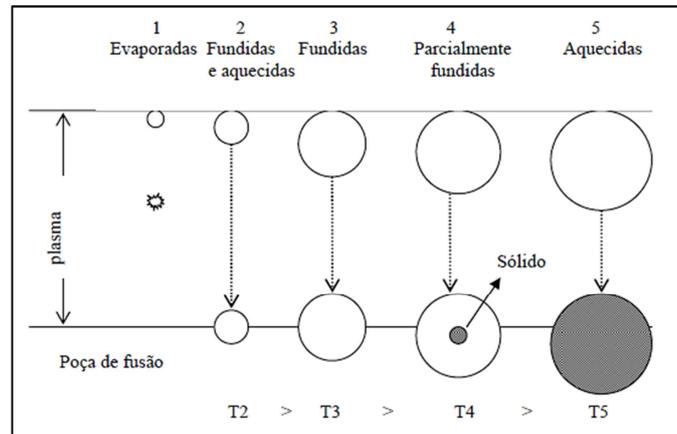


Figura 2.128: Representação esquemática do comportamento térmico das partículas, com diferentes massas, durante a passagem no plasma até a poça de fusão (Adaptado de Bond, D., 2008).

Transferindo este comportamento para a poça de fusão, podemos concluir que durante o processamento PTA as partículas atingem a poça de fusão com diferentes temperaturas uma vez que o material de adição utilizado possui uma faixa de granulometria (45 a 180 μ m), conforme figura 2.129. Além disso, as partículas, com temperaturas diferentes, atingem regiões de diferentes temperaturas na poça de fusão.

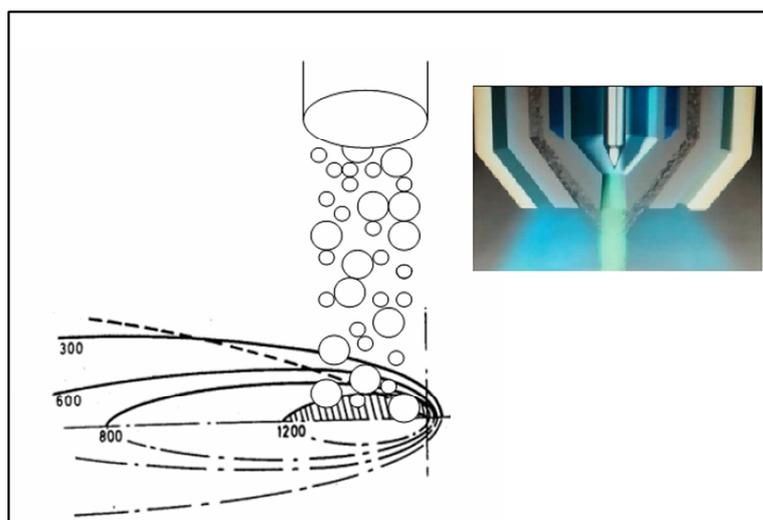


Figura 2.129: Desenho esquemático das gotas fundidas do material atomizado atingindo a poça de fusão com diferentes temperaturas em regiões de diferentes isotermas (Adaptado de Bond, D., 2008).

Depois que as partículas aquecem pela passagem no plasma, quando estas chegam à superfície da poça de fusão, são aquecidas pela poça de fusão, em estudos de partículas cerâmicas B₄C, a quantidade de calor absorvida pela partícula aumenta com o tamanho das partículas, pois estas chegam à poça de fusão com temperaturas menores. Este fator só é importante, quando partículas ainda sólidas chegam à poça de fusão, pois elas retiram calor do metal líquido e continuam seu aquecimento podendo chegar à fusão.

De acordo com esta fundamentação é possível que gotas que chegam à poça de fusão numa temperatura próxima ao ponto de fusão solidificam independentes, e as demais podem ser incorporadas à poça de fusão, estas gotas que solidificam independentes contribuem para o refinamento da microestrutura, também impactando na medição de dureza.

Além da nucleação heterogênea a partir dos grãos do substrato, existe ainda mais um mecanismo que permite a nucleação dentro da poça fundida. Por causa da convecção, da temperatura da poça de fusão e também da agitação promovida pelo jato de plasma, as pontas das dendritas podem ser quebradas, e estes fragmentos se tornam núcleos para crescimentos de novos grãos no interior da poça fundida. Este fenômeno é interessante do ponto de vista das propriedades mecânicas, pois ele promove um refinamento maior do depósito e/ou cordão.

2.8 Diluição

A soldagem de revestimento resistente à corrosão é a técnica de soldagem pela qual se deposita, sobre um substrato, uma camada com propriedades especiais. Dessa maneira, a liga da camada depositada deverá apresentar composição química e propriedades superiores daquelas providas pelo material de base ou substrato.

Sendo assim, como são utilizadas ligas com características diferentes, o produto obtido após uma soldagem de revestimento por fusão será composto pela composição química intermediária entre as duas ligas, o substrato e o metal de adição. A composição final do depósito e suas propriedades irão depender das composições e propriedades individuais de cada liga e da mistura que acontecerá entre elas durante a

fusão. A figura 2.130 mostra de maneira simples e esquemática um único cordão de solda depositado sobre um substrato de composição química diferente. O grau de mistura ilustrado nesse caso é definido como a porcentagem de diluição; “B” é a área da seção transversal correspondente a zona fundida que se localiza abaixo da linha de superfície do metal de base, enquanto que “A” representa a área da seção transversal da zona fundida localizada acima da linha da superfície do metal de base.

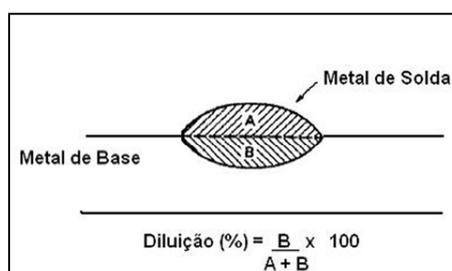


Figura 2.130: Esquema da diluição em uma solda de revestimento com um único passe (Adaptado de UFTPR, 2006).

Com outras palavras, na soldagem por fusão podemos definir diluição como a quantidade percentual de metal de base que entra na composição do metal de solda. A diluição pode variar desde valores muito baixos, como 5%, até 100% no caso de soldagem autógena (processo de soldagem onde não é utilizado material de adição).

A figura 2.131 ilustra esta característica em um esquema da seção transversal de uma junta soldada (ZEEMANN, 2003).

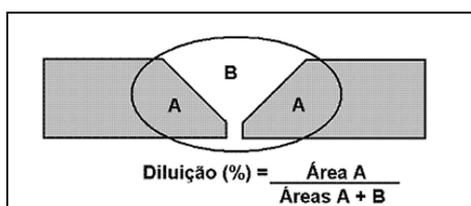


Figura 2.131: Desenho esquemático da diluição em uma junta soldada (Adaptado de UFTPR, 2006).

Uma importante ferramenta, empregada na soldagem de aços inoxidáveis e na soldagem de materiais dissimilares, para se prever tanto a microestrutura resultante da solda, quanto possíveis problemas de soldabilidade, em função da composição química analisada são os diagramas constitucionais, dentre eles o tradicional diagrama de Schaeffler (figura 2.132).

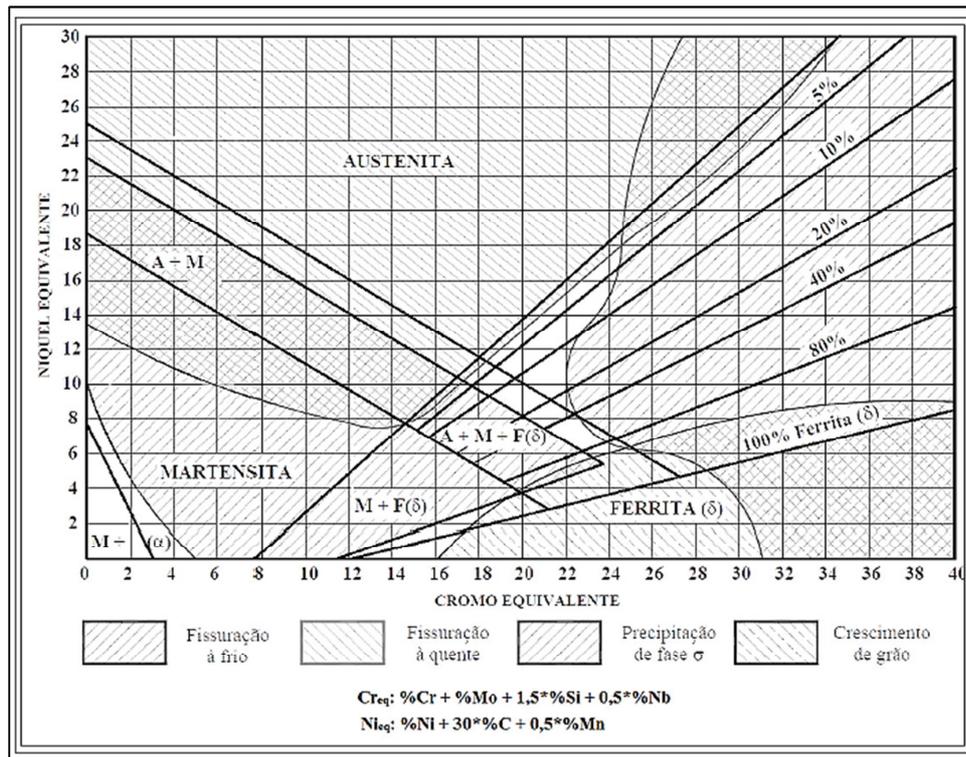


Figura 2.132: Diagrama de Schaeffler. (Adaptado de UFTPR, 2006).

Nas juntas de revestimento, onde um metal de adição com resistência à corrosão é depositado em um material de base que apresenta menores propriedades de resistência à corrosão, baixos valores de diluição são sempre desejados. Com baixos valores de diluição, a composição final do revestimento depositado por soldagem será próxima da composição do metal de adição com propriedades resistentes à corrosão, sendo assim as propriedades desejadas do revestimento serão mantidas.

Sempre é importante ressaltar que deverá existir uma quantidade mínima de diluição requerida para que exista união metalúrgica entre o revestimento soldado e o metal de base

A soldagem de revestimento com ligas de níquel é largamente utilizada para assegurar resistência à corrosão em componentes de aço.

Em particular, tem sido extensivamente usados consumíveis de soldagem de Ni-Cr-Mo para aplicações em água do mar. A tempos tem sido reconhecido que a resistência à corrosão dos metais de adição de alta liga pode ser afetada pela segregação de alguns elementos durante a solidificação e, em casos de juntas dissimilares, pela diluição nos materiais.

O aspecto mais importante na aplicação de revestimentos por fusão é a diluição do metal de solda pelo metal de base, resultando em uma redução das propriedades do material de adição. O controle da diluição é vital, economicamente, para o processo de revestimento por soldagem, devido ao alto custo dos metais de adição altamente ligados.

Também deverá existir uma mínima quantidade de diluição requerida para satisfazer união metalúrgica necessária entre o metal de base e o revestimento soldado. A diluição mínima recomendada é de 10% a 15%.

Do ponto de vista metalúrgico, a composição e as propriedades do revestimento são fortemente afetadas pela diluição obtida. Devido a essas influências, a quantidade de diluição, que será obtida com cada processo de soldagem, deve ser considerada para uma seleção adequada da combinação do material do revestimento e do processo de soldagem, requerido para cada aplicação em particular.

A prática mais comum para o controle da diluição é o controle e restrição do elemento prejudicial ao desempenho do revestimento. Um teor máximo de 5% de ferro nas camadas superficiais do revestimento tem sido considerado como desejável quando o material de Inconel 625 é utilizado como revestimento. Assim o teor de ferro permitido nesta liga foi ajustado para permitir uma boa resistência à corrosão. Consumíveis de soldagem de Inconel 625 com teores de ferro abaixo de 2% têm sido propostos como vantajosos na obtenção de depósitos de solda com teores menores do que 5% de ferro na sua superfície.

Uma das mais importantes características de um depósito PTA, de acordo com os requisitos de qualidade que se têm, é a diluição, uma quantificação da mistura entre o material de base e o material de adição resultante no metal de solda. Uma baixa diluição resulta em maior pureza da composição química do revestimento em relação a contaminações do metal de solda pelo material de base. O valor da diluição depende de parâmetros do processo: vazão de pó (V_{mpo}), corrente de soldagem, velocidade de soldagem (V_s), tecimento, vazão de gás de plasma (V_{gpl}), gases e materiais utilizados, diâmetro do bico constritor, granulometria do pó aportado.

A diluição para o PTA pode ser reduzida à ordem de 5 % (ou 2% a 3%) em vantagem sobre outros métodos (com MIG ou TIG: 30 % ou 20% a 25%; com MIG: 20% e com ER: 27%; com TIG: 8% a 13%). A tabela 2.9, mostra uma comparação da

diluição média para diferentes processos de soldagem a arco, mesma composição do material de adição e mesmo material de base. Com baixa diluição, é possível conseguir a resistência almejada em um ou poucos passes de soldagem, reduzindo custo de materiais, o que também é proporcionado pela possibilidade de se utilizar, para o corpo da peça, materiais não ligados de menor preço (SILVA, R. H. G, 2010).

Forma do material de adição	Processo de soldagem	Diluição média
Vareta	TIG	20%
Eletrodo Revestido	ER	25%
Pó	PTA-P	3%

Tabela 2.9: Comparação da diluição média entre diferentes processos (Adaptado de SILVA, R. H. G, 2010).

A menor diluição propiciada pelo PTA se deve ao fato de que neste processo a energia nunca está diretamente focalizada sobre o substrato (BEWLEY, J.G.1980). Ao invés disso, a poça metálica está sempre sob o arco, tendendo a isolar o substrato do contato direto com o arco. A maior parte do aporte térmico à peça deve ser absorvida pelo pó que é aportado (MARCONI, M. I, 2002). Atribui-se a menor diluição do PTA-P à transmissão de calor da poça ao pó incidente. Esse fenômeno resulta num resfriamento da poça. (PAVLENKO, A, 1996). O mencionado isolamento realizado pela poça pode realmente contribuir para baixa diluição, mas, em experiências no LABSOLDA, se nota que valores altos de corrente do arco principal ou vazão de gás de plasma podem causar grande depressão sobre a poça e conseqüente alta penetração. Acredita-se também que o projeto da tocha, quanto ao tipo de injeção de pó, tenha influência decisiva sobre essa questão (SILVA, R. H. G, 2010).

A determinação do valor de diluição, nos depósitos com regiões com falta de fusão, foi realizada pela variação da composição química, especificamente através da medição da relação dos teores de Fe no depósito e no substrato (YAEDU, 2005), medidos em 1mm² em cada região, pela análise em microscópio eletrônico de varredura, com microsonda acoplada para análise de energia dispersiva de raio-X (EDAX), figura 2.133. Como o fabricante da liga indica um máximo teor de Fe de 3% no material de adição, este valor foi subtraído do teor medido no revestimento após a deposição.

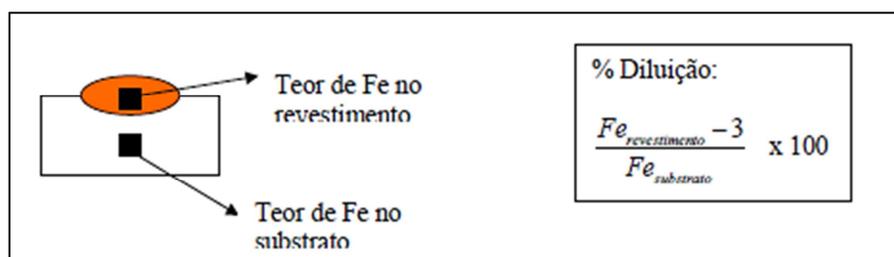


Figura 2.133: Medida de diluição pela relação dos teores de Fe (Adaptado de Bond, D, 2008).

Existem vários métodos que podem ser utilizados para a determinação da diluição em juntas soldadas e também o resultado dessa diluição. Desses métodos, dois dos principais são os métodos por análise química (API, 2004) e por macrografia.

No caso da análise química, esse teste é utilizado para verificar a composição química do revestimento depositado sobre o substrato, para que as propriedades do revestimento sejam garantidas para tanto, se faz necessário que o revestimento depositado por soldagem apresente uma composição química igual ou muito semelhante à composição química do metal de adição utilizado, esse foi o método escolhido para determinação, sobretudo do teor de Fe em função de se atender aos requisitos das normas citadas neste trabalho (UFTPR, 2006).

Conforme requisitos de normas que são utilizadas para a fabricação de equipamentos submarinos destinados à extração e controle de petróleo e gás, como por exemplo, a API 6 A para se qualificar um procedimento de soldagem de revestimento resistente à corrosão, se faz necessário, dentre outros testes, que seja executada uma análise química no revestimento.

Essa análise química deverá ser realizada no revestimento soldado a uma distância de 3 mm acima do metal de base. Uma outra maneira de se determinar a diluição de uma junta soldada e através de macrografia: a junta soldada é seccionada usando uma ferramenta de corte abrasiva. Após o corte a amostra é polida e atacada com uma solução de nital 2%. A área individual da seção transversal do metal fundido do substrato e a área do metal de adição depositado são medidos utilizando-se um sistema de análise quantitativa de imagem. Quando a diluição é determinada pelo método macrográfico, as áreas das seções transversais do metal de base fundido e do metal de adição depositado são determinadas através da divisão da área da zona fundida

localizada abaixo da linha do metal de base pela área total da zona fundida. No entanto, a diluição é na verdade um resultado das quantidades volumétricas V_{mb} e V_{ma} , onde V_{mb} é o volume fundido do metal de base e V_{ma} é o volume do metal de adição depositado.

Esses termos volumétricos são simplesmente transformados para termos de área quando as amostras são transversalmente seccionadas e as medidas da área da seção transversal do metal de base e da área da seção transversal do metal de adição são feitas. É importante ressaltar que para a transformação de volume em área seja feita, a área da seção transversal da amostra não deverá se alterar durante todo o comprimento da junta soldada. Para que as áreas da seção transversal sejam constantes ao longo do comprimento da solda, o volume do metal de adição depositado, V_{ma} , e o volume do metal de base fundido, V_{mb} , deverão ser constantes para uma mesma velocidade de soldagem.

2.8.1 Parâmetro que afetam a diluição

No processo de soldagem de revestimento, a diluição pode ser afetada por vários fatores. Dentre esses fatores podemos citar os seguintes: corrente elétrica de soldagem, diâmetro e comprimento do metal de adição, oscilação da tocha de soldagem, sobreposição dos cordões de solda, inclinação da tocha de soldagem, voltagem do arco, tipo de junta, processo de soldagem, temperatura de pré-aquecimento, velocidade de soldagem, e velocidade de alimentação do consumível.

Dentre todos esses fatores mencionados acima, podemos destacar os seguintes:

2.8.2 Corrente elétrica

O aumento da corrente elétrica faz com que a temperatura da poça de fusão seja maior. Este aumento de temperatura proporcionado pelo aumento da corrente elétrica faz com que sejam obtidos maiores valores de penetração e um aumento do volume de metal fundido e da largura do cordão de solda o que provoca aumento na diluição.

Esses fatores fazem com que as trocas químicas entre materiais dissimilares, como no caso de revestimentos resistentes a corrosão, sejam maiores, fazendo assim com que a diluição do processo seja aumentada. O aumento da diluição proporcionado pelo aumento da corrente elétrica de soldagem tende a diminuir a qualidade do revestimento, principalmente quando o objetivo do mesmo é proporcionar resistência à corrosão ou elevar a sua dureza.

Por outro lado, valores de corrente elétrica baixos diminuem a energia de soldagem, dificultando a fusão do material de base, fazendo com que o aparecimento de defeitos de soldagem, como falta de fusão sejam mais frequentes.

Sendo assim, correntes elétricas baixas não garantem a união metalúrgica entre o revestimento depositado e o substrato, inviabilizando a utilização do revestimento, quando o mesmo é submetido a qualquer tipo de esforço mecânico, que tenda a separar o revestimento do substrato.

2.8.3 Diâmetro do metal de adição

A influência do diâmetro do metal de adição no fenômeno de diluição está relacionada com o fato que pequenos diâmetros de metais de adição necessitam de menores valores de energia de soldagem, visto que a soldagem com metais de adição de pequeno diâmetro pode ser realizada com poças de fusão menores quando comparadas com metais de adição de diâmetro grande. Dessa maneira, a soldagem é realizada consequentemente com baixos valores de corrente, porém com a total união metalúrgica entre o revestimento e o substrato. Sendo assim a soldagem com metais de adição com diâmetros pequenos são acompanhadas de baixos valores de diluição.

2.8.4 Distância entre os cordões de solda

Cordões de solda próximos (com maior sobreposição) reduzem a diluição, pois o cordão depositado funde uma pequena quantidade do metal de base e uma maior parte do metal de adição depositado no passe anterior. Sendo assim a poça de fusão apresenta uma pequena quantidade de metal de base fundida. Ao contrário, cordões depositados

com largura maior ocasionam uma maior fusão do metal de base na poça de fusão devido ao fato da sobreposição dos cordões serem menores (AWS, 1998).

A utilização de passes de soldagem com maior sobreposição acarretam espessuras de revestimento maiores, e conseqüentemente maior gasto de material consumível por camada. Por outro lado, a utilização de passes com menor sobreposição tem como resultado espessuras de revestimentos menores, e conseqüentemente menor gasto com o metal de adição, porém devido aos altos valores de diluição, pode ser necessário a deposição de mais uma camada de revestimento extra, para que as propriedades do revestimento sejam as esperadas.

2.8.5 Oscilação da tocha

Maiores larguras de oscilação da tocha proporcionam redução dos valores de diluição. A deposição com cordão retilíneo apresenta valor de diluição máximo. A frequência da oscilação também é um fator que afeta a diluição. Como regra, altas frequências de oscilação proporcionam baixos valores de diluição.

Com a oscilação, existirá mais metal de adição fundido proveniente do passe anterior e menor quantidade de material de base fundido, fazendo com que a diluição seja menor. De maneira geral existem 3 (três) maneiras básicas de oscilação conforme apresentado na figura 2.134 (UFTPR, 2006).

A oscilação em pêndulo é caracterizada pela leve hesitação em ambos os lados do cordão, hesitação essa que proporciona nessas regiões uma penetração levemente maior e também maior diluição nessas extremidades.

O comprimento do arco de soldagem é continuamente alterado durante a soldagem com oscilação em pêndulo, resultando em variação das características do arco durante a execução da soldagem.

A oscilação em linha apresenta aproximadamente os mesmos resultados da oscilação em pêndulo, porém apresenta uma grande vantagem que é a manutenção do comprimento do arco de soldagem e dessa maneira a conseqüente manutenção das características do arco durante o processo de soldagem utilizando essa técnica.

A oscilação em linha reta com velocidade constante produz menores níveis de diluição e garantem, para movimentos na horizontal, que o comprimento do arco de soldagem seja mantido sempre constante. Com essa oscilação o movimento é programado para que não exista uma permanência mais prolongada no final da oscilação, fazendo com o movimento não tenha um final, assim como ocorre nos outros tipos de oscilação.

Dessa forma a permanência mais prolongada nas extremidades laterais do cordão não acontece e conseqüentemente a soldagem do cordão apresenta uma homogeneidade de penetração, fazendo com que a maior penetração apresentada na oscilação pêndulo nas extremidades do cordão sejam eliminadas.

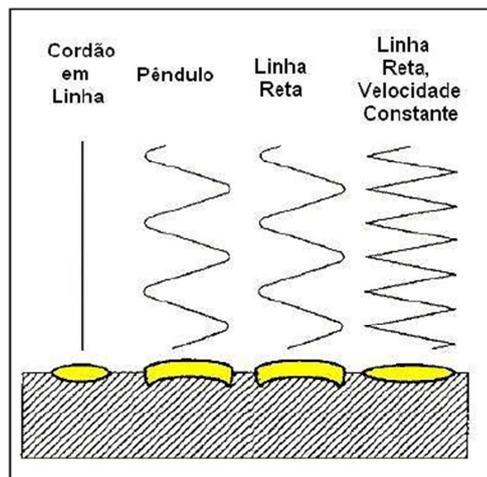


Figura 2.134: Técnicas básicas de oscilação e configurações dos cordões de solda (Adaptado de UFTPR, 2006).

2.8.6 Posição de soldagem e inclinação de trabalho

A posição de soldagem (figura 2.135) na qual o revestimento é aplicado tem uma importante função na quantidade de diluição que é obtida. Quando a soldagem é executada na posição sobre cabeça, a poça tende a cair sobre o arco, nessa situação, fica evidenciada menor penetração no metal de base e por consequência, menor diluição.

A ordem decrescente da diluição pela posição de soldagem é a seguinte:

- (1) Vertical-ascendente (maior diluição);
- (2) Horizontal;

- (3) Posição plana inclinada ascendente;
- (4) Posição plana sem inclinação;
- (5) Plana com inclinação descendente (menor diluição).

No processo de soldagem TIG automático, modalidade arame quente, ser muito utilizado na área de petróleo e gás, principalmente para o revestimento de furos de passagem de fluido, a maioria das soldagens executadas acontecem na posição horizontal, posição essa que proporciona altos níveis de diluição.

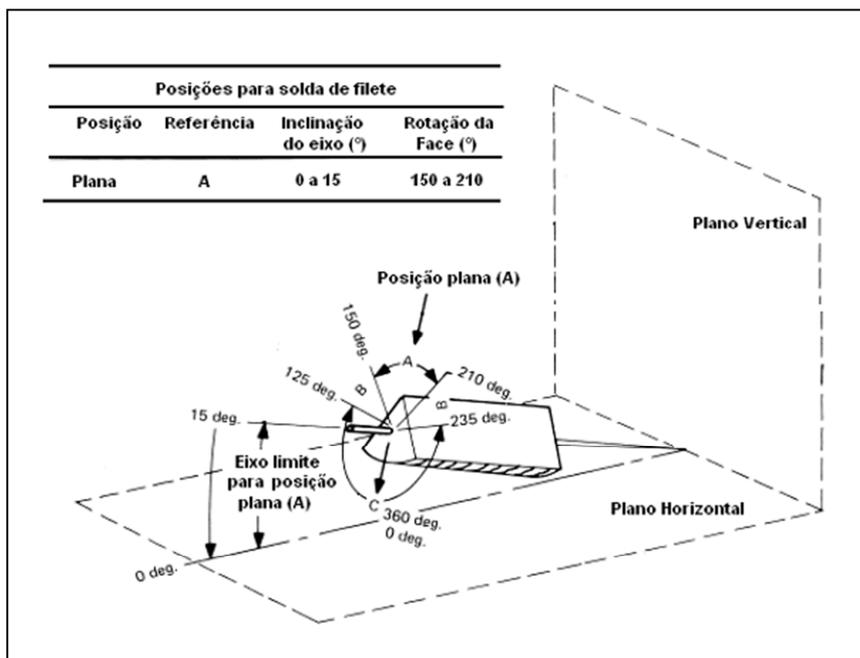


Figura 2.135: Posições de soldagem (Adaptado de UFTPR, 2006).

2.8.7 O binômio taxa de deposição x diluição

No processo de soldagem com eletrodo não consumível, como é o caso do processo TIG, a velocidade de alimentação do metal de adição está diretamente ligada a taxa de deposição. Com o aumento da velocidade de alimentação como resultado obtém-se um aumento da taxa de deposição.

A taxa de deposição por sua vez influencia diretamente a diluição. Quando a velocidade de alimentação do metal de adição aumenta, ocorre uma redução na diluição,

visto que uma quantidade maior de metal de adição está sendo adicionada na poça de fusão, dessa maneira, a porção do metal de base fundido será menor.

Quando a velocidade de alimentação do metal de adição é diminuída, a quantidade de metal de adição adicionada na poça de fusão é menor, fazendo com que uma porção maior do metal de base seja fundida e a diluição durante o processo aumente.

Por exemplo, no processo de soldagem TIG automático modalidade arame quente, a diluição do revestimento pode ser controlada pelo aumento da velocidade de alimentação do metal de adição, aliado a um aumento da temperatura de pré-aquecimento do metal de adição e diminuição da corrente de soldagem.

Uma vez que a diluição quantifica o grau de mistura do metal de adição com o metal de base, este de baixa resistência à corrosão ou ao desgaste abrasivo, quanto menor for a participação do metal de base no revestimento, maior será a eficiência deste na proteção contra a corrosão ou ao desgaste. É possível obter com PTA com pó revestimento de até 6 mm de espessura e 10 mm de largura com um único passe (dependendo da tocha utilizada). O revestimento feito com plasma com pó tem menor diluição que aquele obtido com plasma com arame, visto que na técnica com pó a energia nunca está diretamente focada no substrato; ao invés disto, a poça de fusão está sempre sob o arco elétrico, tendendo a isolar o substrato do contato direto com o arco.

Para efeito de comparação, as tabelas 2.10 e 2.11 apresentam as diluições dos principais processos empregados na soldagem de revestimento. Como se vê em especial na tabela 1, a soldagem com plasma empregando pó tem uma diluição bem menor que a do processo GTAW, o que torna o primeiro processo de soldagem, sob este aspecto, bem mais atraente que o segundo.

Tabela 2.10: Diluição dos diferentes processos empregados na soldagem de revestimento (Riowelding 2014).

Processo de soldagem	Diluição [%]	Observação
Plasma com pó	06 - 10	
Eletroescória com fita	08 - 20	
Arco submerso com fita	15 - 25	
Eletrodo revestido	15 - 30	
Arco submerso com um arame	15 - 30	CCEN
Arame tubular autoprottegido	15 -35	
Arame tubular com proteção gasosa	15 -35	
GMAW (MIG/MAG)	20 - 40	
GTAW (TIG)	20 - 40	CCEP
Arco submerso com um arame	30- 70	

Tabela 2.11: Diluição dos diferentes processos empregados na soldagem de revestimento (K. Corgan, J. HaakeK. Corgan e J.Haake, 2005). Levando em consideração a espessura do revestimento, taxa de deposição e diluição.

Processo	Espessura [mm]	Taxa de deposição [kg/h]	Diluição [%]
Oxiacetileno	1,5	≤ 1	1 - 5
Eletrodo revestido	3	1 - 4	15 - 30
GTAW (TIG)	1,5	≤ 2	5 -10
Plasma	2	≤ 10	2 -10
GMAW (MIG)	2	3 - 6	10 - 30
Arame tubular	2	3 - 6	15 -30
Arco submerso (arames)	3	1- - 30	15 - 30
Arco submerso (fita)	4	10 - 40	10 -25
Eletroescória (fita)	4	15 - 35	5 - 20

A figura 2.136 mostra a taxa de deposição de diferentes processos de soldagem de revestimento, comprovando que o processo plasma com pó deposita mais metal de adição que o processo GTAW com arame quente. (K. Corgan, J. HaakeK. Corgan e J.Haake,2005).Verifica-se, novamente, o enorme potencial do processo de soldagem de revestimento com plasma pó, quando comparado especialmente com o GTAW (TIG) hot wire (arames quente). Observando-se as principais características de revestimentos feitos com estes dois processos (Tabela 2.12), verifica-se que é possível obter um revestimento com PTA de uma única camada de 3 mm de espessura. Como a diluição é extremamente baixa e o teor de ferro no revestimento pode ser menor que 5%, então a deposição de só uma camada de superliga de níquel seria suficiente para conferir

internamente resistência à corrosão a um tubo, reduzindo consideravelmente seu tempo de revestimento.

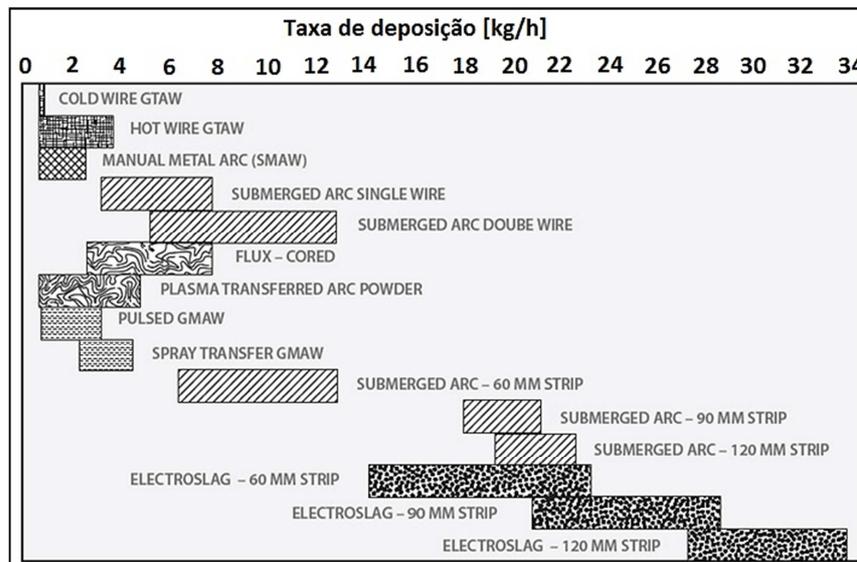


Figura 2.136: Taxa de deposição de diferentes processos de soldagem de revestimento (Adaptado de Nickel Institute Technical Series No 10 064).

Tabela 2.12: Taxas de deposição máximas aproximadas de diferentes processos de soldagem de revestimento. (K. Corgan, J. HaakeK. Corgan e J.Haake, 2005).

Processo de soldagem de revestimento	Taxa de deposição máxima aproximada [lb/h]
Laser de diodo direto de alta potência (HPDDL)	8
GTAW com arame frio	5
GTAW com arame quente	18
Plasma com arame quente	18
Plasma com pó	22
GMAW	15
Arame tubular com proteção gasosa	15
Arame tubular autoprotetido	40
Arco submerso	50+

2.9 Meio ambiente

Aspectos ambientais se tornaram já há tempos uma preocupação presente nos processos industriais, assim como também saúde e bem estar da força produtiva. Neste contexto o PTA apresenta uma clara vantagem em relação a processos de aspersão, nos quais há intensa geração de ruído e de pó residual. O melhor desempenho ambiental do PTA também fica evidente contra processos que formam escória. Nas informações da empresa COMMERSALD é mencionado um certificado do Instituto Ecoricerche, no qual, numa comparação de fumos de soldagem, o PTA mostrou menores níveis de emissão que processos convencionais de soldagem. (SILVA, R. H. G, 2010).

O melhor acabamento superficial resulta em menor quantidade de material removido mecanicamente (menos resíduos), para obtenção da geometria final desejada.

2.10 Consumível: Superliga de Níquel 625

O níquel é utilizado em armas, ferramentas e moedas em variadas proporções desde o início da civilização. No século XVIII, quando o níquel era fundido os mineradores alemães descobriram que o material branco fundido por eles era muito duro para ser martelado para alguma utilidade e pensaram que o material era amaldiçoado, assim o apelidaram de “Old Nick Copper” ou “Kupfer Nickel”. Como a sua separação era difícil em função da presença de sulfetos nos minérios e pela precariedade dos processos da época, sua utilização era muito restrita. Devido aos avanços tecnológicos, muitas novas ligas foram desenvolvidas, algumas são destacadas pela ASM Metals Handbook: descoberta do Monel em 1905; desenvolvimento do trabalho de Marsh que levou ao desenvolvimento das ligas Nimonic (Ni-Cr+Ti); trabalhos de Haynes em ligas binárias Ni-Cr e Co-Cr; trabalho de Paul D. Merica, o qual trabalhou com a utilização do níquel em ferro fundido, bronze e aços, assim como descobriu que Al e Ti levam a formação de endurecimento por precipitação nas ligas de níquel; adições de ferro-cromo (70Cr-30Fe) ao níquel para criar as ligas do tipo Inconel; desenvolvimento de trabalhos em 1920 com ligas Ni-Mo, que levaram ao desenvolvimento do Hastelloy; introdução de nova família de ligas Fe-Ni-Cr (Incoloy) com teores menores de Ni (20-40); uso da Metalurgia do Pó que levou à introdução das

ligas endurecidas por dispersão de óxidos; novas tecnologias de fundição que produziram uma solidificação direcional e desenvolvimento das superligas monocristalinas, utilizadas em paletas de turbinas. (OLIVEIRA, W.E., 2014).

A liga de UNS N06625 é uma liga a base de níquel, cromo e molibdênio. A presença desses elementos em sua composição proporciona a mesma característica de alta resistência à corrosão em diversos meios.

Essa liga é muito utilizada na forma de revestimento resistente à corrosão aplicado por soldagem em equipamentos para prospecção submarina de petróleo (LUNARDINI, 2002, DIMBYLOW e CHIPPERFIELD, 1983). Ela também é comumente conhecida nessa área como Inconel 625. O Inconel 625 é na verdade um dos nomes comerciais da liga UNS N06625. (OLIVEIRA, W.E., 2014).

Essa liga é indicada no revestimento de peças para equipamentos de prospecção submarina de petróleo, pela própria norma API 6A (API, 2004).

O metal de adição correspondente a liga de Inconel 625 é classificada conforme ERNiCrMo-3 de acordo como o ASME II parte C, SFA 5.14.

A composição nominal do metal de solda em porcentagem da classificação ERNiCrMo-3 conforme o ASME II (SFA-5.14) é 61% de níquel, 22% de cromo, 9% de Molibdênio e 3,5% de Nióbio mais Tântalo. O metal de adição dessa classificação também é usado para a soldagem de ligas de níquel-cromo-molibdênio contra ela mesmo, e ligas de níquel contra aços. Este metal de adição é recomendado para aplicações em temperaturas de operação que vão de temperaturas criogênicas a 540°C.

O Inconel 625 é uma solução sólida de matriz cúbica de face centrada. A liga pode conter carbeto, os quais são inerentes a esse tipo de liga, devido ao processo de solubilização a que o material é submetido após a sua fabricação. Os carbeto que podem ser encontrados são os MC e M₆C (ricos em níquel, nióbio e molibdênio). Adicionalmente, M₂₃C, um carbeto de cromo, aparece no material solubilizado e exposto a baixas temperaturas (SMC, 2003).

Os valores individuais apresentados na tabela 2.13 são os valores máximos. Muitas aplicações requerem a utilização da liga de Inconel 625(NiCrMo-3), conforme já comentado, principalmente pelas suas características de resistência à corrosão.

Porém, a fabricação de peças maciças dessa liga torna-se inviável devido ao alto custo do material. Como uma alternativa, essa liga é depositada por soldagem em materiais de base de aço carbono ou baixa liga, fazendo que exista uma redução do custo da matéria-prima, garantindo as propriedades de resistência à corrosão requerida para os projetos.

ELEMENTOS	% EM PESO
CARBONO (C)	0,10 %
MANGANÊS (Mn)	0,50 %
FERRO (Fe)	5,00 %
FÓSFORO (P)	0,02 %
ENXOFRE (S)	0,015 %
SILÍCIO (Si)	0,50 %
COBRE (Cu)	0,50 %
NIQUEL (Ni)	58 % (Mínimo)
ALUMÍNIO (Al)	0,40 %
TITÂNIO (Ti)	0,40 %
CROMO (Cr)	20,0 a 23,0 %
NIÓBIO + TANTALO (Nb+Ta)	3,15 a 4,15 %
MOLIBDÊNIO (Mo)	8,0 a 10,0 %
OUTROS ELEMENTOS	0,50 %

Tabela 2.13: Composição química em peso percentual do metal de adição conforme ASME II parte C (Adaptado de OLIVEIRA, W.E., 2014).

O ERNiCrMo-3 apresenta boa resistência a corrosão por ataque localizado tipo Pite. A resistência do material à corrosão por pite, pode ser medida através de número de PREn, (Pitting Resistance Equivalent Number), através da equação abaixo (GITTO e GOOCH, 1996)

$$PREN = Cr\% + 3,3Mo\% + 16N\%$$

Quanto maior o número PRE, maior a resistência à corrosão localizada por pite que apresenta o material. O metal de adição ERNiCrMo-3, comumente chamado de Inconel 625, apresenta teores de cromo na faixa de 20 a 23%, além de teores de molibdênio na ordem de 8,0 a 10%, fazendo com que a liga obtenha valores de PREN na faixa de 51. Este valor é bastante alto quando comparado com ligas inoxidáveis duplex e super duplex que apresentam PREN na ordem de 34 e 42 respectivamente.

Podemos verificar que o teor de níquel desse metal de adição é superior a 58%, o que faz com que o material apresente alta resistência à corrosão generalizada. O teor de ferro apresentado para o Inconel 625 é um valor máximo. Devido à diluição mínima

exigida para a união metalúrgica entre o substrato e o revestimento, caso o metal de adição seja utilizado perto do seu limite máximo de 5,0%, existe uma grande probabilidade que o revestimento final depositado apresente teores de ferro maiores que 5,0%. Por esse motivo, é aconselhável o uso desse consumível com teores máximos de ferro na ordem de 2,0% (GITTO e GOOCH, 1996).

As ligas de níquel podem ser susceptíveis ao aparecimento de trincas por solidificação, que é típica em ligas com ocorrência de solidificação na forma de austenita primária. Essas falhas estão associadas à presença de fases líquidas nos contornos de grãos ao longo da solidificação, provocando diminuição da tensão de escoamento (ASM Metals Handbook).

Na solidificação da soldagem, em consequência da diferença de solubilidade formam-se fases segregadas, que podem gerar fases de baixo ponto de fusão, aumentando a possibilidade de ocorrer trincas durante a solidificação. Elementos como fósforo e enxofre, aumentam a possibilidade de ocorrer trincas de solidificação em ligas da série 600, em consequência da tendência de expandir o intervalo de temperatura de solidificação. A tendência destes elementos é segregar no líquido durante a solidificação e pode reduzir a energia interfacial na interface sólido-líquido, que provoca um espalhamento dos filmes líquidos nos contornos de grãos e com a presença de tensões residuais durante o processo de soldagem, aumenta-se a possibilidade de trincas durante a solidificação com a utilização de MA à base de níquel (GOULD, E.K, 2010).

A adição de elementos como Mn, Si, Al e Ti reduzem a suscetibilidade de trincas durante a solidificação. As ligas que apresentam grande concentração de Nb, Cr e Mo, que são fortes formadores de carbonetos e fases intermetálicas, favorecem a formação de trincas durante o processo de solidificação (BUSO, S.J, 1999). Existem possibilidades de ocorrer trincas de baixa ductilidade (“Ductility Dip Cracking – DDC”), que estão associadas com os elementos considerados endurecíveis por solução sólida. Trata-se de um fenômeno que ocorre em estado sólido no intervalo das temperaturas “solidus” (T_s) e $0,5T_s$. Os materiais susceptíveis a formação desta trinca sofrem uma perda significativa de ductilidade neste intervalo de temperatura. Estudos recentes indicam uma melhor compreensão do modo de falha da “DDC”.

As regiões de maior concentração das “DDC” são os contornos de grãos nas zonas de ligação das ligas endurecíveis por solução sólida, ocorrendo em altas

temperaturas. A susceptibilidade da “DDC” pode ser reduzida por meio da formação intergranular de precipitados (NOECKER LI FF, DUPONT, J. N, 2009). Ligas endurecíveis por solução sólida podem sofrer efeitos de corrosão, em consequência da tendência de segregação no metal, favorecendo a formação de fases interdendríticas secundárias e gradientes de composição, as quais podem sofrer ataques secundários. O alívio de tensões podem gerar simultaneamente efeitos benéficos e prejudiciais às juntas soldadas que dependem da temperatura e do tempo utilizado no tratamento (CANTARIN, T.N.; NEVES, M.D. M, 2011).

Quando se realiza a soldagem de materiais dissimilares ocorre a formação de pequenas zonas descontínuas, duras e frágeis ao longo da interface da linha de fusão. Estas regiões de ordem micrométrica possuem uma variação química específica, mas intermediária entre o metal de base e o metal de adição podendo ser determinadas qualitativamente por cálculos de diluição. Segundo (KEJELIN N, Z.; BUSHHINELLI, A.J.A; POPE, A. M, 2005) são observados essas microrregiões provenientes de soldagem dissimilar, que são denominadas de Zonas Parcialmente Diluídas (ZPD's).

Um grande desafio é identificar a quantidade e a localização dessas regiões por não serem evidentes e nem contínuas. A presença destas áreas provoca diferenças de comportamento durante o ataque para revelar a microestrutura e pode provocar modificação das propriedades mecânicas da junta soldada. Na figura 2.137, observa-se a presença da ZPD entre o metal de adição e o metal de base com espessura de 35 μm .

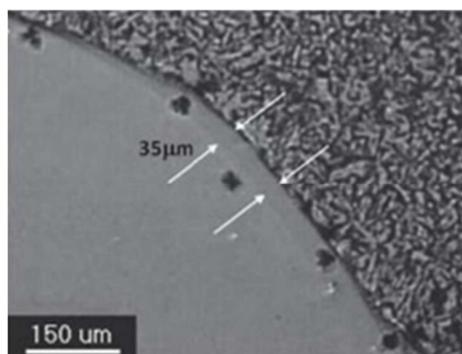


Figura 2.137: ZPD com 35 μm de espessura.

2.11 Alguns exemplos de aplicação do processo PTA

Dentre as aplicações podemos citar o revestimento para assentos de válvulas (automotivas, navais, conforme figura 2.138).



Figura 2.138: Revestimento metálico plasma pó para válvula automotiva naval.

Na figura 2.139 temos a figura de um componente chamado estabilizador utilizado na indústria de petróleo, necessitando de reparo em suas lâminas.



Figura 2.139: Estabilizador utilizado na indústria de petróleo, necessitando de reparo em lâminas (Adaptado de Kennametal,).

Já na figura 2.140 temos o estabilizador com as lâminas reparadas pelo processo PTA.



Figura 2.140: Estabilizador com lâminas reparadas pelo processo PTA (Adaptado de Deloro Stellite).

A figura 2.141 apresenta um estabilizador com lâminas recuperadas, sendo a soldagem PTA feita transversalmente.



Figura 2.141: Aplicação de consumível antiabrasivo pelo processo PTA sobre ferramenta manual (Adaptado de TBi).

2.12 Revestimento por colaminação

No cladeamento (revestimento) por laminação conjunta as chapas formam um sandwich, que é laminado posteriormente, conforme figura 2.142.

Objetivos: Evitar a contaminação do CRA com o material dos cilindros de laminação, diminuir a formação de óxidos; Evitar o empeno da chapa (alongamentos diferentes do metal base e do CRA). Na figura 2.143, temos a fabricação dos tubos cladeados.

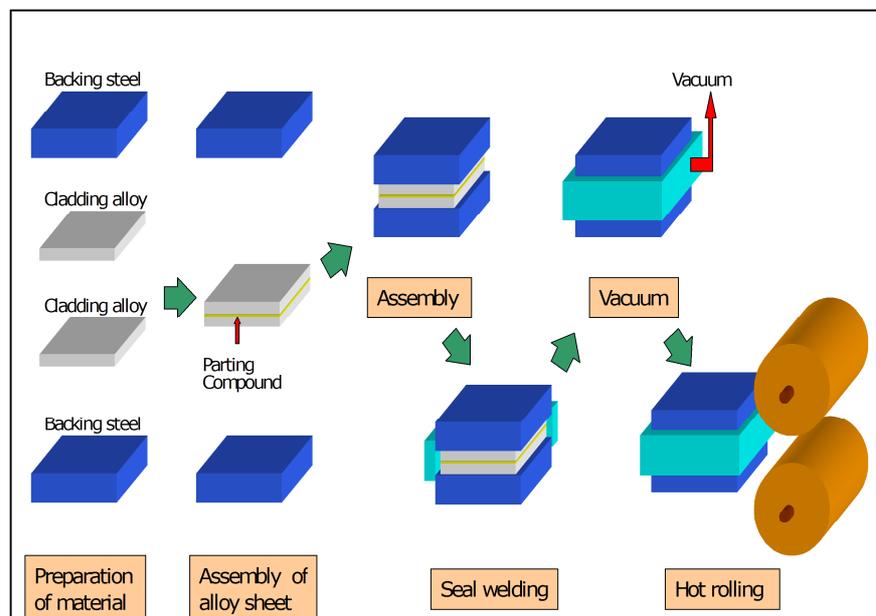


Figura 2.142: Colaminação de chapas cladeadas, ou seja, revestidas por uma liga CRA (corrosion resistant alloy) (Adaptado de SERRA, F.A.S, 2015).

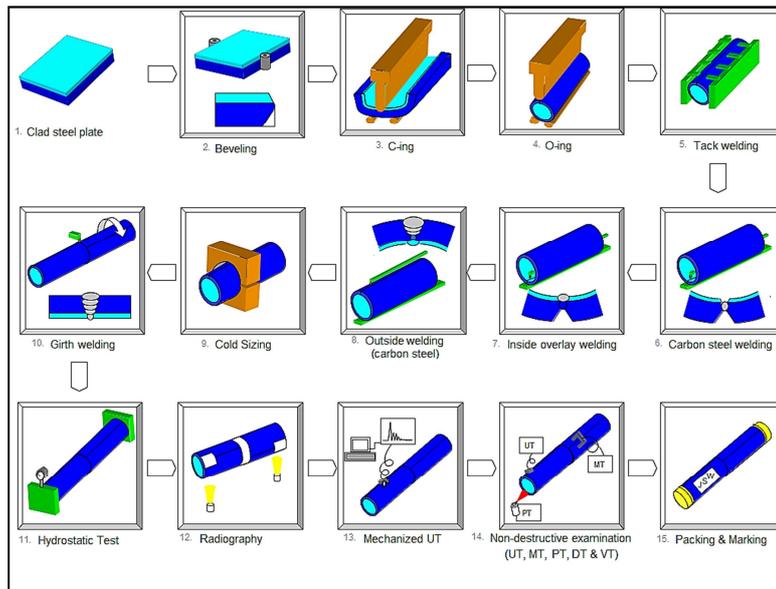


Figura 2.143: Fabricação de tubos cladeados (revestidos) por chapas colaminadas (Adaptado de Butting).

2.13 Comparações entre o PTA e TIG

Alguns trabalhos realizaram comparações diretas entre o processo PTA e outros, especificamente para operações de revestimento, sob diferentes critérios e condições. HUANG, X. et al. (1998) apresentou o gráfico em rede da figura 2.144, comparando qualitativamente o desempenho do PTA ou PTA com o do TIG em relação a diferentes aspectos.

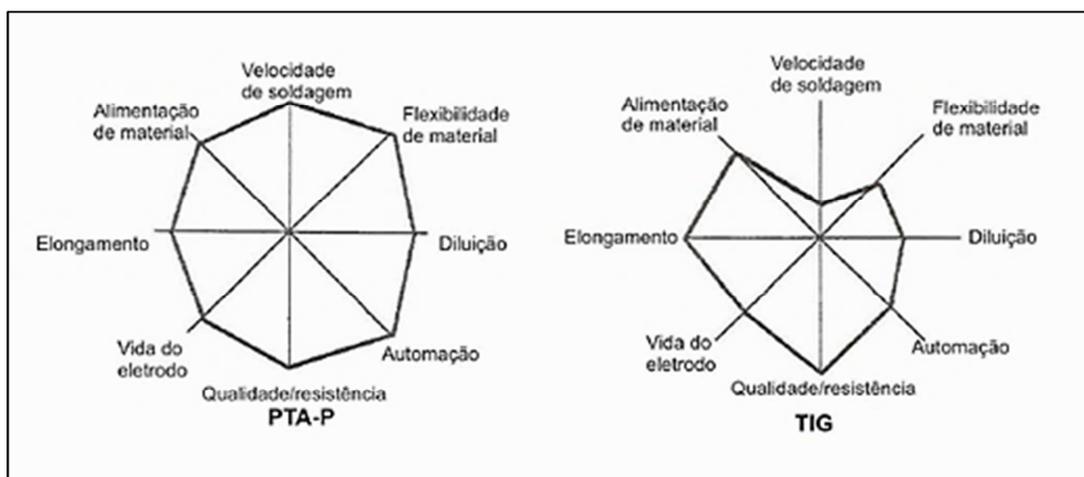


Figura 2.144: Comparação qualitativa de desempenho entre TIG e PTA (Adaptado de HUANG, X. et al. 1998).

2.14 Custos associados ao processo PTA x TIG automático

Segundo dados fornecidos pela empresa Commercald em 2011, esses foram valores obtidos confrontando vários processos de soldagem, dentre os quais podemos trazer atenção ao PTA e TIG AUT (TIG automático), conforme tabela 2.14.

Welding consumable and welding process	Coating weight	Weight including machining allowance	Weight including dispersion	Welding consumable cost	Arc times	Downtime	Welding times	Labor costs	Programming time	Programming costs	TOTAL COST
	Kg	Kg	Kg	€/Kg	Min	Min	Min	€	Min	€	€
PTAW Inconel 625	10,00	20,00	22,00	770,00	480,00	144,00	624,00	676,00	120,00	130,00	1576,00
Plasmig Inconel 625	10,00	20,00	22,00	770,00	266,00	80,00	346,00	375,00	120,00	130,00	1275,00
Mig Inconel 625	10,00	20,00	22,00	770,00	480,00	144,00	624,00	676,00	120,00	130,00	1576,00
Stell 6 PTAW	10,00	20,00	22,00	1034,00	600,00	180,00	780,00	845,00	120,00	130,00	2009,00
Stell 6 Plasma Twin	10,00	20,00	22,00	1034,00	300,00	90,00	390,00	422,50	120,00	130,00	1586,50
Stell 6 MIG	10,00	20,00	22,00	1760,00	480,00	144,00	624,00	676,00	60,00	65,00	2501,00
Stell 6 TIG MAN	10,00	16,60	16,60	780,20	1992,00	597,60	2589,60	2805,40	0,00	0,00	3585,60
Stell 6 TIG AUT	10,00	16,60	16,60	780,20	996,00	298,80	1294,80	1402,70	60,00	65,00	2247,90
Filo MIG Inox	10,00	20,00	22,00	198,00	1046,40	156,96	1203,36	1299,24	0,00	0,00	1497,24
Plasmig Inox	10,00	20,00	22,00	253,00	732,48	109,87	842,35	912,55	24,00	26,00	1408,56

Tabela 2.14: Dados fornecidos pela empresa Commercald sobre custos e tempo de fabricação dos processos de soldagem utilizados em revestimento.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Materiais

O consumível utilizado foi o pó do NiCrMo3, também conhecido comercialmente como superliga de Níquel 625 ou ainda comercialmente como Inconel 625, sendo fornecido pelo fabricante Kennametal sob a designação de Nistelle 625, abaixo temos a composição química. Lote 80000048326, conforme figura 3.1.

Carbon (C)	%	0,02	MAX:	0,10
Sulfur (S)	%	0,002	MAX:	0,015
Nitrogen (N2)	%	0,08	MAX:	0,13
Nickel	Balance			
Aluminum (Al)	%	0,03	MAX:	0,40
Cobalt (Co)	%	0,0	MAX:	1,0
Chromium (Cr)	%	21,7	SPEC:	20,0 - 23,0
Copper (Cu)	%	0,077	MAX:	0,500
Iron (Fe)	%	0,4	MAX:	5,0
Manganese (Mn)	%	0,4	MAX:	0,5
Molybdenum (Mo)	%	9,0	SPEC:	8,0 - 10,0
Phosphorus (P)	%	0,008	MAX:	0,015
Silicon (Si)	%	0,4	MAX:	0,5
Titanium (Ti)	%	0,04	MAX:	0,40
Niobium + Tantalum	%	3,62	SPEC:	3,15 - 4,15

Figura 3.1: Composição química do pó utilizado.

Já na figura 3.2 temos a granulometria do pó consumível de Inconel 625 utilizado.

SIEVE ANALYSIS				
ASTM B214-07, ISO 4497, NF EN 24497				
70 Mesh / 212 Micron	%	0,0	MAX:	0,0
80 Mesh / 180 Micron	%	3,0	MAX:	5,0
100 Mesh / 150 Micron	%	11,2		
140 Mesh / 106 Micron	%	29,8		
200 Mesh / 75 Micron	%	34,5		
270 Mesh / 53 Micron	%	21,1		
325 Mesh / 45 Micron	%	0,3	MAX:	3,0
Pan	%	0,0	MAX:	0,1

Figura 3.2: Granulometria do pó consumível de Inconel 625.

O material utilizado foi um tubo de aço carbono com diâmetro de 12" (307,8 mm) e espessura de ½" (12,7 mm), com composição química mostrada na figura 3.3 e enquadrado em termos de propriedade mecânica na classe API X42.

VALORES MÉDIOS OBTIDOS NA MEDIÇÃO DA AMOSTRA																
measuring program: Low alloy steel program no: 11																
sample: amostra base																
Nr	C	Si	Mn	P	S	Cu	Al	Cr	Mo	Ni	V	Ti	Nb	Co	W	Fe.
mittel	0.101	0.199	0.443	0.010	0.000	0.035	0.020	0.085	0.049	0.079	0.002	0.002	0.000	0.000	0.000	98.98
norm-grade: 1.0037 St 37-2																
1.0570 St 52-3																

Figura 3.3: Composição química do tubo de aço carbono com propriedades mecânicas dentro do que preconiza a API, sendo X42.

Foi utilizada a tecnologia do Fabricante Kennametal, tocha modelo HPI 350 para revestimento e as figuras 3.1 e 3.2 e 3.3 mostram a dimensão e espessura utilizada em nossos testes com pó de superliga de Níquel 625 pelo processo PTA.

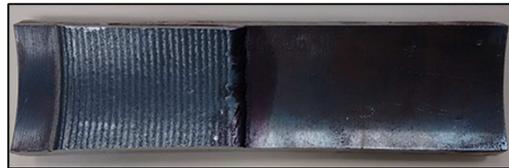


Figura 3.1: Peça revestida pelo processo de soldagem PTA com pó de Inconel 625, Nistelle 625.



Figura 3.2: Vista lateral da peça revestida pelo processo de soldagem PTA com pó de Inconel 625, Nistelle 625.

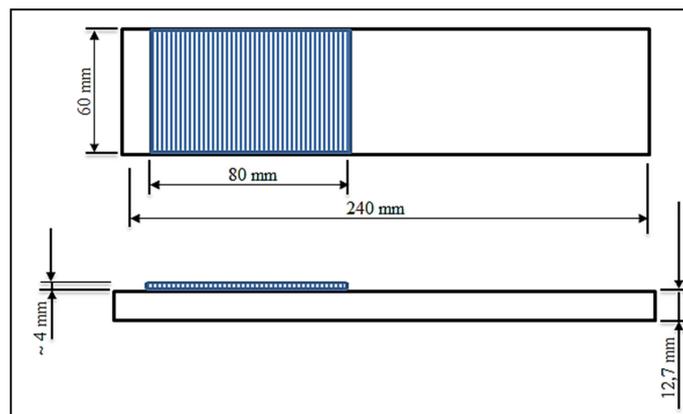


Figura 3.3: Dimensões da peça soldada pelo processo de soldagem de revestimento PTA com pó de Inconel 625, Nistelle 625.

3.2 Métodos

A metodologia experimental adotada neste trabalho teve por finalidade a execução da deposição de pó da superliga liga de Níquel conhecida comercialmente como Inconel 625 pelo processo de soldagem de revestimento plasma pó de arco transferido internamente em um tubo de aço carbono objetivando com apenas um único passe alcançar a espessura de revestimento de aproximadamente 4 mm e um teor de Fe na superfície do revestimento do mesmo valor percentual existente no consumível sendo ocasionado pela baixíssima diluição inerente ao processo PTA.

Alguns itens das normas: ISO10423, ISO 17637, ASTM A265, ISO15614-7, API5LD, DNV-F101, ASTM G48, EEMUA PUBLICATION 294, foram levadas em consideração durante a elaboração deste trabalho. Realizamos o revestimento com soldagem PTA conforme figura 3.4 , tubo girando e tocha parada. Na figura 3.5, temos o segmento de material depositado, objeto de estudo.

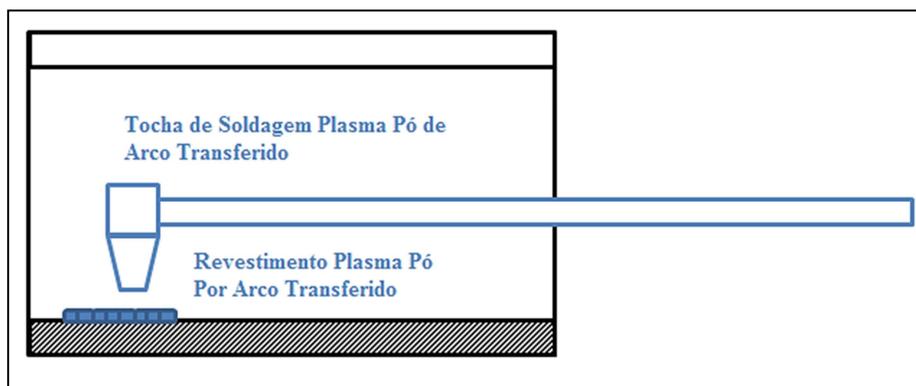


Figura 3.4: Revestimento ou cladeamento interno do tubo de aço carbono pelo processo de soldagem de revestimento plasma pó, PTA.

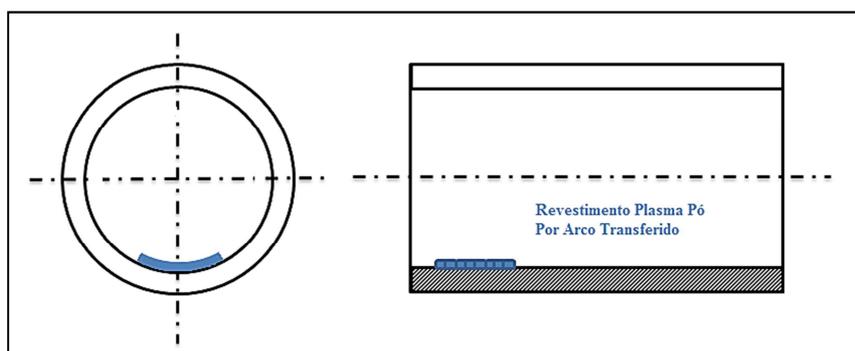


Figura 3.5: Segmento de material depositado (Inconel 625) sobre diâmetro interno de tubo de aço carbono pelo processo de soldagem de revestimento plasma pó.

Para a soldagem foi utilizado o equipamento especial denominado Starweld 400, com as seguintes características: Tensão de alimentação 460 volts trifásica, corrente de arco piloto de 10 amperes até 100 amperes, corrente de soldagem 300 amperes@100%, reservatório com capacidade para 10 galões de água deionizada, alimentador de pó com capacidade de até 80 gramas por minuto, a tocha denominada HPI 350 utilizada foi um protótipo desenvolvido na Alemanha com características específicas, as fotos do equipamento e tocha são vistos logo abaixo nas figuras 3.6 e 3.7.



Figura 3.6: Equipamento de soldagem PTA Starweld 400 do fabricante Kennametal (Adaptado de Kennametal).

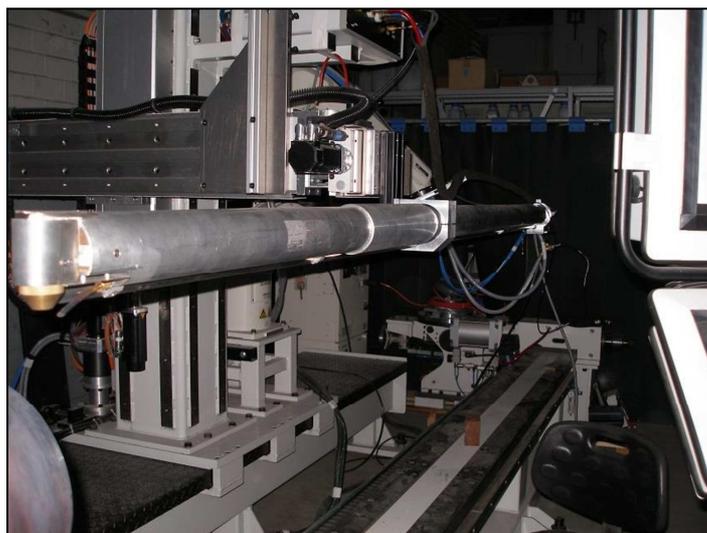


Figura 3.7: Tocha de soldagem PTA, modelo HPI 350 do fabricante Kennametal (Adaptado de Kennametal).

Abaixo na figura 3.8, temos alguns detalhes da tocha protótipo HPI 350 de plasma pó do fabricante Kennametal, essa foi a tocha utilizada para confeccionar as o revestimento interno dos tubos (secções) objeto de nosso estudo.

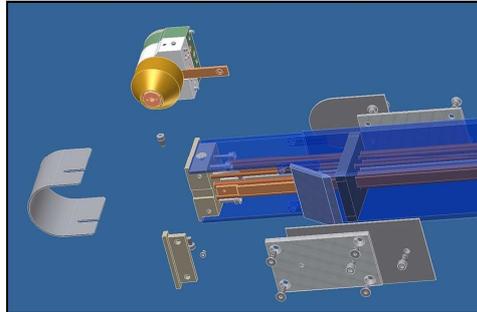


Figura 3.8: Tocha modelo HPI 350 de soldagem PTA do fabricante Kennametal.
(Adaptado de Kennametal).

Mais abaixo na figura 3.9, em detalhes temos o dimensional da nova tecnologia (protótipo de tocha HPI 350, do fabricante Kennametal).

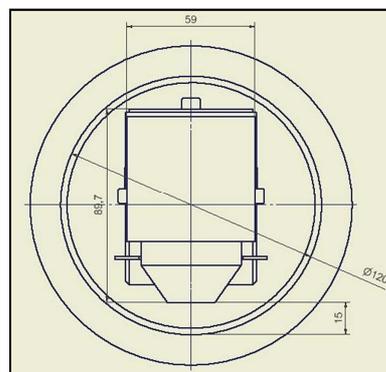


Figura 3.9: Dimensão da cabeça da tocha modelo HP I350, do fabricante Kennametal.
(Adaptado de Kennametal)

Na figura 3.10 temos uma vista da superfície do diâmetro interno de um tubo revestido com o processo de soldagem plasma pó de arco transferido feito com a tocha HPI 350. Na figura 3.11 temos uma melhor visão da superfície do revestimento.



Figura 3.10: Superfície do diâmetro interno de um tubo revestida com o processo de soldagem plasma pó de arco transferido feito com a tocha modelo HPI 350. (Adaptado de Comersul).



Figura 3.11: Superfície interna de um tubo de aço carbono revestida com pó metálico pelo processo de soldagem plasma pó. (Adaptado de Comersul).

Os seguintes parâmetros foram utilizados om a tocha protótipo HPI 350. (Kennametal) para a confecção do revestimento, objeto de nossa análise conforme figura 3.12.

Gases de plasma, arraste e proteção: Argônio puro.

Corrente de soldagem: 185 A contínua com eletrodo de 6 mm de diâmetro refrigerado a água.

Tensão: 33 V; Consumível: Nistelle 625; Taxa de deposição do pó: 55 g/min; Vazão do gás plasma: 1,6 lpm (litros por minuto); Velocidade de Soldagem: 600 mm/min; Vazão do gás de arraste: 3 lpm; Vazão do gás de proteção: 25 lpm.

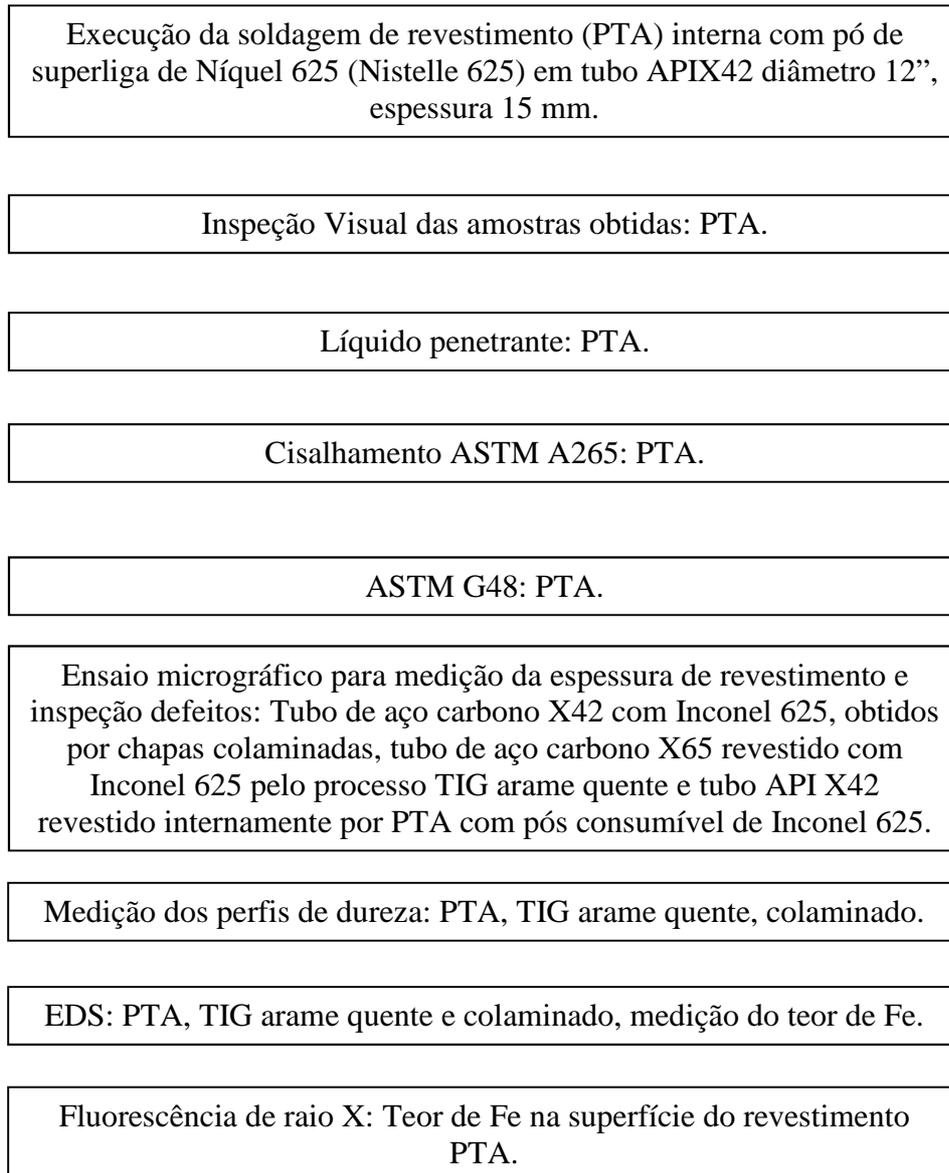


Figura 3.12: Fluxograma de sequência das atividades realizadas.

3.2.1 Inspeção visual

Conforme a informação citada nas normas ISO 17637:2003, para se realizar uma inspeção visual devemos ter uma intensidade de iluminação de no mínimo 350 luxes e estarmos distantes no mínimo cerca de 600 mm da peça inspecionada.

3.2.2 Líquido penetrante

Após a inspeção visual conforme norma N 1596 foi realizado o ensaio de líquido penetrante na secção do tubo cladeado por PTA delimitada pela região em vermelho (conforme figura 3.13).

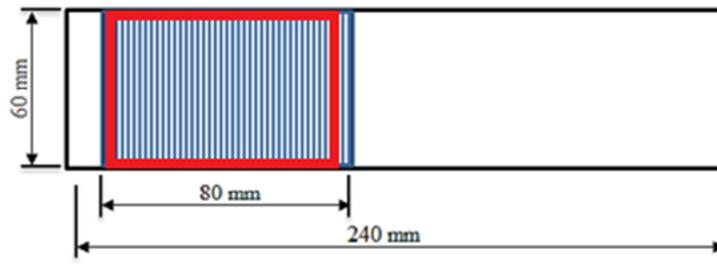


Figura 3.13: Ensaio por líquido penetrante.

3.2.3 Ensaio de cisalhamento ASTM A265

O corpo de prova abaixo foi submetido a uma força compressiva (seta em azul) e devido à existência dos apoios abaixo, uma força cisalhante (corte) foi aplicada sobre o corpo de prova delimitado por uma linha vermelha (Figura 3.14).

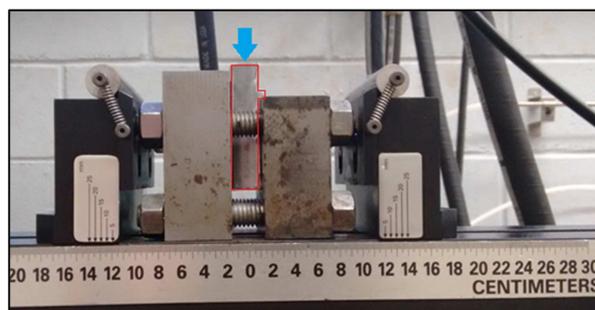


Figura 3.14: Corpo de prova oriundo da secção do tubo cladeado por PTA para ensaio de cisalhamento ASTM A265. (CENPES TMEC).

3.2.4 Ensaio de corrosão ASTM G48

Conforme norma ASTM G48 dois corpos de prova com dimensões 3,4 x 0,96 x 0,095 cm e 3,517 x 0,954 x 0,083 cm, pesando respectivamente 2,307666667 g e

2,056666667 g foram submetidos durante 24 horas à uma temperatura de 40C +/-2°C, com superfícies de área exposta de 7,36 e 7,45 centímetros quadrados respectivamente.

3.2.5 Microscopia

Utilizamos lixas 100-1200, solução nital 5% para ataque do aço carbono e solução eletrolítica (ácido oxálico 10%) de 2-5 seg, 5-10 volts para ataque do Inconel 625, pasta de diamante de 1-6 µm e pasta de alumina 0,3 µm, o microscópio utilizado, modelo Z1M, do fabricante Zeiss, sendo inclusive utilizado também na medição de espessuras dos revestimentos realizados pelo processo TIG arame quente, PTA e colaminação.

3.2.6 Dureza

Conforme norma API5LD, o perfil de dureza Vickers obtido seguiu a seguinte disposição para a amostra de PTA com apenas um único passe, utilizando carga de 10 kgf, inicialmente com seis pontos de medição, conforme figuras 3.15.

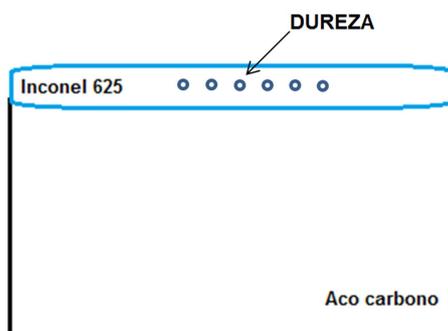


Figura 3.15: Disposição dos pontos de medição de dureza sobre o revestimento de Inconel 625 feito pelo processo PTA.

O microdurômetro utilizado nas medições de dureza foi o modelo HMV-G do fabricante Shimadzu.

Após a medição inicial do perfil de dureza na amostra de PTA descrita acima, mais quarenta e quatro pontos de medição foram executados com a seguinte disposição

vista nas figuras 3.16 (2 x 10 = 20 pontos) e 3.17 (24 pontos), distando 0,5 mm com ângulo de 15°, com carga de 0,5 kgf.

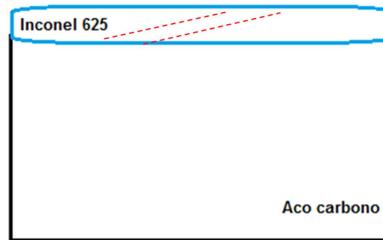


Figura 3.16: Disposição dos 20 pontos de medição sobre o revestimento de Inconel 625 (PTA) até a ZTA do metal de base.

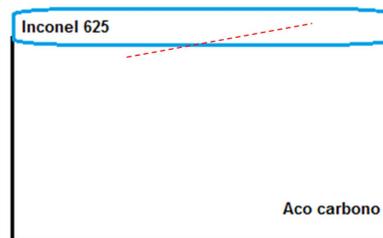


Figura 3.17: Disposição dos 24 pontos de medição sobre o revestimento de Inconel 625 (PTA) até a ZTA do metal de base.

Além do perfil de dureza Vickers com carga de 10 kgf e 0,5 kgf, também foi utilizada a técnica de indentação instrumentada. As indentações foram realizadas diretamente em uma das faces planas do corpo de prova de tração preparadas com lixa abrasiva de 200 mesh. O penetrador utilizado foi uma esfera de WC-Co de 1,5 mm.

Temos na figura 3.18 abaixo o equipamento desenvolvido no CENPES para uso em campo objetivando levantar as propriedades mecânicas dos materiais, com base em indentações esféricas, ou seja, dureza Brinell (HB), a medição seguiu a disposição mostrada nas figuras 3.19 e 3.20.



Figura 3.18: Equipamento de indentação utilizado (CENPES TMEC).

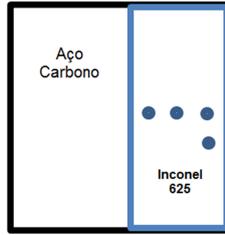


Figura 3.19: Disposição dos pontos de medição sobre o revestimento de Inconel 625 até feitos por indentação instrumentada.

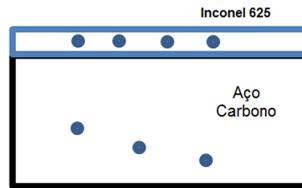


Figura 3.20: Disposição dos pontos de medição sobre o revestimento de Inconel 625 (PTA) e material de base (aço carbono API X42) feitos por indentação instrumentada.

Os perfis de dureza obtidos nas amostras de aço carbono X65 revestidas pelo processo TIG arame quente com dois passes, e X65 revestida por colaminação seguiu a seguinte disposição, conforme as figuras 3.21 e 3.22, objetivando a comparação com o PTA. Os pontos de medição foram feitos a 45° com distância entre pontos de 1 mm e carga de 0,5 kgf. Ao todo foram vinte pontos de medição, dez pontos medidos em cada linha.

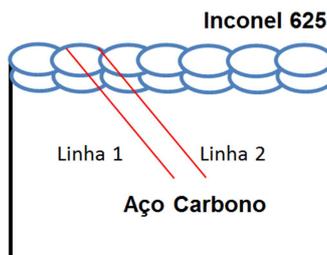


Figura 3.21: Disposição dos 20 pontos de medição sobre o revestimento de Inconel 625 (TIG arame quente).

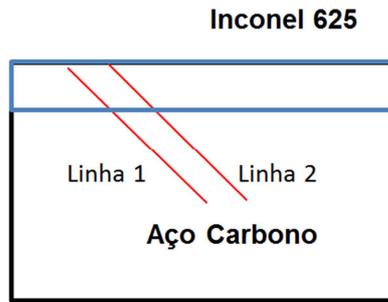


Figura 3.22: Disposição dos 20 pontos de medição sobre o revestimento de Inconel 625 (colaminação) até feitos por indentação instrumentada.

3.2.7 EDS

Objetivando a medição do teor de Fe na camada de revestimento realizadas pelos processos PTA, TIG arame quente, conforme ISO 10423 tabela 15, separamos basicamente duas regiões para essa medição semiquantitativa: Uma região próxima à superfície e a outra aproximadamente no meio da espessura do revestimento (retângulo vermelho), conforme figura 3.23, o MEV de bancada utilizado modelo TM3000 do fabricante Hitachi.



Figura 3.23: Região (retângulos azul e vermelho) submetida ao EDS para semiquantificação do teor de Fe.

3.2.8 Análise por fluorescência de raio X

Foi utilizado o equipamento manual Titan, do fabricante Bruker, para avaliação qualitativa do teor de Fe na superfície do revestimento de Inconel 625 pelo processo

PTA com fim de compará-lo com o teor de Fe medido por EDS acima descrito, a figura 3.24 apresenta a amostra submetida à fluorescência por raio X.



Figura 3.24: Equipamento de fluorescência por raio X e amostra.

4. RESULTADOS

4.1 Inspeção Visual

Com base na tabela 1 da norma ISO 15614 (Specification and Qualification of Welding Procedures for Metallic Materials-Welding Procedure Test. Part 7: Overlay welding, não foram vistos poros, trincas superficiais ou qualquer outra imperfeição à olho nu.



Figura 4.1: Peça revestida com PTA, usando Nistelle 625 (Inconel625) (CENPES TMEC).

Conforme norma ISO 15614-7, trincas ou outros defeitos planares não são permitidos, juntamente com poros, poros na superfície menor que 2 mm podem ser permitidos, nenhum defeito foi detectado mediante a inspeção visual.

4.2 Líquido penetrante

Em relação ao ensaio por líquido penetrante, nenhum defeito foi detectado na parte selecionada que também foi utilizada para os demais ensaios (tracejado azul), conforme figura 4.2.

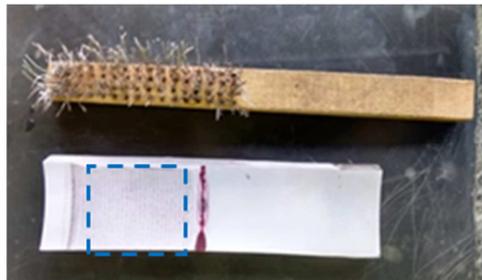


Figura 4.2: Secção de tubo (corpo de prova) submetido ao ensaio de líquido penetrante sem indicação de defeito (CENPES TMEC).

4.3 Ensaio de cisalhamento ASTM A265

Conforme ITEM 7.2.1 da norma ASTM A265, a resistência mínima de cisalhamento entre o revestimento e o metal de base deve ser de 140 MPa, a resistência obtida foi de 210,31 MPa, a figura 4.3 nos mostra o corpo de prova sofrendo cisalhamento.



Figura 4.3: Corpo de prova sob ação de força cisalhante com 2584,5 kgf resultando em 210,31 MPa (CENPES TMEC).

4.4 Ensaio de corrosão ASTM G48 Método A.

Os dois corpos de prova com dimensões 3,4 x 0,96 x 0,095 cm e 3,517 x 0,954 x 0,083 cm, pesando respectivamente 2,307666667 g e 2,056666667 g submetidos durante 24 horas à uma temperatura de 40C +/-2°C, com superfícies de área exposta de 7,36 e 7,45 centímetros quadrados respectivamente não apresentaram perda de massa estando livre de pites de corrosão após as 24 horas do ensaio, conforme figuras 4.4 e 4.5.

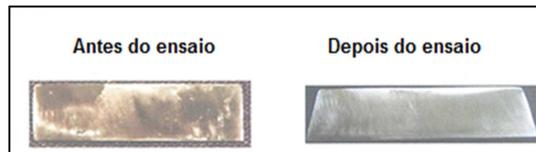


Figura 4.4: Corpo de prova para ensaio ASTM G48 método A (TMECMETAL).

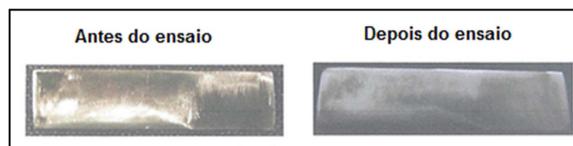


Figura 4.5: Corpo de prova para ensaio ASTM G48 método A (TMECMETAL).

4.5 Microscopia e inspeção

Na figura 4.6, temos a micrografia do processo de soldagem de revestimento plasma com pó consumível de Inconel 625 revestido internamente sobre o tubo de aço carbono X42, com um único passe, com espessura média de 3,8 mm.

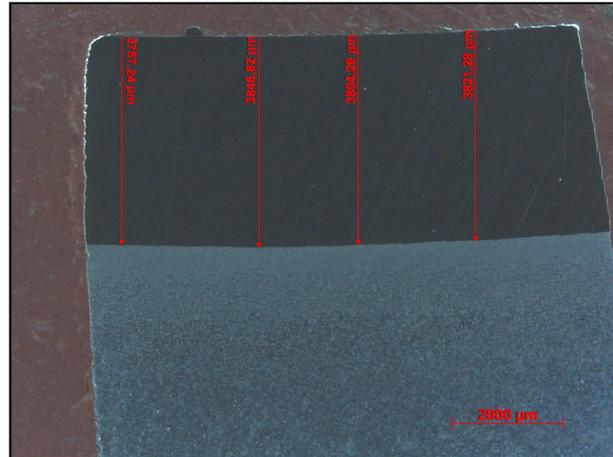


Figura 4.6: Espessura de 3,8 mm em média do revestimento feito com pó de Inconel 625 sobre aço carbono internamente pelo processo PTA com apenas um único passe (CENPES TMEC).

Conforme EEMUA PUBLICATION 294: Guidelines for materials selection and corrosion control for subsea oil and gas production equipment, Appendix IV: CRA Clad and lined piping for subsea applications e Norsok M-001: Materials selection; Item 4.4: Weld overlay.

A espessura mínima de revestimento requerida por essas normas é de 1,5 – 3 mm em relação à primeira norma e 3 mm em relação à segunda, como foi medido cerca de 3,8 mm de espessura de revestimento, este item foi atendido.

Segundo a ISO 15614-7 sobre o tópico exame ou inspeção microscópica, temos: “Poros individuais maior que 2 mm não são permitidos trincas maiores que 1,5 mm não são permitidas”.

Temos na figura 4.7 abaixo, por exemplo, um comprimento de aproximadamente 0,13 mm referente à falta de fusão contínua do revestimento de pó

consumível de Inconel 625 sobre o diâmetro interno de um tubo de aço carbono pelo processo de soldagem de revestimento plasma pó sendo bem menor do que os 1,5 mm não permitidos pela norma, esta falta de fusão de aproximadamente 0,13 mm foi a maior descontinuidade observada.

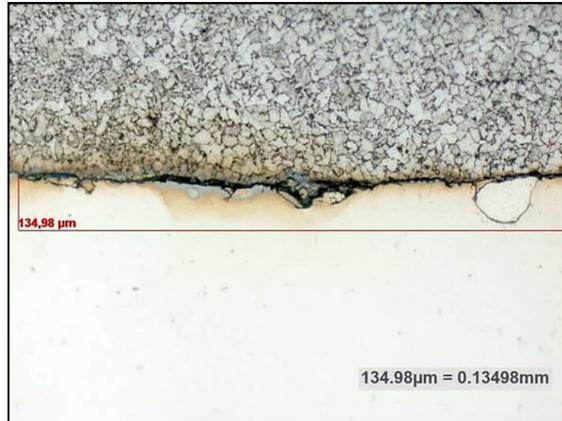


Figura 4.7: Tamanho da descontinuidade (0,13498 mm) caracterizado como falta de fusão existente no revestimento interno de Inconel 625 no tubo de aço API X42 pelo processo PTA (CENPES TMEC).

Para fins de comparação, abaixo na figura 4.8 temos uma descontinuidade detectada pelo processo TIG arame quente utilizando arame de Inconel 625 sobre o diâmetro interno de um tubo de aço carbono API X65. Os parâmetros de soldagem usuais para o cladeamento feito com TIG arame quente são: velocidade de soldagem em torno de 203,2 mm/min, corrente de soldagem em torno de 250 amperes e taxa de deposição aproximadamente 1,1 kg/hora.

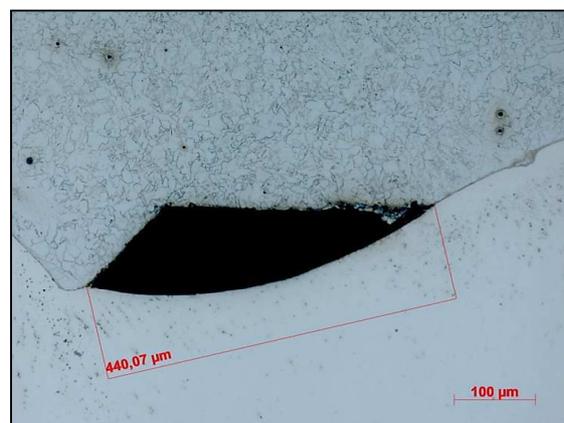


Figura 4.8: Tamanho da descontinuidade (0,44007 mm) caracterizado como falta de fusão existente no revestimento interno de Inconel 625 no tubo de aço API X65 pelo processo TIG arame quente (CENPES TMEC).

No processo de revestimento por colaminação não foram detectadas descontinuidades referentes à falta de fusão.

Considerando o aspecto da microestrutura, na figura 4.9, temos a mesma apresentada no cordão feito pelo PTA com consumível de Inconel 625, aumento de 200X e 500X.

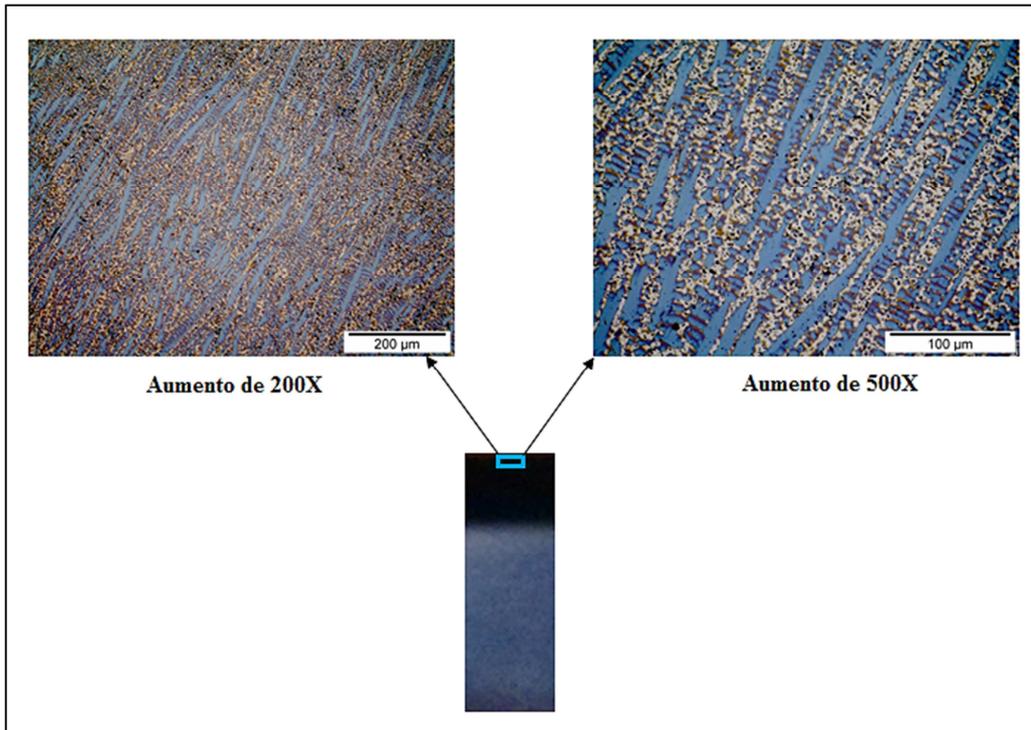


Figura 4.9: Aumento de 200X e 500X referente à microestrutura formada pelo Inconel 625 PTA sobre o aço API X42 (CENPES TMEC).

Percebemos a existência de carbonetos presentes na microestrutura e responsáveis, em função de sua quantidade, pela dureza, a seta em amarelo exemplifica tal afirmação, na figura 4.10.

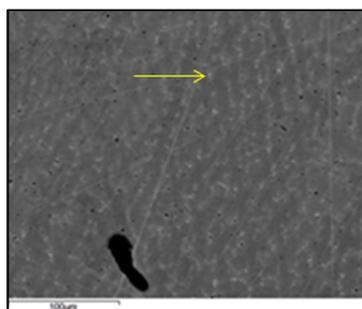


Figura 4.10: Microestrutura com presença de carbonetos (seta em amarelo).

A figura 4.11 abaixo mostra a existência de NbC em ligas de Ni.

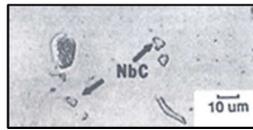


Figura 4.11: Carboneto de Nióbio presente em ligas de Ni (Dupont, J.N., LIPPOLD, J.C et al, 2009).

A figura 4.12 abaixo corrobora o exposto acima, obviamente observando o revestimento de Inconel 625 sobre o X70, verificamos também a formação de carbonetos nas regiões interdendríticas, ocorrendo em função do teor de Carbono existente no pó de Inconel 625, no metal de base e da presença de elementos de liga formadores de carbonetos como: Cromo, Molibdênio e Nióbio, seta em amarelo.

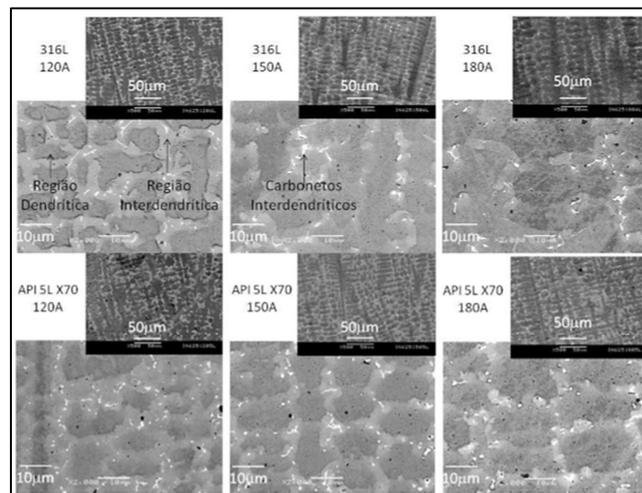


Figura 4.12: Carbonetos presentes na soldagem de revestimento do Inconel 625 pelo processo PTA sobre aço carbono API X70 com 120, 150,180 amperes (Adaptado de ANTOSZCZYSZYN, T.J, 2014).

A quantidade de Carbono existente juntamente com a quantidade dos elementos formadores de carbonetos, o fator diluição e o refino da microestrutura são os principais responsáveis pelo aumento da dureza, sendo o fator preponderante para o aumento da dureza: a quantidade de carbonetos presentes na microestrutura. A microestrutura é composta por uma estrutura hipoeutética com dendritas de Níquel ($\gamma\text{Ni} - \text{CFC}$) e interdendrítico não lamelar contendo carbonetos, dentre os quais podemos citar os de Nb. (ANTOSZCZYSZYN, T.J, 2014).

As figuras 4.13 e 4.14 mostram estrutura muito semelhante a da figura 4.40.

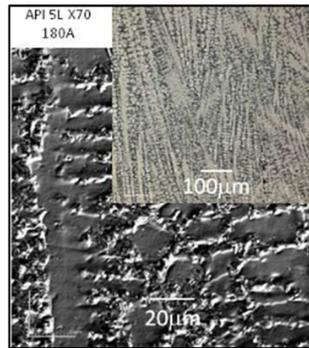


Figura 4.13: Tubo API 5L X70 sendo revestido pelo processo PTA com consumível em pó de Inconel 625, com corrente de 180 amperes (Adaptado de ANTOSZCZYSZYN, T.J, 2014).

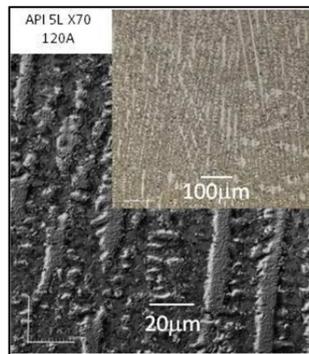


Figura 4.14: Tubo API 5L X70 sendo revestido pelo processo PTA com consumível em pó de Inconel 625, com corrente de 120 amperes (Adaptado de ANTOSZCZYSZYN, T.J, 2014).

4.6 Dureza

De acordo com a norma API 5LD (Specification for CRA or Lined Steel Pipe), os valores de dureza medidos com penetrador de 10 kg, não podem ser superiores a 345 HV. Na figura 4.15 (linha1), abaixo temos os resultados da medição de dureza inferior a 350 HV, com HV10, ou seja, penetrador de 10 kg, sendo todos em conformidade com a API5 LD e na figura 4.16, o perfil de dureza.

Serviço	22/03/2016
Descrição	PLASMA PO
Amostra	LINHA 1
Método	HV SHIMATZU HMV
Carga (kg)	10
#	Valores
1º PONTO	204
2º PONTO	215
3º PONTO	203
4º PONTO	218
5º PONTO	221
6º PONTO	216
média	213
desvpad	7,52
#Medições	6
IC95%	7,9



Figura 4.15: Pontos de dureza medidos conforme API 5LD no revestimento (cladding), conforme API 5LD, no revestimento de PTA, utilizando pó de Inconel 625 sobre aço carbono API X42 (FIRJAN SENAI CTS SOLDA).

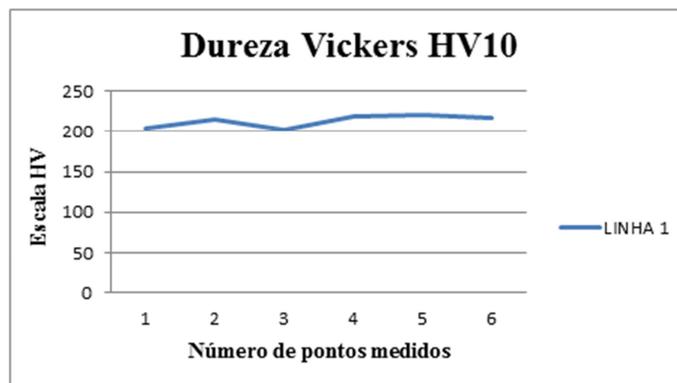


Figura 4.16: Perfil de dureza da amostra com único passe de PTA utilizando Inconel 625, referente à figura 4.15.

Na figura 4.17 mais medições foram feitas, desta vez com penetrador de 0,5 kg (HV0,5), podemos perceber uma média de dureza levemente superior a anterior em função da menor área abrangida pelo penetrador conforme figura 4.17 abaixo.

Serviço	22/03/2016	CTS	
Descrição	PLASMA PO		
Amostra	LINHA 1	LINHA 2	
Método	HV SHIMATZU HMV	HV SHIMATZU HMV	
Carga (kg)	0,5	0,5	
#	Valores	Valores	
1 SUPERFICIE +1MM	230	237	
2 DIAGONAL 15°+0,5MM	238	230	
3 DIAGONAL 15°+0,5MM	235	235	
4 DIAGONAL 15°+0,5MM	227	227	
5 DIAGONAL 15°+0,5MM	230	231	
6 DIAGONAL 15°+0,5MM	237	235	
7 DIAGONAL 15°+0,5MM	235	227	
8 DIAGONAL 15°+0,5MM	219	225	
9 DIAGONAL 15°+0,5MM	239	229	
10 DIAGONAL 15°+0,5MM	225	219	
média	233	229,50	
desvpad	6,47	5,40	
#Medições	10	10	
IC95%	4,6	3,86	

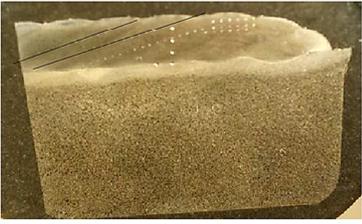


Figura 4.17: Dureza medida conforme API 5LD no revestimento (cladding), (FIRJAN SENAI CTS SOLDA).

Na figura 4.18, Temos a diferença de tamanho entre penetrador de 10 kg (HV10) com medida entre diagonal de 0,25 mm e penetrador de 0,5 kg (HV0,5) com medida entre diagonal de 0,06 mm e na figura 4.19 o perfil de dureza referente à figura 4.17.

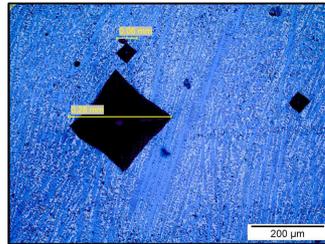


Figura 4.18: Diferença do tamanho do penetrador HV10 e HV0,5 (FIRJAN SENAI CTS SOLDA).

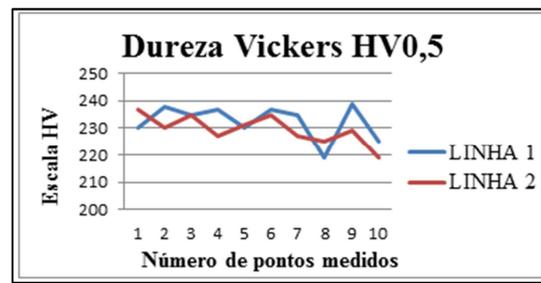


Figura 4.19: Perfil de dureza medida no revestimento (cladding), referente à amostra da figura 4.17(FIRJAN SENAI CTS SOLDA).

E na figura abaixo (4.20), temos 24 pontos de medição que vão desde a proximidade com a superfície do cordão até o metal de base, distando 0,5 mm e com inclinação de 15° (disposição dos pontos de medição de dureza).

Serviço	22/03/2016	CTS
Descrição	PLASMA PO	
Amostra	LINHA 3	
Método	HV SHIMATZU HMV	
Carga (kg)	0,5	
#	Valores	
1 SUPERFÍCIE +1MM	229	
2 DIAGONAL 15°+0,5MM	225	
3 DIAGONAL 15°+0,5MM	236	
4 DIAGONAL 15°+0,5MM	247	
5 DIAGONAL 15°+0,5MM	243	
6 DIAGONAL 15°+0,5MM	240	
7 DIAGONAL 15°+0,5MM	244	
8 DIAGONAL 15°+0,5MM	230	
9 DIAGONAL 15°+0,5MM	228	
10 DIAGONAL 15°+0,5MM	232	
11 DIAGONAL 15°+0,5MM	247	
12 DIAGONAL 15°+0,5MM	253	
13 DIAGONAL 15°+0,5MM	237	
14 DIAGONAL 15°+0,5MM	234	
15 DIAGONAL 15°+0,5MM	263	
16 DIAGONAL 15°+0,5MM	262	
17 DIAGONAL 15°+0,5MM	257	
18 DIAGONAL 15°+0,5MM	273	
19 DIAGONAL 15°+0,5MM	152	
20 DIAGONAL 15°+0,5MM	142	
21 DIAGONAL 15°+0,5MM	131	
22 DIAGONAL 15°+0,5MM	147	
23 DIAGONAL 15°+0,5MM	132	
24 DIAGONAL 15°+0,5MM	132	
média	217	
desvpad	59,58	
#Medições	24	
IC95%	25,2	

Figura 4.20: Dureza Vickers HV0,5 à 1 mm da superfície (Inconel 625) até o metal de base API 5L X42.

Já na figura 4.21 abaixo, temos o perfil de dureza com penetrador de 0,5 kg.

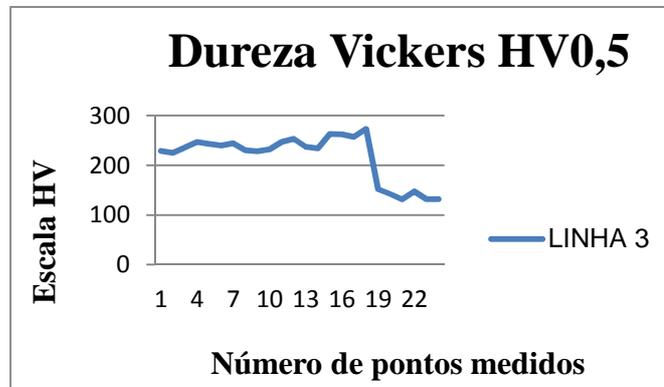


Figura 4.21: Perfil de dureza referente aos 24 pontos medidos HV0,5 desde a 1 mm da superfície passando pela ZTA, referente à figura 4.20.

A título de confrontação dos valores de dureza obtidos pelo ensaio Vickers, foi executado o ensaio de indentação instrumentada em escala Brinell (HB) sobre a superfície do revestimento de Inconel 625 (PTA) e sobre o aço carbono (X42).

A figura 4.22 abaixo mostra as indentações feitas na superfície do revestimento de Inconel 625, PTA.



Figura 4.22: Indentações esféricas feitas na superfície do revestimento de Inconel 625, PTA (CENPES TMEC).

A figura 4.23 abaixo mostra as indentações feitas no metal de base (API 5L X42) e na metade da espessura do revestimento de Inconel 625.



Figura 4.23: Indentações esféricas feitas no metal de base e na metade da espessura do revestimento (CENPES TMEC).

Abaixo temos a figura 4.24 com os valores tabelados de dureza em HB no metal base, superfície do revestimento e na metade da espessura do revestimento.

Tabela I: Resultados de propriedades mecânicas estimadas				
Local	Ensaio	Dureza (HB)	LE (MPa)	LR (MPa)
MB - Metal Base	MB - 01	138	302	407
	MB - 02	133	296	395
	MB - 03	133	302	399
	Média	135	300	400
	Desvio Padrão	3	3	6
MS-S - Metal de Solda na Superfície	MS - 01	256	572	967
	MS - 02	245	538	931
	MS - 03	231	487	895
	MS - 04	240	504	934
	Média	243	525	932
Desvio Padrão	10	38	29	
MS-M - Metal de Solda ao meio da espessura	MS - 01	220	447	887
	MS - 02	228	491	890
	MS - 03	235	496	929
	MS - 04	232	483	907
	Média	229	479	903
Desvio Padrão	7	22	19	

LE - Limite de escoamento; LR - Limite de resistência; HB - Dureza Brinell.

Figura 4.24: Resultado das propriedades mecânicas com base nas indentações esféricas referentes ao metal de base, metal de solda na superfície e metal de solda no meio da camada (CENPES TMEC).

O valor de dureza de 255HB corresponde a 258 HV, segundo informações da SteelExpress, (SteelExpress, 2016), logo, percebemos a proximidade do valor de dureza obtido dentro do que preconiza a API 5LD.

As durezas para fins de comparação medidas com penetrador de 0,5 kg (HV0,5) com uma corrente de 185 amperes utilizada em um único passe, objeto de nosso estudo, foi bem próxima das durezas obtidas em um cladeamento com pó de Inconel 625 feito em um tubo API 5L X70, sobretudo quando comparamos a dureza em relação à diluição, acima temos 120 amperes, o que obviamente resulta em baixa diluição.

Por conseguinte, é muito simples a verificação com base nas durezas medidas que: 185 amperes com maior taxa de deposição gera um cordão mais espesso, menor diluição e com 120 amperes, diminuindo a corrente, diminuindo a diluição, consequentemente o patamar dos valores de dureza são compatíveis.

A dureza está relacionada à menor diluição, que induz a um maior teor de elementos em solução sólida (Mo, Nb), maior fração de carbonetos e maior refinamento da microestrutura (ANTOSZCZYSZYN, T.J, 2014).

Abaixo na figura 4.25 temos a maior dureza referente a menor diluição, no caso as maiores durezas são medidas com uma corrente de solda de 120 amperes.

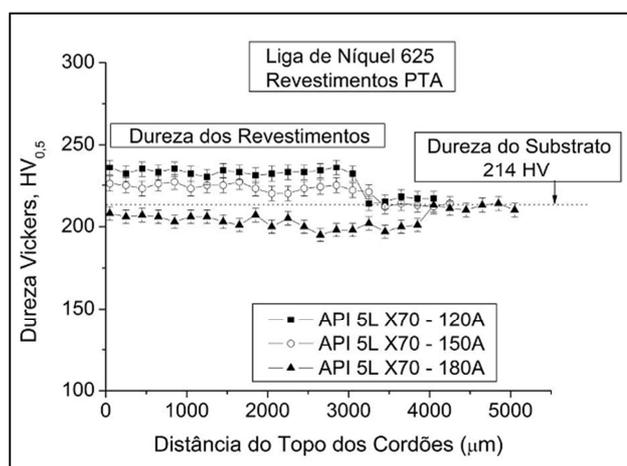


Figura 4.25: Perfil de dureza com correntes de 120, 150,180 amperes (Adaptado de ANTOSZCZYSZYN, T.J, 2014).

Abaixo na figura 4.26, temos a espessura de revestimento (3,9583 mm) de arame de Inconel 625 sobre aço carbono API X65 mediante o processo de soldagem de

revestimento TIG arame quente sendo executada com dois passes de soldagem, ao contrário do PTA que utilizou apenas um.

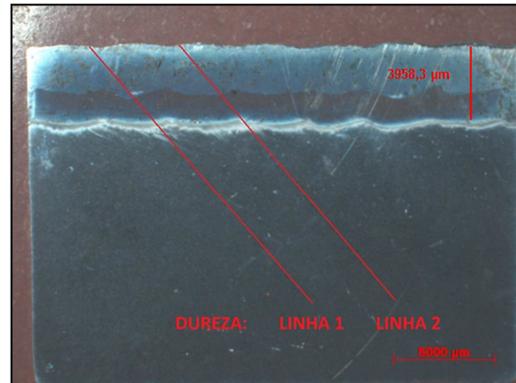


Figura 4.26: Altura aproximada de revestimento de Inconel 625 com 3,9583 mm de espessura de Inconel 625, sendo necessários dois passes para alcançarmos a espessura mencionada (CENPES TMEC).

Na figura 4.27 temos uma composição química do X65 revestido internamente com arame de Inconel 625 pelo processo TIG arame quente.

Classe	C _(máx)	Mn _(máx)	P _(máx)	S _(máx)	Nb _(min)	V _(min)	Ti _(min)	S _e (ksi)
X-56	0,26	1,35	0,04	0,05	0,005	0,005	0,005	56
X-60	0,26	1,35	0,04	0,05	0,005	0,005	0,005	60
X-65	0,26	1,40	0,04	0,05	0,005	0,005	0,005	65
X-70	0,23	1,60	0,04	0,05	-----	-----	-----	70
X-80	0,18	1,80	0,03	0,018	-----	-----	-----	80

Figura 4.27: Composição química do tubo de aço carbono API X65. (Adaptado de KEJELIN, N.Z, 2012).

Abaixo na figura 4.28, para fins de comparação com o PTA temos a dureza HV0,5 medida no revestimento de Inconel 625 executada pelo processo de TIG arame quente sobre aço carbono X65 e na figura 4.29, o perfil de dureza.

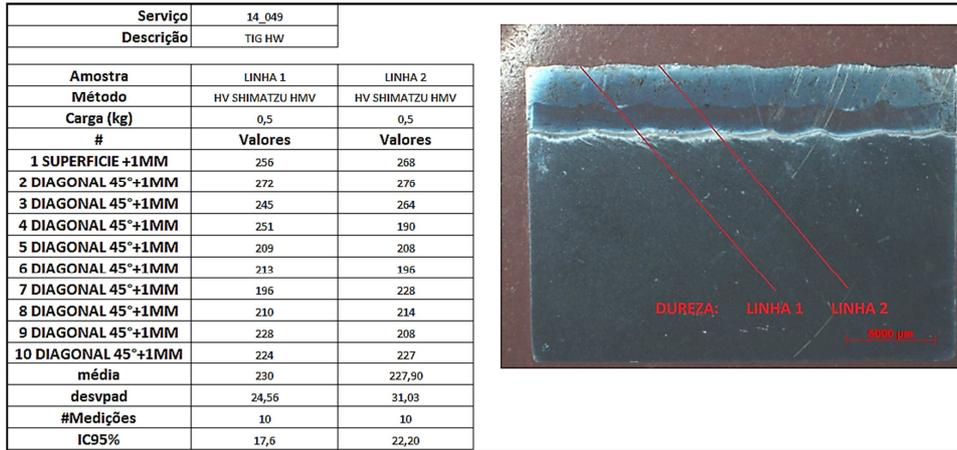


Figura 4.28: Dureza HV 0,5 medida desde a 1 mm da superfície (Inconel 625) até o metal de base do tubo de aço carbono API X65 (CENPES TMEC).

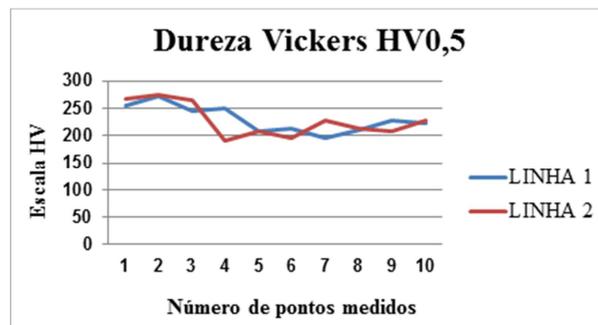


Figura 4.29: Perfil de dureza HV 0,5 referente à figura 13.27.

Agora Na figura 4.30, também para fins de comparação, temos a espessura do revestimento com aproximadamente 3,7 mm de de Inconel 625, fabricante Butting, sendo este tubo feito por chapas colaminadas de inconel 625 juntamente com aço carbono, onde as propriedades medidas por indentação sugerem o API X42.

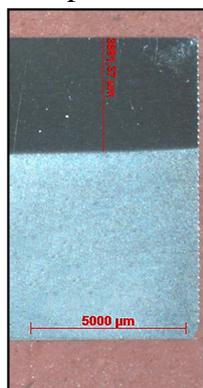


Figura 4.30: Espessura de 3,69137 mm de revestimento de Inconel 625, do fabricante Butting. (CENPES TMEC).

Na figura 4.31 abaixo temos a medição de dureza Vickers HV0,5 da amostra do tubo cladeado ou revestido por colaminação de Inconel 625, do fabricante Butting, desde a 1 mm da superfície (Inconel 625) até o metal de base, tubo de aço carbono API X42 e na figura 4.32, o perfil de dureza.

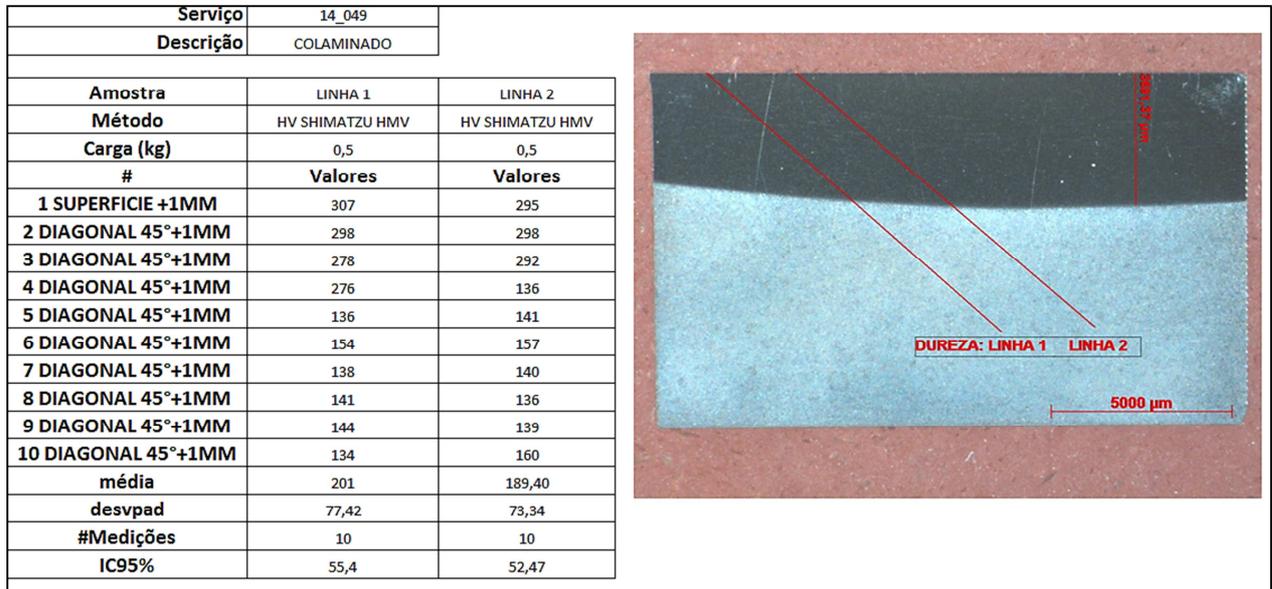


Figura 4.31: Dureza HV 0,5 medida desde a 1 mm da superfície (Inconel 625) até o metal de base do tubo de aço carbono API X42.

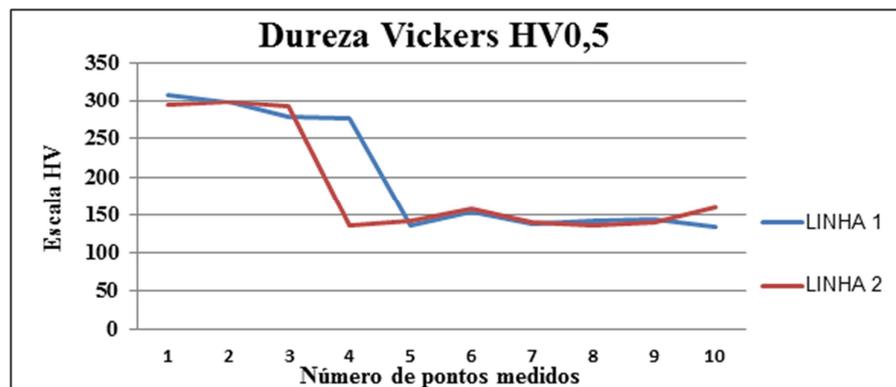


Figura 4.32: Perfil de dureza HV 0,5 referente à figura 13.30

4.7 EDS

Separamos basicamente duas regiões para determinação do teor de Fe no revestimento de Inconel 625 pelo processo de soldagem TIG arame quente: Uma região próxima à superfície e outra próxima ao meio da espessura. Em azul a região da superfície e em vermelho a região aproximadamente localizada no meio da espessura, conforme figura 4.33.

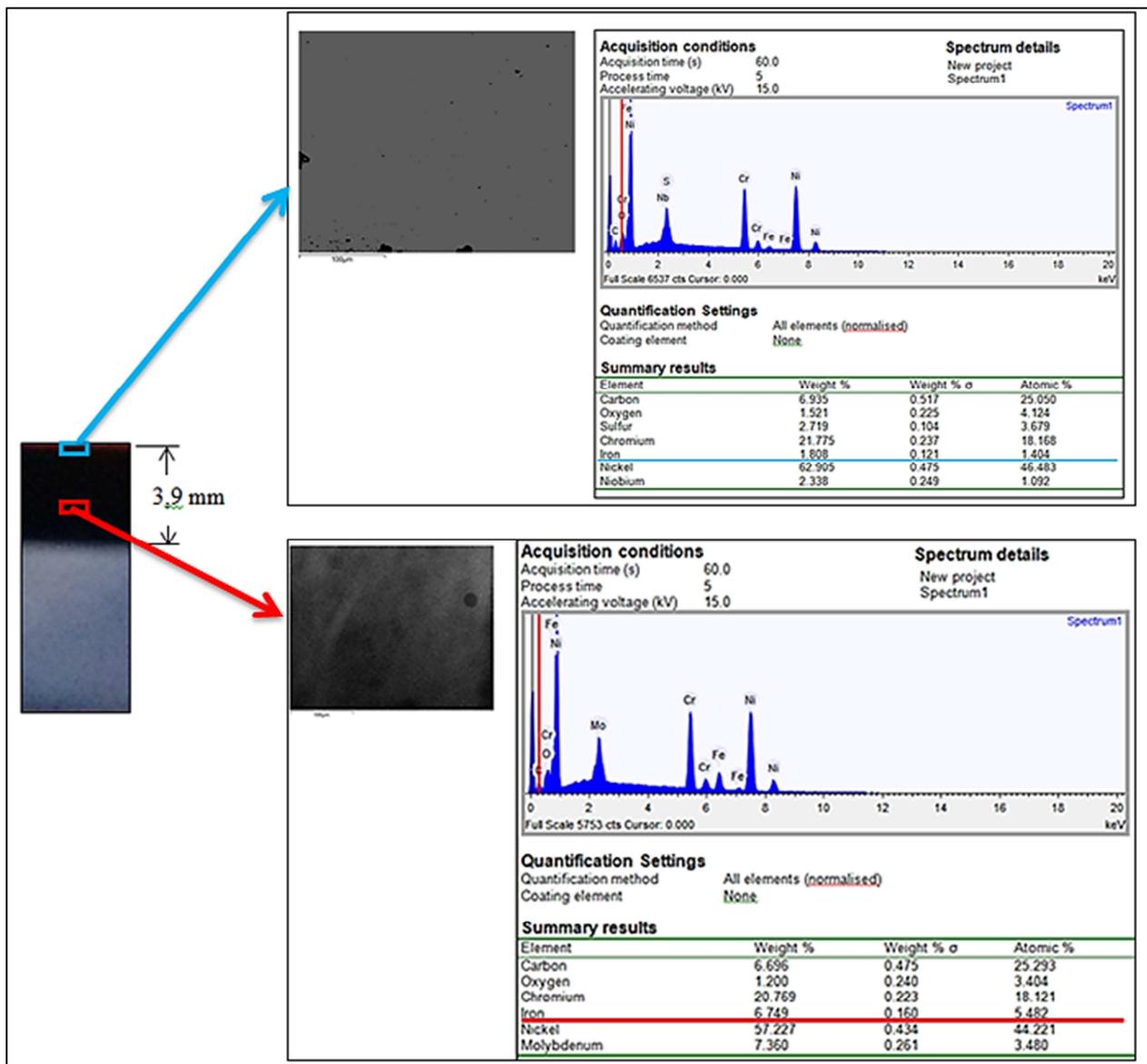


Figura 4.33: Indicação do teor de Fe próximo à superfície do revestimento e no meio da espessura do revestimento, feito pelo processo de TIG arame quente utilizando consumível de Inconel 625 internamente sobre tubo de aço carbono API X65.

Na figura 4.34 temos o revestimento de Inconel 625 pelo processo PTA realizado internamente ao tubo API X42 com apenas um único passe e uma análise de teor de elementos feita próximo à superfície do revestimento e na metade da espessura do revestimento.

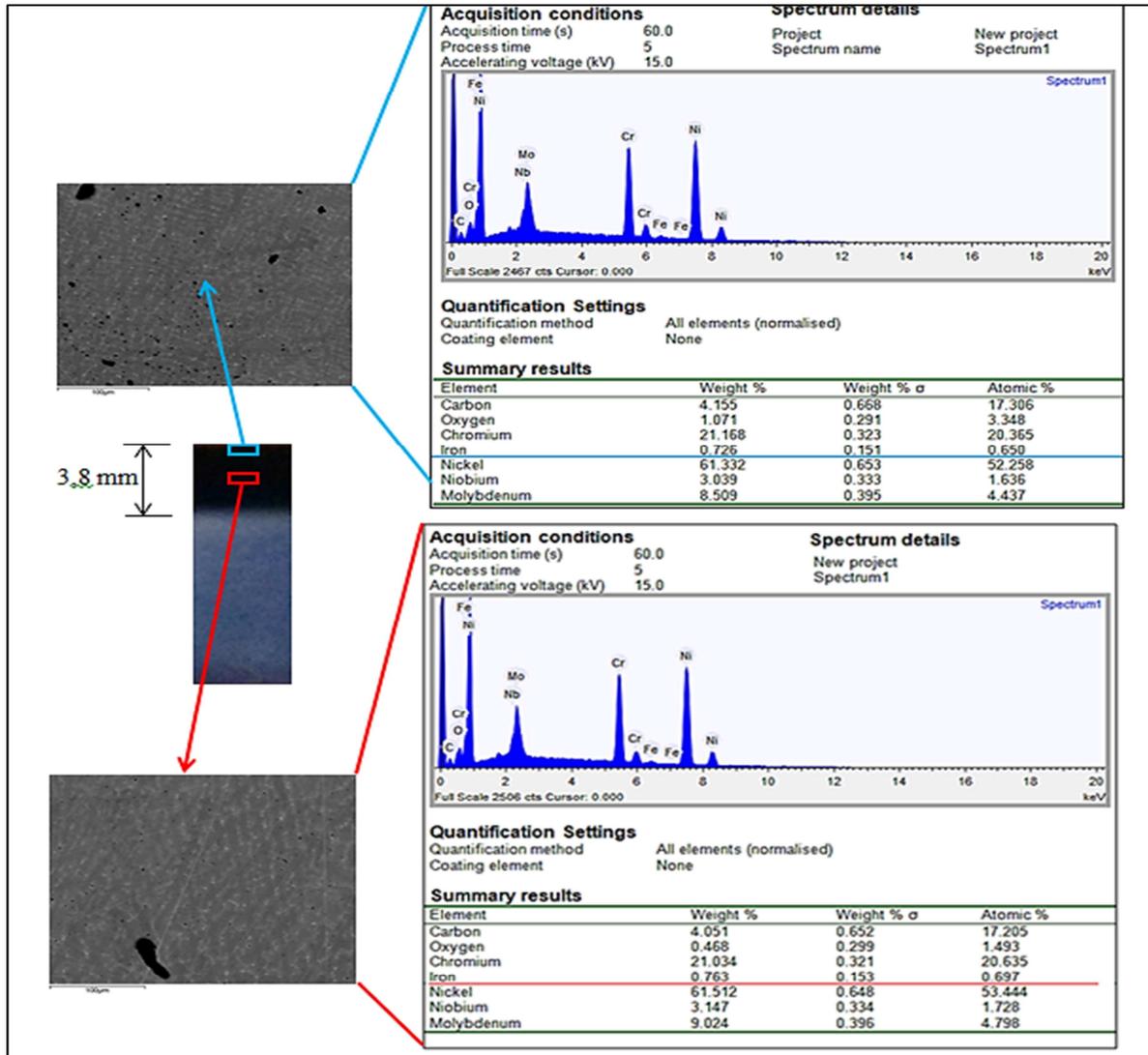


Figura 4.34: Teor de Fe próximo à superfície do revestimento e no meio da espessura do revestimento, feito pelo processo PTA utilizando apenas um único passe com Inconel 625 internamente sobre tubo de aço carbono API X42.

4.8 Análise por fluorescência de raios X.

Objetivando uma comparação com o EDS, a medição dos elementos realizada por fluorescência de raio X, ao contrário do EDS nos forneceu um teor de Ni menor e um teor de Fe maior na superfície do revestimento de Inconel 625 internamente ao tubo de aço carbono API X42 feito por PTA, conforme figura 4.35, o teor de Fe conforme exposto abaixo foi de 3,68%.



The image shows a handheld XRF analyzer screen displaying analysis results. The screen is titled "Não disponível na biblioteca" and shows the following data:

El	Min	%	Máx	+/- [*2]
Mn	< LOD			0.10
Fe		3.68		0.20
Ni		51.18		0.50
Cu		0.09		0.05
Zr		0.01		0.01
Nb		3.45		0.08
Mo		7.72		0.11
W		0.06		0.05

Additional information on the screen includes: "84 Emparelhar 0.0 12-23 14:02" and "Tempo 30.0". At the bottom of the screen, there are buttons for "Cfg. Média", "Calcular Média", "Espectro", "Editar info", and "Voltar". Below the screen, there are three physical buttons: a green power button, a yellow warning triangle button, and a square button.

Figura 4.35: Teor de Fe e Ni medidos por fluorescência de raios X na superfície do revestimento de Inconel 625 sobre aço carbono (Tubo API X42).

5. DISCUSSÃO

5.1 Defeitos superficiais e ensaio mecânico de cisalhamento

A amostra do revestimento feita pelo processo TIG arame quente foi recebida já inspecionada em conformidade com que preconiza as normas de fabricação, logo, neste caso a atenção maior foi dada a amostra de PTA que não apresentou nenhum defeito detectável a olho nu e ou por líquido penetrante, obviamente em uma escala de fabricação e segundo a EEMUA Publication 294: Guidelines For Materials Selection and Corrosion Control For Subsea Oil And Gas Production Equipment todo o revestimento deveria ser 100% inspecionado por ultrassom e radiografado, porém, neste trabalho apenas consideramos o ensaio visual e de líquido penetrante dada a sua facilidade.

Sobre a secção de tubo revestida por colaminação, não era factível com a realidade do trabalho proposto uma comparação de teor de Fe na última camada em função de não ser um processo de arco elétrico para deposição.

O ensaio de cisalhamento ASTM A265 realizado apenas na amostra revestida pelo processo PTA revelou o esperado, ou seja, uma tensão de cisalhamento superior a 140 MPa também estando de acordo com a DNV F-101 página 79, a tensão de cisalhamento medida de 210,31 MPa pode ser atribuída a uma penetração controlada inerente do próprio processo PTA onde pela constricção do arco temos uma pressão de arco cerca de dez maior que a pressão de arco do processo TIG, logo a penetração é alcançada de maneira mais contundente, porém, mais controlada em função da distância bico peça apresentar menos efeitos deletérios quando comparado ao processo TIG, mantendo a mesma relação penetração x largura.

Esse é um fator extremamente interessante e que merece nossa atenção porque no processo TIG quando aumentamos a distância do eletrodo, ou seja, a distância do tungstênio em relação à peça obra, temos uma maior largura do cordão e menor penetração, já no processo PTA esse efeito não é tão pronunciado tornando-o menos suscetível à falta de penetração o que poderia impactar no resultado do ensaio de cisalhamento fato este que não ocorreu, por conseguinte mesmo com baixíssima diluição (penetração) obtivemos um resultado satisfatório.

O que corrobora o parágrafo anterior são os tamanhos e características das descontinuidades observadas nas figuras 4.7 e 4.8, é sabido que um tubo não possui um secção perfeitamente circular, logo, temos ao longo do seu comprimento variações dimensionais em termos de diâmetro interno principalmente, que são para o processo de soldagem de revestimento: variação da altura do eletrodo de tungstênio em relação à peça obra, ou seja, variação do comprimento do arco que impacta à relação penetração x largura do cordão, sobretudo nos processos TIG e TIG arame quente. A descontinuidade (falta de fusão) encontrada mediante inspeção microscópica no processo PTA foi de 0,13 mm, enquanto no TIG arame quente foi de 0,44 mm, sendo a característica da descontinuidade do TIG arame quente melhor compreendida com auxílio das figuras 5.1 e 5.2.

A figura 5.1 exemplifica a variação dimensional do diâmetro interno de um tubo a ser revestido compreendendo a relação de penetração x largura do cordão em função da variação da altura do eletrodo à peça obra.

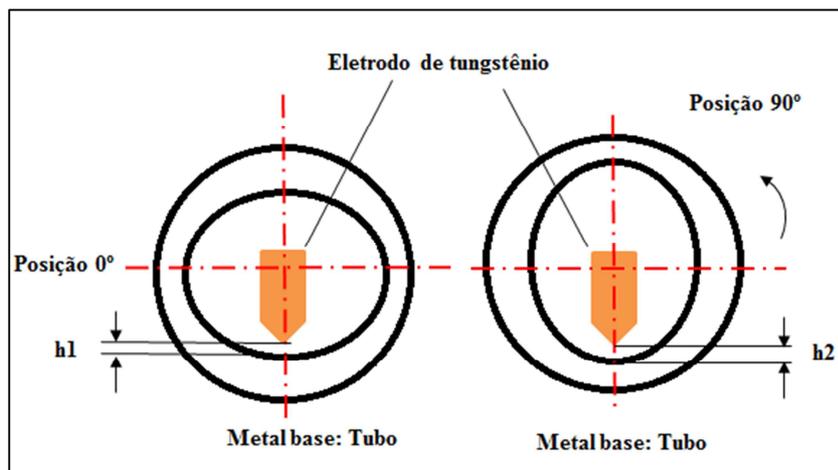


Figura 5.1: Variação de diâmetro ao longo do comprimento.

Obviamente a figura 5.1 extrapola a variação dimensional permitida para a fabricação de tubos de aço carbono revestidos com Inconel 625, mas, nos dá uma ideia do que ocorre durante o processo de soldagem de revestimento que pode ser tanto o TIG, TIG arame quente ou PTA. Durante a soldagem de revestimento (TIG arame quente) o tubo gira enquanto o eletrodo de tungstênio (tocha) avança, por conseguinte

as alturas h_1 e h_2 são diferentes, sendo h_2 maior que h_1 , temos em h_2 uma menor penetração e maior largura do cordão.

A figura 5.2 enfatiza o problema da falta de penetração ocasionada pela variação de altura do tungstênio em relação à peça obra, neste caso o diâmetro interno do tubo de aço carbono a ser revestido.

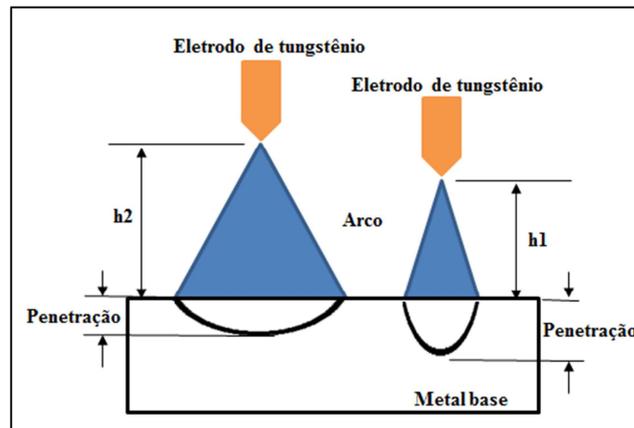


Figura 5.2: Relação entre penetração x largura do cordão de solda em função da variação da altura do eletrodo à peça obra no processo TIG arame quente.

Esse efeito é menos acentuado no processo PTA em função da constricção do arco, o que provavelmente explica a diferença entre as discontinuidades encontradas principalmente em relação ao seu tamanho. A figura 5.3 exemplifica o menor efeito da relação altura do tungstênio (comprimento do arco) sobre a relação penetração x largura do cordão de solda (revestimento).

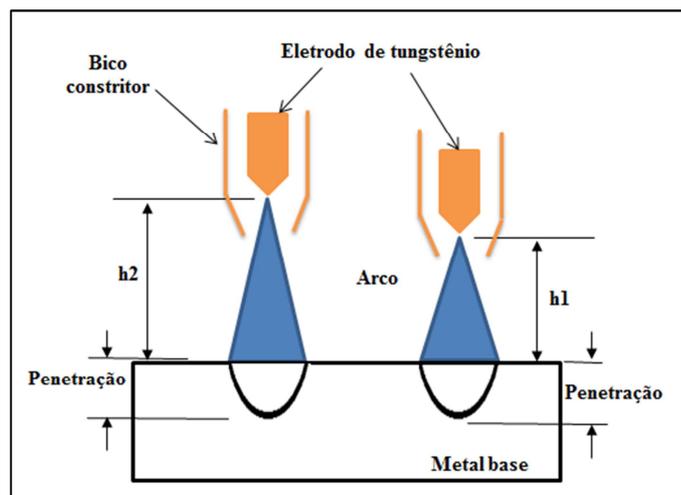


Figura 5.3: Relação entre penetração x largura do cordão de solda em função da variação da altura do eletrodo à peça obra no processo PTA.

Na figura 5.3 quando variamos a altura de h1 para h2, a relação penetração x altura não sofre uma variação tão contundente como ocorre no processo TIG arame quente em função da existência de um bico constritor, ou seja, temos um arco com maior densidade em amperes por milímetro quadrado com maior pressão de arco em KPa sendo desta forma tornando este processo menos suscetível à falta de fusão, contribuindo para melhor uniformidade da penetração, desta forma impactando positivamente sobre o ensaio ASTM A265 (cisalhamento) e posterior resultado obtido.

É provável que algumas questões surjam sobre a inibição ou redução dos tamanhos (comprimento) da descontinuidade falta de fusão ou penetração que podem ocorrer no processo TIG arame quente pelo uso de sistemas conhecidos como AVC (Automatic Voltage Control), ou seja, controle automático de tensão no arco; É sabido que quando se controla a altura, se controla o comprimento do arco e comprimento do arco é igual a tensão em volts, por conseguinte tensão em volts do arco é a distância do eletrodo de tungstênio à peça obra.

A parte em vermelho na figura 5.4 retrata a atuação do AVC, esse sistema monitora a tensão em volts do arco no processo TIG arame quente ou PTA, essa tensão é transduzida (uso de transdutor) em altura, ou seja, mesmo que existam variações dimensionais ao longo do comprimento de um tubo (variação do diâmetro) de aço carbono a ser revestido, a altura em tese será sempre a mesma porque o motor acima da tocha TIG ajustará a altura para que a tensão em volts seja sempre a mesma.

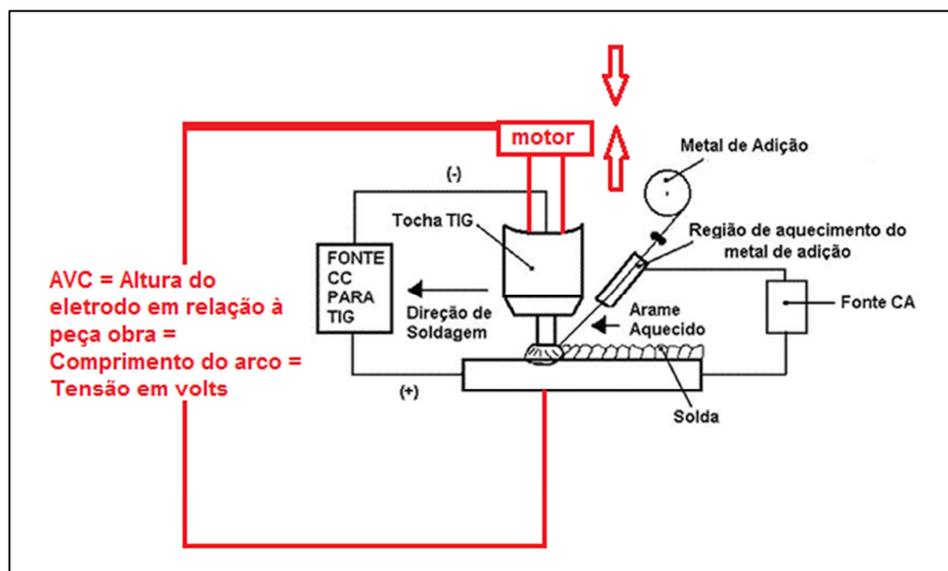


Figura 5.4: Atuação do AVC no processo TIG arame quente.

Como o processo PTA possui como característica uma constrição do arco, logo temos menos suscetibilidade à falta de penetração e fusão, logo, este processo também se torna menos dependente de um sensor tipo AVC.

Outro fator que chama nossa atenção para a quase linearidade da penetração vista na figura 4.6 deve ao fato de que o eletrodo de tungstênio é protegido pelo bico constritor, então os riscos de contato com o metal de base são em muito minimizados ou completamente extintos.

Se existe um perfil geométrico da ponta do eletrodo de tungstênio mantida por mais tempo durante a operação de revestimento em função da ausência de contato com o metal de base, ou seja, a peça obra, podemos concluir que ao longo desta operação o sensor AVC será acionado de maneira menos contundente porque a altura do eletrodo de tungstênio ao metal de base será praticamente constante .

O processo PTA tem como característica marcante a adição do material consumível em pó dentro de uma coluna de plasma densa e com perfil de temperatura muito distinto (superior) em relação ao TIG arame quente, a densidade de corrente é cerca de três vezes maior que o TIG, o material consumível aquecido encontra o material de base praticamente fundido e neste momento é adicionado ao mesmo sob elevadas temperaturas, esse fator propicia uma baixa diluição impactando no teor de Fe, conforme será abordado no item 5.2.

5.2 Teor de Fe, dureza e corrosão.

O revestimento com apenas um único passe é de extrema relevância para o processo produtivo, atualmente o mercado utiliza o processo GTAW hot wire, ou TIG arame quente como a melhor alternativa em quase todas as aplicações, porém, existe uma grande gama de peças com diâmetro superior a 4” e comprimento entre 0,6 metros e 1 metro (peças cilíndricas), por exemplo, onde certamente o PTA se encaixa perfeitamente como uma alternativa.

Outro aspecto notório é a taxa de deposição, enquanto temos uma taxa de 1,1 kg/h aproximadamente referente ao processo TIG arame quente, o PTA apresenta uma taxa de deposição de 3,3 kg/h, ou seja, três vezes superior para a mesma aplicação.

Conforme a norma Norsok M-001 (Materials Selection), item 4.4, tabela 3, a espessura de revestimento requerida para proteção contra a corrosão é de no mínimo 3 mm (acabado) com 10% teor de Fe em peso, já a norma ISO10423 (Petroleum and Natural Gas Industries-Drilling and Production Equipments: Wellhead and Christmas Tree Equipment), tabela 15, preconiza um teor de Fe de 5-10% em massa.

Os dois processos: TIG arame quente e PTA atendem o requisito destas normas acima, porém, o processo PTA alcança a espessura de revestimento com apenas um único passe, conforme figura 5.5, e a espessura da camada está intimamente relacionada com a diluição (penetração) e conseqüentemente teor de Fe.

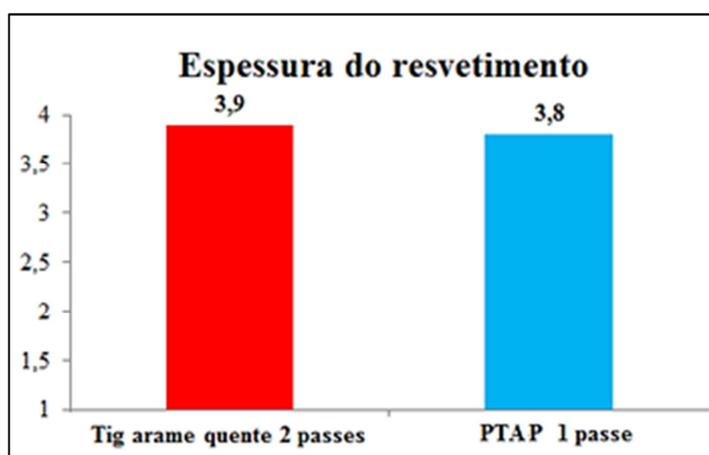


Figura 5.5: Espessura de revestimento obtida pelos processos TIG arame quente e PTA usando Inconel 625 sobre tubos API X65 e X42 revestidos internamente.

A diluição não foi quantificada, mas, sim o teor de Fe, a fórmula proposta $\% \text{ Diluição} = (\text{Fe revestimento} - 3) / \text{Fe substrato} \times 100$ referente às regiões onde existiu a falta de fusão não foi aplicada em função do teor máximo de Fe ser superior a 3% no consumível de adição.

Sobre os teores de Fe em massa temos na figura 4.33 o revestimento de Inconel 625 pelo processo TIG arame quente utilizando dois passes resultando em 3,9 mm aproximadamente de espessura de revestimento sobre o tubo de aço carbono API X65 com teor de Fe de 1,808%, já o processo PTA apresentou teor de Fe 0,726% próximo à superfície da camada e na metade da espessura do revestimento, de 0,763%, conforme figura 4.34, ambos os processos sendo retratados comparativamente na figura 5.1 sob a perspectiva de: Teor de Fe x espessura do revestimento de Inconel.

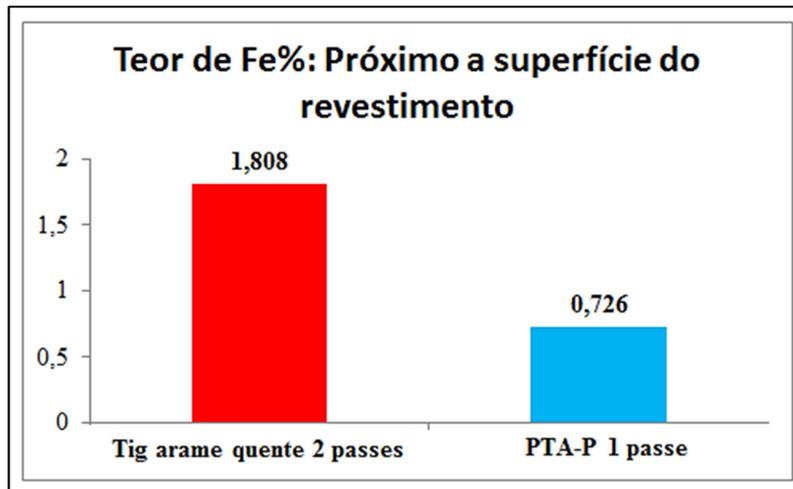


Figura 5.1: Diferença do teor de Fe próximo à superfície dos revestimentos de Inconel 625 executados pelo processo TIG arame quente e PTA.

O valor mínimo de espessura de 3 mm requerido pelas norma Norsok M-001 é superior ao mínimo requerido pela DNV F101 (DNV-OS-F101) página 77 onde requer um valor mínimo de 2,5 mm de espessura de cladeamento, os valores de espessura estão fortemente atrelados ao % de Fe em massa que pode entrar em contato com o fluido sofrendo desta forma ação corrosiva.

De acordo com o valor semiquantitativo obtido por EDS, para uma espessura de 1,9 mm de revestimento obtido pelo processo PTA (meio da camada de 3,8mm) temos um % de Fe em massa de 0,763%, ou seja, com o PTA em função da baixa diluição poderíamos ter uma espessura inferior a 2,5 mm atendendo ao requisito da norma em termos de teor de Fe, impactando obviamente na produtividade agilizando o processo.

O resultado obtido do teor de Fe pela fluorescência de raios X foi de 3,68% na superfície da camada sendo superior ao valor de 0,726% Fe obtido pelo EDS, uma vez que a fluorescência de raios X é uma técnica qualitativa e quantitativa.

Sobre o aspecto dureza, a API 5LD, tabela 3, recomenda uma dureza de 345 HV10, ou seja, 345 Vickers com penetrador de 10 kg para liga Inconel 625, o valor médio obtido foi de 213 HV10; o valor obtido foi inferior ao permitido pela norma.

Com o penetrador de 0,5 kg a dureza média foi levemente maior em função de uma menor área com provavelmente menor dispersão de carbonetos, uma área menor com indentação pode apresenta maior concentração de carbonetos, por isso a dureza obtida foi em torno de 220-230 HV0,5.

Quando comparamos as primeiras indentações para obtenção dos valores de dureza do PTA com o TIG arame quente, as primeiras três indentações feitas no revestimento TIG arame apresentaram uma média de 263 HV0,5 contra 232 HV0,5 do PTA, provavelmente devido à baixa diluição do PTA (quantidade Carbono presente no substrato e consumível) e principalmente quantidade de carbonetos presentes na microestrutura sendo este o fator preponderante para o aumento da dureza.

Já a média dos três valores iniciais obtidos na medição da dureza no tubo feito por chapas colaminadas foi em torno de 294 HV0,5 em função do encruamento.

Sobre o ensaio de corrosão ASTM G48 método A não revelou perda de massa nos corpos de prova do revestimento feito por PTA com temperatura de 40°C, estando livre de corrosão, mais uma vez o fator diluição ou controle de diluição como era de se esperar contribuiu com baixo teor de Fe, a duração poderia ser estendida por mais quarenta e oito horas, porém, com experiências obtidas outrora em corpos de prova oriundos de revestimento feitos pelo processo TIG arame quente, se convencionou não postergar esse ensaio.

6. CONCLUSÕES

O processo de soldagem de revestimento PTA, ou seja, plasma pó revelou maiores taxa de deposição e menor suscetibilidade a falta de penetração e fusão quando comparado ao processo TIG arame quente.

O processo é mais competitivo quando o binômio taxa de deposição x diluição é um fator governante no processo de fabricação.

O processo PTA usado em revestimento revelou uma melhor distribuição dos carbonetos evitando aumento de dureza, melhorando as propriedades mecânicas.

Com apenas um único passe, a espessura de revestimento feita com processo PTA foi praticamente igual a espessura de revestimento feita com dois passes pelo processo TIG arame quente.

7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Soldagem de união utilizando PTA manual e automatizada, devido à flexibilidade do processo.

Influência da corrente pulsada na solda PTA para soldagem de união em função de menor aporte térmico.

Influência da corrente pulsada na solda PTA para soldagem de revestimento, objetivando analisar a microestrutura e propriedades mecânicas.

Influência de misturas gasosas no gás plasma sobre a diluição no processo de soldagem de revestimento.

A influência das variáveis corrente e vazões de gases sobre o tamanho do grão e seu impacto na tenacidade para aplicações em equipamentos criogênicos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

AFIADOR DE TUNGSTÊNIO Disponível em: < <http://www.carbografite.com.br> >
Acessado em: 02 fev. 2016.

ANTOSZCZYSZYN T. J., Revestimentos De Liga De Níquel Inconel 625 Por Plasma Com Arco Transferido (PTA-P) Sobre Aços API 51 X70 E AISI 316L. Dissertação de M.Sc., UFPR, Paraná, Brasil, 2014.

ASM METALS HANDBOOK. Properties and Selection Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials, v.2; 1997.

ASM METALS HANDBOOK. Welding, Brazing and Soldering, v.6, 10th Edition edn; 1993.

ASTM A 265.

ASTM G48.

API 5LD.

BEWLEY, J.G. Plasma-Transferred-Arc Wearfacing. Tooling & Production, p. 54-55. dez. 1980.

BEWLEY, J.G. High Production Hard Surfacing With Versatile Metal Powders. Welding Design & Fabrication. P. 70-71. Abr. 1978.

BOND D., Avaliação De Revestimento Soldados Processados Com Materiais Atomizados, Tese de D.Sc., UFPR, Paraná, Brasil, 2008.

BUSO, S.J. Estudos Microestruturais E Por Microanálise Para Identificação Dos Precipitados Presentes Em Amostras Da Liga De Níquel 600 (Nacional) Após Processo De Soldagem. São Paulo: IPEN; 1999.

CANTARIN, T.N.; NEVES, M.D.M. Caracterizações Mecânicas e Microestruturais do Aço AISI 8630 Modificado Revestido com a Liga de Níquel 625 pelo Processo TIG. In: Consolda 2011; Natal – RN - Brasil. 2011.

DESIR, J.L. Plasma Arc Coatings Combat Component Wear. Welding and Metal Fabrication, p. 219-222. jun. 1983.

DEUIS, R. L. et al. Metal-Matrix Composite Coatings By PTA Surfacing. Composites Science And Technology, V.58, N. 2, P. 299-309, 1998.

DÍAZ, V. M. V., Inovação do Equipamento e Avaliação do Processo Plasma de Arco Transferido Alimentado com Pó (PTAP) para Soldagem Fora de Posição. Tese de D.Sc.em engenharia, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.

DRAUGELATES, U. et al. Surfacing With Combinations Of Wire And Powder For Producing Hard Material-Reinforced Wear Resistant Layers. Welding And Cutting, N. 4, p. 39-41. Düsseldorf, abr. 1995.

DUPONT, J. N., BANOVIC, S. W., MARDER, A. R. Microstructural Evolution And Weldability Of Dissimilar Welds Between A Superaustenitic Stainless Steel And Nickel-Based Alloys. Welding Journal Supplement. AWS. pp. 125-135, 2003.

EQUIPAMENTOS PARA REVESTIMENTO GTAW HW. Disponível em: <<http://www.arcdynamics.com.br>> Acessado em: 02 fev. 2016.

EEMUA PUBLICATION 294.

GEBERT, A. et al. Plasma-Pulver-Auftragschweissen.Oberflächentechnik, n.1, p. 56-60. München, 1996.

GUIMARÃES, A. S, Apostila de Processos de Soldagem, UFRJ, 2006.

HARDNESS CONVERSION. Disponível em: <<http://www.steelexpress.co.uk/steel-hardness-conversion.html>> Acessado em: 02 fev. 2016.

HUANG, X. et al. Applications of PTA Powder Welding in Petroleum Chemical Industry. Proceedings of the 15th International Thermal Spray Conference, p. 1013-1017. Nice, mai.1998.

INCONEL 625. Disponível em: <<http://www.comersul.com.br/>> Acessado em: 02 fev. 2016.

ISO 10423, Petroleum And Natural Gas Industries-Drilling And Production Equipment: Wellhead And Christmas Tree Equipment.

ISO 15614-7, Specification And Qualification Of Welding Procedures For Metallic Materials-Welding Procedure Test. Part 7: Overlay Welding.

ISO 15156-2(NACE 0175).

ISO 17637.

K. CORGAN, J. HAAKE NUVONYX Proceedings of the 23rd ASM Heat Treating Society Conference, September 25–28, 2005 David L. Lawrence Convention Center, Pittsburgh, Pennsylvania, USA Cladding With High Power Direct Diode Lasers vs. Cladding With Traditional Arc Welding Processes, Inc., Bridgeton Missouri, USA Nickel Institute Technical Series No 10 064.

KABATNIK, L. Plasma-Pulver-SchweiEm VerschleiBeständiger Schichten Auf Aluminiumwerkstoffe, Tese De D.Sc. Em Engenharia – Rheinisch- Westfälisch Technisch Technisch Hochschule Aachen, 2002.

KENNAMETAL, Disponível em: < <http://www.kennametal.com>> Acessado em: 02 fev. 2016.

KEJELIN N, Z.; BUSHHINELLI, A.J.A; POPE, A. M.: "Effects of welding parameters on the Partially Diluted Zones Formation at Dissimilar Metal Welds". In: Anais do 18th International Congress of Mechanical Engineering - COBEM: November; Ouro Preto. 2005.

MARCONI, M.; MARCONI, B. Powder Plasma Arc Welding On Thick Walled Pipes International Institute Of Welding, 16 p., Paper 11. 2005.

MARCONI, M. I Riporti Duri Con Polveri Saldate Con Il Processo P.T.A. (Plasma Ad Arco Trasferito). Livro Online (www.plasmateam.com), 320 p. 2002.

MARTINS F., FILHO I.G.S., Estudo Da Influência Dos Parâmetros De Soldagem De Revestimento Resistente À Corrosão Na Diluição Pelo Processo TIG Modalidade Arame Quente, Relatório Técnico Apresentado Ao CNPQ Como Parte Do Processo De Prestação De Contas Do Processo 478015/2006-2, UFTPR, 2006.

MATSUDA, F. et al. Carbide Addition On Aluminium Alloy Surface By Plasma Transferred Arc Welding Process. Transactions Of JWRI, Welding Research Institute Of Osaka University, v.19, n.2, p. 241-247. Osaka, 1990.

MATSUDA, F. et al. Formation Of Thicker Hard Alloy Layer On Surface Of Aluminum Alloy by PTA Overlaying With Metal Powder. Transactions Of JWRI, Welding Research Institute Of Osaka University, v.20, n.1, p. 89. Osaka, 1991.

NOECKER LI FF, DUPONT, J. N.: Metallurgical Investigation Into Ductility Dip Cracking In Ni-Based Alloys: Part I. Welding Journal, 88(1):7S-20S, 2009.

NORSOK M-001.

PAVLENKO, A. Neue Kenntnisse über Physikalische Grundlagen des Plasma-Pulver-Auftragschweißens als Basis für die Prozesssteuerung. 1996. 118 f. Tese De D.Sc. em Engenharia) - Rheinisch-Westfälisch Technisch Technisch Hochschule Aachen.

PAYÃO J.C.F, Apresentação Sobre Projeto Plasma Pó Para Revestimento, LNTSold, 2015.

PLASMA TORCHES. Disponível em: < <http://www.plasmatechnik.com/english/sonderbrenner/sonderbrenner>. > Acessado em: 20 fev. 2016.

PLASMA CONSUMABLES. Disponível em: < www.pro-fusiononline.com> Acessado em: 02 fev. 2016.

PROCESS OF FABRICATION. Disponível em: < <http://www.r-techwelding.co.uk> > Acessado em: 02 fev. 2016.

PROF. DR. ING. U. DILTNEY. ISF, Welding Institute RWTH, Aachen University Lecture Notes. Welding Technology 1 Welding and Cutting Technologies.

PTAP APPLICATIONS. Kennamental Presentation 2015.

PTA Welding Systems. ISOTEC, 24 p., set./2001.

PTA, Eutectic Castolin, Disponível em: < <http://www.eutectic.com.br>> Acessado em: 02 fev. 2016.

RAMIREZ, A. J., LIPPOLD, J. C. b. High Temperature Behavior Of Ni-Base Weld Metal Part II - Insight Into The Mechanism For Ductility Dip Cracking. Materials Science and Engineering A. v380. pp. 245-258, 2004.

REIS, R.; SCOTTI, A. Fundamentos E Prática Da Soldagem A Plasma. Artliber Editora, 1ª ed., 2007. ISBN 978-85-88098- 39-8.

ROTÂMETROS. Disponível em: < http://www.elan.ind.br/ELAN_arquivos/pop_up/rotametros.jpg> Acessado em: 02 fev. 2016.

SCHNICK, M. et al. Simulation von Plasmalichtbögen. Artigo do DFK 2006, 10 p. Dresden, mar. 2006.

SERRA F.A.S., Curso de Revestimentos Metálicos, Petrobras, CENPES, 2005.

SILVA R.H.G., Inovações Em Equipamentos E Em Parametrização No Processo De Revestimento Por Plasma-Pó (PTA-P). Tese de D.Sc., UFSC, Santa Catarina , Brasil, 2010.

SUN, Z.; HUANG, Z.H. Micro-PTA Powder Cladding On A Hot Work Tool Steel. Int. J. Of Materials And Product Technology, v.13, ns. 3-6, p. 146-154, 1998.

TIG TORCHES. Disponível em: <
http://www.pwpind.com/welding_torches/tig_gas_lens.htm > Acessado em: 20 fev. 2016.

TIG PROCESS. Disponível em: <
<http://www.profabricationtechniques.com/welding/gtaw-tig-welding/> > Acessado em: 20 fev. 2016.

TIG PROCESS. Disponível em: < <http://www.trade-equip.co.uk/blog/?p=39> >
Acessado em: 02 fev. 2016.

WELDING PROCESS. Disponível em: <
<http://www4.hcmut.edu.vn/~dantn/course/Pdf/WeldingTechnology1-English.pdf>>
Acessado em: 02 fev. 2016.

TIG PROCESS. Disponível em: <
<http://www.profabricationtechniques.com/welding/gtaw-tig-welding/>> Acessado em: 02 fev. 2016.

TOCHAS TIG. Disponível em: <<http://www.binzel-abicor.com.br>> Acessado em: 02 fev. 2016.

TOCHAS PLASMA PÓ (PTAP). Disponível em: <<http://www.tbi-brasil.com>>
Acessado em: 02 fev. 2016.

TUNGSTÊNIO E3. Disponível em: < <http://www.e3tungsten.com/>> Acessado em: 02 fev. 2016.

WAHL, W.; KRAUSKOPF, F. Plasma-arc Powder Surfacing of Ferrous Materials. Welding and Cutting, n. 2, p. 15-16. Düsseldorf, fev. 1993.

ZEEMANN A.; Diluição, Infosolda, Seção artigos, 2003. Disponível em:
<http://www.infosolda.com.br/artigos/metsol106.pdf>. Acessado em: 29 de out. 2003.