

CARLOS MAURÍCIO GALLOTTI COIMBRA

**COMPARAÇÃO DOS PROCESSOS DE
REVESTIMENTO POR SOLDAGEM PTA - PLASMA
ARCO TRANSFERIDO E POR SOLDAGEM
OXIACETILÊNICA SIMULANDO APLICAÇÃO EM
LÂMINAS DE ESTABILIZADORES DE COLUNA
DE PERFURAÇÃO DE PETRÓLEO**

Monografia apresentada ao Programa de
Educação Continuada em Engenharia da Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo para
conclusão de curso de Especialização.

São Paulo

Outubro /2012

CARLOS MAURÍCIO GALLOTTI COIMBRA

(Engenheiro Mecânico, Escola de Engenharia Universidade Mackenzie)

**COMPARAÇÃO DOS PROCESSOS DE
REVESTIMENTO POR SOLDAGEM PTA - PLASMA
ARCO TRANSFERIDO E POR SOLDAGEM
OXIACETILÊNICA SIMULANDO APLICAÇÃO EM
LÂMINAS DE ESTABILIZADORES DE COLUNA
DE PERFURAÇÃO DE PETRÓLEO**

Monografia apresentada ao Programa de Educação Continuada em Engenharia da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para conclusão de curso de Especialização.

Área de Concentração: Engenharia de Soldagem

Orientador: Prof. Dr. Sérgio Duarte Brandi

São Paulo

Outubro/2012

*Se podes contemplar a ciência face a face,
Sem renegar a Fé nem ser demolidor:
Sonhar sem permitir que o sonho te embarace,
Pensar sem ser pensador;
Se consegues ser duro e ser calmo sem custo,
Ser valente sem fúria e sem temeridade,
Se sabes ser bondoso e ao mesmo tempo, justo,
Sem Tibieza nem vaidade .*

Rudyard Kipling

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à Minha Esposa Alessandra Coimbra e à Minha Filha Carol, que pacientemente conseguiram administrar a ausência do marido e pai, nos finais de semana, nestes 02 anos que estive envolvido neste projeto. Agradeço e um beijo carinhoso às duas.

Também concedo este espaço aos meus pais que, sempre sonham pela constante continuidade nos estudos de seus filhos.

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Dr. Sergio D. Brandi pela orientação e atenção durante este trabalho.

Ao Professor Dr. José Ramalho pelo auxílio em informações adicionais dos processos e indicação de laboratório.

A empresa Comersul que apoiou este trabalho, propiciando acesso a um acervo técnico e pela doação dos consumíveis para os experimentos realizados. A empresa Gerdau Comercial de Aço S/A, em especial ao Danilo Lopes e a Joyce Lozano, por disponibilizar amostras de aço AISI 4140. A empresa Megadur que disponibilizou o sistema PTA para os ensaios de revestimento das amostras. A empresa Quality que disponibilizou o sistema Oxi-acetileno para os ensaios de revestimento das amostras.

Aos amigos Antonio Leria e Andrés Toscanini que me incentivaram neste projeto. Ao amigo Roderick Webber que propiciou em campo, informações do processo PTA. Ao amigo Luiz Cunha que propiciou informações técnicas dos estabilizadores. Ao amigo Quenelmo Lima, que detalhou na prática, revestimentos em estabilizadores na cidade de Macaé.

Ao colega Jaime Casanova que administrou no laboratório da USP o corte das amostras para análises. Ao colega Dani Michel Andrade Centeno que realizou os ensaios no laboratório da USP.

CURRICULUM VITAE

CARLOS MAURÍCIO GALLOTTI COIMBRA

Brasileiro, Casado 40 anos
Rua Guaraiúva, 599 Apto 82 - Brooklin
São Paulo – SP
Cel : 55.11.8151-1661
Residência : 55.11.5507-5701
e-mail : carlos.gallotti@uol.com.br

FORMAÇÃO ACADÊMICA

- Cursando o 4º Semestre em Pós Graduação em Engenharia de Soldagem pela USP / 2012
- Pós Graduação em Comércio Exterior pelo Mackenzie / 2001
- Graduado em Engenharia Mecânica pelo Mackenzie / 1995

RESUMO DAS QUALIFICAÇÕES

- 17 anos de experiência profissional na área de manutenção mecânica industrial, direcionado para recuperação de partes e componentes desgastados por abrasão, corrosão, calor, impacto e atrito metal-metal;
- Especialista em Aspersão Térmica. Desenvolvendo aplicações e processos mais adequados para as necessidades dos clientes (Flame/ Arc spray/ Plasma spray/HVOF Maçarico e PTA;
- Experiência acumulada em atividades como: Planejamento (PCP e PCM); Suprimentos; Controle de serviços; Desenvolvimento e Aplicações no Cliente; CRM – Comercial; Atualmente coordenando uma equipe de vendas, difundindo tecnologia em Aspersão Térmica e Soldas Especiais de revestimento, pouco exploradas no Brasil, em mercados como Petróleo/ Gás; Mineração; Forjaria; Plástico; Vidro e Sucro Alcooleiro;

EXPERIÊNCIA PROFISSIONAL**Comersul Importação e Exportação LTDA – (Dez/02 – Atual)**

Representante e distribuidor de consumíveis e equipamentos das empresas: Wall Colmonoy, Deloro Stellite, Metallisation, Saint-Gobain, HC Starck, Osram/Plansee e Special Metals Weldings.

Cargo: Gerente de Aplicação e Novos Negócios (Principais responsabilidades):

- Coordenar equipe de vendas; buscar resultados comerciais; adequar estoque com a demanda do mercado;

- Consolidar o nome da empresa e das representadas no mercado Nacional, difundindo políticas sérias, seguras e estoques inteligentes;
- Implementar o CRM- Customer Relationship Management na empresa;
- Desenvolver aplicações e projetos de revestimentos e sistemas em Aspersão térmica e Soldagem. Em especial, Soldabrasagem e Plasma Arco Transferido;
- Entender e conquistar mercados poucos explorados, como Petróleo / Gás, Petroquímico, Mineração e Sucro Alcooleiro, com o foco de crescimento em faturamento e lucratividade;
- Identificar ligas especiais e processos, fazendo Cross Reference, com os dados das representadas as normas de Aspersão Térmica e soldagem;

Cascadura Industrial S/A - (1995 – 2002)

Líder na prestação de serviço/ manutenção Industrial em Aspersão Térmica

Cargo: Gerencia de Suprimentos e PCP (Principais responsabilidades):

- Responsável pela área de suprimentos e sua distribuição entre as unidades fabris; planejamento de estoque (curva ABC); PCP; desenvolvimento e qualificação de fornecedores; análise de custos e prazos; negociação internacional; controle das atividades nos processos de importação e exportação; follow-up. Implementação da ISO 9002, no setor de suprimentos, sendo o Representante da Administração;

Cargo: Engenharia de Fábrica e Aplicações (Principais responsabilidades):

- Engenharia de processos de produção: PCP; PCM; responsável pelo gerenciamento do chão de fábrica, controlar dos serviços postos na fábrica. Cromo duro, Metalização, Soldagem e Unisangem.
- Engenharia de Aplicação: desenvolvimento revestimentos, orçando serviços em campo, implementando novas tecnologias para novos clientes, bem como antigos, atuando mais diretamente nos setores petroquímico, siderúrgico e metal mecânica.

Lucas Diesel do Brasil S/A (1994 - 1995)

Cargo: Estagiário na Área de Qualidade

- Elaboração e divulgação de Procedimentos e Instruções de Trabalho referentes ao item 4.11 da Norma ISO 9001.

IDIOMAS

- Inglês Fluente

RESUMO

Neste trabalho foi comparado dois processos de revestimentos por soldagem em ferramentas de perfuração de petróleo. O objetivo deste estudo foi avaliar desempenho, tempo de deposição, máxima temperatura de aplicação, microdureza atingida do revestimento, questões de metalurgia e soldagem como diluição no metal base (MB), zona de ligação (ZL) e zona afetada pelo calor (ZAC).

Os processos de revestimento por soldagem, conforme norma API Espec.7-1, contemplam a aplicação por Plasma Arco Transferido – PTA e por Maçarico Oxi-acetileno, revestindo componentes com ligas resistentes ao desgaste abrasivo.

Para obtenção de dados práticos, foram realizados revestimentos por soldagem em corpos de prova em aço cromo-molibdênio, SAE 4140 e como consumível, uma liga de níquel cromo boro com carbeto de tungstênio. Os parâmetros de aplicação foram seguidos, conforme manuais. A coleta de dados e ensaios de microdureza e micro e macrofotografias foram realizados.

As principais características de cada processo foram destacadas: Oxi-acetileno, muito utilizado para recuperação de pequenas superfícies, onde a habilidade do soldador é fundamental. O PTA, indicado para revestimentos onde há a necessidade de controle térmico no metal base evitando mudanças de fase do aço “ZAC” e diluição. Quanto à velocidade e consumo de material, ambos tem características próximas. Também constatado no estudo, pouca literatura traduzida dos 02 processos.

ABSTRACT

This work compared two processes of coatings for welding tools oil drilling. The aim of this study was to evaluate performance, deposition time, maximum application temperature, microhardness reached the coating, metallurgy and welding issues like dilution in metal base (MB) attachment zone (ZL) and heat affected zone (HAZ).

The coating processes by welding, according to API Espec.7-1, contemplate the application Plasma Transferred Arc - PTA and oxy-acetylene torch, coating components to abrasive wear resistant alloys.

To obtain practical data were performed by welding coatings on specimens in chrome-moly steel, SAE 4140 and as consumable, a nickel chrome boron with tungsten carbide. The application parameters were followed as textbooks. Data collection and microhardness tests and micro and macrophotographs were performed.

The main characteristics of each process were highlighted: Oxy-Acetylene, widely used for recovery of small areas where the skill of the welder is fundamental. The PTA, suitable for coatings where there is a need for thermal control in avoiding base metal phase changes of steel "HAZ" and dilution. As regards the speed and material consumption, both have similar characteristics. Also noted in the study, little translated literature of 02 cases.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Ilustração de um estabilizador de petróleo	04
Figura 2.2 – Desenho construtivo de um estabilizador com detalhes das lâminas.....	04
Figura 2.3 – Ilustração de um escareador com roletes	06
Figura 2.4 – Ilustração e foto de um alargador	08
Figura 2.5 – Ilustração dos dentes removíveis de um alargador.....	14
Figura 2.6 – Ilustração do processo de brasagem de carbeto de tungstênio com maçarico.....	17
Figura 2.7 – Ilustração do processo soldabrasagem por cordão com carbeto de tungstênio	19
Figura 2.8 – Ilustração do processo solda brasagem por maçarico com pó e pastilha de tungstênio	20
Figura 2.9 – Ilustração do processo soldagem PTA com pó e pastilha de tungstênio	22
Figura 2.10 – Ilustração de uma coluna plasma de um arco	26
Figura 2.11 – Ilustração um corte esquemático de uma tocha plasma.....	26
Figura 2.12 – Ilustração de um esquema de uma tocha TIG e uma tocha plasma	27
Figura 2.13 – Esquema de zonas de calor numa tocha plasma	29
Figura 2.14 – Esquema de uma tocha de arco plasma transferido e arco plasma não transferido.....	30
Figura 2.15 – Ângulo de afiação de um eletrodo.....	36

Figura 2.16 – Desenho das linhas longitudinais de afiação de um eletrodo e disposição para afiação.....	37
Figura 2.17 – Ilustração dos cordões de solda dos processos listados e suas diluições	40
Figura 2.18 – Corte de uma tocha PTA, detalhando as principais partes internas	42
Figura 2.19 – Distribuição de temperatura de um arco plasma PTA	43
Figura 2.20 – Esquema de montagem de um arco plasma transferido e um arco plasma não transferido construtivo, de uma soldagem.....	44
Figura 2.21 – Disposições dos cordões de soldagem com o processo de soldagem com PTA.....	47
Figura 2.22 – Esquema de uma soldagem oxigás, com o metal de adição na forma de vareta nua	50
Figura 2.23 – Fluxo de calor radiando pela peça a ser soldada	51
Figura 2.24 – Esquema do fluxo e reações de combustão de um dardo de um maçarico oxi-acetilênico.....	53
Figura 2.25 – Variação da temperatura (a) em função da distância a partir da extremidade do dardo	55
Figura 2.26 – Esquema de um maçarico convencional, detalhando as partes..	57
Figura 2.27 – Esquema de um maçarico que projeta partículas metálicas.....	59
Figura 2.28 – Foto superior, aplicação em eixo de uma turbina de motor diesel e na foto inferior, um bloco de motor sendo revestido	61
Figura 4.1 – Foto da tocha do PTA, montada no pórtico, depositando o material numa amostra, para ajuste de parâmetros.....	74

Figura 4.2 – Foto do Maçarico Eutalloy aplicando o consumível no corpo de prova.....	74
Figura 4.3 – Disposição da soldagem no disco, a distância para leitura da temperatura e o tempo a ser mensurado para obter a velocidade de soldagem.....	76
Figura 4.4 – Corte do disco, ilustrando detalhes do cordão de soldagem.....	77
Figura 4.5 – Corte do disco, ilustrando detalhes dos cordões de soldagem.....	77
Figura 4.6 – Corte do disco, ilustrando detalhes dos cordões de soldagem.....	78
Figura 4.7 – Microscópio óptico Olympus BX60M	90
Figura 5.1 – Ensaio de Dureza Vickers no corpo de prova soldado pelo processo PTA no ensaio de Sobreposição.....	94
Figura 5.2 – Ensaio de Dureza Vickers no corpo de prova soldado pelo processo Oxiacetileno no ensaio de Sobreposição.....	95
Figura 5.3 – Ensaio de Dureza Vickers no corpo de prova soldado pelo processo PTA no ensaio de Duplo Passe	95
Figura 5.4 – Ensaio de Dureza Vickers no corpo de prova soldado pelo processo Oxiacetileno no ensaio de Duplo Passe	96
Figura 5.5 – Macrofotografia do cordão de duplo passe e da ZAC.....	98
Figura 5.6 – Microfotografia na região antes da zona de ligação, com ensaio da microdureza, da soldagem de Sobreposição	100
Figura 5.7 – Microfotografia na região antes da zona de ligação, com ensaio da microdureza, da soldagem de Duplo Passe.....	100
Figura 5.8 – Macrofotografia do processo de soldagem PTA no ensaio de Sobreposição	101

Figura 5.9 – Macrofotografia do processo de soldagem Oxi-acetileno no ensaio de Sobreposição.....	102
Figura 5.10 – Macrofotografia do processo de soldagem PTA no ensaio de Duplo Passe.	103
Figura 5.11 – Macrofotografia do processo de soldagem Oxiacetileno no ensaio de Duplo Passe.	103
Figura 5.12 – Macrofotografia do processo de soldagem PTA e Oxi-acetileno no ensaio de Sobreposição, agrupadas para ilustrar a ZAC.	105
Figura 5.13 – Macrofotografia do processo de soldagem PTA e Oxiacetileno no ensaio de Duplo Passe, agrupadas para ilustrar a ZAC.	106

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Composição química típica dos aços AISI 4145	10
Tabela 2.2 - Composição química típica dos aços AISI 4145H.....	11
Tabela 2.3 - Comparação entre os processos de soldagem	38
Tabela 2.4 - Tipos e características das chamas	54
Tabela 4.1 - Composição química nominal e real do aço AISI 4140 conforme lote #89482010	65
Tabela 4.2 - Ensaio mecânicos, metalográficos e microinclusões do aço AISI 4140, informados no certificado de qualidade de número # 578909	66
Tabela 4.3 - Composição Química em percentual, requerida para Eletrodos e Varetas nuas de Cobalto e Níquel	70
Tabela 4.4 - Informações de composição química do material de revestimentos Colmonoy® 88PTA.....	71
Tabela 4.5 - Informações de composição química do material de revestimentos Colmonoy® 88HV	72
Tabela 4.6 - Informações dos parâmetros utilizados para a soldagem dos corpos de prova com o sistema PTA	79
Tabela 4.7 - Informações dos parâmetros utilizados para a soldagem dos corpos de prova com o maçarico oxiacetileno	81
Tabela 4.8 – Velocidade de Soldagem e Aporte de Calor por Processo	83
Tabela 4.9 - Ensaio Sobreposição Aporte de Calor e Tempo Gasto entre Cordões – Processo PTA	85

Tabela 4.10 - Ensaio Sobreposição Aporte de Calor e Tempo Gasto entre Cordões – Processo Oxiacetileno	85
Tabela 4.11 - Ensaio Duplo Passe Aporte de Calor e Tempo Gasto entre Cordões – Processo PTA	87
Tabela 4.12 - Ensaio Duplo Passe Aporte de Calor e Tempo Gasto entre Cordões – Processo Oxiacetileno	88
Tabela 5.1 - Ensaio Sobreposição Aporte de Calor e Tempo Gasto entre Cordões Comparativo com os 02 processos.....	105

LISTA DE SÍMBOLOS, SIGLAS E ABREVIATURAS

API:	American Petroleum Institute
ASTM:	American Society For Testing And Materials
AWS:	American Welding Society
CNC:	Controle Numérico de Comando
HAZ:	Heat Affected Zone
IIW:	International Institute of Welding
ISO:	International Organization for Standardization
LE:	Limite de Escoamento
LR:	Limite de Resistência
MIG:	Metal Inert Gas
MEV:	Microscópio Eletrônico de Varredura
PAC:	Plasma Arc Cutting
PTA:	Plasma Transferred Arc
PTAW:	Plasma Transferred Arc Welding
TIG:	Tungsten Inert Gas
ZAC:	Zona Afetada pelo Calor
μ :	Permeabilidade Magnética

SUMÁRIO

DEDICATÓRIA	iii
AGRADECIMENTOS	iv
CURRICULUM VITAE	iv
RESUMO	vi
ABSTRACT	vii
LISTA DE FIGURAS	viii
LISTA DE TABELAS	xxii
LISTA DE SÍMBOLOS, SIGLAS E ABREVIATURAS	xiv
SUMÁRIO	xv
1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.	2
2.1 ESTABILIZADORES, ESCAREADORES E ALARGADORES.	2
2.1.1 Estabilizadores.	2
2.1.2 Escareadores.	5
2.1.3 Alargadores.	7
2.1.4 Matéria Prima das Ferramentas de Coluna de Poço.....	8
2.1.4.1 Aço AISI 4145	10
2.1.4.2 Aço AISI 4145H.....	10
2.1.4.3 Aços Inoxidáveis Não Magnéticos	11
2.1.5 Revestimento nas Áreas que sofrem maior desgaste	13
2.1.5.1 Brasagem de alpaca com carboneto de tungstenio triturado.....	15
2.1.5.2 Soldabrasagem de Cordao Flexível de NiCrBSi com carbonetos de tungstenio eletrofundido triturado ou esferico.....	17
2.1.5.3 Soldabrasagem de pó metálico de niCrBSi+WC com carbonetos de tungstenio em pastilhas.....	19
2.1.5.4 Soldabrasagem pelo processo Plasma Arco Transferido PTA por pó metálico de NiCrBSi+WC com carbonetos de tungstenio em pastilhas	22
2.1.5.5 Soldabrasagem pelo processo Plasma Arco Transferido PTA por pó metálico de niCrBSi+WC com carbonetos de tungstenio em pastilhas em estabilizadores não magnéticos	22
2.2 PROCESSO DE SOLDAGEM COM PLASMA ARCO TRANSFERIDO.....	23
2.2.1 PLASMA.....	23
2.2.1.1 Definição.	23
2.2.1.2 Características do plasma.....	23

2.2.2 PROCESSO DO REVESTIMENTO POR PLASMA.....	24
2.2.2.1 Historico.	24
2.2.2.2 Descrição das Inovações.....	25
2.2.2.3 Benefícios da constrição do arco.....	28
2.2.2.4 Tipos de arco plasma.....	29
2.2.2.4.1 Transferido.....	29
2.2.2.4.2 Não Transferido.....	30
2.2.2.5 Vantagens do processo.....	31
2.2.2.6 Gás do Arco Plasma e Gás de Proteção.....	32
2.2.2.7 Eletrodo.....	34
2.2.2.8 Processo plasma arco transferido e demais processos do revestimento	37
2.2.3 PROCESSO POR ARCO TRANSFERIDO PTA PARA REVESTIMENTO.....	40
2.2.3.1 O Processo PTA.....	40
2.2.3.2 Por que o processo PTA para revestimento?.....	45
2.2.3.3 Materiais para o processo PTA de revestimento.....	48
2.3 PROCESSO DO REVESTIMENTO OXIGÁS – OXIACETILENICA - SOLDABRASAGEM.....	49
2.3.1 Definição	49
2.3.2 Princípios do processo.	51
2.3.2.1 Definição da chama oxiacetilênica.	51
2.3.2.2 Propriedades Física dos Gases.	54
2.3.3 Maçaricos (Equipamentos).	56
2.3.3.1 Maçaricos convencionais.	56
2.3.3.2 Maçaricos para Aspersão de Pó Metálico.	57
2.3.4 Soldagem com Maçarico Oxiacetilínico de ligas especiais..	59
2.3.5 Consumíveis para Soldagem com Maçarico Oxiacetilínico.	60
3. OBJETIVOS.	62
4. MATERIAIS E MÉTODOS.	63
4.1 MATERIAIS.....	63
4.1.1 CORPO DE PROVA:.....	63
4.1.2 REVESTIMENTO.	67
4.2 MÉTODOS.	73
4.2.1 EQUIPAMENTOS UTILIZADOS NA SOLDAGEM.....	73
4.2.2 ENSAIOS DE APLICAÇÃO.	75
4.2.2.1 Procedimento do revestimento com Arco Plasma Transferido PTA.....	78
4.2.2.2 Procedimento do revestimento com Maçarico Oxiacetileno	80
4.3 MEDIÇÕES.....	82

4.3.1 VELOCIDADE DO REVESTIMENTO E APORTE DE CALOR...	82
4.3.2 TEMPO TOTAL DO REVESTIMENTO E MAXIMA TEMPERATURA ATINGIDA.....	83
4.3.3 COMPARAÇÃO DA MICROESTRUTURA, DA ZAC E DA DILUIÇÃO ENTRE PROCESSOS	89
4.3.3.1 Caracterização Microestrutural.....	89
4.3.3.2 Ensaio Metalográfico	90
4.3.3.3 Ensaio de Microdureza.....	91
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	92
5.1 COMPARAÇÃO ENTRE PROCESSOS.	92
5.1.1 VELOCIDADE E TEMPO DO REVESTIMENTO	92
5.1.2 CONSUMO DE MATERIAL.....	93
5.1.3 MICRODUREZA.	94
5.1.4 DILUIÇÃO.....	101
5.1.5 ZAC ZONA AFETADA PELO CALOR.....	104
6. CONCLUSÕES.....	107
SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS	110
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	111

1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA.

Busca-se com este trabalho, apresentar o processo de revestimento com PTA - Plasma Arco Transferido, processo de revestimento que tecnicamente e comercialmente esta substituindo processos de revestimento tradicionais em lâminas e partes dos Estabilizadores, Alargadores e Escareadores, componentes do sistema de sondagem e de coluna de perfuração de petróleo, que sofrem desgaste excessivo por abrasão, atrito e corrosão.

Neste processo a aplicação de ligas especiais resistentes a desgaste e corrosão, compostas com Níquel, Cromo, Boro, Silício com Carboneto de Tungstênio, são as mesmas utilizadas nos demais processos de revestimento. Os benefícios deste processo consistem no aprimoramento tecnológico, execução do revestimento por soldagem e volume de produção.

Dividir-se-á o trabalho em abordagem das partes de uma coluna de perfuração de petróleo; do desgaste nas partes, como os estabilizadores; o processo de revestimento PTA e o processo Oxi-acetileno e a comparação prática dos 02 processos, avaliando resultados obtidos nos ensaios.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.

2.1 ESTABILIZADORES, ESCAREADORES E ALARGADORES

Estabilizadores, Alargadores e Escareadores são ferramentas de uma coluna de perfuração de poços de petróleo [1]. Também fazem parte de outras colunas de perfuração e extração de gás, de água bem como sondas para identificação do solo e estudo. Descrever-se-á as funções e características das ferramentas da coluna de perfuração, que serão analisadas neste estudo. Como são fabricadas, tipos de revestimentos de desgaste, processos de revestimento e inovações tecnológicas.

2.1.1 ESTABILIZADORES

Ferramenta imprescindível para a coluna de perfuração, por reduzir a transmissão dos movimentos laterais da coluna à broca [2,3], tem a função de centralizar a coluna de perfuração, afastar os comandos contidos numa coluna das paredes do poço e fornecer maior rigidez à estrutura de perfuração. Também mantém o calibre do poço, pois sempre o seu diâmetro interno vai coincidir com o diâmetro externo da broca. O seu posicionamento na coluna é muito importante para a perfuração direcional, pois sua posição controla a variação da inclinação, ou seja, permitir que a trajetória pretendida do poço não seja desviada e também quando se busca garantir a verticalidade dos comandos.

Os estabilizadores são partes integrantes dos comandos de colares de perfuração, traduzidos de (*drill collars*), que possuem em seu corpo lâminas de forma espiral, projetada para o diâmetro externo, revestidas com metal duro ou soldadas com carboneto de tungstênio. Podem também ser camisas acopladas, de forma espiral no sentido da perfuração, para evitar o contato dos comandos, como sensores e bombas de óleo, com a parede do poço e sem perder a funcionalidade na coluna de perfuração.

Os estabilizadores normalmente são instalados entre os comandos dos colares de perfuração.

Os estabilizadores são divididos em:

Não rotativos, que podemos chamar de fixos e dos Rotativos com lâminas intercambiáveis, integrais e soldadas.

Os estabilizadores não rotativos são fabricados de borracha e danificam-se rapidamente quando perfurando em formações rochosas muito abrasivas.

Os estabilizadores rotativos de camisas intercambiáveis podem ter a camisa substituída quando apresentar certo desgaste. Já os estabilizadores com lâminas integrais e soldadas, estudo deste trabalho, podem ser recuperados pelo processo do revestimento oxi-acetilenica, TIG, MIG e PTA, preenchendo novamente as áreas das lâminas desgastadas, retornando à medidas originais.

As lâminas dos estabilizadores podem ser divididas com espirais abertas (270°) ou fechadas (360°). As lâminas são revestidas com ligas especiais que suportam a abrasão severa, causada pelo atrito direto do estabilizador à parede do poço. Geralmente as lâminas são revestidas com carboneto de tungstênio, cobrindo boa parte da área de contato ao poço [4]. As figuras 2.1 e 2.2

representam, respectivamente, um estabilizador e desenhos construtivos de um estabilizador e detalhes das lâminas.

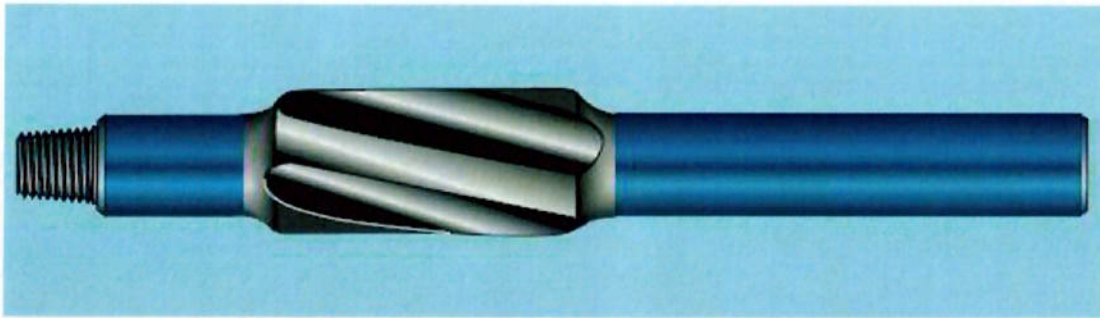


Figura 2.1 – Ilustração de um estabilizador de coluna de poço. [5]

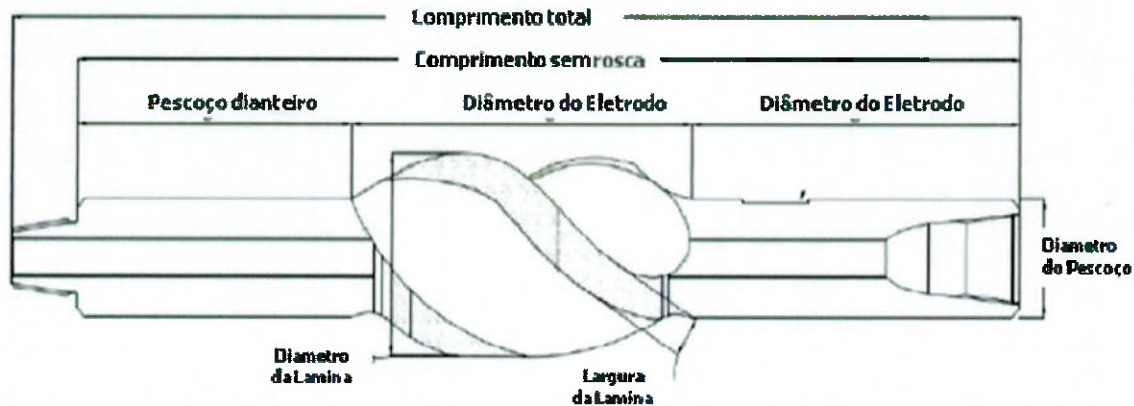


Figura 2.2 – Desenho construtivo de um estabilizador, detalhando as lâminas [Adap. Ref. 6].

Dentro de um poço de perfuração, existem variáveis importantes como: o tipo de rocha, onde identificará o componente abrasivo existente; o lodo perfuração, detalhes de viscosidade, lubrificação e também fator de desgaste erosivo, a presença de outros agentes, como água, sais etc., que podem acelerar a corrosão dos metais; e complementando, a presença de várias combinações dentro de um único poço [7]. Com estas inúmeras possibilidades de

combinações, é estimulado um desenvolvimento constante de novos estabilizadores e revestimentos nas lâminas.

Far-se-á necessário, descrever tipos de estabilizadores de lâminas, suas aplicações e formas construtivas, mas não se especificando detalhes dimensionais e características técnicas [8,9]:

- Lâmina Espiral Integral – Utilizado para formações rochosas duras. Superfície de contato de 360°. Construção em uma só peça. Fabricados em aço AISI 4145H e aços não magnéticos [10];
- Não Magnéticos – Fabricado em aços inoxidáveis não magnéticos, como o próprio nome traduz, utilizado em aplicações de perfuração direcional, onde se busca a leitura dentro de uma coluna de perfuração;
- Camisas Estabilizadoras traduzido de (*Sleeves*) – Utilizadas em áreas remotas. Intercambiáveis com outras camisas e mandris;
- Trico – Desenhado especialmente para ser utilizado em aplicações de águas profundas onde prevalecem ambientes de perfuração mais severos;
- Lâmina Reta Soldada – Para perfurar formações suaves a semiduras.

2.1.2 ESCAREADORES

O escareador tem a mesma função do estabilizador, porém gera menos torque, trabalha diretamente em contato com as paredes do poço e são empregadas em poços onde as rochas são mais densas. Por possuir roletes nas lâminas, consegue a função de mandril.

A presença dos roletes, nesta ferramenta estabilizadora de coluna de poço consegue manter o calibre, principalmente quando as formações são muito abrasivas. Também chamado de roletes de escareadores, traduzido de (*Roller-Reamer* ou apenas *Reamer*).

Divide-se basicamente em três tipos de usos:

- Escareador de fundo com três roletes. Utilizado entre os comandos dos colares de perfuração e a broca, para diminuir a necessidade de repasse na coluna de perfuração.
- Escareador de coluna com três roletes. Utilizado entre os comandos com finalidade de manter o calibre do poço e ajudar na eliminação das folgas junta as chavetas.
- Escareador de fundo com seis roletes. Utilizado entre os comandos e a broca. Em função do maior número de apoios evita alterações abruptas na direção e inclinação.

A figura 2.3 representa um escareador com os roletes no centro do corpo.

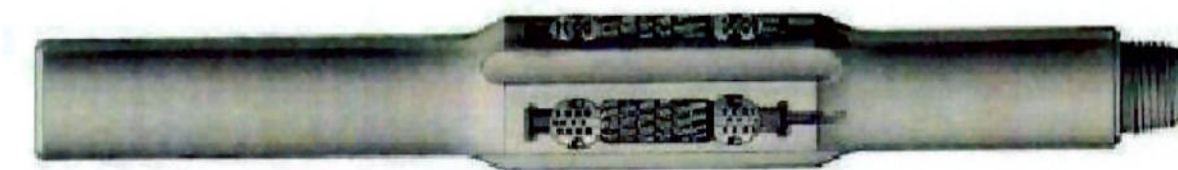


Figura 2.3 – Ilustração de um escareador com os roletes centrais [Adapt. Ref. 11].

Complementando, os escareadores tem a função de alinhar e principalmente direcionar a coluna de perfuração [12].

2.1.3 ALARGADORES

Alargador de poço, como os estabilizadores e os escareadores, são ferramentas de uma coluna de perfuração. Esta ferramenta, como o nome já sugere, tem a função de aumentar o diâmetro de um poço já perfurado. Também, existem colunas de perfuração que se busca trabalhar com alargadores desde a superfície, trabalhando com uma única medida [1]. Existem basicamente dois tipos de alargadores:

- Alargador total, traduzido de (*Hole Opener*). Alargador utilizado quando se deseja alargar ou abrir um poço desde a superfície, diâmetro fixa. Por exemplo: perfuração do condutor de 30 polegadas utiliza uma broca de 26 polegadas e um Alargador total de 36 polegadas. Esta ferramenta aumentará a coluna do poço;
- Alargador de meio de poço, traduzido de (*under reamer*). Alargador utilizado quando se deseja alargar um trecho do poço começando por um ponto abaixo da superfície. Por exemplo, podem ser usados com a finalidade de prover espaço para a descida de revestimento de poço. Os braços móveis são normalmente abertos através da pressão de bombeio [7].

A figura 2.4 representa um esquema de um alargador de poço e com os dentes rotativos, como se fossem brocas adicionais à ferramenta.



Figura 2.4 – Ilustração de um alargador [5] e foto da ferramenta.

2.1.4 MATÉRIA PRIMA DAS FERRAMENTAS DE COLUNA DE POÇO (ESTABILIZADORES/ ESCAREADORES/ ALARGADORES)

As ferramentas de poço normalmente são fabricadas em aços especiais, com propriedades mecânicas conforme norma API Espec.7-1 e ISO 10424-1 (*Petroleum and Natural Gas Industries – Rotary Drilling Equipments – Part 1: Rotary Drill Stem Elements*) [13], atendendo a esforços, tensões, resistência a corrosão e ao desgaste por abrasão e soldabilidade.

A norma API – Espec. 7, informa no capítulo material requerido os seguintes pontos: “onde não há uma solicitação específica”, busca-se fabricar as partes de uma coluna de perfuração, como estabilizadores, escareadores e alargadores, conforme a norma ISO 10424, que pode variar conforme aplicação, mas deverá atender as especificações de limites de composição química, condições de tratamento térmico e limites de resistência a tração,

compressão, alongamento e dureza. Referente a resistência ao impacto deverá seguir ensaios conforme a norma a ASTM A 370 [14].

Comercialmente os fabricantes de colunas de perfuração, trabalham com aços AISI 4145 e o AISI 4145H, onde H, na língua inglesa, abreviação de *hardness* traduzindo endurecido e o teor de carbono é aumentado em 0,02 pontos percentuais. [15]. Também descrito como faixa "H" conforme SAE J1268 JUN80 [16]. São aços cromo-molibdênio com teor de carbono na casa dos 0,45% e tratados termicamente para aumentar a dureza e a resistência mecânica.

Há uma tendência no mercado mundial para fabricar partes de uma coluna de perfuração, em especial os estabilizadores com aços inoxidáveis, buscando as propriedades do cromo, criar um filme na superfície que resiste à oxidação tornando o material mais passivo e resistente a corrosão. Bem como utilizando as propriedades não magnéticas do aço. E função da necessidade do revestimento, onde afetariam diretamente a característica magnética do aço, alguns fabricantes desenvolveram novos aços inoxidáveis com baixíssimo teor de carbono, chamando os comercialmente aços inoxidáveis não magnéticos, onde cada fabricante patenteia a liga. Temos como grandes fabricantes destes aços a Carpenter Technology Corporation, ThyssenKrupp AG. e Schoeller-Bleckmann Darron Limited [18, 19].

A seguir estão apresentadas as ligas usualmente utilizadas no mercado, ilustrando composições químicas e tratamento térmicos.

2.1.4.1 Aço AISI 4145

Os aços AISI/SAE 4145 (UNS G41450/ ABNT 4145H) são aços média-liga Cromo-Molibdênio, de média temperabilidade, onde se consegue atingir valores intermediários de dureza, resistência mecânica e tenacidade, quando beneficiados [16]. Na tabela 2.1 tem-se a composição química típica da liga.

Tabela 2.1 – Composição química típica nominal do aço AISI/SAE 4145 (UNS G41450/ ABNT 4145H) [16].

Elemento Químico	C	Mn	Si	P	Cr	Mo	S
Percentual % Nominal	0,45	0,85	0,25	0,02	0,90	0,20	0,025

Esta classificação de aço é utilizada em eixo, engrenagens, luvas, rolos para papelão corrugado e principalmente para a indústria do petróleo, em partes de coluna de perfuração, como estabilizadores, alargadores, escareadores, etc.

2.1.4.2 Aço AISI 4145H

O aço AISI 4145H Modificado HTSR (*Heat treated Stress Relieved*) também é um aço liga Cromo-Molibdênio, com faixa "H" conforme SAE J1268 [16]. A tabela 2.2 mostra a composição química típica da liga. Quando comparado com o aço AISI 4145, apresenta valores nominais muito parecidos, porém com faixa mais aberta de carbono. Este intervalo de composição química favorece o tratamento térmico de beneficiamentos conforme norma API.

Tabela 2.2 – Composição química típica do aço AISI 4145H Modificado HTSR [15,16].

Elemento Químico	C	Mn	Si	P	Cr	Mo	S
Percentual % Nominal	0,47	0,85	0,25	0,02	0,90	0,20	0,025

O aço AISI 4145H Modificado HTSR é um aço cromo molibdênio onde é especificado um tratamento térmico, mantendo as mesmas qualidades da liga. Para obter esta classe de aço AISI 4145H, o aço é principalmente temperado e revenido, atingindo durezas na faixa de 30 a 36HRc. Com um carbono levemente superior ao AISI 4145, assemelha-se ao AISI 4140, oferecendo uma boa ductilidade e tenacidade, mantendo características combinadas com a resistência ao desgaste.

2.1.4.3 Aços Inoxidáveis Não Magnéticos

Nos últimos anos a indústria do petróleo, em função das adversidades existentes numa exploração de petróleo, buscou em parceria com que centros de pesquisa e desenvolvimento, novas tecnologias em aços, revestimentos e processos para os em equipamento. Para atender novas bacias de petróleo, novos campos de perfuração, principalmente em águas profundas onde as laminas d'água são superiores e também a presença do pré-sal [20].

Para atender esta nova demanda, as novas colunas de perfuração são mais longas, e necessitam ser precisas e são controladas a partir de comandos das

bases. Desde na identificação de eventuais falhas numa sonda de perfuração ou extração, reparando ou ajustando ações como ajuste de pressão de óleo das bombas, fluxo do lodo, alinhamento da coluna de perfuração, aumento ou redução de velocidade e carga nas brocas, dentre outras ações numa coluna de perfuração. Os aços já desenvolvidos conforme a norma API, atendem muito bem os requisitos de dureza, resistência mecânica e soldabilidade. Mas neste último quesito, quando um aço do tipo AISI 4145H for submetido a altas temperaturas, que ocorrem durante um processo do revestimento, as características de permeabilidade magnética são afetadas, comprometendo a qualidade dos impulsos elétricos. Havendo esta magnetização do aço, o controle dos dados e a comunicação entre as partes eletrônicas, tornam-se comprometida.

Como são ligas especiais, com a substituição de elementos e a inclusão de outros que garantem a características de não magnetizar, muitos destes materiais são patenteados pelos seus detentores de tecnologia. Empresas como a Carpenter Technology Corporation, ThyssenKrupp AG. e Schoeller-Bleckmann Darron Limited, desenvolveram suas próprias ligas.

Os três fabricantes de aços não magnéticos comentados, apresentam produtos muito similares, diferenciando-se entre si, tanto em percentual de elementos como na ausência/ substituição de elementos. Por se tratar de marcas registradas, reservam os direitos de divulgação e estudos. Em linhas gerais, estes aços não magnéticos são aços inoxidáveis austeníticos modificados, ligados com nitrogênio. Os baixos teores de carbono resultam na diminuição da tendência de precipitação de carbonetos no contorno do grão, principalmente

quando comparados com outros aços similares, como aços da família cromo-manganês. Também há o aumento da resistência à corrosão intergranular. Com a presença de níquel, aumentado significativamente valores de cromo e mantendo manganês e molibdênio e a inclusão do nitrogênio, a liga tem propriedades elevadas de resistência à corrosão intergranular.

Embora todos os fabricantes analisados tenham vários tipos diferentes de aços não magnéticos, variando entre si, percentuais dos principais elementos de liga como o cromo e nitrogênio, mas se mantendo as propriedades não magnéticas, tanto em condições de trabalho à quente como quando recozidos. A permeabilidade magnética quando aquecido é menor que 1,002 H/m [19]. Permeabilidade é a grandeza magnética, denominada por μ , que quantifica o valor magnético de um determinado material, medido na unidade H/m (Henry/metro) [21]. Este material apresenta valor de dureza na faixa de 32 a 38 HRC.

2.1.5 PROCESSOS DE REVESTIMENTO POR SOLDAGEM DAS LÂMINAS E DAS ÁREAS QUE SOFREM MAIOR DESGASTE

Como já informado nos capítulos anteriores, uma coluna de perfuração é composta por uma sequência de partes e em estudo deste trabalho, destacam-se aos estabilizadores, os escareadores e os alargadores. Nos diâmetros mais externos destas ferramentas há o contato direto com a parede do poço acelerando o desgaste abrasivo destas partes. A recuperação destas peças normalmente é por revestimento e aplicando-se revestimentos duros, ou ligas

especiais resistentes a abrasão e corrosão existentes no ambiente de perfuração.

Nos escareadores, as partes que sofrem desgaste, normalmente são roletes e estes são repostos com facilidade. Havendo desgaste de alguma outra parte do mesmo, busca-se um reparo localizado.

Para os alargadores, os dentes que fazem o trabalho de abrir o diâmetro do poço podem ser substituídos por peças novas ou também soldados localizadamente ou insertando carbonetos de tungstênio com outros elementos resistentes [6]. Por não requerer esforços em desenvolver alternativas num projeto de reparo de uma coluna de perfuração, não será abordado também neste estudo. A figura 2.5 ilustra os dentes removíveis de um alargador.



Figura 2.5 – Fotos dos dentes removíveis de um alargador.

Nos estabilizadores, as lâminas sofrem desgaste severo e constante junto à parede do poço. Devido ao projeto construtivo desta ferramenta, que estabiliza a coluna num poço. Faz-se necessário a recuperação ou a fabricação dos mesmos com soluções de revestimento que suportem a abrasão e corrosão.

No decorrer dos anos, novas tecnologias e novos processos de revestimento com metal duro ou microconstituintes com alta resistência vem sendo incorporados com outras soluções em virtude de custo e limitação de investimento.

Entre os materiais que mais suportariam a abrasão severa das rochas e o atrito direto constante podem-se destacar os diamantes e os rubis, dentre outros minerais, mas que são comercialmente inviáveis. Os carbonetos de tungstênio, que são fabricados em grande escala, são os substitutos atuais destes minerais, para atender a demanda global pelo produto. Os carbonetos de tungstênio podem estar na forma de pastilhas sinterizadas, ou *bits* triturados de carbonetos também sinterizados ou em grão/ partículas uniformemente distribuídos de morfologia angular ou esférica. Este último fornecido pelo processo eletrofundido.

Em função dos custos, disponibilidade no mercado e grande gama de formatos e de formas de aplicação, o carboneto de tungstênio é o constituinte mais amplamente utilizado para revestir as lâminas dos estabilizadores, desta forma chamados de revestimentos duros. Nos próximos tópicos são descritos alguns processos de deposição de revestimento duro.

2.1.5.1 Soldabrasagem de alpaca com carbonetos de tungstênio triturados

A soldabrasagem como no processo de brasagem, é um processo de junção que possui as seguintes características: o metal de adição deverá ter a temperatura de fusão compreendida acima da faixa dos 400°C e sendo abaixo

da temperatura de fusão do metal de base. Diferenciando entre si, pelo fato do processo de soldabrasagem, o metal de adição não penetra por capilaridade e as formas das juntas serão semelhantes as adotadas nos processos de fusão convencionais. A preparação da superfície a ser soldabrasada, bem como na brasagem, requer condições necessárias para garantir a “molhabilidade” do metal de enchimento sobre o metal de base e garantir a penetração e aderência na junta bem como no revestimento. Para a ideal aplicação, requer a remoção dos óxidos, umidade, resíduos químicos e sujeiras decorrentes ao processo de usinagem anterior. Como o processo utiliza o maçarico, aquecendo a superfície a ser soldabrasagem, faz-se necessário o uso de fluxos, para evitar a oxidação durante o processo.

Neste processo a liga de Alpaca, ou solda Alemã, classificada como RBCuZn-D pela norma AWS, contém 50% de Cobre, 40% de Zinco e 10% de níquel [22], e a temperatura de fusão está abaixo do ponto de fusão do metal de base. Os carbonetos na forma de grãos são irregulares, de tamanhos médios e grandes (entre 1,00 a 10,00 mm), são inseridos no processo de fabricação das varetas de alpaca e soldabrasadas na superfície preparada a ser revestida. As características deste depósito são: boa aderência ao metal base, mas os carbonetos ficam vulneráveis em função da baixa resistência mecânica da alpaca em ambientes de abrasão severa e corrosão. Os carbonetos desprendem-se com facilidade acelerando o desgaste das lâminas. Pode-se colocar como vantagem deste processo, o baixo custo de aplicação e fácil remoção. E como desvantagem, a baixa resistência mecânica e baixa durabilidade comprovada do revestimento. Normalmente aplicado em

estabilizadores do tipo de poço para colunas em terra, traduzidos do inglês "*on shore*", onde há facilidade da remoção da coluna de perfuração. O processo de aplicação é simples e custo baixo, utilizando um Maçarico oxi-acetilênico. A figura 2.6 ilustra em fotos as varetas o soldador soldabrasando e a superfície revestida.



Figura 2.6 – Fotos das varetas do soldador e detalhes do revestimento.

2.1.5.2 Soldabrasagem de Cordão de NiCrBSi com carbonetos de tungstênio eletrofundidos, triturados ou esféricos.

O princípio da soldabrasagem com uma liga de níquel, a faixa de temperatura de fusão está muito próximas do metal de base, a aderência como na alpaca é por da difusão atômica entre o metal de adição no estado líquido e o metal

base no estado sólido [22,23]. Os carbonetos podem ser irregulares ou esféricos e de granulometria de pequenos para médios (na faixa entre 0,40 a 1,60mm). O revestimento tem excelente aderência ao metal base, boa concentração de carbonetos distribuídos na matriz de níquel, podendo variar de 40 a 70%. O processo de deposição é manual, dependendo muito da habilidade do operador. Pode-se destacar como vantagens, o custo do consumível, quando comparado com outros processos, onde estes estão na forma de cordões flexíveis compostos com níquel, tungstênio e outros elementos em pó, extrudados continuamente com um aglomerante. Baixo investimento de aplicação, um maçarico e uma tocha tipo chuveiro para aquecimento e formação da poça de fusão. Como desvantagem, o processo de soldagem requer um pré-aquecimento da superfície, próximo da temperatura de fusão do metal de adição, atingindo a faixa dos 900 a 1050°C. A zona afetada pelo calor por este processo é muito grande, solicitando um controle de térmico muito rigoroso, resfriando certas partes do estabilizador que não podem sofrer superaquecimento.

Processo muito parecido com a soldagem de alpaca, mas necessitando mais aporte térmico a superfície. A figura 2.7 ilustra em 02 imagens, o procedimento de pré-aquecimento buscando deixar a peça avermelhada e posteriormente a adição do consumível. Nas outras fotos o revestimento soldado e o acabamento após retífica.

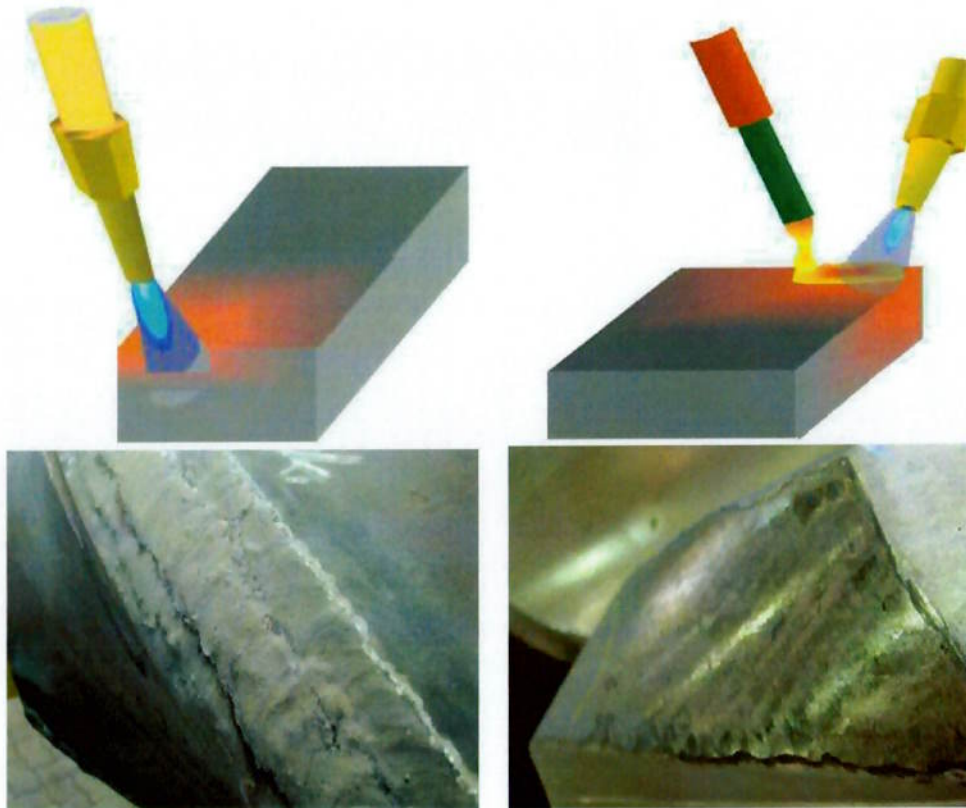


Figura 2.7 – Ilustração do processo de revestimento por chama oxi-acetilênica e fotos do revestimento, no estado bruto e após acabamento [24].

2.1.5.3 Soldabrasagem de pó metálico de NiCrBSi+WC com carbonetos de tungstênio em pastilhas.

Este processo é o mesmo da soldabrasagem comentado anteriormente, mas não ocorrendo à adição do cordão de tungstênio como consumível e sim, a liga de níquel com de tungstênio em pó. Será abordado nos próximos capítulos deste estudo comparativo de processos a soldabrasagem de pó, ou revestimento pelo processo oxi-acetilenico.

Complementando o revestimento é depositado sobre uma malha de pastilhas de carboneto sinterizadas ou eletrofundidas, de dimensões e disposição, conforme projeto. A característica deste revestimento consiste na excelente

aderência ao metal base e boa cobertura da superfície da lâmina. A liga de níquel fica distribuída ao entorno das pastilhas de carboneto. Este processo apresenta como vantagem, baixo investimento, necessitando somente de um maçarico para pulverização do pó e uma tocha tipo chuveiro para pré-aquecer e manter a temperatura. Como já comentado, este processo requer uma pré-aquecimento da superfície próximo da temperatura de fusão do metal de adição, variando na ordem de 900 a 1050°C. A figura 2.8 ilustra em fotos o processo de revestimento, utilizado com um maçarico, detalhes da disposição das pastilhas e o revestimento soldado com as pastilhas após retífica.

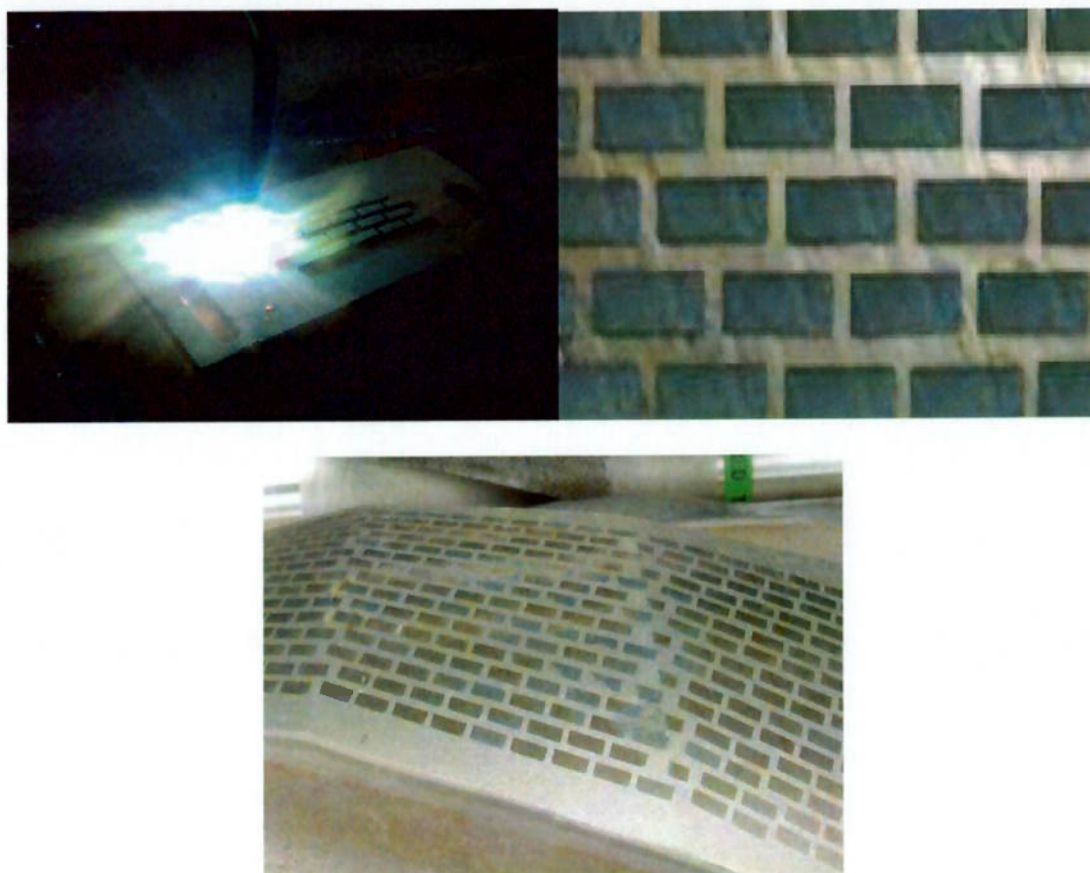


Figura 2.8 – Fotos da aplicação, das pastilhas e revestimento acabados.

2.1.5.4 Revestimento pelo processo Plasma Arco Transferido PTA por pó metálico de NiCrBSi+WC com carbonetos de tungstênio em pastilhas.

Processo de revestimento com plasma arco transferido, obtido a partir de um arco elétrico de tensão e corrente controlada, onde o arco plasma é muito concentrado e direcionado em função da constrição do bico. A alimentação do consumível ocorre simultaneamente no final da tocha.

Como no processo soldabrasagem, o consumível está na forma de pó, com concentrações de carbonetos variadas. A liga é composta de níquel com cromo, boro, silício e outros elementos. O revestimento pode ser soldado somente com o pó ou também com os carbonetos em pastilhas sinterizadas, de dimensões e disposição, conforme projeto. Como é uma soldagem, há fusão com o metal base, onde a aderência é total. A liga de níquel fica distribuída ao entorno das pastilhas de carboneto. O processo é automatizado, por X-Y ou robô e é muito difundido entre as grandes empresas que revestem as lâminas do segmento de recuperação de estabilizadores. Será detalhadamente nos próximos capítulos o processo. Mas em linhas gerais o PTA gera baixo aporte de calor no metal base, com baixa diluição, reduzindo a ZAC. Desta forma o processo consegue ser mais eficiente. A coluna plasma é muito concentrada consegue, com o auxílio da movimentação controlada por meio de CNC, mapeando os espaços entre as pastilhas de tungstênio, evitando o desperdício do pó de níquel e sobre metal. A figura 2.9 ilustra em fotos o processo de revestimento PTA, onde na primeira foto, tem a disposição de uma lamina a ser soldada. Na segunda foto a coluna plasma e na última, a lâmina revestida e retificada.

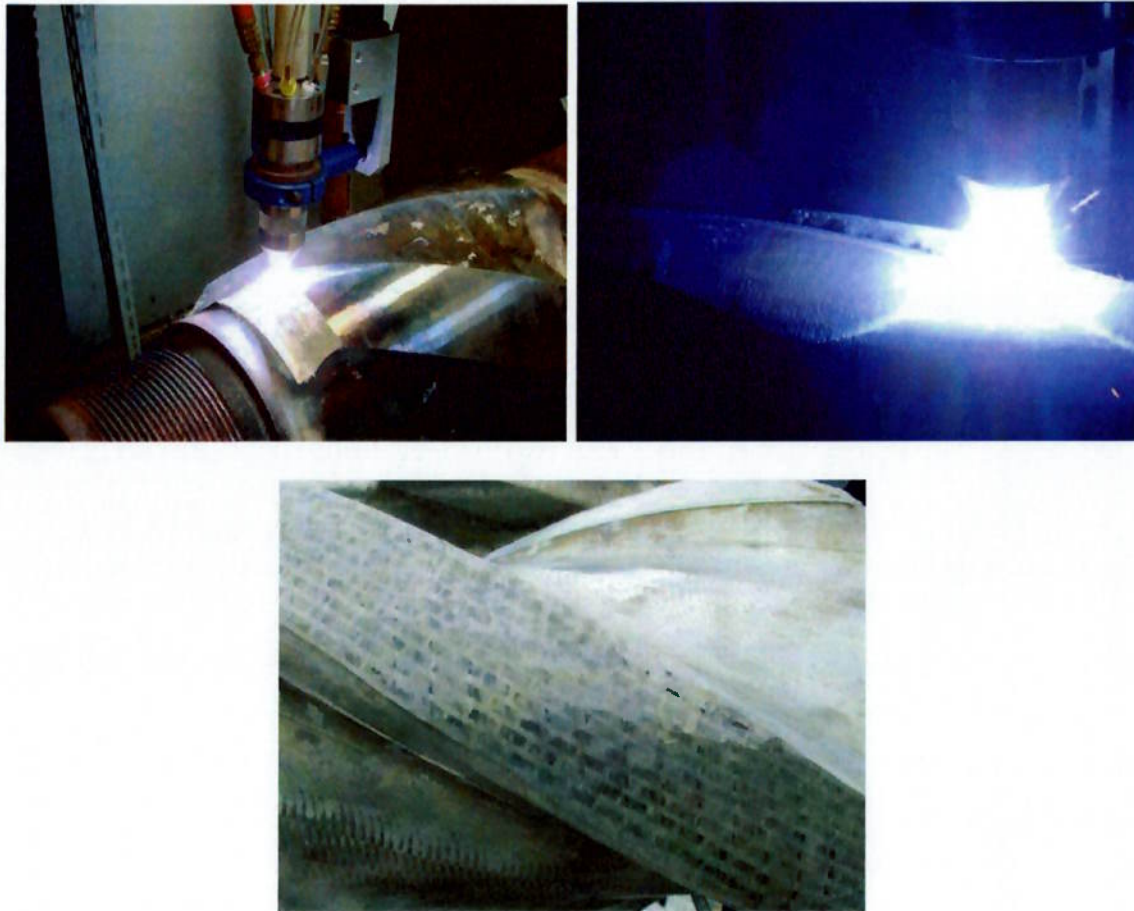


Figura 2.9 – Fotos de: acima, esquerda e direita, sistema PTA soldando e abaixo, revestimento acabado.

2.1.5.5 Revestimento pelo processo Plasma Arco Transferido PTA por pó metálico de NiCrBSi+WC com carbonetos de tungstênio em pastilhas em estabilizadores não magnéticos.

O processo é exatamente similar ao processo do revestimento por PTA, como informado no capítulo anterior, diferenciando somente na composição das ligas, que ao contrário do que difundem comercialmente, são ligas patenteadas, com presença do elemento Boro, que reduz o ponto de fusão e evitando altas temperaturas de fusão da liga.

2.2 PROCESSO DO REVESTIMENTO COM PLASMA ARCO TRANSFERIDO

2.2.1 PLASMA

2.2.1.1 Definição

Em uma matéria ao receber certa quantidade de energia, tende a ocorrer mudanças no seu estado. Sendo mais específico, sólidos fundem e passam para o estado líquido e conseqüentemente quando estes recebem mais energia, também tendem a alterar seu estado passando para o estado gasoso. Novamente, o estado gasoso recebendo continuamente mais fluxo de energia, a matéria atinge o estado plasma. Também chamado de o quarto estado da matéria.

Neste estado, os gases ionizam-se passando a ser eletricamente condutores. A ionização de um gás produz elétrons livres e íons positivos entre os átomos de gás. Nesta transformação o gás adquire excelente capacidade para transmissão de corrente elétrica.

2.2.1.2 Características do plasma

O plasma é eletricamente condutor. Restringindo o orifício de passagem do gás, ocorrerá maior a temperatura no plasma, devido à dificuldade da passagem de elétrons, desta forma desta, consegue-se controlar o fluxo de energia com uma ação mecânica.

2.2.2 PROCESSO DO REVESTIMENTO POR PLASMA

2.2.2.1 Histórico

Na década de 50, o processo TIG já estava fortemente implantado como método inovador do revestimento, quando se buscava alta qualidade e dificuldade do revestimento em metais nobres. Utilizando conceitos e pesquisas realizados na década de 20, onde os cientistas H. Gerdien e A. Lotz [25] trabalharam com arcos refrigerados com água para obter iluminação de grande intensidade [26]. Mais especificamente, colunas de arcos elétricos estabilizados com turbilhão de água refrigerada, engenheiros e pesquisadores do laboratório de solda da Union Carbide nos Estados Unidos aplicaram os conceitos acima, em uma variação do processo TIG, descobrindo que ao diminuir consideravelmente o diâmetro do bocal direcionador de gás da tocha TIG, refrigerada com água fria, as propriedades do arco elétrico seriam alteradas, gerando variações muito significativas [27].

Em 1955 o processo soldagem arco plasma já estava sendo experimentalmente utilizado e em 1962, o processo soldagem plasma, ou também chamado plasma por arco transferido, iniciava a comercialização, principalmente para soldagem autógena em juntas e posteriormente com adição de materiais. Inicialmente utilizava-se vareta nua, arame contínuo e com os anos, a introdução de consumíveis na forma de pó atomizado [28, 29], sendo esta última a forma mais utilizada no segmento do revestimento especial. O plasma arco transferido continua sendo referência em soldagem, pois consegue qualidade, produção e

principalmente automação no processo do revestimento, limitantes dos demais processos do revestimento [30].

2.2.2.2 Descrição das inovações

O processo do revestimento com plasma é um aprimoramento tecnológico do processo do revestimento TIG. Os fundamentos dos 02 processos são basicamente os mesmos, uma coluna de gás, com auxílio de um arco elétrico entre o eletrodo e a peça, promove a elevação da sua temperatura o suficiente para que os impactos entre as moléculas de gás provoquem entre si, desagregação das mesmas e ocorra a ionização. A figura 2.10 ilustra a coluna plasma. A diferenciação entre os processos e inovação consiste que o gás ionizado, intencionalmente é forçado a atravessar um orifício reduzido com paredes refrigeradas. Este choque térmico que o gás ionizado sofre, gera um elevado gradiente térmico, entre o núcleo da coluna de gás com as extremidades, que são banhadas com a parede de cobre refrigeradas do orifício. Há uma diminuição da densidade no centro da coluna estimulando os elétrons a adquirirem energia para ionizar outros átomos. Esta reação aumenta o grau de ionização da coluna do arco e faixas de temperatura, consequentemente taxas de energia transferida para a peça a ser soldada. Associada a ao significativo aumento da velocidade do plasma em função da constrição e da colimação, grau de paralelismo. A redução do diâmetro do bocal, constringindo o arco elétrico, eleva a velocidade do gás e o seu calor por efeito Joule. A temperatura e a tensão do arco cresceram dramaticamente. A força do gás ionizado por estar em alta velocidade remove da poça de fusão,

impurezas durante o revestimento [28]. A Figura 2.11 mostra um corte esquemático onde consegue identificar a coluna plasma entre o eletrodo e a peça, o bocal refrigerado e de constrição e detalhes do fluxo do gás de plasma.

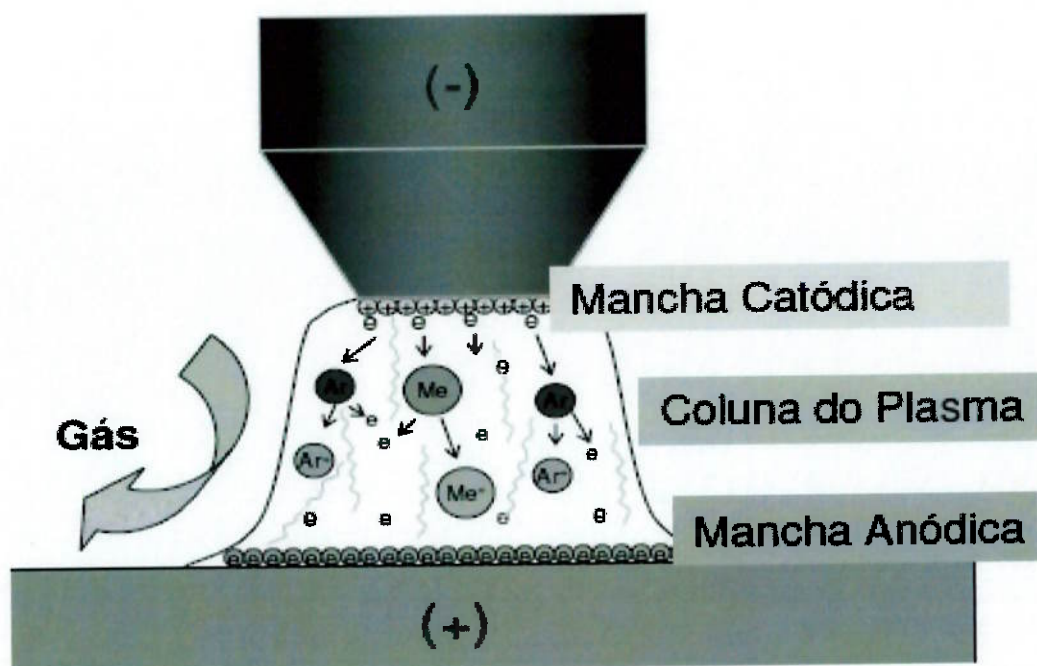


Figura 2.10 – Esquema de uma coluna plasma [31].

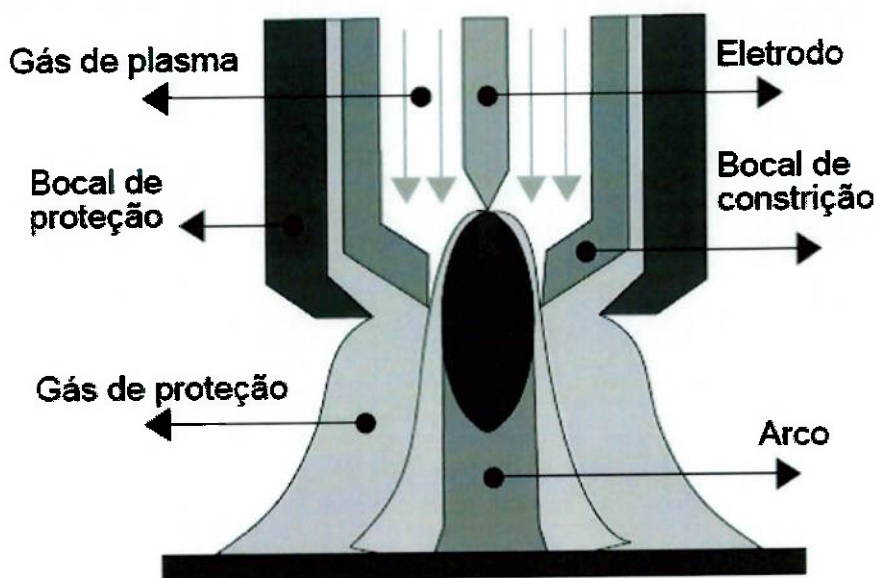


Figura 2.11 – Corte esquemático de uma tocha de um plasma [32].

O esquema construtivo de uma tocha de um arco plasma é diferente de uma tocha TIG. A figura 2.12 mostra dois cortes esquemáticos das tochas tanto do processo TIG como do plasma. No processo plasma, a ponta do eletrodo é recolhida no bocal, através do qual o gás plasma flui. No processo TIG o eletrodo é projetado para fora do bocal.

Neste processo o gás passa pelo arco elétrico formando o arco plasma. O mesmo gás, aquecido dentro do bocal, expande e ao sair no orifício, adquirindo velocidades na ordem de 6 km/s, acentuando o fenômeno de dissociação. Nesta transformação os íons recombinam-se para voltar ao estado gasoso, liberando energia que geram temperaturas na casa dos 25.000°C. Dependendo da combinação de gases, pode se obter valores superiores a 25.000°C [33].

Esta energia é utilizada para corte, soldagem autógenas de metais, soldagem com adição de ligas especiais e soldagem revestimento.

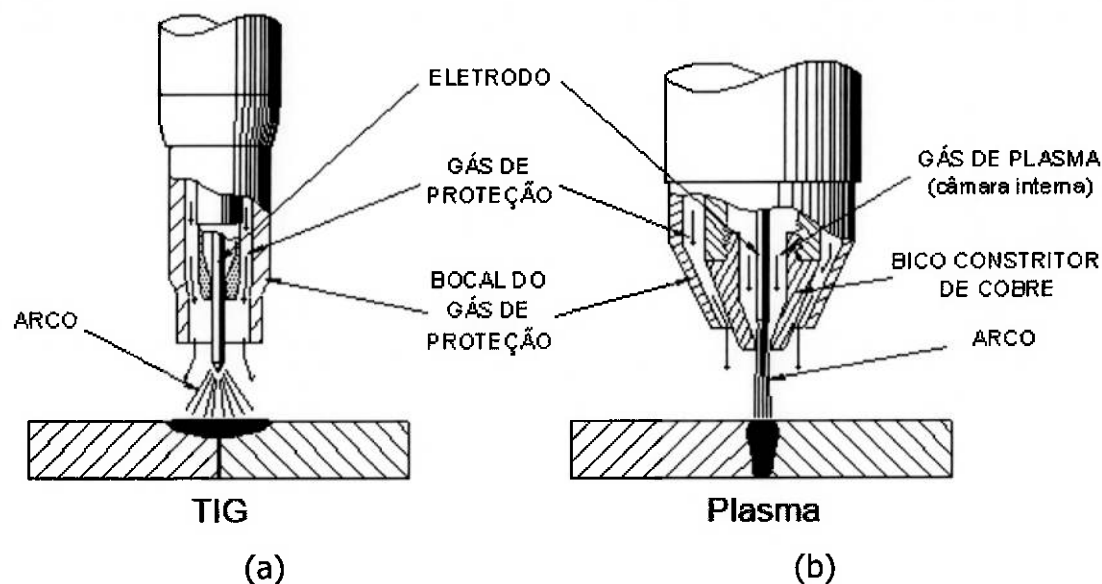


Figura 2.12 – Corte esquemático de uma tocha TIG (a) e de uma tocha do processo do revestimento a plasma com arco transferido (b) [34].

2.2.2.3 Benefícios da constrição do arco

O projeto construtivo de uma tocha plasma, o fluxo de gás que constituirá o jato plasma, circunda o eletrodo e passa através de um orifício calibrado constringindo o arco elétrico. Com esta engenharia, consegue notável melhoria na estabilidade do arco. No processo convencional TIG, também chamado de arco aberto, o arco é atraído para região mais próxima da peça a ser soldada e é defletido por campos magnéticos fracos. Este desvio/ inclinação, reduz a energia na peça. No processo do revestimento por plasma, considera-se o jato plasma mais consistente, forte e direcional, pouco afetado pelos campos magnéticos. A constrição possibilita altas concentrações nas densidades de corrente, consequentemente grande quantidade de energia. Altas densidades de corrente produzem altas temperaturas na coluna do arco. Esta constrição oferece melhor controle sobre a energia do arco [31].

A figura 2.13 ilustra o incremento de temperatura provocado pela constrição do bocal. Também descreve mudanças das características elétricas do arco. À direita temos um arco constringido, num orifício de 4,8mm, operando com 200A de corrente e argônio como gás do plasma e de proteção. No lado esquerdo, temos um arco aberto, processo convencional TIG, operando também com a mesma corrente, de 200 A, contínua e polaridade direta - CCPD. O Argônio como gás de proteção.

Na comparação, temos um incremento de 100% na tensão do arco. Mais energia e aproximadamente 30% de aumento na temperatura, entre o processo plasma arco e o processo TIG [28].

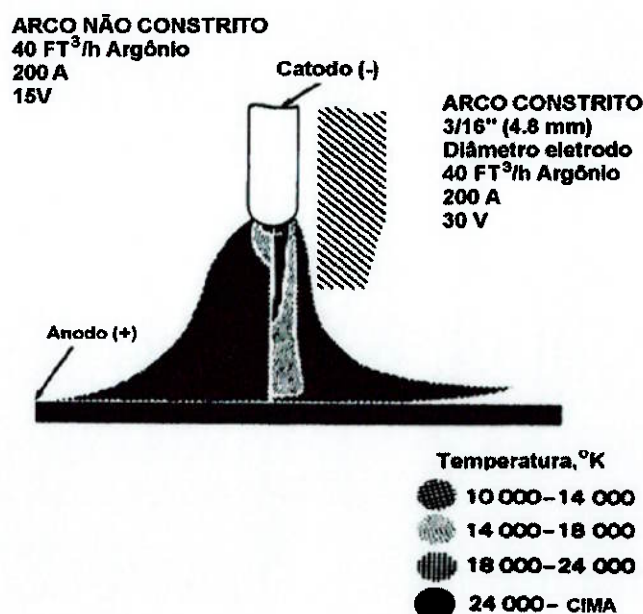


Figura 2.13 – Esquema onde ilustro as zonas de calor numa tocha plasma [35].

2.2.2.4 Tipo de arco plasma

Existem 02 tipos de arco plasma utilizados no processo do revestimento com plasma. O arco e o arco não transferido. A figura 2.14 ilustra os modos de transferência do arco [35].

2.2.2.4.1 Arco Transferido

Após a abertura do arco piloto entre o eletrodo e o bocal, o arco se transfere para a peça por aproximação, fluindo para a mesma, extinguindo-se o arco piloto. Ao se afastar a pistola da peça, o arco extingue-se. A peça a ser soldada é parte integrante do circuito elétrico. A taxa de transferência de energia para a peça é maior pois sofre influencia direta de 02 fontes de calor. Uma delas, a

mancha anódica na superfície. Fluxo intenso de elétrons. A segunda consiste no jato plasma, concentrado e direcional. Este processo, por arco transferido é o mais comum para soldagem.

2.2.2.4.2 Arco Não Transferido

O arco piloto é intensificado, soprado para fora do bocal aproveitando-se o calor gerado pelo mesmo. O jato plasma emerge entre o catodo e o anodo, dentro do corpo da tocha. O calor gerado sobre a peça a ser soldada é obtida somente pelo jato plasma, que vence o orifício constringido do bocal. Processo utilizado principalmente para corte de materiais metálicos não condutores, junção de peças também não condutoras, soldagem que requer baixa concentração de energia e principalmente em aspersão térmica de revestimentos, aspergindo pós metálicos e cerâmicos.

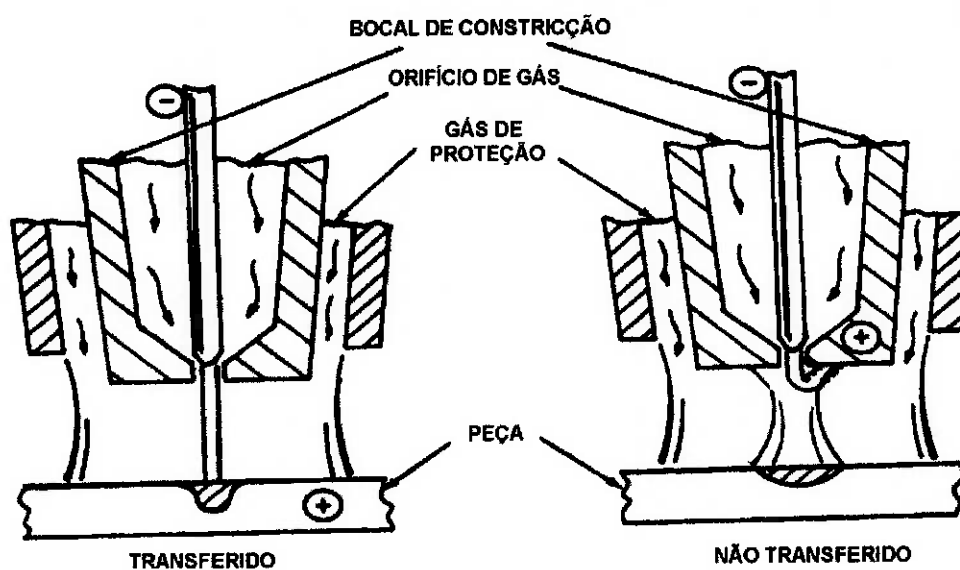


Figura 2.14 – Esquema de uma tocha arco transferido e arco não transferido

[35].

2.2.2.5 Vantagens do processo

O processo plasma arco destaca dos demais processos por manter estabilidade direcional, focada e concentrada independentemente das variações das distancias entre a peça a ser soldada e a tocha. A constrição do arco gera colimação do jato plasma, possibilitando variações no comprimento do arco ao alterar substancialmente a capacidade de fundir o substrato a ser soldado. Desta forma, é possível manter uma distância maior do bocal com a peça a ser soldada, obtendo-se um comprimento do arco maior, auxiliando em muito a visibilidade do operador. Fato que não ocorre com o processo TIG. Também em função do jato concentrado, consegue menores quantidades de passes do revestimento, e de material de adição, para processos de fabricação e revestimentos [27].

Como vantagem adicional, o eletrodo está alojado dentro do bocal de constrição e o contato com a superfície a ser soldada é uma operação improvável. Também nesta disposição recuada, reduz as chances de inclusão de tungstênio na solda. Bem como aumentando a vida do eletrodo.

O arco-piloto do processo plasma permite a abertura instantânea do arco principal do revestimento, independentemente estar trabalhando com intensidades de corrente baixa. Evitando uma superdosagem da corrente, na abertura do arco, provocando mordeduras e crateras. O arco-piloto serve para orientar o soldador a posicionar a tocha no local indicado para início do revestimento.

Complementado, o processo permite técnicas do revestimento diferenciadas como microplasma, fusão interna, do inglês *melt-in* e fusão em forma de

buraco de fechadura do inglês *key-hole*. Segue uma breve descrição técnica das citações:

- Microplasma. Técnica para união de chapas de espessuras de 0,1 a 1,0mm de espessuras;
- Fusão interna (*Melt-in*). Para união de chapas finas, soldagem autógena (sem adição de arame) de 0,5mm até 3,0mm de espessura de aços carbonos não revestidos e revestidos (galvanizados) e aços inoxidáveis;
- Buraco de fechadura (*Key hole*). Técnica utilizada para soldagem mecanizada ou robotizada, da maioria dos metais, em chapas com até 10mm de espessura, com juntas de topo, não requerendo o chanfro e a formação do buraco de fechadura é uma sinalização da completa penetração e uniformidade da junta soldada. Técnica que apresenta grandes vantagens metalúrgicas, pois o processo plasma garante baixa taxa de calor transferida ao substrato, limitando a zona termicamente afetada pelo calor, região que normalmente há o crescimento dos grãos. Também resulta menor tempo para fragilização de aços inoxidáveis e superligas, devido à alta velocidade de deposição [36].

2.2.2.6 Gás do arco plasma e gás de proteção

Para a formação de um arco plasma, os gases utilizados devem ser inertes, evitando a oxidação e erosão do eletrodo. Para a proteção da poça de solda, não é rigorosamente exigido um gás inerte, mas desde que este gás não cause transformações da junta soldada. O gás do arco plasma não é suficiente para a

proteção da região soldada, desta forma, faz-se necessário a adição de uma quantidade de gás de proteção. Tornando a tocha mais complexa.

Pode-se utilizar o mesmo tipo de gás para a formação do plasma e para a proteção adicional da poça de fusão. Principalmente para soldagem com altas correntes, para evitar variações na consistência dos gases [28,37].

A escolha do gás a ser utilizado para o plasma depende do metal a ser soldado e do metal de adição.

O argônio é o mais indicado na soldagem com baixas correntes e gerar um potencial de ionização na ordem de 15V. Promove melhor limpeza das camadas de óxidos de metais reativos e facilitar a abertura do arco elétrico. O argônio é utilizado quando outros gases especiais não forem recomendados para certos materiais a serem revestidos.

Tanto o hélio puro ou misturado com argônio, quanto à mistura de argônio com hidrogênio podem ser aplicados para o arco plasma, mas requerem tensões mais altas para a abertura do arco, para as mesmas correntes. Para o hélio, há necessidade de uma refrigeração do bocal mais eficiente, devido ao aumento da taxa de calor transferido à tocha.

A mistura de hélio ou hidrogênio pode gerar um potencial de ionização na ordem de 24,5 V. para uma mesma corrente. Tem um efeito redutor na poça do revestimento, mantém a área do revestimento limpa e o arco plasma tem uma suave pluma [33], revestimento em escamas.

A vazão do gás do plasma influencia no poder e penetração no processo do revestimento plasma. Quanto maior for o fluxo do gás plasma, maior será a

penetração, maior diluição do metal de adição no metal base e aumentando a zona termicamente afetada pelo calor - ZAC.

O tamanho do orifício de constrição a ser utilizado está relacionado diretamente com o diâmetro do eletrodo, com a corrente e com o fluxo de gás.

2.2.2.7 Eletrodo

No processo do revestimento arco plasma, os eletrodos não são considerados consumíveis. Participam como no processo do revestimento TIG para a geração do arco com a peça. Estes não diferem em nada dos eletrodos utilizados com as tochas TIG. São basicamente barras de tungstênio, puras ou ligadas com outros elementos como tória, lantânia, céria e zircônia, que auxiliam na ionização e baixam o ponto de fusão, aumentando a longevidade dos eletrodos [28, 33, 38]. Introdução para a descrição dos eletrodos.

- Eletrodos de tungstênio puro. Classificação AWS – EWP. Comparados com os eletrodos ligados, tem baixa capacidade de corrente. Indicado em correntes baixas.
- Eletrodos de tungstênio com Tória. Classificação AWS – EWTh-2. A faixa de tória varia entre 0,8 a 2.2%. Muito comum e facilmente comercializado, por ser superior ao eletrodo de tungstênio puro. Eleva a emissividade de elétrons do eletrodo e alcançar correntes elevadas no arco plasma, principalmente com corrente contínua e polaridade direta. Eletrodos de tungstênio dopados com tória estão sendo substituídos por outros tipos de eletrodos, em função do elemento tório, que é radiativo. Mesmo sendo de baixo índice de radiatividade, pode causar problemas

de saúde para os operadores, durante o processo de afiação, onde o operador pode vir a aspirar e ingerir pequenas partículas durante a retífica do eletrodo. Como informativo da AWS, na parte de proteção e segurança, informa que durante a retífica das pontas dos eletrodos dopados com tória, há a geração de poeira radioativa, com risco de exposição externa. Consequentemente, faz-se necessário a ventilação do local de trabalho e uso correto de EPI's.

- Eletrodos de tungstênio com Céria. Classificação AWS – EWCe-2. O teor de Céria varia de 1,8 a 2,2%. Alternativa não radiativa para o eletrodo com tória, em soldagem com corrente contínuas e polaridade direta, em faixas baixas. Principalmente para peças pequenas e delicadas. Não indicado para aplicações com correntes altas, devido a migração rápida dos óxidos em função do calor para a ponta do eletrodo.
- Eletrodo de tungstênio com Lantânia. Classificação AWS – EWLa-1½. O teor de Lantânia varia de 1,3 a 1,7%. Eletrodo que tem comportamento similar ao eletrodo de tungstênio com 2% de Tória. Utilizado também em aplicações, onde requerem altas velocidades. Estudos recentes, comparando eletrodos de tungstênio com 2% de Tória, com 2% de Céria e 1,5 % de Lantânia, os resultados dos ensaios indicavam este último com menor erosão na ponta do eletrodo.
- Eletrodo de tungstênio com zircônia. Classificação AWS – EWZr-1. Com faixas de 0,15 até 1%, são normalmente utilizados para soldagem alternada, podendo também utilizar em alta corrente contínua, mas com

baixo desempenho, quando comparados com os outros eletrodos. Alta resistência a contaminação do eletrodo [38].

A seleção dos eletrodos deve ser acompanhada pela norma AWS – A5.12-69, que pode ser a mesma adotada para os processos TIG e arco plasma.

A ponta do eletrodo deve ser cônica, com ângulo de 20 a 60° e principalmente concêntrica, para evitar o direcionamento do arco ou duplo arco. Para eletrodos com diâmetros maiores, como 1/8" e 3/16", utilizados para altas correntes, a ponta do eletrodo como exemplo, deve ficar na faixa de 0,8mm. Na figura 2.15 ilustra melhor dos ângulos e ponta do eletrodo. Também o eletrodo deve ser afiado no sentido longitudinal do corpo, para evita falhas na transferência dos elétrons no momento do arco plasma. A figura 2.16 ilustra a questão das linhas longitudinais e disposição no posicionamento de afiar os eletrodos.

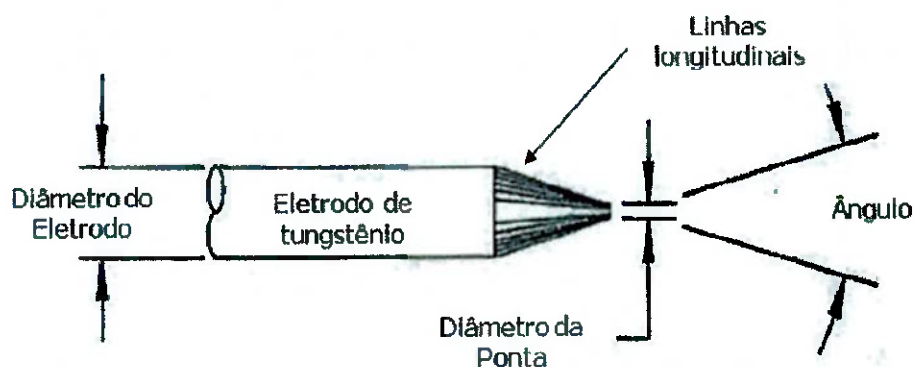


Figura 2.15 – Ângulo de afiação de um eletrodo [Adapt. Ref. 33].

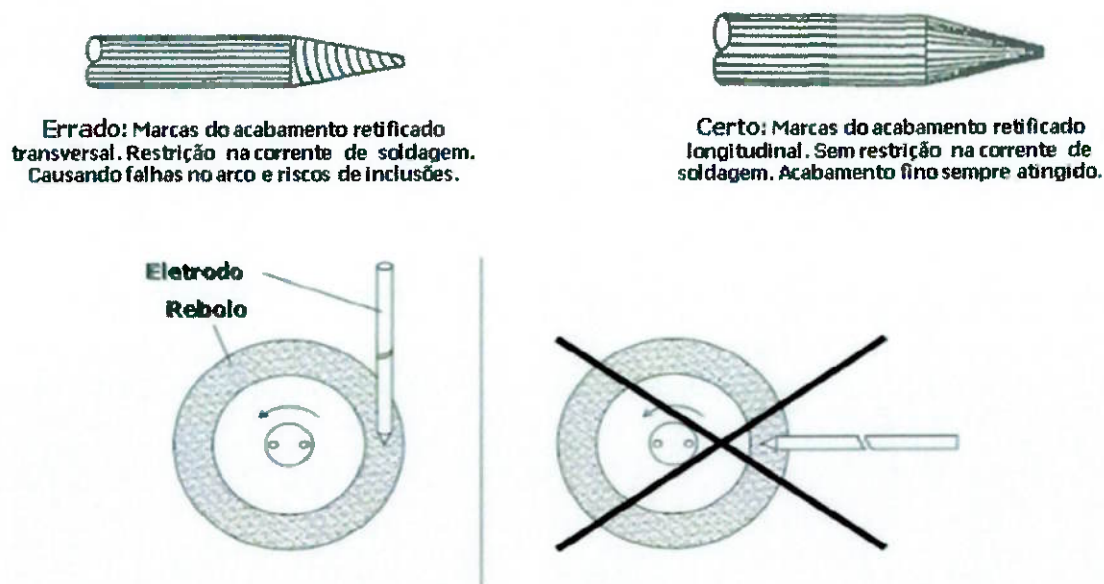


Figura 2.16 – Desenho das linhas longitudinais de afiação de um eletrodo e posição para afiação [Adapt. Ref. 33].

Existem sistemas desenvolvidos especificamente para a afiação dos eletrodos de tungstênio. São pequenas retíficas que garantem ângulos, pontas e raios longitudinais. Faz-se necessário o uso específico de rebolos diamantados, que consigam acabamentos com 20 RMS, ou melhor. Como a soldagem por arco plasma é muito mais precisa quando comparadas com outros processos, a utilização incorreta do eletrodo comprometerá a qualidade do revestimento.

2.2.2.8 Processo plasma arco transferido e demais processos do revestimento por soldagem

O processo arco plasma transferido destaca-se, quando comparados com os demais processos existentes, por apresentar uma coluna plasma mais intensa e concentrada e controlada, baixo aporte de calor na peça, consequentemente

menor ZAC e dispor de uma grande quantidade de consumíveis, quando estes, estiverem na disposição em pó atomizado. Sistema de alimentação contínua, chamado de alimentador de pó. Desvantagem, custo elevado, obrigatoriedade de um trocador de calor de água, automatização. Muito pouco se encontra sistemas plasma PTA em uso manual [30,39]. Na tabela 2.3, além de informar mais detalhadamente o processo PTA, compara com os outros demais processos do revestimento existentes.

Tabela 2.3 – Comparação entre os principais processos do revestimento para revestimento com diferentes consumíveis [adapt. Ref. 24,34,35,40].

Processo	Calor gerado	Diluição (%)	Variedades de materiais	Espessura (mm)	Tacha de deposição (kg/h)	Manual ou mecanizado	Eficiência (%)	Investimento
Oxi-acetileno /Soldagem com Gas (Maçarico. Vareta/ Pó)	Alto	BAIXO < 3	MEDIO	4 – 6 (Pós)	1 – 4	MANUAL	>95	BAIXO
Eletrodo Revestido	MEDIO	ALTO 15 – 35	MEDIO	4 – 6	1 – 3	MANUAL	<90	BAIXO
MIG/ MAG (Arame)	ALTO	ALTO 10 – 30	BAIXO	6 -10	2 – 6	AMBOS	>90	MÉDIO
Arco Submerso	ALTO	ALTO 15 – 40	BAIXO	6 -12	10 – 40	MECANIZADO	>90	ALTO
TIG (Vareta nua)	MEDIO	MEDIO 8 – 20	MEDIO	3 – 8	1 – 4	AMBOS	<90	MÉDIO
PTAW – PLASMA (Pó)	BAIXO	BAIXO 3 – 15	ALTO	2 – 10	2 – 10	AMBOS(*)	98	ALTO
LASER (Pó)	BAIXO	BAIXO <5	ALTO	1 – 5	1 – 2	MECANIZADO	70	ALTÍSSIMO

As vantagens do processo são [24,34,35] :

1. Baixa diluição = Alta taxa de deposição de metal duro. Na figura 2.17 identifica a diluição quando comparada com outros processos;

2. Menor Zona Afetada pelo Calor (ZAC);
3. Menor interferência nos grãos de carbonetos;
4. Pode-se atingir a faixa real de dureza do revestimento e máxima resistência por abrasão do revestimento;
5. Tensão residual reduzida, quando comparada com outros processos, como Oxi-acetilênica (Maçarico), Submerso e MIG;
6. Controle preciso da geometria o depósito;
7. Excelente preenchimento de camadas;
8. Alta taxa de deposição >95%, de eficiência;
9. Considerando ganho de produção, na ordem de até 100%, 65% em tempo e até 80% em material economizado e redução de hora máquina;
10. Custo do consumível: na ordem de 30% menor que em arames tubulares e varetas;
11. Maior densidade de energia pode ser transformada em maior velocidade, ou maior penetração ou eliminação de pré-aquecimento.
12. Maior facilidade de controle.

As desvantagens do processo são [24,34,35]:

1. Consumo de gás elevado, quando comparado com o processo TIG;
2. Investimento alto, em relação aos outros processos manuais;
3. Nos demais processos, o revestimento é manual ou semiautomatizado, neste considera um sistema e não um

equipamento, desta forma o mesmo mais complexo, com custo de manutenção e controles mais elevados;

4. Mão de obra mais qualificada, requerendo treinamentos.

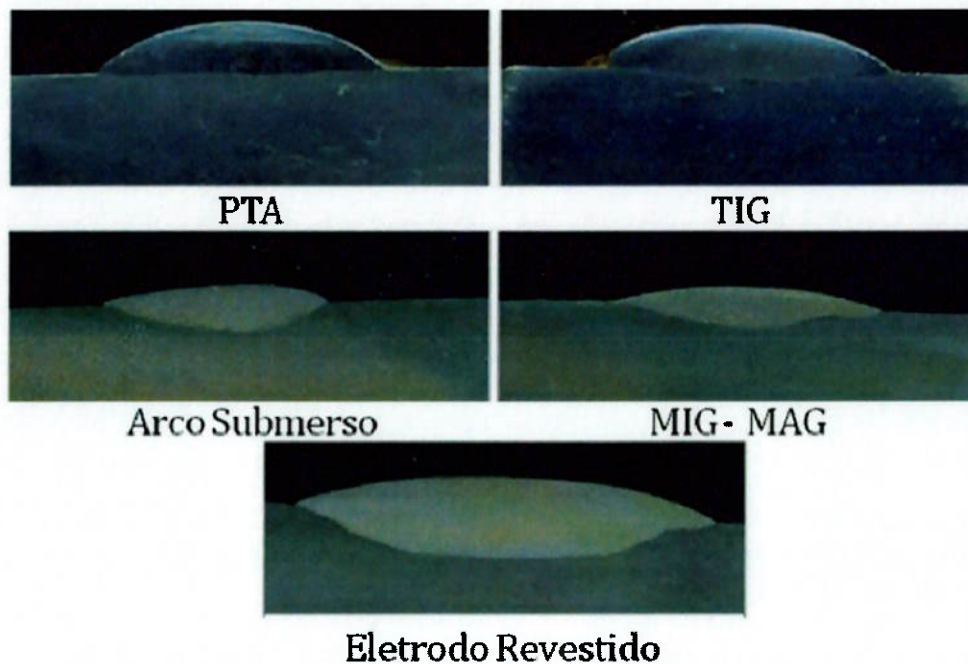


Figura 2.17 – Ilustração de cordões de solda e diluições dos processos do revestimento mais usuais [adaptada da referência 41].

2.2.3 PROCESSO POR ARCO TRANSFERIDO PTA PARA REVESTIMENTO.

2.2.3.1 O Processo PTA

O processo por Plasma Arco Transferido PTA, utilizado como revestimento por soldagem, vem sendo utilizado largamente nas últimas décadas, por ser um método de aplicação seguro, versátil e onde consegue depositar camadas significativas, de ligas complexas, ou de difícil elaboração, com qualidades do

revestimento excelente e confiável. Desde então, o processo cresce a passos largos e novas aplicações estão sendo adotadas, com o incremento de novos hardwares e softwares para a movimentação da tocha.

Grande gama de materiais, revestimento premium, repetição de processo do revestimento e alto volume de trabalho [39].

O PTA é uma extensão do processo a TIG, onde ambos utilizam um arco gás de proteção produzido pelo catodo de tungstênio não consumível. O arco plasma, no entanto oferece uma maior densidade de energia do arco em virtude da natureza do feixe colimado de plasma. A tocha incorpora um eletrodo de tungstênio toriado como catodo e não consumível. Um arco elétrico é criado entre o catodo e o anodo de cobre (corpo da tocha) ou a peça de trabalho. A figura 2.18 demonstra a forma construtiva de uma tocha PTA. A presença de um gás inerte, com relativamente alta ionização elétrica é direcionada em torno do catodo. O gás é ionizado com o arco, expande-se, acelerando e formando um arco de altíssima energia. Associadas as vantagens do arco plasma gerado, um sistema de esfriamento com água gelada no bocal de contração, além da necessidade do resfriamento do conjunto, criando um de choque térmico, constringindo mais o arco plasma, deixando-o mais fino e controlável [42] .

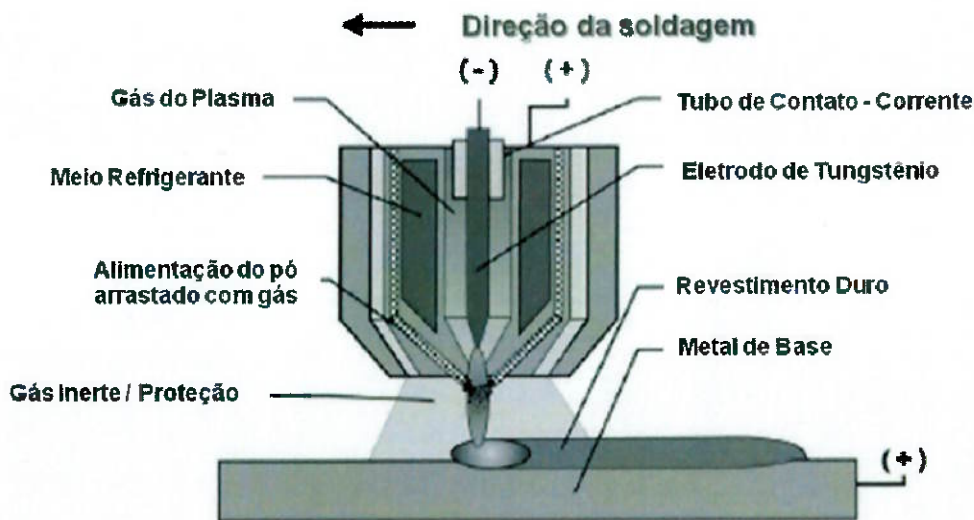


Figura 2.18 – Corte de uma tocha PTA, detalhando as principais partes internas [adaptada da referência 29].

No processo de revestimento PTA, onde o consumível está na forma de pó, incorpora 03 sistemas de fluxo de gás. O fluxo de gás interno, chamado de gás do plasma, quase sempre é de argônio. O gás plasma contribui para gerar o plasma e proteger o eletrodo toriado. O gás de proteção serve para isolar com um gás inerte, como proteção à poça de fusão, evitando a sua oxidação e contaminação. Também se utiliza o argônio. O terceiro sistemas de fluxo de gás, é utilizado no transporte do consumível, na forma de pó, no caso revestimento, onde a demanda é alta, o fluxo de gás consegue uma homogeneidade e repetição das camadas soldadas. Normalmente trabalha-se com argônio, ou utilizar outros gases como hélio e ou argônio com hidrogênio. A constrição do arco ou colimação é o ponto chave para se obter camadas uniformes de metal duro. O aspecto mais importante é estabilidade direcional do feixe plasma. O feixe ou fluxo plasma de um PTA não é desviado pelos

campos magnéticos e elétricos, comuns nos feixes do processo TIG. Consequentemente, altas densidades de corrente, concentração mais elevada de energia produzindo temperaturas mais elevadas do arco. Na figura 2.19 observa-se as faixas de temperatura, em Celsius e Fahrenheit, na coluna plasma de uma tocha PTA.

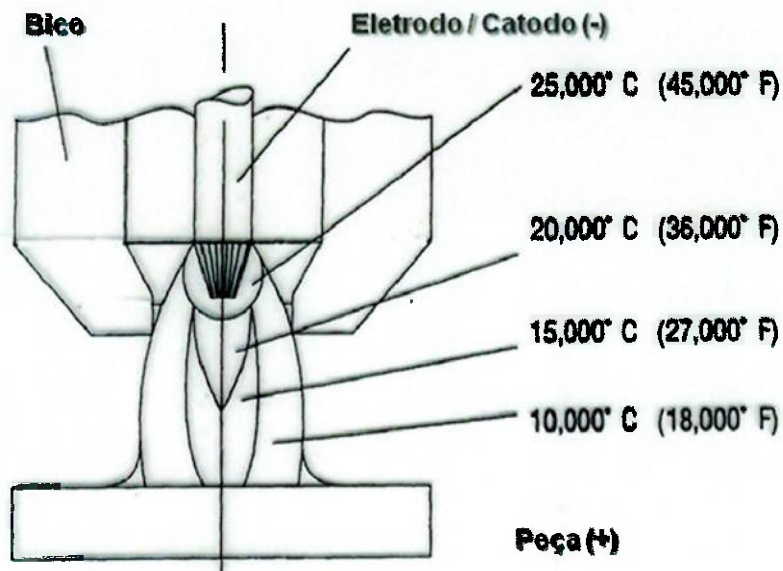


Figura 2.19 – Distribuição de temperatura de um arco plasma PTA. [Adaptação da referência 33].

Como já informado no capítulo anterior existem 02 tipos de arco plasma. O arco plasma não transferido e o arco plasma transferido. O PTA para revestimento utiliza os 02 modos de transferência. O arco piloto no sistema é acionado como um arco não transferido para auxiliar a transferência para arco principal. Serve para estabilizar o arco, de baixa e média até a plena carga. Normalmente é alimentado por uma fonte de alimentação de energia separada (outra fonte retificadora de até 100 A). A figura 2.20 ilustra lado a lado o esquema

construtivo de um arco plasma transferido à esquerda e o arco plasma não transferido construtivo, de uma soldagem à direita.

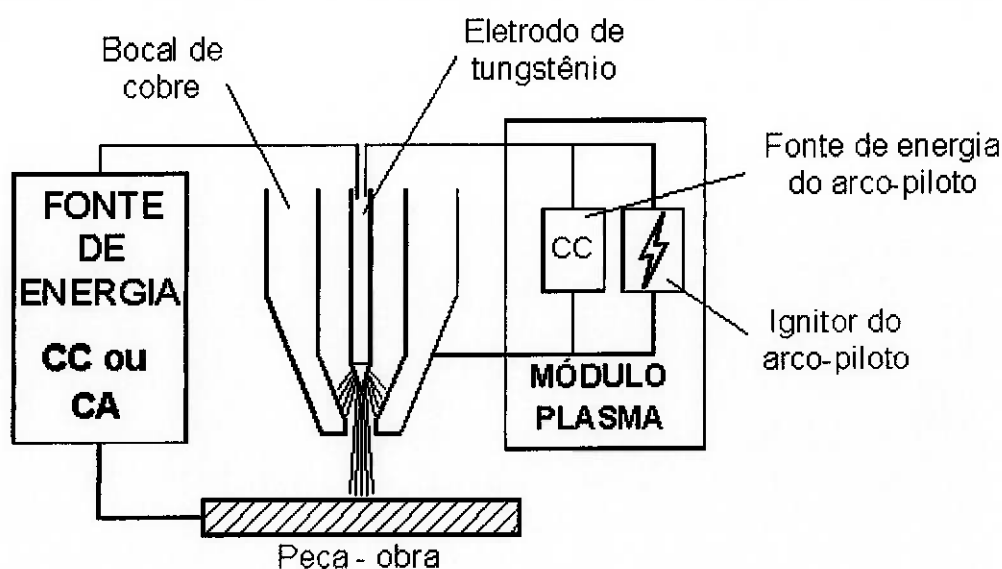


Figura 2.20 – Esquema de montagem de um arco plasma transferido e um arco plasma não transferido construtivo, de uma soldagem [43].

O consumível para revestimento duro, utilizando o processo PTA, na maioria das vezes na forma de pós-metálicos, variando a faixa granulométrica e distribuição. Dependendo diretamente do conjunto de alimentação e orifícios da tocha do sistema.

Os pós são alimentados através de mecanismos de precisão que controla a quantidade por unidade de tempo, pré-determinada, chamados de alimentadores de pó. Utiliza-se um gás inerte para o transporte, para não haver nenhuma reação do com o consumível, no transporte, bem como não haver nenhuma alteração das características do arco plasma no instante da entrada do consumível, na soldagem.

2.2.3.2 Por que o processo PTA para revestimento?

Revestimento pelo processo PTA tem várias vantagens significativas sobre os processos oxi-combustíveis e o TIG. O processo PTA combinado com sistemas de hardware disponíveis atualmente, propicia uma interface com a automação. Avanços significativos foram realizados no segmento automotivo, em especial revestimentos especiais em válvulas de motores, onde combinado com a robótica, revolucionaram o processo. Na maior parte dos revestimentos duros utilizam os elementos como o cobalto ou o níquel como aglomerante e ligados com outros elementos como boro, silício, cromo e tungstênio, elevando a resistência a desgaste e facilitando o revestimento. O sistema de alimentação do consumível no processo PTA é mais controlável, de ajuste fino, assegurando uma menor quantidade de material depositado, em comparação com os outros processos, e associada a baixa penetração, atingindo propriedades da liga com pouca camada. O processo gera menos defeitos durante o revestimento, reduzindo o tempo e custo de retrabalhos. Os consumíveis estão dispostos em pó, com faixas granulométricas conforme alimentador de pó e orifícios da tocha. Os pós podem ser misturados mais facilmente criando novas ligas, com custos inferiores aos consumíveis na forma de vareta, eletrodo e arame.

Quanto às propriedades metalúrgicas e mecânicas o revestimento pelo processo sistema PTA oferece muitas vantagens comparadas com os demais processos. Por garantir um controle preciso, mantendo todos os parâmetros de revestimento fixos, como: taxa de alimentação de pó, fluxos de gases, corrente, tensão, velocidade constante, deslocamento suave e aporte térmico na peça, o sistema garante repetibilidade e assegura a mesma qualidade final do produto,

lote por lote. Uma vez que há um controle do aporte térmico com precisão, conseguindo diluições controladas no metal base na ordem de 5 a 7%, principalmente para ligas de ferro e cobalto. Significando menor espessura de camada do metal revestido, para alcançar as propriedades solicitadas do depósito. O controle do fluxo de calor, também auxilia a regular o tamanho e dureza dos grãos da zona afetada pelo calor (ZAC). Região sensível a trincas devido ao crescimento do grão, na transformação martensítica e tensão de envelhecimento. O controle do aporte de calor também regula o grau de sensitização dos aços inoxidáveis. Em geral os depósitos pelo processo PTA de uma liga, são geralmente mais resistentes a corrosão do que outros revestimentos com a mesma liga, por outros processos. Isto devido aos carbonetos finos e a estrutura dendrítica que confere a tenacidade e resistência a corrosão. Os depósitos são caracterizados pelos baixíssimos níveis de inclusões, oxidações e defeitos.

Os resultados dos revestimentos depositados podem ser influenciados pela escolha certa dos gases. Materiais muito duros, onde a probabilidade as trincas são altas, estas podem ser reduzidas através da otimização da corrente e da rampa de alimentação do pó, durante o revestimento. Pela tendência natural da automação do processo, há menos exigência de habilidade e destreza do soldador. Como os depósitos são suaves, com baixa variação de espessura entre passes, também reduz significativamente o tempo de máquina e de rebolo, na etapa de acabamento [33]. Na figura 2.21 ilustra os detalhes mencionados acima, como suavidade entre passes, altura do depósito, espaçamento versus entre os cordões e a disposição do segundo passe.

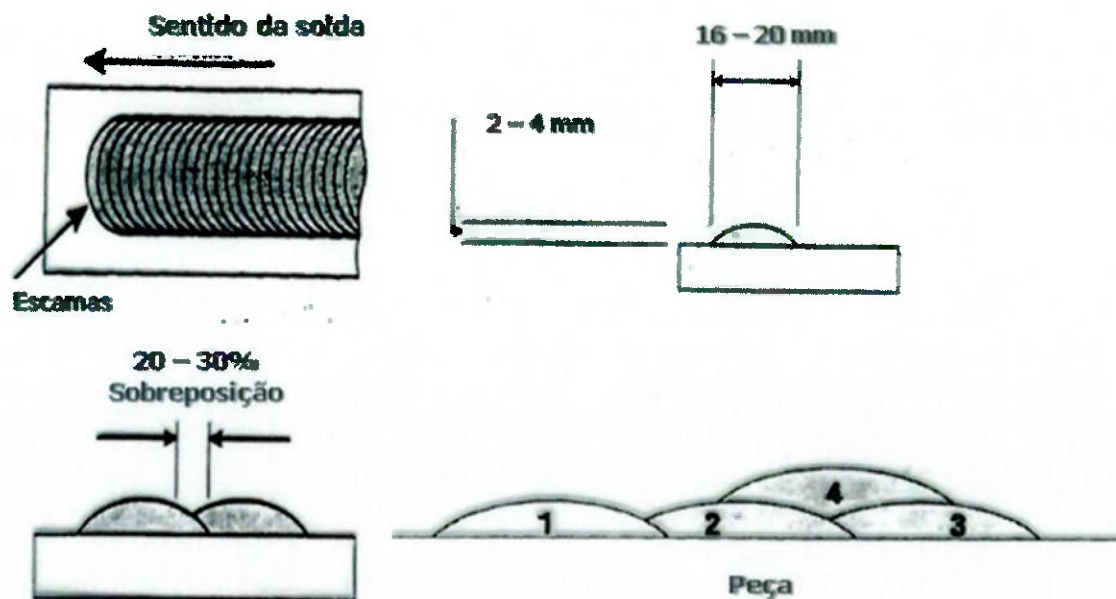


Figura 2.21 – Disposições dos cordões de revestimento com o processo do revestimento com PTA [Adapt. Ref. 33].

O consumível na forma de pó permite uma gama ilimitada de materiais a serem utilizados como revestimento. Desde ligas mais dúcteis, de durezas intermediárias a ligas com concentração elevada de metal duro. Pode-se revestir uma grande variedade de substratos, facilmente atingindo propriedades como resistência mecânica e resistência à desgaste por abrasão, corrosão e atrito metal/metal. Os parâmetros de espessura variam de 1,2 a 2,5 mm, podendo ser superior por passe. A taxa de depósito media 3,0 kg(s)/hora, mas podendo variar para cima como para baixo. Eficiência na faixa dos 95%.

O processo PTA de revestimento tem características predominantes. Para conseguir as plenas vantagens do processo, é necessária a montagem em manipuladores e robô já incorporados com painel de controle da máquina. Para segmentos industriais, onde há uma produção em série, o investimento elevado deste sistema é amortizado pela demanda por um revestimento de qualidade.

Não indicado para soldagem de manutenção de peças de geometrias distintas. Não é um sistema portátil, tão pouco o uso manual, pois reduziria o controle da distância da tocha à peça, influenciando a tensão e calor junto a superfície, diluindo mais material e propiciando trincas indesejadas. O PTA de revestimento atende atualmente e setores industriais como: petróleo, automobilístico, plástico, siderúrgico e indústria vidreira.

2.2.3.3 Materiais para o processo PTA de revestimento

O cobalto, o níquel e o ferro são elementos base que constituem a maior porção de ligas utilizadas pelo PTA. Para conseguir características de resistência, há uma combinação de elementos como carbono, cromo, molibdênio, tungstênio, silício, boro e nióbio adicionados em específicas proporções. Basicamente ligas resistentes a desgaste e corrosão são divididas em 06 categorias gerais, dependendo da fase metalúrgica que confere a resistência ao desgaste [33]:

- Carbonetos adicionados à liga
- Boretos adicionados à liga;
- Silicatos adicionados à liga;
- Intermetálicos;
- Sólidos dissolvidos em soluções das ligas;

Para revestimentos em laminas de estabilizadores, utilizam ligas de níquel cromo boro silício com carboneto de tungstênio de tamanho e microestrutura diferenciada.

2.3 PROCESSO DO REVESTIMENTO OXIGÁS/SOLDABRASAGEM

2.3.1 Definição

Conforme a AWS (American Welding Society) a soldagem Oxigás pode ser definida como um processo de união ou coalescência em função do calor gerado pela chama com ou sem metal de adição [44]. O processo também é chamado por soldagem por maçarico, soldabrasagem, soldagem oxi-acetilênica, dentre outros. Processo largamente empregado em brasagem, soldagem branda e soldabrasagem de ligas de metal duro. Muito utilizado também na terminologia em inglês, como OFW - *Oxifuel Welding* e PGW – *Pressure Gas Welding* [45].

Processo do revestimento datado do século XIX. Em 1985 o cientista Frances Le Châtelier, mensurou que a chama de acetileno como oxigênio atingia em torno dos 3000°C. Somente no século XX tornou-se um processo do revestimento regular, quando desenvolveram a produção e envasamento de acetileno e do oxigênio [45].

Podem ser utilizados diferentes gases combustíveis, mas o acetileno (C_2H_2) é o mais comum para soldagem oxi-acetilênica para revestimentos duros. No processo, a chama resultante da mistura gás-oxigênio na ponta do maçarico, gerando grande poder de calor, proporciona a fusão localizada do metal base e a formação da poça de fusão. A figura 2.22 ilustra o processo, neste caso o metal de adição ou revestimento é uma vareta nua. O soldador após criar a poça de fusão desloca o maçarico ao longo da superfície para conseguir a fusão

uniforme, num sentido, adicionando o metal a ser soldado. Dependendo do material a ser soldado, faz-se necessário o uso de um fluxo para garantir a escorificação de impurezas. Como é um processo manual, a qualidade tende a ser inferior a outros processos, devido à necessidade da habilidade e experiência do operador e da maior exposição de proteção da zona fundida.

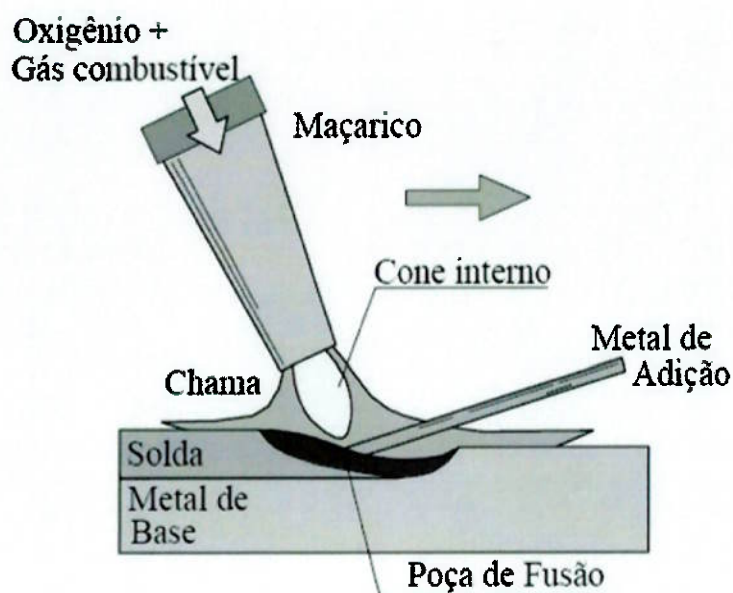


Figura 2.22 – Esquema de uma soldagem oxigás, com o metal de adição na forma de vareta nua [Adapt. Ref. 45].

O processo do revestimento oxigás ou oxi-combustível apresenta as seguintes vantagens: Investimento baixo, tanto do maçarico, como reguladores de pressão nos cilindros; soldar em diversos locais, equipamento portátil; versatilidade. Com pequenas alterações como diâmetro de bico e injetor de pó, consegue variações na quantidade de energia; não requer energia elétrica; fácil controle e de operação, decorrente da simplicidade do processo.

Como desvantagem, deve-se destacar a segurança. Risco de acidentes com o manuseio incorreto e sem procedimentos de segurança dos cilindros,

mangueiras, reguladores e equipamento. Também o processo exige grande habilidade do soldador; a zona afetada de calor é muito maior conforme a figura 2.23 , pois para formar a poça de fusão, requer o aquecimento de uma área muito maior que a real soldada; baixa velocidade de trabalho. Taxas de deposição baixas, quando comparadas com processo de soldagem elétrica.

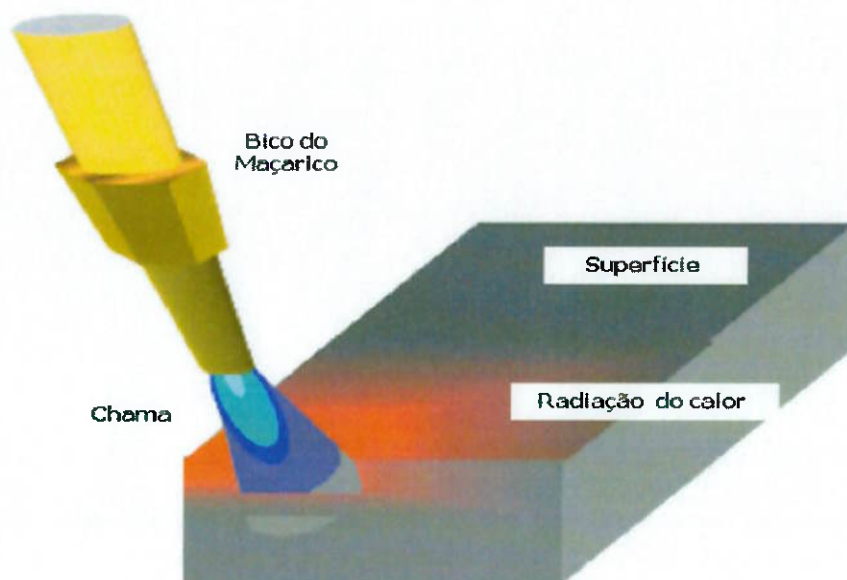
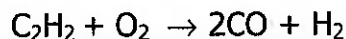


Figura 2.23 – Fluxo de calor radiando pela peça a ser soldada [Adaptado da referência 24].

2.3.2 Princípios do processo

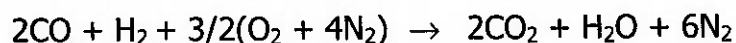
2.3.2.1 Definição da chama oxiacetilênica

A chama oxi-acetilênica. Combustão de acetileno com o oxigênio, ocorre em 02 fases, ou 02 estágios. O primeiro, a combustão primária, fase na qual somente o oxigênio participa da reação. Na secundária, ocorrem reações com Carbono, na participação do ar atmosférico. Considerando as mesmas relações volumétricas, tem-se para a zona de combustão primária [44]:



Nesta equação a combustão é parcial gerando uma atmosfera redutora.

Para a zona de combustão secundária tem-se:



Nesta zona a combustão é completa gerando uma atmosfera oxidante com menor temperatura, devido à presença de nitrogênio existente no ar atmosférico, participando da reação somente retirando calor da reação. A figura 2.24 descreve e esquematiza a zona de combustão primária, a secundária e o arraste de ar atmosférico.

A chama é dividida em 02 partes. O Dardo, região que ocorre a combustão primária e o Penacho, área da combustão secundária.

A chama de uma mistura oxi-acetilênica pode ser regulada, variando a relação entre o comburente e o gás. A relação de consumo, identificado pela letra "a" na tabela 2.24, é a razão entre os volumes do comburente (oxigênio) e do combustível (gás) na região de combustão primária. A partir da relação, pode se dividir em Chama Neutra, Chama redutora ou carburante e a Chama Oxidante. Na tabela 2.24 estes conceitos e outras características são abordados.

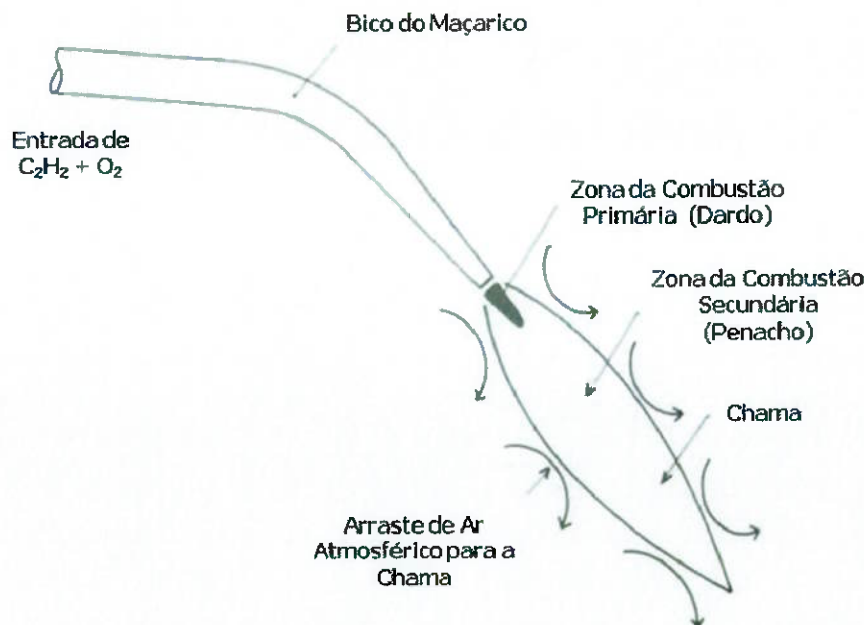





Figura 2.24 – esquema do fluxo e reações de combustão de um dardo de um maçarico oxi-acetilenico [Adaptado da referência 46].

No processo oxi-acetilenico, a máxima temperatura que a chama de um maçarico atinge, está em torno dos 3100°C , e esta está diretamente relacionada a regulação da chama, conforme a variação do "a". Na figura 2.25 consegue identificar melhor, onde temos a regulação o "a" entre 1,25 a 1,50, sendo uma chama oxidante. Também a temperatura máxima da chama é a função da distância, medida a partir do término do dardo. Na figura 2.25 ilustra esta relação da distância, quando atinge a temperatura máxima e depois começa a decrescer. Explicado pela presença variação da atmosfera do penacho, alterando a composição química, deixando a mais oxidante à medida que distancia do término do dardo.

Tabela 2.4 – Tipos e características das chamas, adaptada de [44].

REGULAGEM DA CHAMA = $\frac{\text{VOL. O}_2}{\text{VOL. GÁS}}$	TIPO DE CHAMA	ILUSTRAÇÃO DA CHAMA	CARACTERÍSTICAS	APLICAÇÃO
$1,0 < a < 1,1$	Neutra		Dardo: Branco brilhante e arredondado. Penacho: Longo	Soldagem de aços, cobre e suas ligas, exceto latão e ligas de níquel
$a < 1,0$	Redutora		Dardo: Branco brilhante e arredondado. Penacho: Esverdeado Véu branco circulando o dardo. <u>Chama menos quente.</u>	Revestimento duro, ferro fundido, alumínio, e chumbo.
$a > 1,1$	Oxidante		Dardo: Branco brilhante, pequeno e pontiagudo. Penacho: Azulado ou avermelhado, mais curto e turbulento. <u>Chama mais quente.</u> Ruido.	Aços galvanizados, latão, e bronze.

2.3.2.2 Propriedades Física dos Gases

A chama é gerada pelo maçarico, é a combustão de um gás. Em virtude das diferentes propriedades físicas dos gases, propiciam diferentes características de chama. Neste estudo, não será comentado detalhes de outros combustíveis, como hidrogênio, Metano, Propano, etc., mas detalhes do Acetileno, que comparado com os demais combustíveis comerciais, tem a maior temperatura máxima da chama e a maior repartição térmica.

A temperatura máxima da chama é a propriedade física do combustível, resultante da do calor da reação. Também chamada de temperatura teórica da chama.

Repartição térmica é obtida pela razão da reação da combustão secundária pela combustão primária. Quanto maior for o valor desta relação, mais concentrada será a chama. Exemplos: Repartição térmica do acetileno igual a 1,56; repartição térmica do hidrogênio igual a 1,00; e do metano igual a 0,43.

Complementando, o calor da reação da combustão primária é predominantemente importante para fusões localizadas do metal base. Contrapartida a reação da combustão secundária tem importante característica de aquecer a chapa.

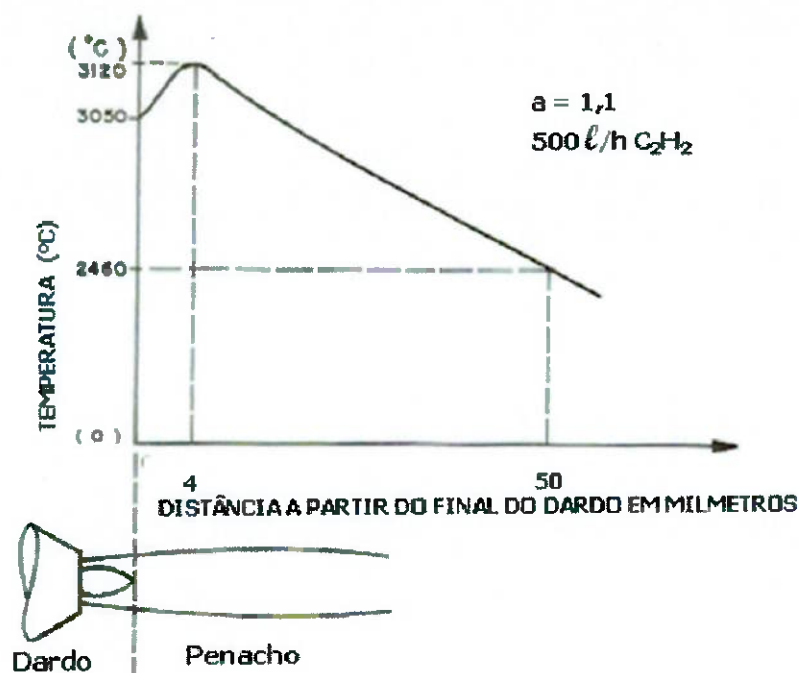


Figura 2.25 – Variação da temperatura (a) em função da distância a partir da extremidade do dardo. Adaptado da referência [46].

2.3.3 Maçaricos (Equipamentos)

2.3.3.1 Maçaricos convencionais

Os maçaricos são equipamentos que propiciam a mistura do oxigênio com o combustível. Dispõe de válvulas de ajuste de vazão dos gases logo na entrada do corpo, corpo para manipular o dispositivo e a lança ou caneta como o bico ou ponta, na outra extremidade. Há uma diferença entre maçaricos misturadores e maçaricos injetores.

Os maçaricos podem ter a parte dianteira removida, sendo direcionado ou para corte ou para soldagem. Para soldagem existem os maçaricos com caneta simples, somente para aquecimentos e o consumível do revestimento é posicionado junto ao dardo. E também maçaricos desenvolvidos para aspergir pó metálico, injetado junto com o fluxo de gás, fazendo com que o consumível seja soldado no instante do aquecimento.

Na figura 2.26 ilustra detalhadamente um maçarico convencional. Normalmente a conexão das mangueiras gases costuma ter roscas diferenciadas. A entrada de acetileno ou combustível, a rosca é à esquerda e a porca da mangueira de conexão há um tipo de rasgo externo para facilitar a identificação da rosca invertida. Para o oxigênio, a rosca é à direita [23]. Alguns fabricantes diferenciam por motivo de segurança o diâmetro maior para a rosca da tomada do oxigênio, para aumentar a segurança. As válvulas de regulação dos gases são do tipo agulha, onde consegue um ajuste fino e constante.

Como informado os maçaricos são divididos conforme características do tipo de misturador. Maçarico Injetor: a câmara de mistura projetada para que se

produza um efeito de aspiração no canal do gás combustível quando a ocorrer a abertura do fluxo de oxigênio. Maçarico misturador, o equipamento é projetado para que os gases se misturem em uma câmara especialmente configurada. A pressão da misturas dos gases é inferior à pressão de entrada dos gases isoladamente.

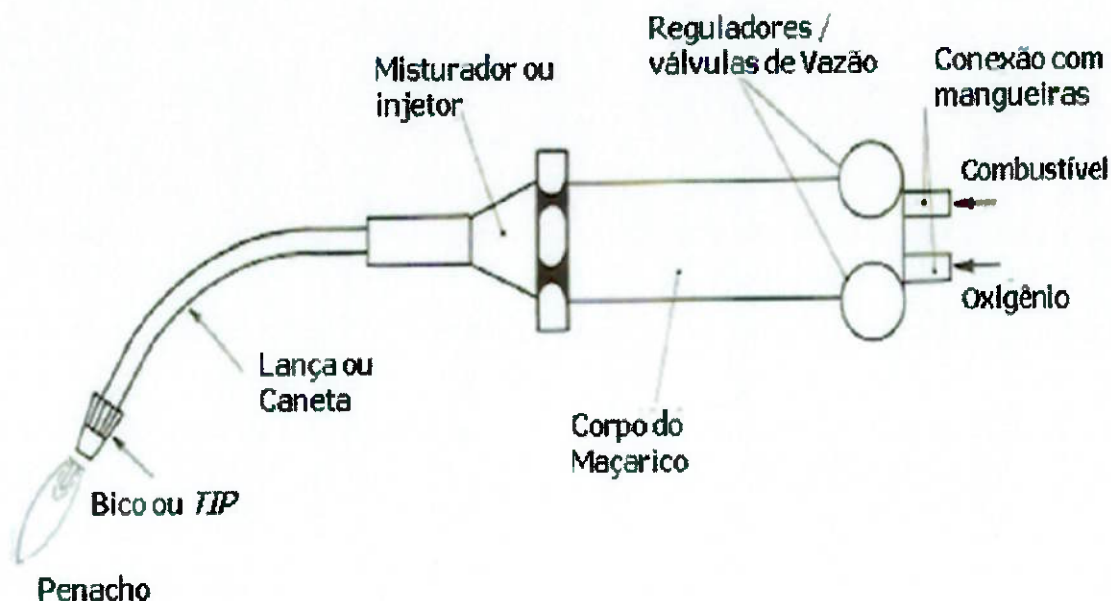


Figura 2.26 – Esquema de um maçarico convencional, detalhando as partes.

Adaptado da referência [46].

2.3.3.2 Maçaricos para aspersão de Pó Metálico

Os maçaricos que projetam partículas metálicas são maçaricos com injeção de gás com um injetor ou carburador no meio do corpo, para a entrada do pó, devidamente projetado para fluir dentro da caneta e que seja pulverizado na saída do bico ou ponta do maçarico. Este pó são ligas desenvolvidas especialmente para ligar metalurgicamente ao metal base por difusão, sendo projetadas e fundidas imediatamente. Na figura 2.27 tem um desenho de um

maçarico e consegue-se compreender a variação de um maçarico para aspersão de pó para um convencional.

Comercialmente existem diversos tipos de maçaricos que conseguem projetar pós e partículas, mas faz-se necessário estudos e desenvolvimento por parte dos envolvidos, pois como há um fluxo intenso de combustível com oxigênio e em adicional partículas metálicas, caso estas venham a fundir no orifício do bico, obstruindo a passagem deste fluxo, poderá ter o risco de acidente, com a explosão, rompendo parte da caneta ou no injetor.

Como o processo de revestimento por maçarico por aspersão de pó requer muita habilidade do soldador e como as ligas a serem depositadas, tem ponto de fusão elevadas, busca-se trabalhar com o dardo muito próximo da superfície a se revestida, como comentado anteriormente. Desta forma é comum ocorra o contato do bico na superfície que está sendo soldada. Se o fluxo de pó e da chama estiver devidamente regulado, não haverá problemas, mas o metal que estiver sendo depositado tende a se aderir no bico, necessitando somente a limpeza. Para evitar, bicos para aspersão de metal duro, como ligas de níquel com carbonetos, são fabricados com ligas de cobre eletrolítico, ligados com outros elementos que elevam a resistência a temperatura e inseridos com metal duro para dar mais vida aos mesmos e também resistir a limpezas constantes [23]. Também há bicos e canetas refrigeradas com água constante ou sistema de água gelada, facilitando a dissipação térmica, proporcionando maior vida e também evitando que o bico fique muito aquecido e venha a perder desempenho.

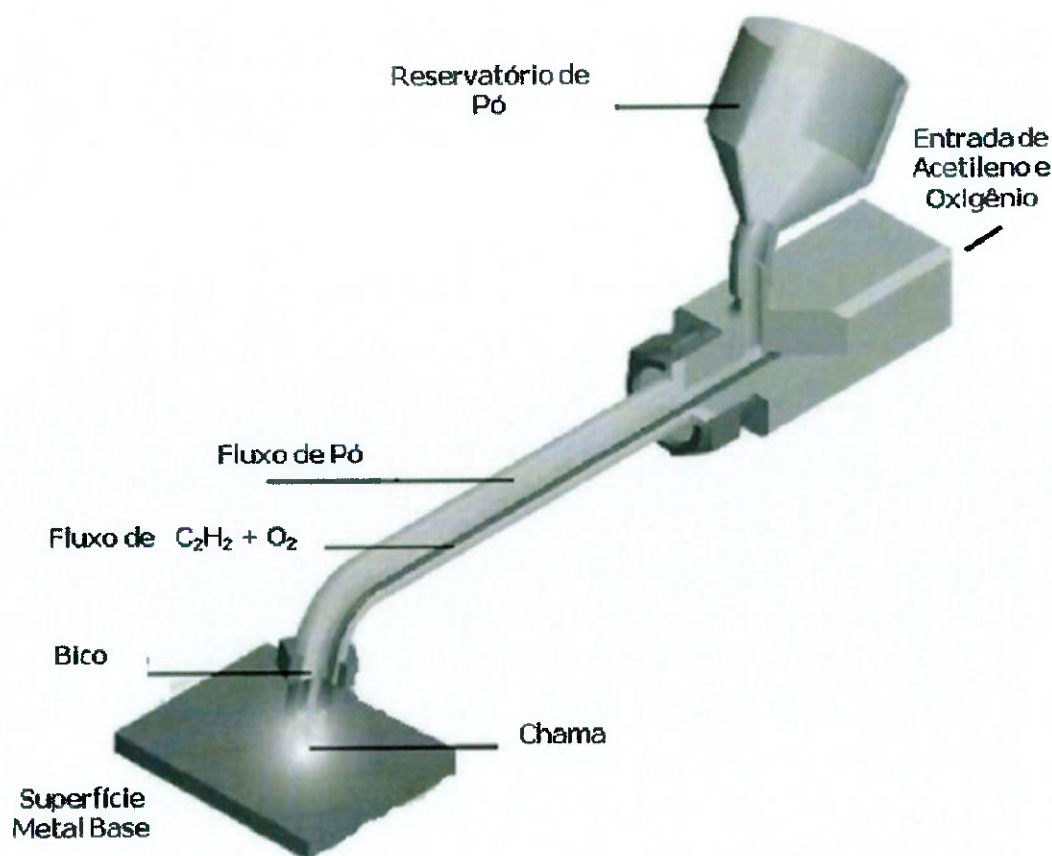


Figura 2.27 – Esquema de um maçarico que projeta partículas metálicas. Adaptado da referência [47].

2.3.4 Soldagem com Maçarico Oxiacetilínico de ligas especiais

Na indústria de reparo e recuperação de peças e partes desgastada, o processo do revestimento por maçarico oxi-acetilênico, por aspersão térmica é largamente difundido. Alguns segmentos como indústria do vidro, em recuperação de bordas e superfícies dos moldes de garrafas de vidros, pelo processo de sopro de vidro, na indústria do petróleo, em diversas partes e componentes, revestindo a superfícies com ligas resistentes a desgaste, por abrasão, corrosão, etc., exemplo, as lâminas de estabilizadores de coluna e perfuração. E também na indústria em geral, revestindo ferramentas de injeção

de plástico, roscas extrusoras, roscas transportadoras, dentes de serras, ferramenta de corte, turbinas, bloco de motor, etc. Na figura 2.28 tem-se fotos de aplicações utilizando maçarico para recuperação, revestimentos partes desgastadas. Nota, muito utilizado também na fabricação de novos componentes. O requisito principal para trabalhar com este equipamento e conseguir resultados satisfatórios em soldagem, consiste em aquecer a peça com o próprio maçarico ou em forno, e controlar a oxidação da superfície. Este processo do revestimento produz camadas lisas, espessuras finas e muito bem aderidas a superfície tanto planas como cilíndricas, incluindo materiais como ferro fundido.

Quando comparados com os outros processos do revestimento, como eletrodo revestido, TIG, MIG para revestimento, tem uma grande vantagem com relação ao investimento inicial do maçarico, utilização e treinamento. Mas por receio e falta de informação, associados a requisitos de segurança como armazenamento correto de gás, instalações devidamente projetadas por especialistas, reguladores calibrados, dentre outros pontos mínimos de segurança, o processo por maçarico vem sendo substituído por outros processos mais seguros, em função do risco da combustão de gases.

2.3.5 Consumíveis para Revestimento com Maçarico Oxiacetilínico

Há uma limitação de ligas que podem ser aspergidas pelo maçarico, decorrente das características do processo, como já comentado anteriormente. As ligas necessitam ter elementos que garantam a fusão fácil do metal base mantendo

características e propriedades conforme projeto, como dureza, resistência a abrasão e corrosão, depois de ser fundida ao metal base.

O níquel tem características importantes, pois auxilia na resistência a corrosão e proporcionando união a outros elementos, como cromo, boro, silício, tungstênio, etc. Estas ligas de níquel são chamadas de Níquel-cromo-boro, e com a presença ou não de carboneto de tungstênio. Especificação AWS A5.13-80 [23].

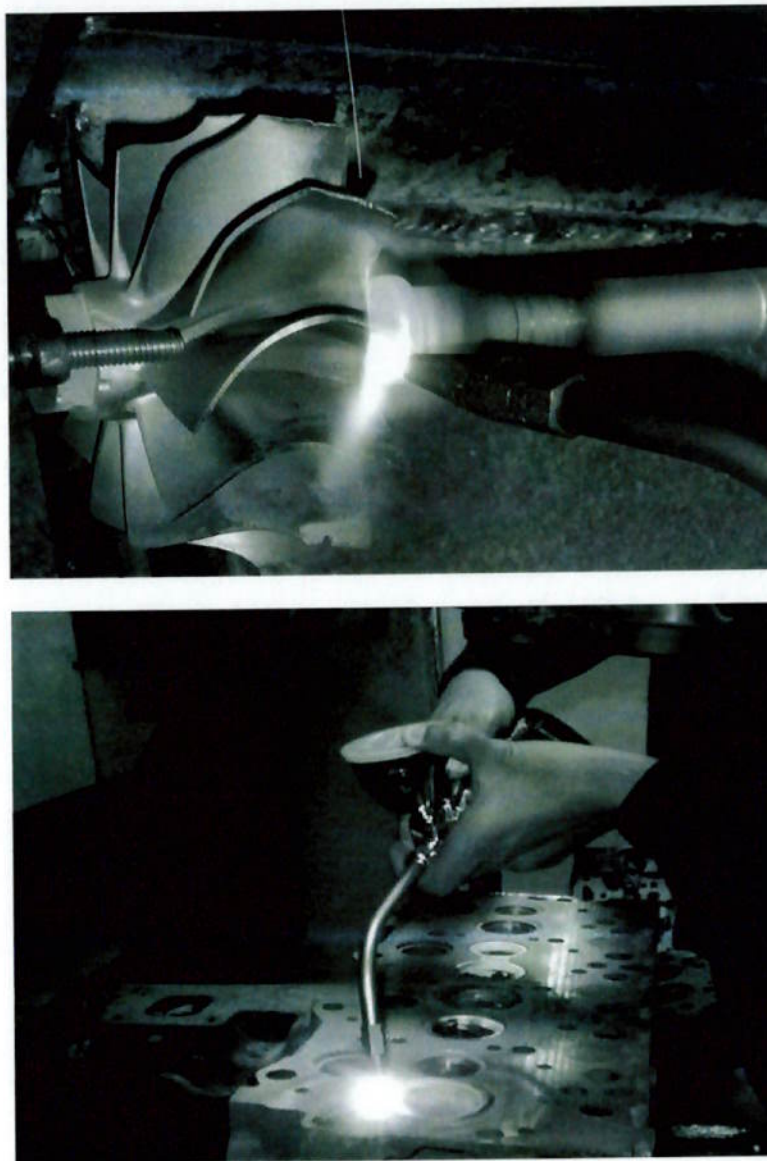


Figura 2.28 – Foto superior, aplicação em eixo de uma turbina de motor diesel e na foto inferior, um bloco de motor sendo revestido.

3. OBJETIVOS.

O objetivo deste trabalho consiste em apresentar por uma metodologia experimental, a comparação de 02 processos de revestimento por soldagem, depositando uma mesma liga de níquel, contendo elementos com cromo, boro, silício, ferro e carboneto de tungstênio comparando-se: a velocidade de revestimento dos 02 processos; a microdureza máxima atingida, considerando pontos similares nos corpos de prova; a diluição do revestimento no metal base e quantificar e qualificar a ZAC dos 02 processos de revestimento.

4. MATERIAIS E MÉTODOS.

4.1 MATERIAIS

4.1.1 CORPO DE PROVA

Para a realização dos ensaios práticos, foram utilizados 05 corpos de prova em aço AISI 4140. O projeto inicial deste projeto buscava reproduzir em laboratório, o dia a dia do revestimento por soldagem em estabilizadores e partes de uma coluna de perfuração de petróleo. Como já informado anteriormente, a maioria das ferramentas, são fabricados em aço AISI 4145H, ou somente AISI 4145. A dificuldade de obter amostras, como pequenas chapas, barras ou discos tanto do aço AISI 4145H e do aço AISI 4145, como alternativa, dentro da mesma família de aços, e com propriedades muito próximas, os ensaios foram realizados com o aço AISI 4140. Este aço tem o teor de carbono levemente inferior, (de 0,45% para 0,40%).

NOTA: Para compreender esta dificuldade, as empresas nacionais, fornecedoras de ligas AISI 4145, trabalham somente por encomenda e muito difícil haver retalho ou sobra de material. Somente medidas acima das 10 polegadas de diâmetro.

Na tabela 4.1 apresentam valores da composição química em percentual do aço AISI 4140. Para fácil visualização e comparação dos valores, foi dividida em 02 colunas de valores. A primeira coluna, para valores nominais, mínimos e máximos dos elementos químicos. Na coluna seguinte, o valor real obtido fabricante, na corrida ou lote de número 89482010.

As amostras foram cortadas de um mesmo lote, no caso um tarugo de 152,40 mm. de diâmetro. As espessuras dos discos cortados variaram de 22 a 26 mm. Utilizando uma mesma corrida, para todos os corpos de prova, os resultados obtidos nestes ensaios de revestimento não requerem identificação especial para cada corpo de prova.

Os valores reais obtidos no lote da amostra utilizada estão dentro dos limites inferiores e superiores, ou máximos. Alguns elementos não foram apresentados valores máximos, pois conforme a norma SAE J404j, não teria importância para a caracterização real da liga em questão.

Já a tabela 4.2 informa dados como: ensaios mecânicos, ensaios metalográficos e ensaios de microinclusões contidos no certificado de qualidade de número 578909.

O material aço AISI 4140, foi fornecido com certificados de composição e qualidade.

Tabela 4.1 – Composição química nominal do aço AISI 4140 e a composição real conforme lote 89482010.

Material SAE 4140	Composição Química		
	Valor Nominal		Valor Real
Percentual	Mínimo	Máximo	Lote #89482010
%C	0,38	0,43	0,40
%Mn	0,75	1,00	0,79
%Si	0,15	0,30	0,23
%Ni	-	0,15	0,10
%Cr	0,80	1,10	0,95
%Mo	0,15	0,25	0,18
%V	-	-	0,006
%S	-	0,040	0,023
%P	-	0,035	0,022
%Ti	-	-	0,003
%Al	-	-	0,012
%Sn	-	-	0,012
%Cu	-	0,15	0,15
%Pb	-	-	0,001
%Nb	-	-	0,004
%Ca	-	-	0,0011
%N	-	-	0,0077

Tabela 4.2 – Informações adicionais do material AISI 4140, informados no certificado de qualidade de número 578909.

ENSAIOS	VALORES OBTIDOS	
DUREZA	296 HB	
METALOGRAFICO	T. GRÃO AUSTENÍTICO	ASTM 7
MICROINCLUSÕES	AF	ASTM 2.0
	AG	ASTM 1.0
	BF	ASTM 0
	BG	ASTM 0
	CF	ASTM 0
	CG	ASTM 0
ULTRASOM	APROVADO	

Demais valores não serão avaliados nestes ensaios, pois se busca trabalhar com dados para revestimento e não esforços mecânicos.

Conforme a norma SAE, o aço SAE 4140 ou AISI 4140, nos requisitos para soldagem, deverá ser seguidos as informações: Soldagem de 4140 no estado endurecido e temperado (como normalmente é fornecido), não é recomendada e se realizada, deverá ser estudado previamente as alterações das propriedades mecânicas dentro da ZAC. É recomendada a soldagem de aços 4140 enquanto estiver no estado recozido.

Soldagem em 4140, em qualquer condição sempre deverá ser realizada com consumíveis de baixo hidrogênio.

Recomendação de pré-aquecimento. Chapas com espessuras, até 25mm – chegar na faixa de 370°C; até 40mm - 400°C; até 50mm - 425°C; até 50mm - 455°C; mais de 150mm - 510°C.

Resfriamento. Lento, na casa dos 95°C/hora. A peça deverá ser resfriada coberta com manta térmica ou banhada com vermiculita.

Complementando, o aço SAE 4140 compreende aos aços cromo molibdênio e para soldagem dependem diretamente dos teores de carbono e de cromo. Requer pré-aquecimento, como informado acima, varia de acordo com a espessura, a massa do componente e o teor de carbono. Faz-se necessário o controle da manutenção do calor durante a soldagem, em função do teor elevado de cromo. Também este controle deverá ser realizado com critérios e evitar que a junta permaneça em temperaturas que possam acelerar processos de fragilização ou perda de propriedades. O pós-aquecimento diminui velocidade de resfriamento da junta e diminui nível de tensões residuais e dureza e maior tempo para evolução do hidrogênio. Os consumíveis deverão seguir em função da composição química, similar aos metais de base, conforme [48].

4.1.2 REVESTIMENTO

Para o revestimento dos corpos para ensaio, foi utilizada uma única liga de níquel, composta dos elementos cromo, boro, silício, ferro, carboneto de tungstênio e carbono. O consumível de revestimento é uma liga desenvolvida

na década de 30, onde conseguiu o melhor aproveitamento do níquel como elemento ligante para outros elementos como o cromo, propiciando fusão com outros aços, conseguindo um aumento da resistência ao desgaste por criar microconstituintes como carbonetos de cromo e boretos de cromo [23].

Esta liga se enquadra na norma AWS 5.13, especificação para revestimentos com eletrodo e metal protegido soldado a arco. Conforme a norma AWS [49], a classificação do consumível AWS 5.13-80 está descontinuada e reclassificada em AWS 5.21:2001. A característica desta liga de níquel cromo diluídas em metais de revestimento com silício e boro, maior o que 3,3% exibem uma estrutura constituída por uma solução de níquel sólido, um binário eutético de solução sólida de níquel e silicato de níquel e uma eutética ternária de solução sólida de níquel, níquel e silicato e boreto de níquel. Existem também partículas de carboneto e boreto disperso na matriz. As microestruturas diferem-se em ERNiCr-A, B e C, em que o binário do microconstituente de boreto eutético de solução sólida de níquel variam. Na tabela 4.3 tem mais detalhes composição nominal ERNiCr-A, B e C.

A liga utilizada nos ensaios classifica-se como ERNiCr-C, com a presença de carboneto de tungstênio. O consumível utilizado foi o pó Colmonoy® 88, fornecido pela empresa Wall Colmonoy Corporation. Segundo os boletins técnicos do material e publicações em congressos, o carboneto de tungstênio é formado durante a revestimento, quando o carbono se rearranja com o tungstênio, formando os carbonetos de tungstênio, diferentemente de outras ligas dentro da mesma classificação, mas são misturas de carbonetos já processados.

Um dos desafios para os ensaios consistiu em identificar uma liga de níquel, resistente a desgaste e que fosse fornecida para os 02 processos de revestimento que estão sendo analisados e comparados. A liga que comercial Colmonoy® 88, tem na forma de pó consumível para processo Plasma Arco Transferido, PTA, bem como para processo oxi-acetilenico.

Para os ensaios, pelo processo Plasma Arco Transferido, utilizou o material Colmonoy® 88PTA na forma de pó, devidamente distribuído num corte granulométrico de $-45/+106 \mu\text{m.}$, projetado para sistemas PTA. A tabela 4.4 informa a composição química real fornecida pelo fornecedor Wall Colmonoy Corp., no lote 71465-6, datado em 22/02/2011 e dureza alcançada no segundo passe do revestimento. Quantidade de material utilizado e detalhes do processo, serão abordados no próximo capítulo, Métodos.

Para os ensaios, pelo processo Oxiacetilênico, utilizou o mesmo material, Colmonoy® 88 HV, também na forma de pó metálico, distribuído num corte granulométrico de $-15/+45 \mu\text{m.}$, projetado para sistemas de aspersão térmica de alta velocidade, conhecido pela sigla em Inglês, H.V.O.F. *High Velocity Oxygen Fuel* e também para maçaricos para projeção de material. A tabela 4.5 informa a composição real fornecida pelo fornecedor Wall Colmonoy Corp., no lote #82780-3, datado em 31/01/2012 e dureza.

Tabela 4.3 – Composição Química em percentual, requerida para Eletrodos e Varetas nuas de Cobalto e Níquel, adaptada de [49].

COMPOSIÇÃO QUÍMICA - PERCENTUAL EM PESO			
AWS (Classificação)	ERNiCr-A	ERNiCr-B	ERNiCr-C
Anexo A	A7.3.1	A7.3.1	A7.3.1
UNS (Numero)	W89634	W89635	W89636
ELEMENTOS	%	%	%
C	0,20 - 0,60	0,30 - 0,80	0,50 - 1,00
Mn	-	-	-
Si	1,20 - 4,00	3,00 - 5,00	3,00 - 5,50
Cr	6,50 - 14,00	9,50 - 16,00	12,00 - 18,00
Ni	Restante	Restante	Restante
Mo	-	-	-
Fe	1,00 - 3,50	2,00 - 5,00	3,00 - 5,50
W	-	-	-
Co	-	-	-
B	1,50 - 3,00	2,00 - 4,00	2,50 - 4,50
V	-	-	-
OUTROS	1	1	1

Tabela 4.4 – Informações de composição química do material de revestimentos Colmonoy® 88PTA, conforme certificado de qualidade de número 71465-6, adaptado do documento [23].

COMPOSIÇÃO - PERCENTUAL EM PESO	
Colmonoy 88PTA	Lote:
Powder	#71465-6
ELEMENTOS	Valor Real em %
C	0,80
Mn	-
Si	4,00
Cr	15,00
Ni	Restante
Mo	-
Fe	3,50
W	16,50
Co	-
B	3,00
OUTROS	Menor 1,00
DUREZA	62HRC

Tabela 4.5 – Informações de composição química do material de revestimentos Colmonoy® 88HV, conforme certificado de qualidade de número 82780-3, adaptado do documento [23].

COMPOSIÇÃO - PERCENTUAL EM PESO	
Colmonoy 88 HV	Lote:
Powder	#82780-3
ELEMENTOS	Valor Real em %
C	0,80
Mn	-
Si	4,00
Cr	15,00
Ni	Restante
Mo	-
Fe	3,50
W	16,50
Co	-
B	3,00
OUTROS	Menor 1,00
DUREZA	62HRC

4.2 MÉTODOS

4.2.1 EQUIPAMENTOS UTILIZADOS NO REVESTIMENTO

Foram ensaiados cordões revestimento por soldagem em 05 corpos de prova, pelos processos: Plasma Arco Transferido e por maçarico Oxiacetilênico.

O processo Plasma Arco Transferido PTA foi utilizado um Sistema PTA do fabricante TBA, modelo PTA 200, de fonte de 200 Amperes de corrente, supridos com os gases Argônio e Hidrogênio. Para proteção, argônio puro, para o arco plasma e transporte do consumível, mistura, Argônio com 15% de Hidrogênio. A tocha do plasma estava montada num pórtico, tipo mesa pantográfica automatizada, para revestimento de placas de desgaste. Na figura 4.1 ilustra a disposição da tocha. No capítulo procedimento de revestimento, será comentado melhor parâmetros de aplicações como: pressões e vazões dos gases, corrente e tensão da fonte retificadora, fluxo de pó e detalhes do bocal e eletrodo de tungstênio.

Pelo processo Oxiacetilênico, foi utilizado um maçarico do fabricante Eutectic - Castolin, modelo Eutalloy, com bico de número 3. As soldagens dos cordões foram feitas manualmente, sem dispositivo, somente os corpos de provas estavam dispostos numa bancada de trabalho. Parâmetros de aplicação e detalhes de instalação serão comentados no capítulo, procedimento de revestimento. Na figura 4.2 ilustra o equipamento.

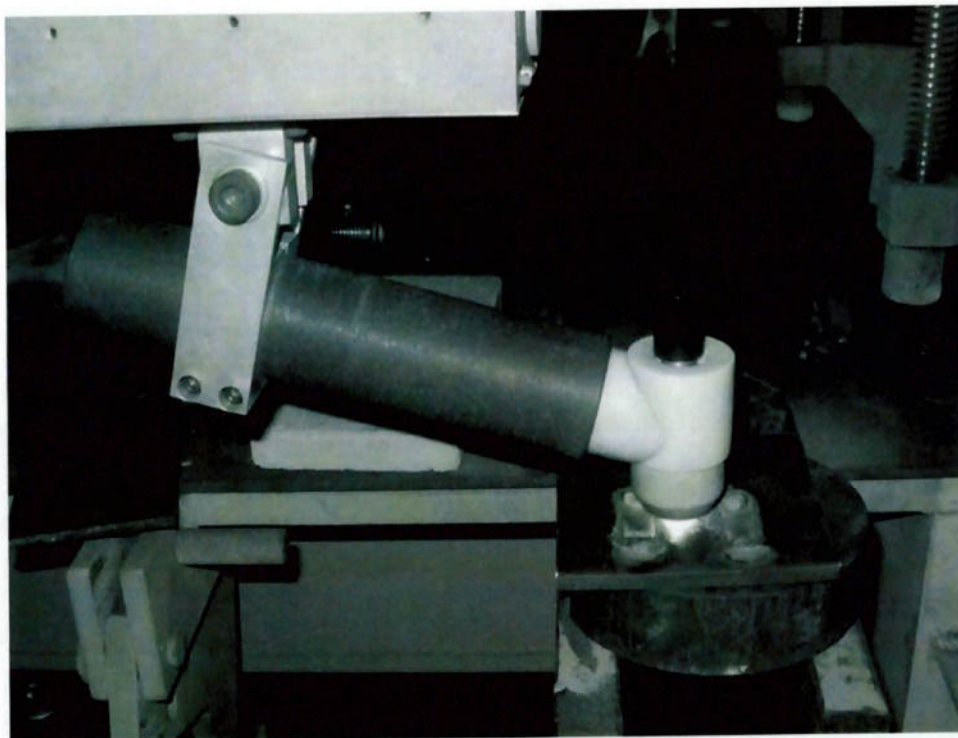


Figura 4.1– Foto da tocha do PTA, montada no pórtico, depositando o material numa amostra, para ajuste de parâmetros.

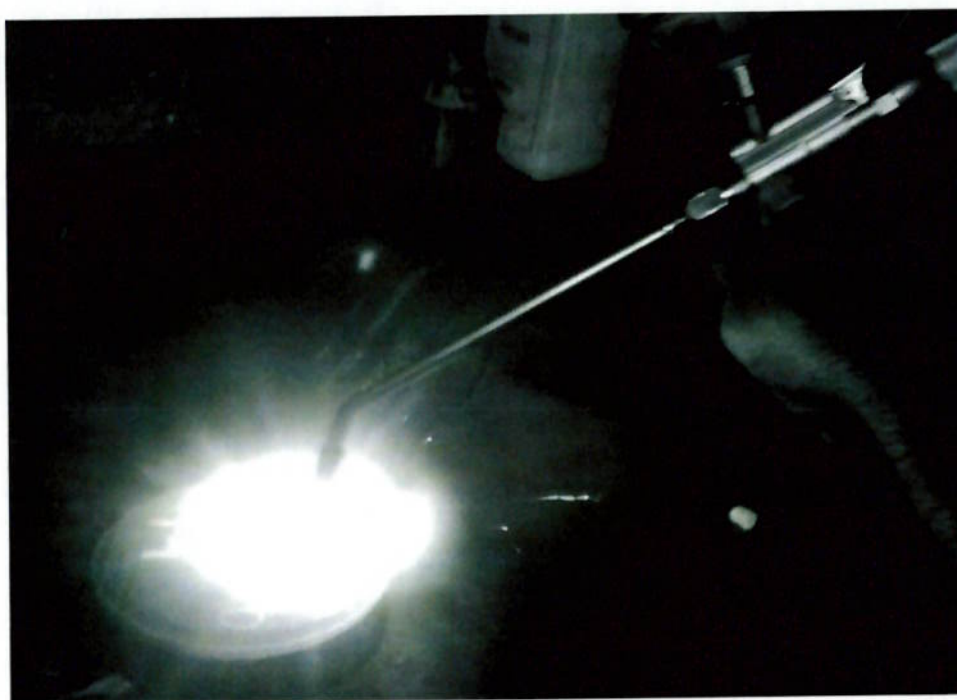


Figura 4.2 – Foto do Maçarico Eutalloy aplicando o consumível no corpo de prova.

4.2.2 ENSAIOS

Foram realizados ensaios de revestimento nos 05 corpos de prova, (discos/ bolachas), buscando contemplar os requisitos/ objetivos do estudo comparativo entre os 02 processos.

Dos 05 discos, 01 deles, foi realizado 02 cordões de revestimento, paralelos entre si, sendo um com o PTA e o outro cordão com o maçarico, para medir a velocidade de aplicação e temperatura máxima atingida no corpo de prova, num ponto distante do cordão em 70 mm aproximadamente.

Nos outros 04 discos, os ensaios foram separados por processo, sendo o primeiro jogo para o PTA e o outro para cordões com maçarico. O primeiro disco, para cada processo buscou-se fazer 02 cordões de revestimento, dispostos lado a lado com pequena sobreposição, soldados imediatamente ao primeiro cordão e havendo a medição de temperatura máxima atingida durante a revestimento para cada cordão, a uma faixa de 70mm aproximadamente ao primeiro cordão.

No segundo e último jogo de discos, seguindo o mesmo princípio anterior, onde foram soldados cordões pelos os 02 processos, a disposição dos ensaios foi diferente, foi realizados 03 cordões de revestimento dispostos lado a lado, com pequena de sobreposição, soldados imediatamente, não havendo intervalo de revestimento e por fim, realizado um cordão de sobreposição, ou melhor, uma dupla camada realizada entre o primeiro cordão e o segundo cordão. Também sendo mensurado a temperatura máxima atingida durante a revestimento para cada cordão, a uma faixa de 70mm aproximadamente ao primeiro cordão. A

figura 4.3 ilustra o procedimento do revestimento, visão superior e a figura 4.4 também a soldagem, mas seção transversal do disco.

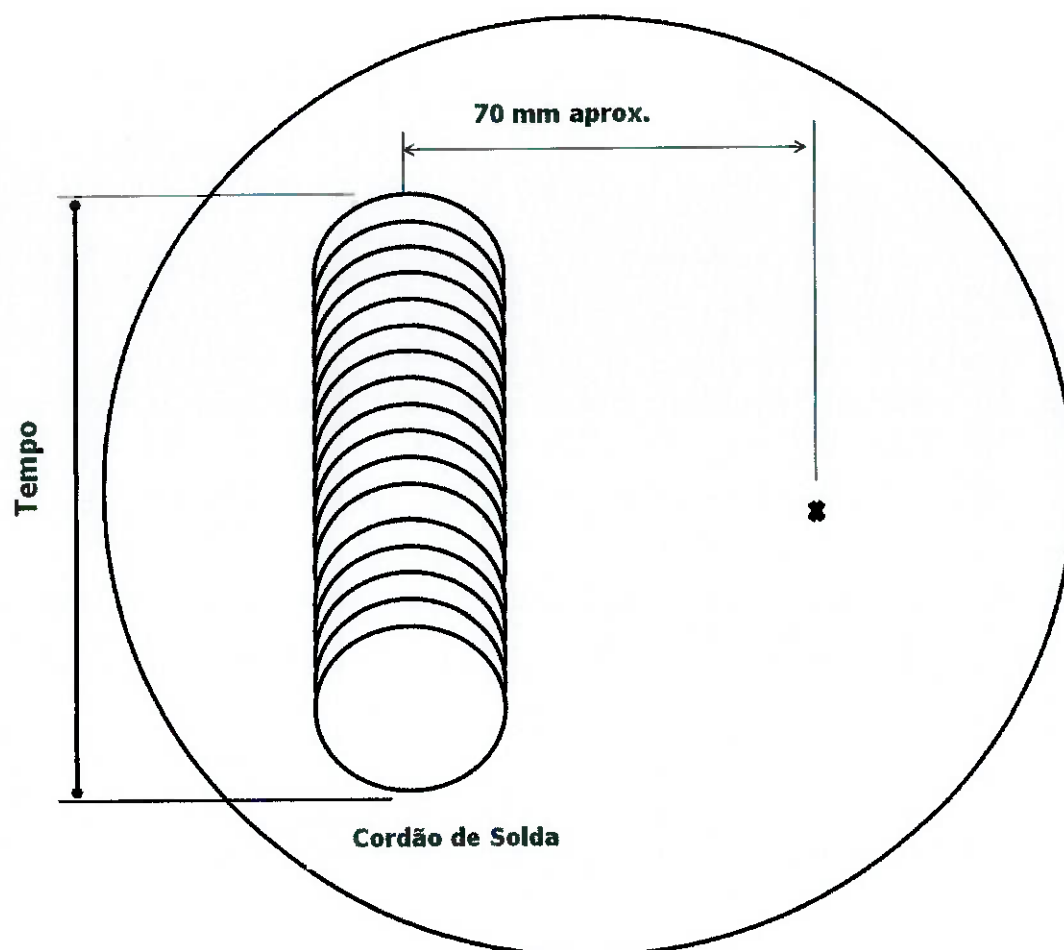


Figura 4.3 – Disposição do revestimento no disco, a distância para leitura da temperatura e o tempo a ser mensurado para obter a velocidade do revestimento.

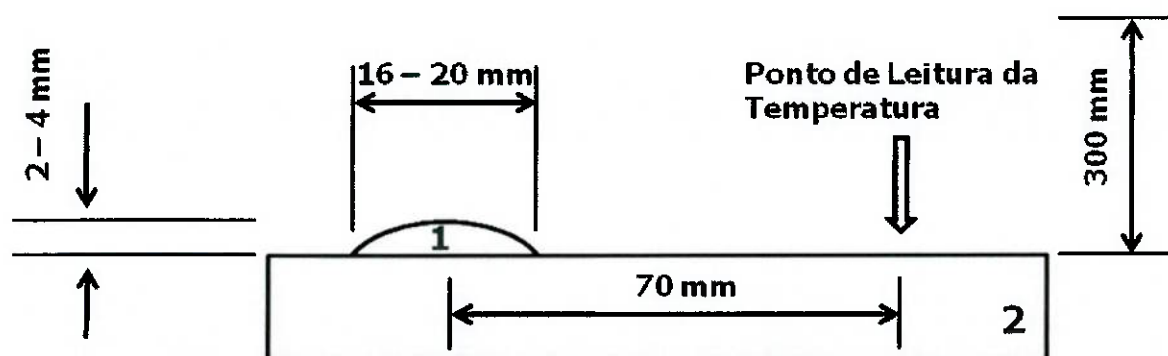
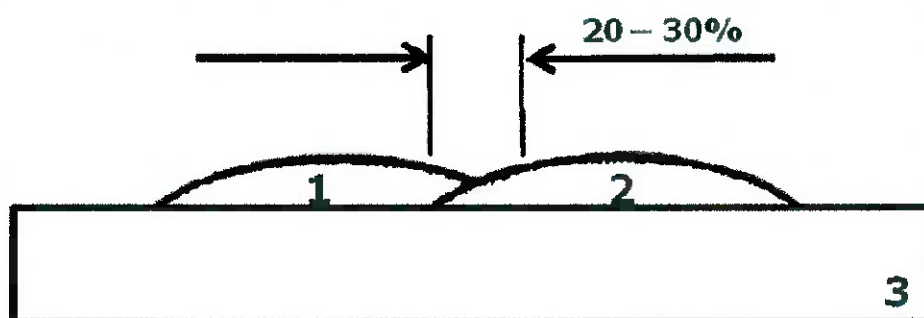


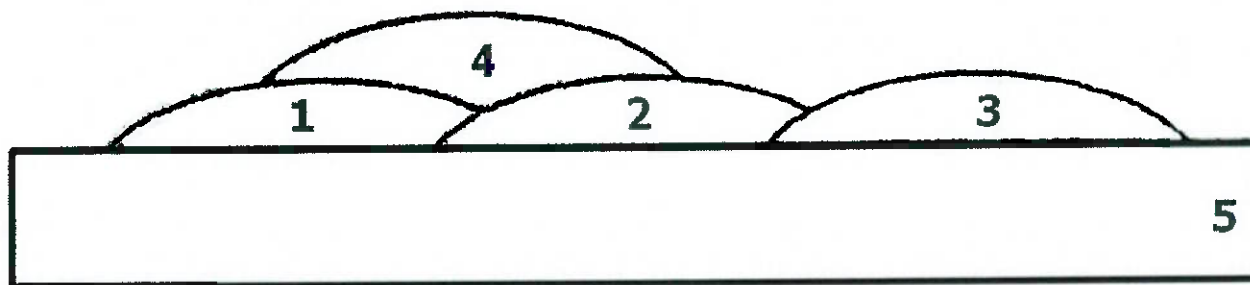
Figura 4.4 – Corte do disco, ilustrando detalhes do cordão do revestimento.

As figuras 4.5 e 4.6 ilustram os ensaios do revestimento nos corpos de prova, sendo o primeiro o ensaio de sobreposição, com 20 a 30% de cobertura ao primeiro cordão. E a segunda figura, ensaios de Dupla camada.



- 1 - Primeiro passe – Cordão Simples**
- 2 - Segundo passe – Sobreposto ao primeiro cordão, em torno de 20 a 30%**
- 3 - Corpo de prova**

Figura 4.5 – Corte do disco, ilustrando detalhes dos cordões do revestimento.



1 - Primeiro passe – Cordão Simples

2 - Segundo passe – Sobreposto ao primeiro cordão

3 - Terceiro passe – Sobreposto ao segundo cordão

4 - Quarto passe – Sobre ao primeiro e segundo cordões

5 - Corpo de prova

Figura 4.6 – Corte do disco, ilustrando detalhes dos cordões do revestimento.

4.2.2.1 Procedimento de revestimento com Arco Plasma Transferido PTA

Na tabela 4.6 informa todos os parâmetros utilizados nos ensaios do revestimento dos corpos de prova, utilizando o consumível pó Colmonoy® 88PTA. Valores de demanda de gás, arco elétrico, corrente e tensão, tanto do arco piloto como do arco principal, alimentação do consumível, movimentação da tocha, etc..

Tabela 4.6 – Informações dos parâmetros utilizados para revestimento dos corpos de prova com o sistema PTA.

PARAMETROS DE APLICAÇÃO – PTA		
GAS		
Solicitação	Tipo de Gás	Vazão de Gás (l/min)
Gás de Soldagem Plasma	Argônio e Hidrogênio	1,5
Gás de Proteção	Argônio	5,2
Gás de Transporte	Argônio e Hidrogênio	2,5
Reguladores de Gás		Litros (l)
Alimentador de Pó		1,75
Manômetro de Mistura		18
Manômetro de Argônio		20
ARCO ELÉTRICO		
Arco Piloto		
Corrente		10 amperes
Tensão		3 a 5 volts
Arco Principal		
Corrente		de 100 a 110 amperes
Tensão		34 a 35 volts
Rampa de Elevação ou de Decida do Arco		
Rampa de Entrada		1,50%
Rampa de Saída		0%
DESLOCAMENTO DA TOCHA		
Velocidade do Carro/ Translação		10,46 m/h
Oscilação do Braço		12 mm/s
Distancia tocha a superfície a ser soldada		10 a 13 mm
DADOS REVESTIMENTO		
Largura do cordão		10 a 12 mm
Diluição		3 a 7%
Altura do cordão		3,5 a 4 mm

4.2.2.2 Procedimento de revestimento com Maçarico Oxi-acetileno

Por ser um processo muito mais simples, quando comparado com o PTA, as diferenças de parâmetros são bem significativas. Na tabela 4.7, seguindo os mesmos parâmetros da tabela 4.6, têm-se as reais evidências que o processo não tem ajustes numéricos para uma repetição e controles. Somente ajustes de pressão e orifício do bico são as variáveis controladas. Pode-se incluir como parâmetros, a distância do bico junto a superfície a ser soldada, o deslocamento da tocha e a oscilação e estas variáveis, estão diretamente relacionadas a habilidade e dependência do soldador, influenciando na qualidade do revestimento. Para os ensaios, foi utilizado o bico de número 3. Existem outros bicos com regulagens conforme orientação do fabricante, mas durante os testes, optou-se por este, por apresentar uma taxa de deposição, próxima ao sistema Plasma Arco Transferido e também de pouco uso. Foram feitos outros testes com demais bicos, mas apresentavam desgastes e influenciariam diretamente os ensaios, com dificuldade de acertar uma chama neutra ou ligeiramente redutora.

Como os ensaios com um maçarico Oxi-acetileno apresentavam dificuldades para a formação do cordão, buscou-se ensaiar o mais próximo das soldagens com o PTA. Mas no ensaio de duplo passe, ao invés de apresentar os 04 cordões em camadas, apresentou um único cordão com espessura superior.

Tabela 4.7 – Informações dos parâmetros utilizados para revestimento dos corpos de prova com o maçarico Oxi-acetileno.

PARAMETROS DE APLICAÇÃO – MAÇARICO		
GAS		
Solicitação	Tipo de Gás	Vazão de Gás
Gás de Solda	Acetileno e Oxigênio	Não inform. Fabricante
Gás de Proteção	Não Aplicado	
Gás de Transporte	Não Aplicado. Sistema Venturi	
Reguladores de Gás		Pressão (Bar)
Alimentador de Pó		Não Aplicado
Manômetro de Acetileno		0,7
Manômetro de Oxigênio		3
ARCO ELÉTRICO		
Arco Piloto		
Corrente		Não Aplicado
Tensão		Não Aplicado
Arco Principal		
Corrente		Não Aplicado
Tensão		Não Aplicado
DADOS DO BICO E DA CANETA DO MAÇARICO		
Bico		Número 3
Caneta		Padrão
DESLOCAMENTO DA TOCHA		
Velocidade do Carro/ Translação		Manual
Oscilação		Manual
Distancia tocha a superfície a ser soldada		10 a 15 mm
DADOS REVESTIMENTO		
Largura do cordão	de 7 a 20 mm Depende do soldador	
Diluição	Não há como regular	
Altura do cordão	de 3 a 5 mm Dependendo do soldador	

4.3 MEDICÕES

4.3.1 Velocidade de revestimento, com o aporte de calor

O primeiro ensaio realizado para comparar os processos, foi executado num único disco, onde o interesse é avaliar o tempo de deslocamento de um distancia X. Na figura 4.3 ilustra o corpo de prova, o cordão e as distâncias.

Neste mesmo ensaio, buscou-se checar a temperatura máxima atingida no corpo de prova, num ponto à uma distância de 70 milímetros do centro do cordão de revestimento. Além de um cronômetro, foi utilizado pirômetro infravermelho, calibrado para emissividade de aço, a uma distância de 300 mm do disco.

Na tabela 4.8, separada por linhas diferentes tem-se os dados por processo, e nas colunas tem os dados obtidos como: trecho percorrido ou tamanho de cordão de revestimento; o tempo gasto em função da distância, devidamente cronometrados, seguindo os mesmos critérios para os 02 processos; a velocidade de revestimento calculada em função da distância e o tempo; a qual temperatura de pré-aquecimento, submetido o disco antes do início do ensaio, realizado com maçarico de GLP, tipo chuveiro; e por fim a temperatura máxima atingida no ponto distante do cordão.

Buscou-se realizar cordões com a mesma largura, em torno de 10 a 12 milímetros, para aproximar ao máximo as características dos ensaios e ter resultados conclusivos quando comparados. Infelizmente o cordão com o maçarico dependia muito da habilidade do soldador e não se conseguiu 100% da largura do cordão em todo comprimento.

Tabela 4.8 – Parâmetros dos processos de revestimento utilizados.

VELOCIDADE DE REVESTIMENTO E APORTE DE CALOR					
CORDÃO	DISTÂNCIA. * (mm)	TEMPO (s)	VELOCIDADE DE REVESTIMEN TO (mm/s)	TEMPERATU- RA DE PRE- AQUECIMEN- TO (°C)	TEMPERATU- RA MÁXIMA ** (°C)
A – PTA	65	95	0,684	193	229
B – Maçarico	85	232	0,366	170	370
* Distância ou deslocamento medido durante o revestimento. Cada processo teve uma medida diferente.					
** Temperatura máxima atingida numa distancia de 70 mm do cordão de revestimento					

As análises dos resultados e comentários serão abordadas no capítulo 5 Resultados e Discussões. Mas já se pode direcionar que o processo de revestimento por maçarico é mais lento gerando um aporte térmico maior, com uma rampa de 200°C.

4.3.2 Tempo de revestimento e Máxima temperatura atingida

Utilizando o mesmo princípio de revestimento do primeiro ensaio, onde foi feito somente um cordão para medir a velocidade de cada processo e a máxima temperatura atingida identificando o processo que gera maior aporte térmico, os outros 02 ensaios realizados em 04 discos, buscou-se avaliar o tempo geral

de deposição, temperaturas de interpasse e máxima ao término do revestimento e por fim, avaliar a dificuldade do processo.

Como informado no capítulo 4.2.2 os ensaios seguintes, cada processo seria realizado em um disco próprio, sendo o ensaio chamado de sobreposição num único disco, e o ensaio de Dupla camada, num outro respectivamente. A figura 4.5 ilustra o ensaio de sobreposição e a figura 4.6 ilustra o ensaio de dupla camada.

As tabelas 4.9 e 4.10 detalham a temperatura de pré-aquecimento, a temperatura máxima e a temperatura no cordão de revestimento. Também informa o tempo gasto, do término do primeiro cordão e o início do outro cordão. A coleta destes dados tem como objetivo, identificar a velocidade do processo e também se o tempo influencia a dissipação térmica no corpo de prova. A leitura e análise da temperatura de pré-aquecimento, está sendo referenciado, tanto para o primeiro cordão quanto para o segundo cordão, para identificar mais facilmente a elevação térmica por processo.

Tabela 4.9 – Temperaturas atingidas no ensaio sobreposição para o processo PTA.

ENSAIO SOBREPOSIÇÃO - APORTE DE CALOR E O TEMPO GASTO ENTRE CORDÕES - PROCESSO PTA				
CORDÃO	TEMPERATURA DE PRE-AQUECIMENTO (°C)	TEMPERATURA MÁXIMA (°C) *	TEMPERATURA MÁXIMA MEDIDA NO CORDÃO (°C) **	TEMPO GASTO ENTRE CORDÕES (s) ***
1º	203	235	279	132
2º		252	295	
* Temperatura máxima atingida à uma distancia de 70mm do 1º cordão de revestimento				
** Temperatura máxima atingida no cordão de revestimento.				
*** Tempo gasto entre o término de um cordão e o início do outro. (Ajuste de máquina)				

Tabela 4.10 – Temperaturas atingidas no ensaio de revestimento por sobreposição para o processo oxi-acetilênico.

ENSAIO SOBREPOSIÇÃO - APORTE DE CALOR E O TEMPO GASTO ENTRE CORDÕES - PROCESSO MAÇARICO				
CORDÃO	TEMPERATURA DE PRE-AQUECIMENTO (°C)	TEMPERATURA MÁXIMA (°C) *	TEMPERATURA MÁXIMA MEDIDA NO CORDÃO (°C) **	TEMPO GASTO ENTRE CORDÕES (s) ***
1º	160	357	528	60
2º		397	590	
* Temperatura máxima atingida à uma distancia de 70mm do 1º cordão de revestimento				
** Temperatura máxima atingida no cordão de revestimento.				
*** Tempo gasto entre o término de um cordão e o início do outro. (Ajuste de máquina)				

Finalizando, o ensaio de Dupla camada de um cordão sobre os demais cordões soldados, completa os ensaios de aplicação, para comparar os processos.

Como ilustrado na figura 4.6, o ensaio de Dupla camada foi realizado sobrepondo os cordões 01 e 02, ao término do cordão 03. E tem como objetivo, avaliar características do revestimento dos 02 processos, além de mensurar temperatura gerada pelos processos e tempo de revestimento.

As tabelas 4.11 e 4.12 apresentam os dados obtidos nos testes de revestimento tanto para o processo PTA como para o processo por maçarico oxiacetileno. Nas linhas, os dados por cordão de revestimento. Nas colunas, temperatura de pré-aquecimento, a temperatura máxima atingida a uma distancia de 70mm do 1º cordão de revestimento, temperatura máxima atingida no cordão de revestimento, onde nos cordões 2, 3 e 4, buscou-se a leitura nos cordões anteriores respectivamente. A última coluna refere-se ao tempo gasto entre o término de um cordão e o início do próximo cordão. Este dado auxiliará a avaliar detalhes visuais do revestimento.

Tabela 4.11 – Temperaturas atingidas no ensaio para o processo PTA.

ENSAIO DUPLA CAMADA - APORTE DE CALOR E O TEMPO GASTO ENTRE CORDÕES - PROCESSO PTA					
CORDÃO	TEMPERATURA DE PRE-AQUECIMENTO (°C)	TEMPERATURA MÁXIMA (°C) *	TEMPERATURA MÁXIMA MEDIDA NO CORDÃO (°C) **		TEMPO GASTO ENTRE CORDÕES (s) ***
1º	175	187	207	1º Cordão	180 (Entre 1º e o 2º Cordão)
2º	175	198	243	1º Cordão	
3º	175	228	257	2º Cordão	180 (Entre 2º e o 3º Cordão)
			268	1º Cordão	
			273	2º Cordão	
4º	175	223	296	3º Cordão	240 (Entre 3º e o 4º Cordão)
			283	1º Cordão	
			286	2º Cordão	
			276	3º Cordão	
			307	4º Cordão	
* Temperatura máxima atingida à uma distancia de 70mm do 1º cordão de revestimento					
** Temperatura máxima atingida no cordão de revestimento.					
*** Tempo gasto entre o término de um cordão e o início do outro. (Ajuste de máquina)					

Tabela 4.12 – Temperaturas atingidas no ensaio para o processo oxi-acetilênico .

ENSAIO DUPLA CAMADA - APORTE DE CALOR E O TEMPO GASTO ENTRE CORDÕES - PROCESSO MAÇARICO					
CORDÃO	TEMPERATURA DE PRE-AQUECIMENTO (°C)	TEMPERATURA MÁXIMA (°C) *	TEMPERATURA MÁXIMA MEDIDA NO CORDÃO (°C) **		TEMPO GASTO ENTRE CORDÕES (s) ***
1°	150	235	505	1° Cordão	60 (Entre 1° e o 2° Cordão)
2°	150	305	535	1° Cordão	
			560	2° Cordão	60 (Entre 2° e o 3° Cordão)
3°	150	391	655	1° Cordão	
			668	2° Cordão	60 (Entre 3° e o 4° Cordão)
			680	3° Cordão	
4°	150	490	743	1° Cordão	60 (Entre 3° e o 4° Cordão)
			745	2° Cordão	
			736	3° Cordão	
			750	4° Cordão	
* Temperatura máxima atingida à uma distancia de 70mm do 1° cordão de revestimento					
** Temperatura máxima atingida no cordão de revestimento.					
*** Tempo gasto entre o término de um cordão e o início do outro. (Ajuste de máquina)					

4.3.3 COMPARAÇÃO DA MICROESTRUTURA, DA ZAC E DA DILUIÇÃO ENTRE OS PROCESSOS.

Para obter estes resultados, foram feitos ensaios junto ao laboratório de materiais e processos, da Escola Politécnica da USP. Os procedimentos experimentais foram: caracterização microestrutural e ensaio de microdureza.

Os corpos de prova foram cortados em seções conforme figura 4.5 e figura 4.6, para serem ensaiados nas faces dos cordões do revestimento e não na superfície final dos mesmos. Houve dificuldades na execução desta etapa, pois os cordões, como já informado anteriormente, são compostos de uma liga resistente ao desgaste, desta forma o procedimento de corte, usou desde lixadeira de disco normal até torno com sistema de retífica acoplado no carro transversal.

4.3.3.1 Caracterização Microestrutural

A caracterização da microestrutura foi feita no material soldado. Após o corte da região de interesse as amostras foram lixadas e polidas para a preparação metalográfica considerando as seguintes etapas:

Lixamento. Desbaste fino, com fluxo contínuo de água nas amostras, utilizando-se lixas de carboneto de silício de 100, 240, 300, 400, 600 e 1000 mesh, seguindo esta sequência, rigorosamente.

Polimento das amostras em pano, com pasta abrasiva de diamante, de 9, 3 e 1 μ m., também sendo seguida esta sequência.

Uma vez obtida uma superfície totalmente polida o material foi submetido a ataque químico com os reagentes Nital 2% (2% de ácido nítrico e 98% de álcool etílico), durante um tempo aproximado de 45 segundos. Posteriormente com o ácido Crômico 10% por 2 minutos, para o metal de base e revestimentos respectivamente.

4.3.3.2 Ensaio Metalográfico

Uma vez revelada à microestrutura, a aquisição de imagens foi feita utilizando a câmera digital Opticam OPT 10000 acoplada no microscópio de marca Olympus BX60M, como ilustrado na figura 4.7. Foram feitas macrofotografias, microfotografias e também macros com recursos de gráficos de coordenadas, para obtenção da ZAC e da diluição do metal base.



Figura 4.7 - Microscópio óptico Olympus BX60M [50].

4.3.3.3 Ensaio de Microdureza

O termo teste ou ensaio da microdureza refere-se a endentações estáticas provocadas por cargas menores que 1,0 kgf. O penetrador neste ensaio realizado foi uma pirâmide de Diamante Vickers.

Utilizou-se um microdurometro Buehler MMT-3/645. A carga utilizada foi de 0,3kgf durante um tempo de 15 s para cada ensaio.

O procedimento de teste é muito semelhante ao teste padrão Vickers, exceto que é feito numa escala microscópica com instrumento de precisão mais fina. Também há a exigência que a superfície a ser analisada seja ou tenha acabamento polido para o ensaio metalográfico. Quanto menor a carga de teste maior o grau de acabamento superficial necessário.

Foram ensaiados os 04 corpos cortados, sendo 02 para o processo PTA e 02 para o Oxi-acetileno. E destes 02, um deles o cordão de sobrepasse e o outro de dupla camada, conforme figura 4.5 e figura 4.6. Foram realizados de 20 a 30 pontos para cada corpo de prova ensaiado.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.

5.1 COMPARAÇÕES DOS PROCESSOS

5.1.1 VELOCIDADE E TEMPO DO REVESTIMENTO

Conforme os dados obtidos nos ensaios apresentados nas tabelas 4.8, 4.9, 4.10, 4.11 e 4.12 descrevem um panorama de vantagens e desvantagens de para cada processo.

O processo PTA tem uma velocidade de aplicação cerca de 50% mais rápido que o processo Oxi-acetileno, conforme o ensaio realizado. Isto comprova que para fazer um mesmo cordão com mesmas dimensões necessitará a metade do tempo quando utilizado o maçarico.

Mas com relação ao tempo de processo, ou melhor, separando o cordão e considerando um trabalho de revestimento numa superfície maior, onde faz-se necessário a aplicação de vários cordões, sobrepondo ao primeiro e também depositando dupla camada, o processo Oxi-acetileno por maçarico requer menos tempo. Quando maior for o ajuste do braço em que a tocha do PTA está montada, o tempo do processo por PTA é superior de 100% até 400% superior, que com os tempos de ajuste do maçarico. Este último dados, foi obtido, em função da movimentação do carro transversal e da altura do mesmo.

Esta variação está claramente evidenciada em função de que o processo Oxi-acetileno é manual, dependendo da habilidade do operador. Também existem sistemas PTA 100% robotizados, que conseguem reduzir este tempo entre um cordão e o outro cordão.

5.1.2 CONSUMO DE MATERIAL

Como informado no capítulo anterior, estudo comparativo entre os processos, foi avaliado a eficiência, diluição e crescimento de camada, está diretamente relacionados ao consumo de material, mas em virtude das construções dos cordões, não houve resultados que possam definir qual o processo tem menor desperdício durante a soldagem.

Foram disponibilizadas as mesmas quantidades de pó, tanto para o processo PTA quanto para o Oxi-acetileno, mas os cordões durante a soldagem não apresentaram as mesmas dimensões, tanto em comprimento, largura e altura. Para a realização de todos os ensaios, tanto para o PTA como para o Oxi-acetileno, este último teve um consumo superior a 30%, mas novamente não se trata da realidade informada pelos fabricantes dos equipamentos que informam rendimentos muito parecidos, como, o PTA na casa dos 5% a 15% de perda e para o Maçarico na casa dos 10% a 15% de perda.

Pela dificuldade de conseguir uma pesagem com precisão dos corpos de prova antes do ensaio, sugestão para futuros testes com a finalidade de medir eficiência de cada processo, poderá ser realizada o mesmo procedimento, pesando os corpos de prova antes da aplicação e depois comparar como os valores dos mesmos soldados. Avaliando a diferença de peso entre antes e depois.

Este tipo de análise é simples e consegue além de mensurar as diferenças de consumo de material de cada processo, também consegue checar se os parâmetros de trabalho estão corretos para os pós em questão.

5.1.3 MICRODUREZA

Utilizado o ensaio de microdureza Vickers carga 0,3kgf, as figuras 5.1 a 5.4 apresentados na forma de gráficos, demonstram os resultados de microdureza obtidos nos diferentes corpos de provas. Na figura 5.1 Microdureza em Vickers no corpo de prova soldado pelo processo PTA no ensaio de Sobreposição. Na coordenada X, números de pontos a uma distância constante e na coordenada Y, valores em Vickers. O valor mais alto medido no cordão soldado, área revestida, foi de 805,5 HV de microdureza.

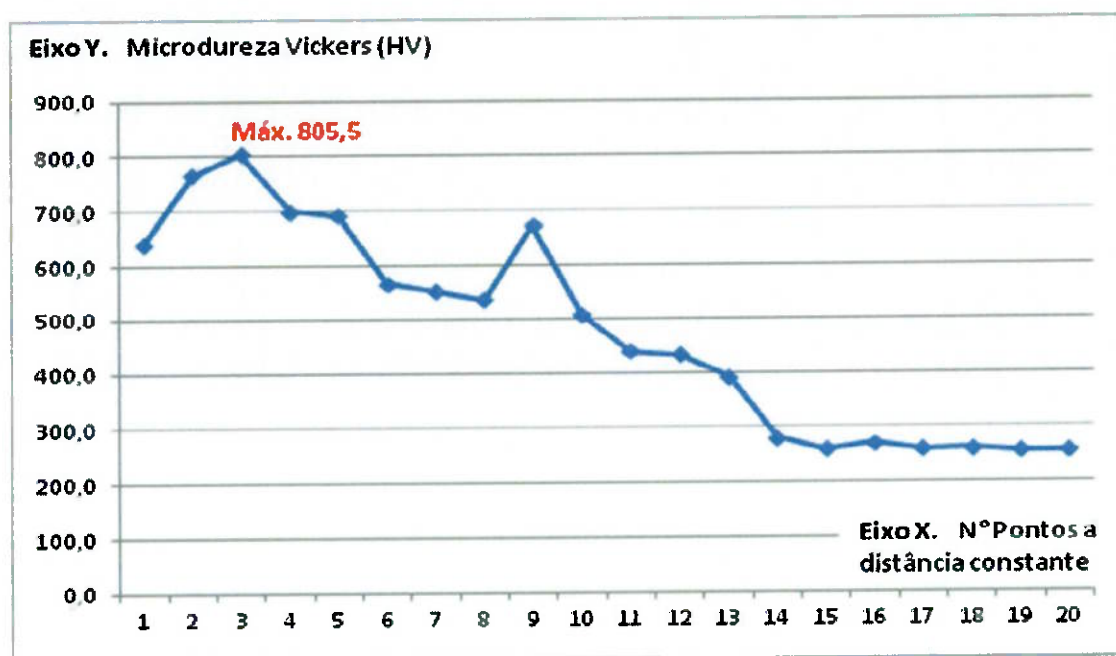


Figura 5.1 – Microdureza em Vickers no corpo de prova soldado pelo processo PTA no ensaio de Sobreposição.

Na figura 5.2 Microdureza em Vickers no corpo de prova soldado pelo processo Oxi-acetileno no ensaio de Sobreposição. A coordenada X, números de pontos a uma distância constante. Na coordenada Y, os valores em Vickers. O valor mais alto medido no cordão soldado, foi de 1071,1 HV de microdureza.

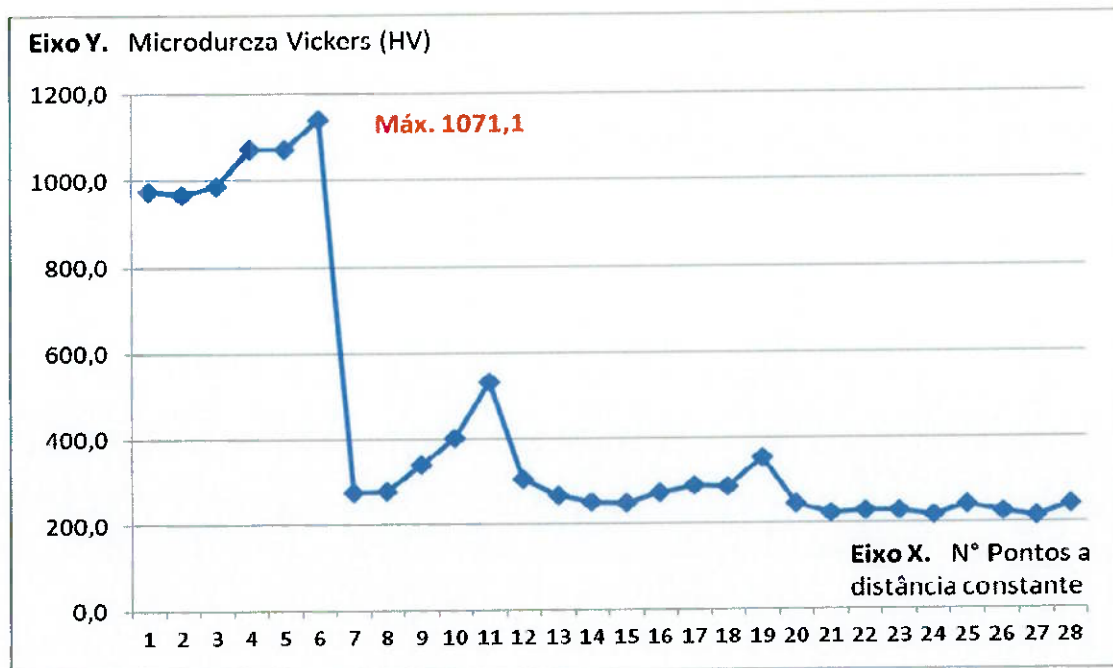


Figura 5.2 – Microdureza em Vickers no corpo de prova soldado pelo processo Oxi-acetileno no ensaio de Sobreposição.

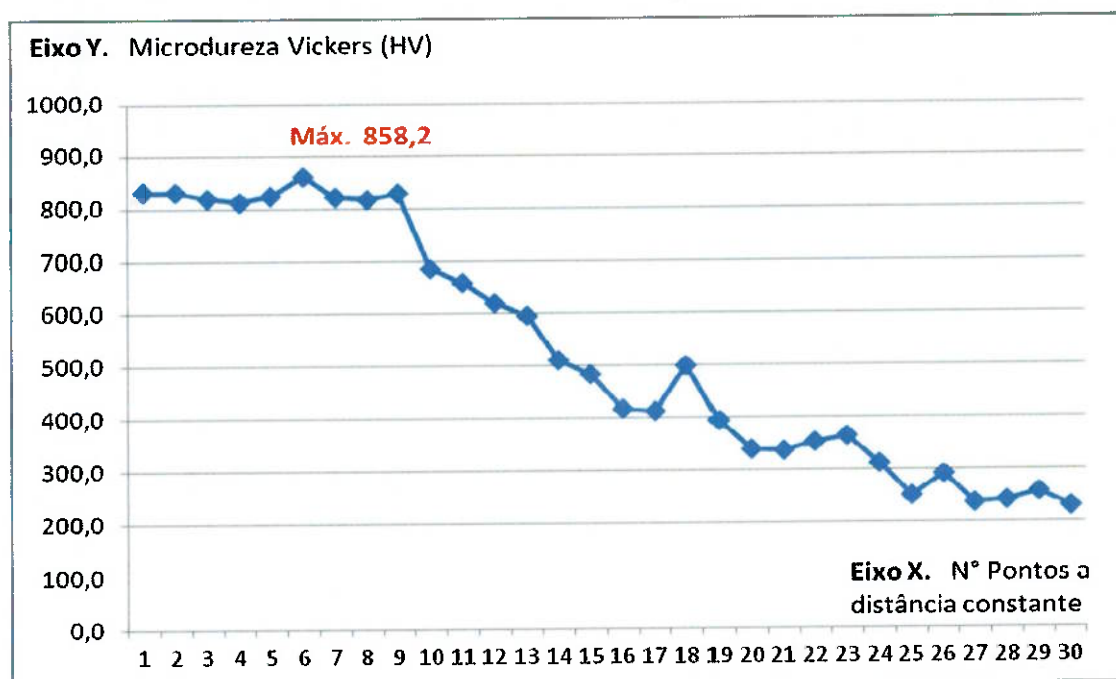


Figura 5.3 – Microdureza em Vickers no corpo de prova soldado pelo processo PTA no ensaio de Dupla camada.

Na figura 5.13 Microdureza em Vickers no corpo de prova soldado pelo processo PTA no ensaio de Dupla camada. No eixo X, números de pontos a uma distância constante e no eixo Y do gráfico, valores em Vickers. O valor mais alto medido foi de 858,2 HV de microdureza.

Por fim, na figura 5.14 representada por um gráfico de microdureza, no corpo de prova soldado pelo processo Oxi-acetileno no ensaio de Dupla camada. Na coordenada X, números de pontos a uma distância constante e na coordenada Y, valores em Vickers. O valor mais alto medido no cordão soldado, área revestida, foi de 951,1 HV de microdureza.

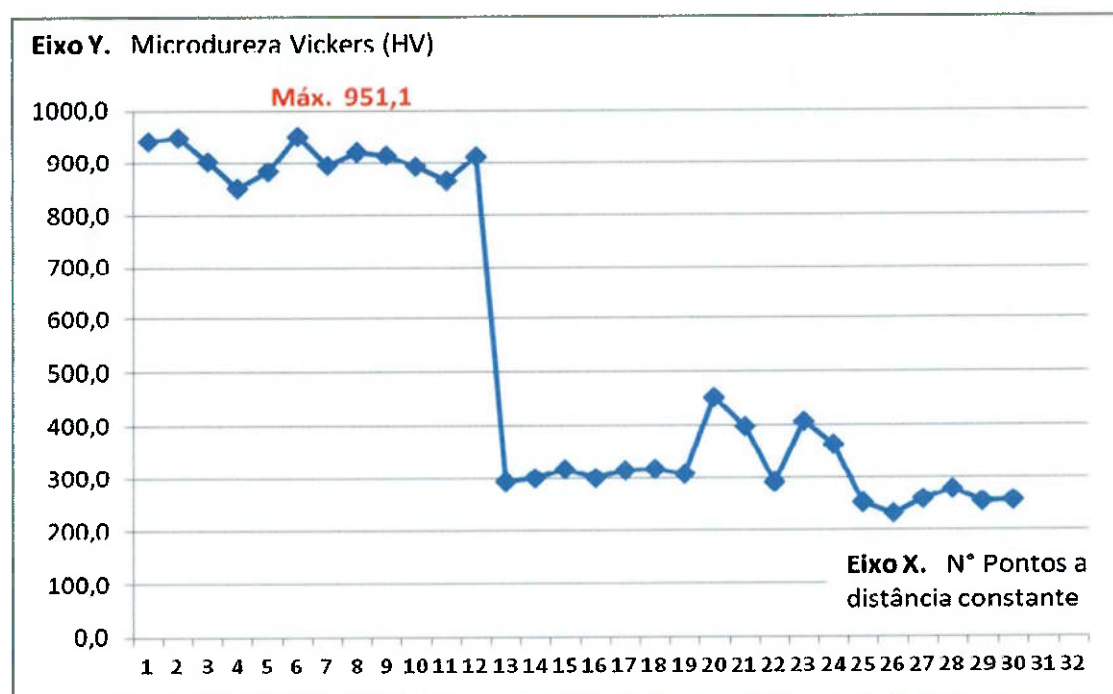


Figura 5.4 – Microdureza em Vickers no corpo de prova soldado pelo processo Oxi-acetileno no ensaio de Dupla camada.

Comparando os processos PTA com o Oxiacetileno, foram identificados valores mais altos, tanto nos ensaios Sobreposição como na Dupla camada, pelo processo Oxi-acetileno. Sendo: Sobreposição (PTA - 805,5 HV contra Oxi-acetileno -1071,1 HV) e Dupla camada (PTA – 858,2 HV contra Oxi-acetileno – 961,1HV).

Nestes gráficos consegue também avaliar comportamentos de durezas bem distintas, dos processos, nas faixas de Dupla camada, na região de Diluição e na ZAC.

No processo PTA, no ensaio de Dupla camada, pode concluir dados interessantes. Embora o revestimento não tenha apresentado uma dureza igual ao do processo Oxi-acetileno, somente 860 HV, no decorrer dos outros pontos, manteve a diminuição de dureza gradativa, tanto no cordão final, quanto no primeiro passe, na faixa de diluição e na ZAC. Isto ocorre pela característica do processo, pois o mesmo há a maior diluição, migrando elementos ou do cordão anterior ou do metal base, na área soldada analisado. A figura 5.5 ilustra bem área diluída de cada cordão, e do Dupla camada e da ZAC.

Já no processo Oxi-acetileno, o comportamento é totalmente diferente. A variação de dureza oscila na casa dos 800 a 950 HV na faixa do revestimento, mantendo-se constante. Mas despencando na zona de ligação. Isto se deve pelo fato de não haver diluição no cordão anterior e também não haver diluição no metal base. Fenômeno que dá a característica de escala gradativa de dureza. A ZAC é muito maior, na casa do 7 mm contra 4 mm no processo PTA. A ZAC maior influencia o metal base mudando as fases do aço e será

comentado posteriormente. A figura 5.5 ilustra macrografia de Dupla camada do Oxi-acetileno e a zona de ligação e a ZAC.

Nas figuras 5.1 a 5.5 também informam características interessantes, quando comparados os mesmos processos, tanto no ensaio de Sobreposição quanto no ensaio de Dupla camada. No processo PTA o gráfico é muito semelhante, onde a linha de durezas desce suave, mas se consegue observar que a máxima dureza ocorre no ensaio de Dupla camada. (858,2 HV contra 805,5 HV no ensaio de Sobreposição). Novamente isto se deve em função da diluição, no metal base, reduzindo a máxima dureza atingida e quando houve Dupla camada, novamente diluindo no cordão anterior, e como este já estava com dureza mais alta, elevou a faixa de dureza.

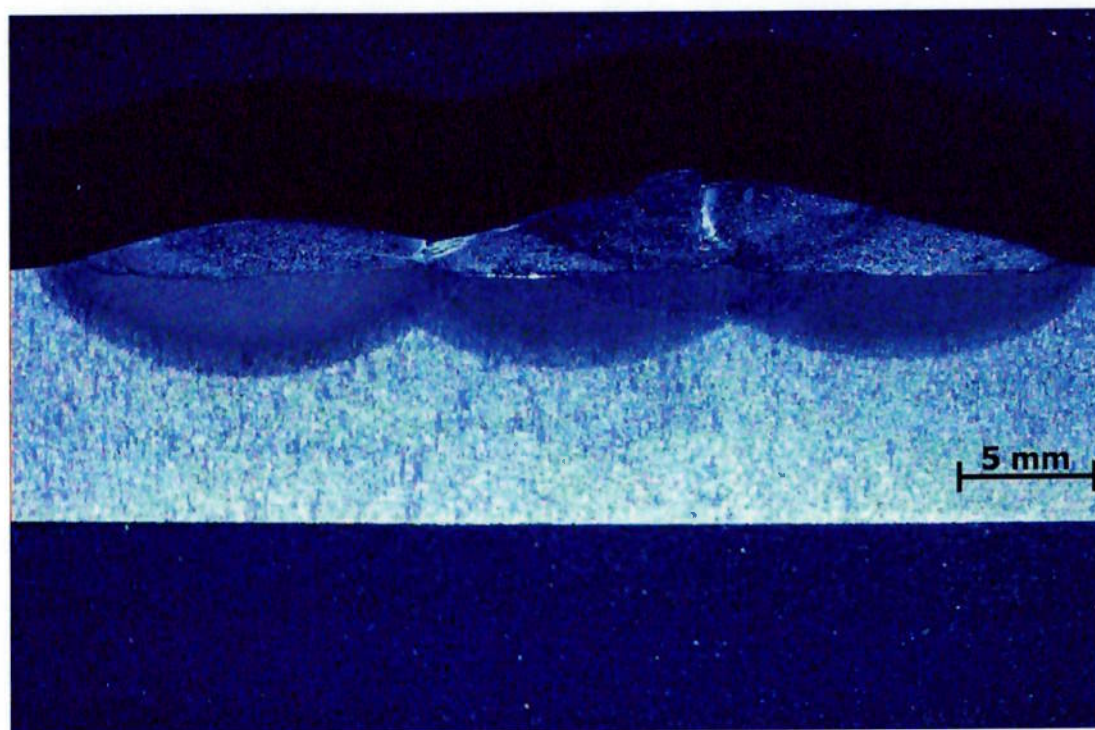


Figura 5.5 – Macrografia do cordão de Dupla camada e da ZAC.

Já no processo Oxi-acetileno aconteceu o contrário. A dureza se mantém igual, na casa dos 900 a 1000 HV. Há um pico de dureza, na ordem dos 1070 HV e analisando tanto as microdurezas tanto no ensaio de Sobreposição como no Dupla camada e conclui-se que este pico deve-se em função de um possível aumento de dureza ou por uma oxidação na zona de ligação no início do processo de aplicação por maçarico. As figuras 5.6 e 5.7, fotos das microdurezas na região antes da zona de ligação. A figura 5.6 representa o revestimento com pico de 1071,1 HV .

Outro comentário referente à dureza consiste na faixa de dureza atingida pelo processo Oxi-acetileno. Fazendo uma média dos valores dos revestimentos, excluindo o desvio, pico de 1071,1 HV, tanto na Dupla camada como no de Sobreposição, a diferença entre os 02 processos oscila na ordem dos 150 HV superior para o processo Oxi-acetileno com relação ao PTA. Como os materiais são uma mesma liga, com composições idênticas em percentual de elementos, o que difere entre si, a granulométrico entre os 02 materiais. O processo PTA requer uma distribuição mais grossa, $-45/+106\ \mu\text{m.}$, o para o maçarico Oxi-acetileno $-15/+45\ \mu\text{m.}$. Este último muito mais fino, e proporcionando uma compactação maior do revestimento, elevando a faixa de microdureza do revestimento.

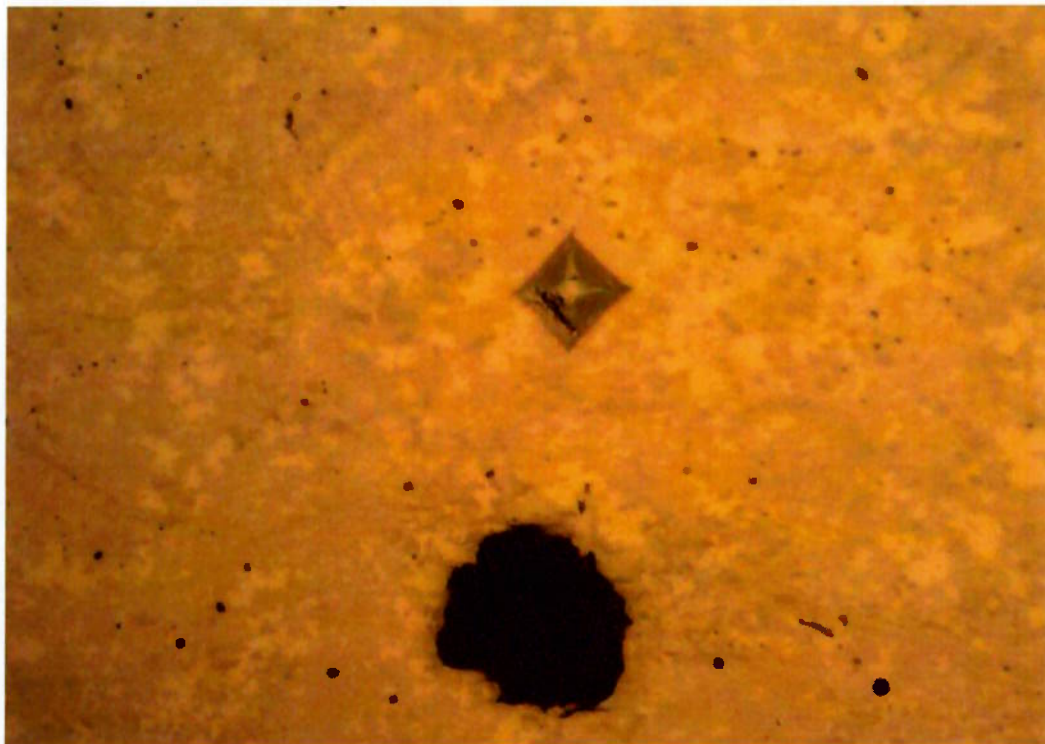


Figura 5.6 – Microfotografia na região antes da zona de ligação, com ensaio da microdureza, do revestimento de Sobreposição.

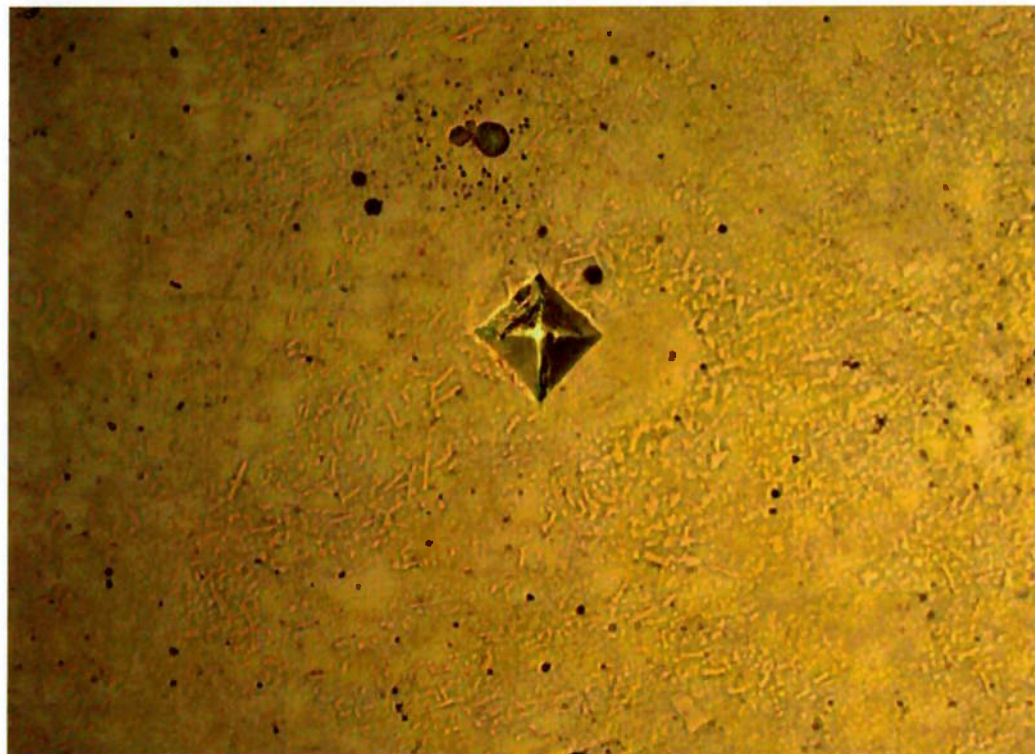


Figura 5.7 – Microfotografia na região antes da zona de ligação, com ensaio da microdureza, do revestimento de Dupla camada.

5.1.4 DILUIÇÃO

As macrofotografias ensaiadas nos corpos de prova ilustram bem a zona de ligação, a ZAC e a diluição do revestimento soldado no metal base. Também se houve diluição e a proporção sobre a quantidade de metal soldado.

A figura 5.8 ilustra o processo do revestimento PTA no ensaio de Sobreposição. Na imagem consegue identificar que houve diluição do revestimento no metal base, de $8,01\text{mm}^2$ contra $38,21\text{mm}^2$ de material depositado. A linha verde desenha o revestimento e a linha vermelha a penetração no metal base.

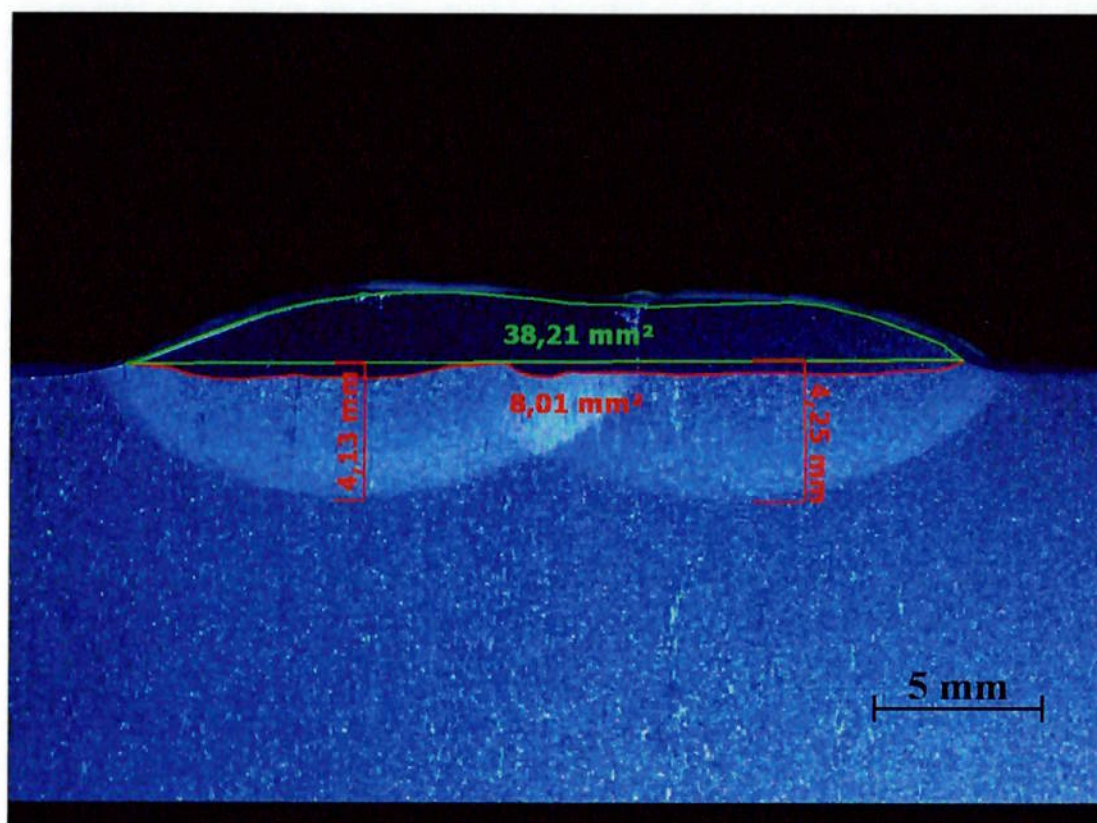


Figura 5.8 – Macrografia do processo do revestimento PTA no ensaio de Sobreposição.

A figura 5.9 ilustra o processo do revestimento Oxi-acetileno no ensaio de Sobreposição. Na imagem consegue identificar que não houve diluição do revestimento no metal base. A linha verde desenha o revestimento, e nas microfotografias na região de ligação consegue identificar na zona de ligação pequenas falhas, por não haver fusão com o metal base.

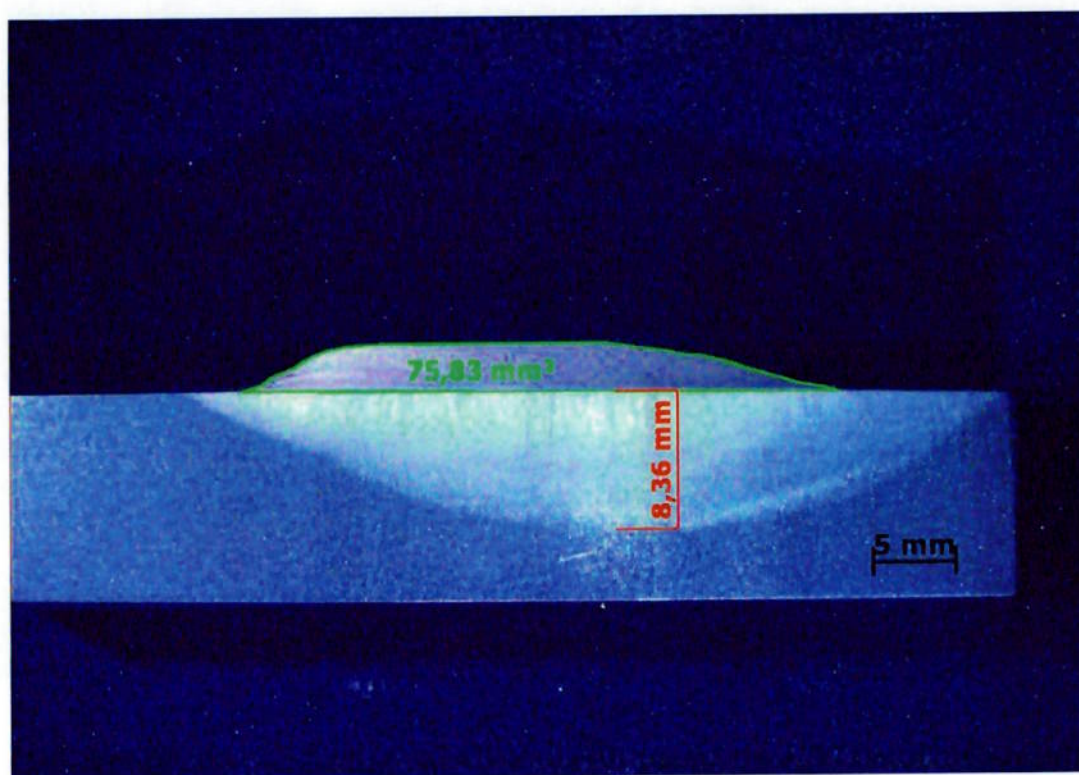


Figura 5.9 – Macrografia do processo do revestimento Oxi-acetileno no ensaio de Sobreposição.

A figura 5.10 ilustra o processo do revestimento PTA no ensaio de Dupla camada. Na imagem consegue identificar que houve diluição do revestimento no metal base, de 16,73mm² contra 58,96mm² de metal depositado. A linha verde desenha o revestimento e a linha vermelha a penetração no metal base.

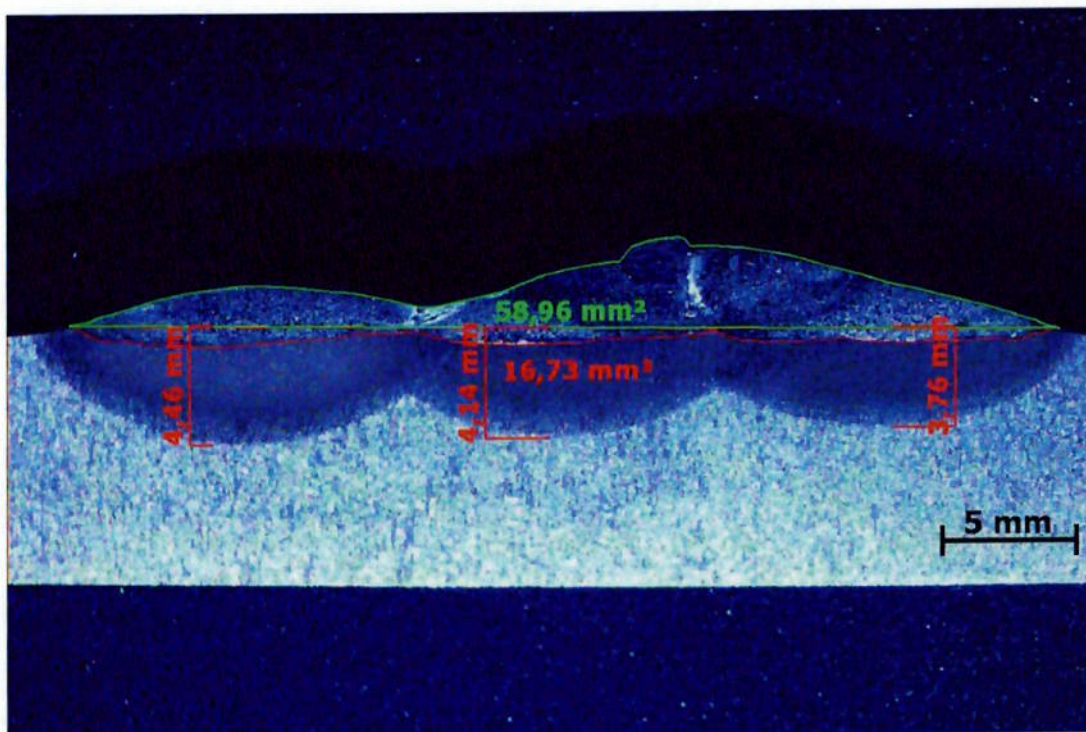


Figura 5.10 – Macrografia do processo do revestimento PTA no ensaio de Dupla camada.

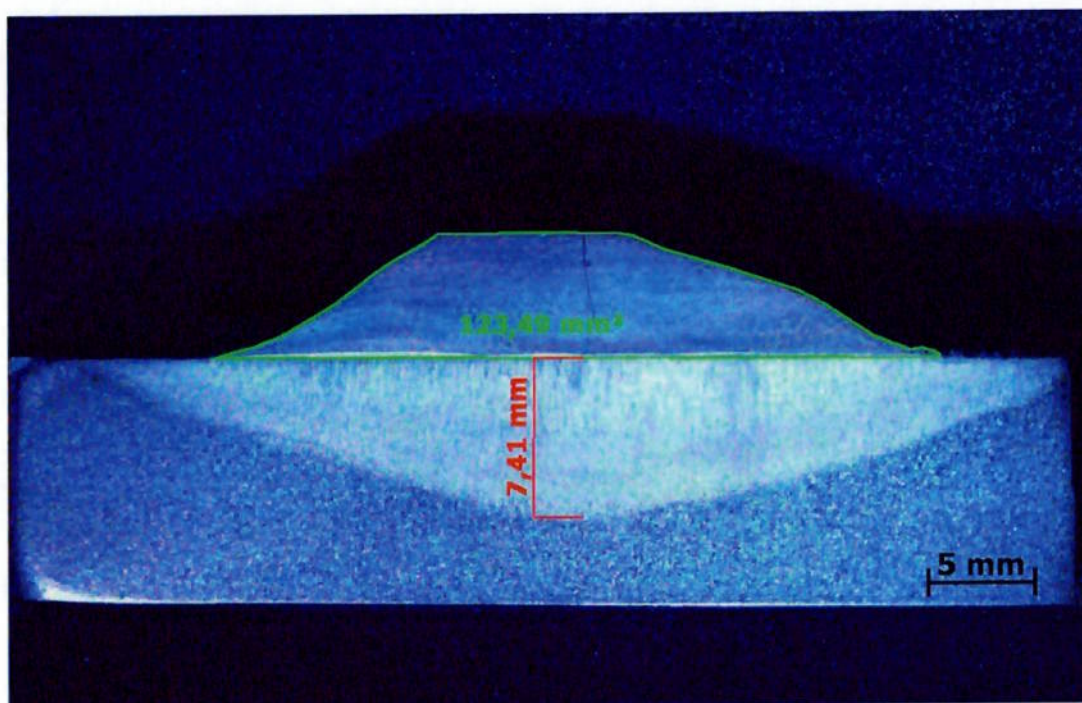


Figura 5.11 – Macrografia do processo do revestimento Oxi-acetileno no ensaio de Dupla camada.

A figura 5.11 ilustra o processo do revestimento Oxi-acetileno no ensaio de Dupla camada. Na imagem consegue identificar que não houve diluição do revestimento no metal base. A linha verde desenha o revestimento. Nesta imagem há condições de identificar falhas na zona de ligação, que pode ser oriundo deste processo, como limpeza, oxidação etc., como já comentado, não haver fusão com o metal base.

5.1.5 ZAC ZOZA AFETADA PELO CALOR

Com base nas macrofotografias apresentadas no capítulo anterior, consegue-se identificar as ZAC, Zonas Afetada pelo Calor, geradas por cada pelo processo.

A figura 5.12, ilustra numa mesma escala as macros dos 02 processos PTA e Oxi-acetileno, para o ensaio de Sobreposição. Desta forma conseguiu comparar e avaliar as áreas afetadas pelo calor gerado por cada processo.

Claramente o processo Oxi-acetileno tem uma ZAC muito superior quando comparada como PTA. Em profundidade em milímetros, o valor é superior e mais de 100%. Os 8,36 mm para Oxi-acetileno, contra os 4,11 mm do processo PTA. Não medido em milímetros, mas visualmente comprovado o comprimento da ZAC em relação ao comprimento dos cordões soldados. Uma constatação deve-se diretamente aos valores de temperatura máxima obtidos nas tabelas 4.9 e 4.10 e copiados os dados mais relevantes para a tabela 5.1, onde traduzem as diferenças de aporte de térmico. O processo Oxi-acetileno necessita uma maior superfície e temperaturas mais elevadas para ocorrer a soldagem.

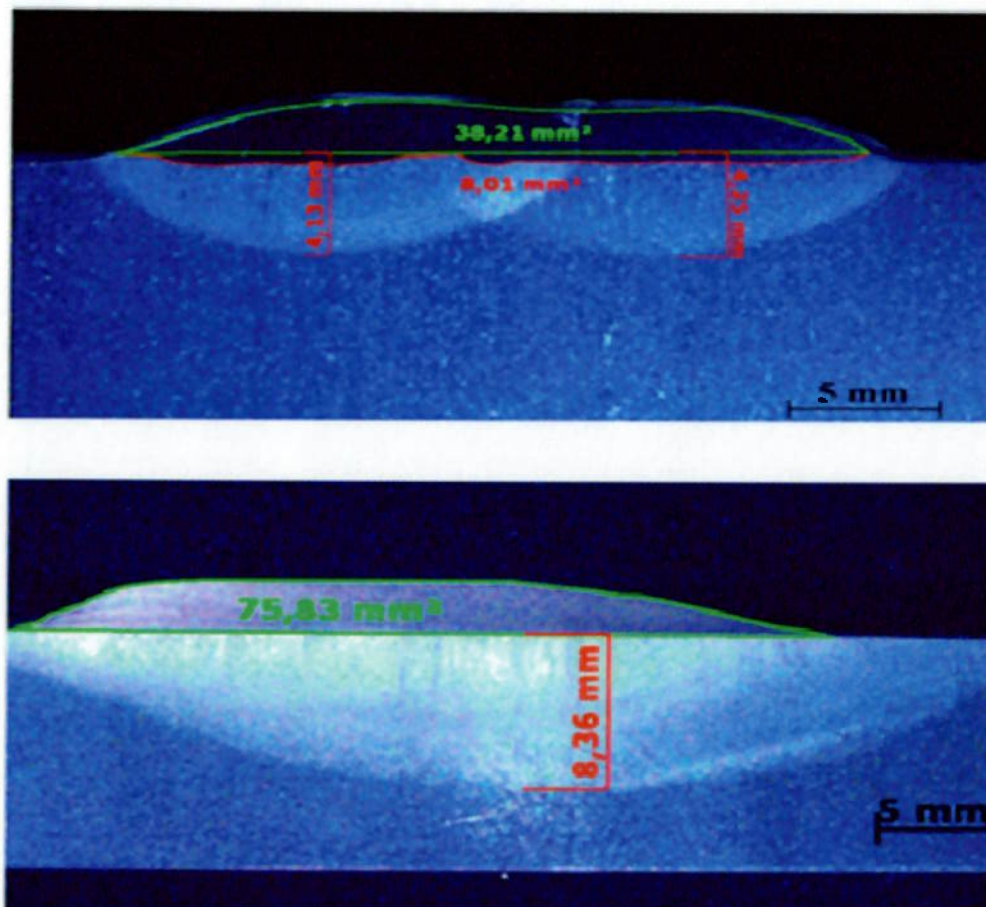


Figura 5.12 – Macrofotografia do processo do revestimento PTA e Oxi-acetileno no ensaio de Sobreposição, agrupadas para ilustrar a ZAC.

Tabela 5.1 – Dados do calor gerado durante o processo do revestimento. Nota que o processo Oxi-acetileno gera perto do dobro de temperatura que o processo PTA, medido no cordão anterior ao soldado.

CORDÃO	TEMPERATURA MÁXIMA (°C)		TEMPERATURA MÁXIMA MEDIDA NO CORDÃO (°C)	
	PTA	Oxiacet.	PTA	Oxiacet.
1°	235	357	279	528
2°	252	397	295	590

A figura 5.13, seguindo o princípio utilizado anteriormente em comparar os processos, buscou disponibilizar na mesma escala, as macros do processo PTA e macros do processo Oxi-acetileno, para o ensaio de Dupla camada. Como comentado anteriormente o processo Oxiacetileno gera uma ZAC maior e única, como fosse um trapézio. Enquanto no processo PTA, reproduz formas similares aos cordões, rebatidas no metal base.

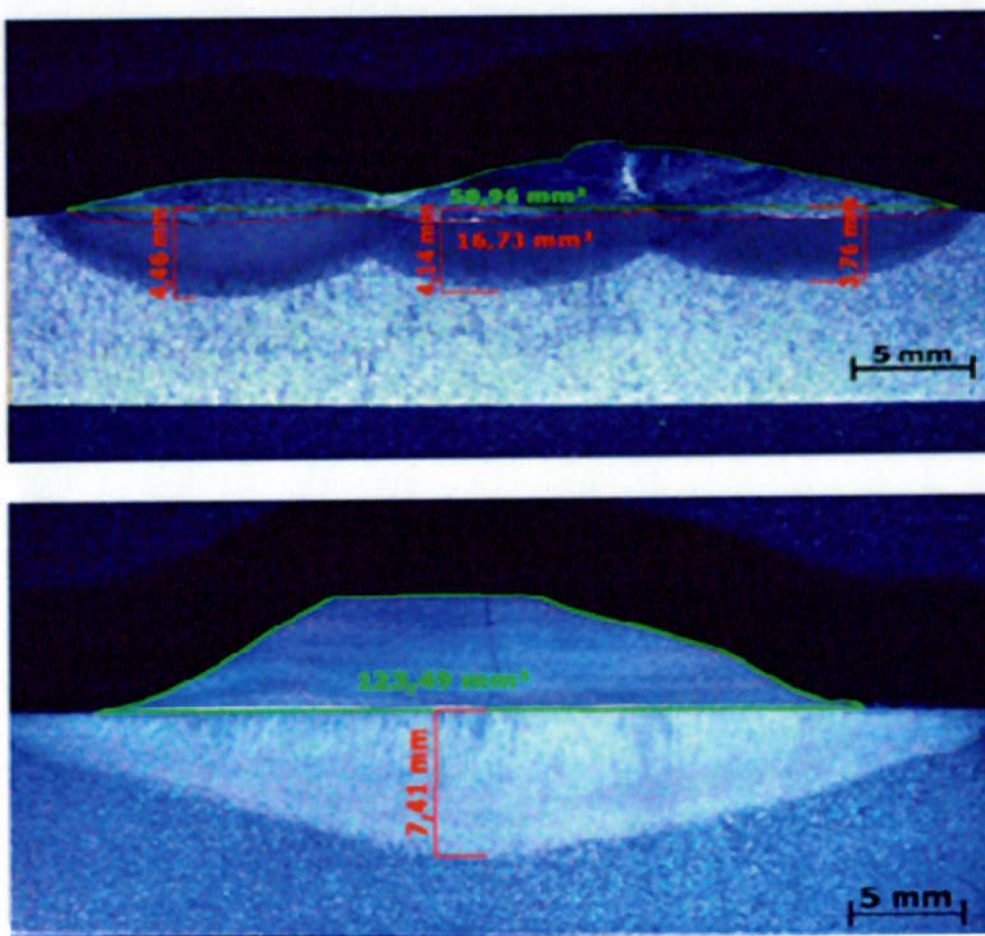


Figura 5.13 – Macrografia do processo do revestimento PTA e Oxi-acetileno no ensaio de Dupla camada, agrupadas para ilustrar a ZAC.

6. CONCLUSÕES

Com base nas técnicas e materiais utilizados pode-se concluir que:

- a) Os resultados demonstraram que o processo Oxi-acetileno é 50% em média mais lento que o processo PTA durante a soldagem. Fato que o processo necessita de uma superfície termicamente mais elevada, tornando-o mais moroso. Embora o processo Oxi-acetileno consiga resultados em tempo de ajustagem entre as soldagens dos cordões, valores em média de 60 a 70% mais rápido do que o processo PTA, mas não sendo relevante para este estudo. Analisando estas características, constata que o processo é mais indicado para revestimento por soldagem de manutenção, em recuperações de superfícies pequenas e de geometria complexa, onde requer a habilidade do soldador para o controle térmico da superfície.
- b) Observou-se que o processo Oxi-acetileno atingiu picos em média 20% superiores ao processo PTA, nos ensaios de Sobreposição e em média 12% superiores também para os ensaios de Dupla camada. Valores diretamente relacionados à ausência de diluição no metal base pelo processo Oxi-acetileno, fato que ocorre com o processo PTA. Também se deve ao tamanho da partícula do pó aspergido pelo maçarico. O mesmo é na média, 50% inferior ao tamanho da partícula do pó para o PTA. A distribuição granulométrica mais fina consegue-se arranjar e se compactar melhor, com os carbonetos de tungstênio e de cromo formados no processo na matriz da liga de níquel, tornado o revestimento com maior dureza.

c) O processo PTA em linhas gerais atinge fixas teóricas de diluição entre 2 a 40% no metal base. Faixa ampla, mas relacionada às seguintes variáveis: característica do equipamento; tipo de tocha; detalhes do metal base; metal de adição; parâmetros utilizados. Neste último, também havendo variáveis significativas, como o gás de proteção utilizado, o gás plasma, tipo de eletrodo utilizado, velocidade de deslocamento e oscilação da tocha, tensão e corrente aplicadas. Os valores de 22% de diluição no metal base para o ensaio de Sobreposição e 26% de diluição para Duplo passe estão dentro da faixa, mas considerado valores altos, mas considerando as variáveis, pode-se atingir valores inferiores aos obtidos.

d) A ZAC gerada pelo processo PTA foi aproximadamente 50% inferior a ZAC gerada pelo Oxi-acetileno no ensaio de Sobreposição e no de Dupla camada, na ordem dos 45% inferior ao processo Oxi-acetileno. Fato relacionado ao aporte térmico gerado por cada processo e constatado nas medições das temperaturas dos cordões e no ponto distante em 70 mm. O processo Oxi-acetileno, pouco se consegue ajustar a questão da ZAC, devido a necessidade de aporte térmico para a soldagem, mas para o processo PTA, devido as variáveis do processo, como já comentado, consegue reduzir este e aumentar mais a diferença entre os processos.

e) O processo Oxi-acetileno não ocorre à fusão com o metal base, na realidade a aderência é obtida pela difusão atômica entre o metal de adição no estado líquido e o metal base no estado sólido. Este estudo a liga utilizada como metal de adição é composta de níquel com outros elementos e com faixa de fusão entre 950°C e 1030°C. Para atingir esta faixa, o aporte térmico é elevado,

gerando uma ZAC mais de 100% superior ao processo PTA e como há a exposição maior de tempo a uma elevada temperatura, ocorre oxidação da superfície a ser ainda revestida. Identificados nas macrografias, linhas de ligação claramente evidenciadas, que influenciarão na aderência do revestimento.

SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS.

Para futuros trabalhos, como ilustrado nos ensaios de microdureza, nas macrografias e evidenciados na ZAC e diluição o processo PTA pode ser explorado com mais ensaios, alternando parâmetros de soldagem, como altura da tocha com relação a peça, como velocidade de deslocamento e oscilação da tocha e também aumento ou diminuição da corrente da fonte do PTA.

Com estas variáveis, poderá obter resultados de menor ou maior diluição, menor ou maior ZAC e diminuição ou aumento da dureza do revestimento.

Estes dados auxiliarão a tendência do mercado em revestir estabilizadores não magnéticos, que como comentado anteriormente, serão as ferramentas de trabalho para o Pré-Sal.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS:

1. SILVA, Dr. Renato A. Engenharia de Perfuração. Produzido por: Dr. Renato A. Silva Em:
http://www.das.usfc.br/~plucenio/DAS5946/.../Apr_DrRenato_A_Silva.pdf
Acessado em: Set/11.
2. Curso Prático & Objetivo. Perfuração de Poços – Curso Técnico de Petróleo da UFPR. Produzido por UFPR Em:
www.tecnicodepetroleo.ufpr.br/apostilas...do.../perfuracoes.pdf Acessado em Set. 11
3. LUZ, A. B.; BALTAR, C. A. M.: A Função dos Minerais Industriais Componentes da Lama de Perfuração de Poços. Produzido por: CETEM Centro de Tecnologia Mineral Ministério da Ciência e Tecnologia. CT2003-100-00 Comunicação Técnica Elaborada para o CETEM. Insumos Minerais para Perfuração de Poços de Petróleo, 2003 Cap.1, p.12-19. Em:
www.cetem.gov.br/publicacao/CTs/CT2003-100-00.pdf Acessado em Out.11
4. RODER, Christensen: Estabilizador Geral. Catálogo Técnico. Produzido por: Christensen Roder do Brasil Em:
www.christensenroder.com.br/estabilizadores.php Acessado em ago. 11
5. STABILDRILL, Energy Stabildrill. Catálogo Técnico. Produzido por Stabildrill Em: www.stabildrill.com/pdfstabil_drill_brochure.pdf Acessado em ago.11

6. RODER, Christensen: Desenho em aberto, de fabricação de um estabilizador, fornecido pela Christensen Roder – Produtos e Serviços de Petróleo LTDA. Fonte- Solid Works. jun.11
7. SUPERIOR, Corporate Brochure. Catálogo Técnico. Produzido por Superior Cia. Em: www.superior.com/corporate_brochure.pdf Acessado em ago.11
8. OILFIELDS ALLOYS, Sales and Rental. Drilling Tools Catalog. Produzido por: Oilfields Alloys Em: www.oilfieldsalloys.com/AO%20products%20catalog.pdf Acessado em Out.11
9. OILFIELD SERVICES & SUPPLIERS PTE LTD. Products & Services Catalogue 2010. Produzido por Oilfields Services. Em: www.oilfieldservices.com/default/oss-catalog.pdf Acessado em out.11
10. DARRON Limited. Oil Tools. Hardfacing. General Catalogue. Produzido por Darron Limited. Em: <http://www.darron-sbo.com/oil-tools/hardfacing.asp> Acessado em out.11
11. LUZ, A. B.; BALTAR, C. A. M.: A Função dos Minerais Industriais Componentes da Lama de Perfuração de Poços. Produzido por: CETEM Centro de Tecnologia Mineral Ministério da Ciência e Tecnologia. CT2003-100-00 Comunicação Técnica Elaborada para o CETEM. Insumos Minerais para Perfuração de Poços de Petróleo, 2003 Cap.1, p.14. Em: www.cetem.gov.br/publicacao/CTs/CT2003-100-00.pdf Acessado em out.11
12. NATIONAL OILWELL VARCO. Technical Data Sheet Drilling and Oil Well Brochure. Produzido por: NOV. 2010, Page 3.

13. SPECIFICATION FOR ROTARY DRILL STEM ELEMENTS., ANSI/API Spec 7-1. First edition, set. 06
14. STANDARD TEST METHOD AND DEFINITION FOR MECHANICAL TESTING OF STEEL PRODUCTS, Designation: A370 – 08. Last approved, abr.08
15. HOWCO GROUP. Material and alloys. Catálogo de produtos e composições dos materiais. Produzido por Howco Group. 2011. p.09 -11
16. VILLARES. Composição Química de Aços. Catálogo de ligas. Produzido por Villares 1981. p. 24 e 25
17. CHIAVERINI, V., Aços e Ferros Fundidos. 5. Edição. Publicação ABM. 1987. p. 397 - 411
18. TECHNICAL DATASHEET CARPENTER, Max Stainless. Catálogos técnicos dos materiais não magnéticos da Carpenter. Fornecido pela Carpenter por e-mail. Em set. 11
19. THYSSENKRUPP YEARBOOK. Non-Magnetic alloys. Catálogo de materiais fornecido pela Thyssenkrupp. Em: <http://www.thyssenkrupp.com/en/year-book/5/3/> Acessado em out. 11
20. CASTOLIN & EUTECTIC. Wear and Corrosion Seminar. Material fornecido no primeiro seminário de Aspersão Térmica no Brasil 2010.
21. NEVES, E. G., Apostila de E. Elétrica, UFPEL. Capítulo 2, pág. 13. Em: http://minerva.ufpel.edu.br/~egcneves/disciplinas/mte/caderno_mte/circ_magn.pdf Acessado em jan. 12
22. WAINER, E.; BRANDI, S. D.; MELO, F. D. H. Soldagem: Processos e Metalurgia. São Paulo: Edgar Blücher, 1995. pág. 243

23. WALL COLMONY, Technical Data Sheet – Welding and Brazing Alloys, 1991. pág. 12
24. SAINT GOBAIN, Tufcote® Coating Solutions - Technical Data. How to braze. 2006
25. HRABOVSKY, M. Water-stabilized plasma generator. Institute of Plasma Physics, Academy Of Sciences Czech Republic. 1998
26. RAHMAN, Marhbubur. Development and Characterization of Electro thermal Vaporization Parallel Capacitively Couple Plasma. University Of British Columbia. 2001
27. RAGHU, D.; WEBBER, R. PTA Provides its Worth in High- Volume Hardfacing Jobs. 1996
28. WAINER, E.; BRANDI, S. D.; MELO, F. D. H. Soldagem: Processos e Metalurgia. São Paulo: Edgar Blücher, 1995. pág. 156
29. DURUM. General Notes for the Plasma-transferred-Arc process (PTA). Historic and application.
30. YAEDU, A. E.. Influencia do Substrato na deposição de Stellite 1 com Plasma De Arco Transferido. Tese de Mestrado. UFPR. 2003
31. BRANDI, S. D. Física do revestimento. Material fornecido para o Curso de Engenharia e Soldagem PECE USP. 2011. Ilustração de uma coluna plasma. pág. 22
32. SILVA, R. H G. Inovações em equipamentos e em parametrizações no processo de revestimento por Plasma. Tese de Doutorado. UFSC. 2010 pág. 31
33. STELLITE COATING. PTA Training Manual. Plasma Transferred Arc Welding. 1996

34. RAMALHO, J.. Processos do revestimento. Soldagem Plasma. Material fornecido para o Curso de Engenharia e Soldagem PECE USP. 2011. Ilustração comparação de uma tocha TIG e uma tocha Plasma, pág. 7
35. WAINER, E.; BRANDI, S. D.; MELO, F. D. H. Soldagem: Processos e Metalurgia. São Paulo: Edgar Blücher, 1995. pág. 160
36. WAINER, E.; BRANDI, S. D.; MELO, F. D. H. Soldagem: Processos e Metalurgia. São Paulo: Edgar Blücher, 1995. Ilustração de um arco transferido e um não transferido. pág. 167
37. BRACARENSE A.Q. Soldagem a plasma – PAW. UFMG. Belo Horizonte - MG 2000. pág. 2
38. PRO-FUSION. Pre-ground Tungsten Electrodes. Manual Specification. California. Em: <http://preground.pro-fusion.pdf> Acessado em jan. 12
39. DELORO STELLITE. International Thermal Spray Conference - ASM Intenational 2012 US – Stellite Presentation. 2012 pág. 3
40. HART, K. W. D.; HARPERD, D. H.; GILL, M. J.; HEATH, G. R.. Case Studies in Wear Resistance Using HVOF, PTAW ans Spray Fusion Surfacing. Eutectic Canada- Castolin Switzerland. 2002. pág. 2
41. BALASUBRAMANIAN, V.; VARAHAMOORTHY, R.; RAMACHAMDRAN, C. R. Selection of welding processo in carbon steel based on quantities and qualities factor. Springer – Verlag London Limited. 2008
42. TWI TECHNOLOGIES WELDING INSTITUTE. David Howse- Welding Engineer Arc Process United Kingdo. e-mail respondido em: 28/03/2012
43. DUTRA, J. C.. LABSOLDA. Máquinas de solda e Fonte do revestimento. Em: <http://www.labsolda.ufsc.br/site/index> Acessado em 12/11

44. WAINER, E.; BRANDI, S. D.; MELO, F. D. H. Soldagem: Processos e Metalurgia. São Paulo: Edgar Blücher, 1995. pág. 180
45. MODENESI, P. J.; MARQUES, P. V.. Introdução aos Processos do revestimento. SOLDAGEM. UFMG. Eng. Metalúrgica. 2000. pág. 30
46. WAINER, E.; BRANDI, S. D.; MELO, F. D. H. Soldagem: Processos e Metalurgia. São Paulo: Edgar Blücher, 1995. Ilustração pág. 181, 182 e 186
47. DELORO STELLITE, Welding, Thermal Spray and Hardfacing alloys Catalogue. 2007
48. GARCIA, D. M.. Soldabilidade dos Aços Cromo Molibdênio. Material fornecido para o Curso de Engenharia e Soldagem PECE USP. 2012.
49. AWS AMERICAN WELDING SOCIETY - Structural Welding Code Steel - AWS D.11/D1.1M 2010
50. OLYMPUS. Catálogo do Microscópio óptico Olympus BX60M. Em: http://www.olympuspresspass.com/presspass_brochures.asp Acessado em: 05/12
51. WM WEAR MANAGEMENT. Guido Walt- Welding Manager. e-mail respondido em: 07/04/2012