

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

TIAGO JOSÉ ANTOSZCZYSZYN

REVESTIMENTOS DE LIGA DE NÍQUEL INCONEL 625 POR PLASMA COM ARCO
TRANSFERIDO (PTA) SOBRE AÇOS API 5L X70 E AISI 316L

CURITIBA

2014

TIAGO JOSÉ ANTOSZCZYSZYN

REVESTIMENTOS DE LIGA DE NÍQUEL INCONEL 625 POR PLASMA COM ARCO
TRANSFERIDO (PTA) SOBRE AÇOS API 5L X70 E AISI 316L

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica do Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Paraná, na área de concentração de Manufatura.

Orientador: Prof. Dr. Adriano Scheid

CURITIBA

2014

TERMO DE APROVAÇÃO

TIAGO JOSÉ ANTOSZCZYSZYN

REVESTIMENTOS DE LIGA DE NÍQUEL INCONEL 625 POR PLASMA COM ARCO TRANSFERIDO (PTA) SOBRE AÇOS API 5L X70 E AISI 316L

Dissertação aprovada como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica do Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Paraná, na área de concentração de Manufatura.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Afonso Reguly
Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof. Dr. Ramón Sigifredo Cortes Paredes
Universidade Federal do Paraná

Prof^a. Dr^a. Karin Graf
Universidade Federal do Paraná

Prof. Dr. Adriano Scheid
Universidade Federal do Paraná
Presidente

Curitiba, 17 de dezembro de 2014.

À minha mãe Luíres, irmãos Rael, Mabel e Luana,
cunhado e amigo João e sobrinha Amábili,
pelo apoio e amor incondicional.
Ao meu falecido pai Romualdo, que está no céu.

AGRADECIMENTOS

À Deus, que todos os dias me abençoa com muita saúde e paz, para que com humildade e determinação eu possa realizar meus sonhos.

À minha Mãe e meu Pai (*in memoriam*), que sempre foram exemplos para minha vida, pela dignidade, força de vontade e amor. Aos meus irmãos e cunhado, pelo apoio, amizade e respeito, compreendendo os diversos momentos familiares em que fui ausente.

Ao meu amigo, professor e orientador, Prof. Dr. Adriano Scheid, minha eterna gratidão por acreditar em minha capacidade, com paciência, incentivo e liderança. Sempre um exemplo de comprometimento e profissionalismo, não me deixando abater em momentos tão difíceis. Com certeza, sem seu empenho, este trabalho não apresentaria o mesmo perfil técnico e científico.

Ao Departamento de Engenharia Mecânica (DEMEC) e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (PG-MEC), da Universidade Federal do Paraná, pela oportunidade.

Aos colegas da iniciação científica e da pós-graduação que prestaram auxílio técnico nos trabalhos de deposição, preparação e caracterização das amostras, em especial ao Rodrigo Metz Gabriel Paes e André Keiji Saito Nagatsuyu.

À Prof^a. Karin Graf, Prof^a. Ana Sofia Clímaco Monteiro D'Oliveira e Prof. Ramón Sigifredo Cortés Paredes, pelos ensinamentos e discussões no desenvolvimento do tema, que foram fundamentais para a concretização deste trabalho.

À Fundação Araucária, pelo apoio financeiro no desenvolvimento do projeto e pela oportunidade de conhecer, de forma especial, a área de petróleo.

Aos amigos Daniel Elias Sauss, Diego Natal Cim e Fernando Noveli Telamo, que nunca me faltaram, demonstrando o verdadeiro sentido da amizade.

Aos colegas da Companhia Paranaense de Energia – Copel, em particular ao Valdir Lemes de Oliveira, Jurandir Dartora e Douglas Paladine Vieira, que apoiaram e incentivaram para que eu pudesse concluir meus estudos, contribuindo assim, para a minha formação profissional.

À todos os que incentivaram e apoiaram durante toda minha vida.

“Construí amigos, enfrentei derrotas, venci obstáculos...

Nunca desisti dos meus sonhos.”

Adaptado de: Augusto Cury

RESUMO

A Liga de Níquel do tipo Inconel 625 é usada em componentes de turbinas aeronáuticas ou de geração de energia e equipamentos na indústria do petróleo, especialmente devido a sua tenacidade aliada à elevada resistência à corrosão. Frequentemente, revestimentos com esta liga de Níquel são utilizados para proteger a superfície de componentes de aço. As propriedades dos revestimentos dependem da composição química e da microestrutura, influenciados por sua vez pelos parâmetros de processo na deposição e pela composição do aço a ser revestido. O processo de Plasma com Arco Transferido (PTA) vem sendo estudado para o processamento de revestimentos para diversas aplicações, com diversas vantagens associadas. A presente dissertação avaliou o impacto da diluição sobre a microestrutura e propriedades da liga de Níquel IN 625 depositada por Plasma com Arco Transferido (PTA) sobre dois substratos: aço carbono API 5L X70 e aço inoxidável AISI 316 L. Diferenças relacionadas à interação com o substrato foram maximizadas pela análise de revestimentos com cordão único, processados com três correntes de deposição: 120, 150 e 180 A. A liga de Níquel atomizada foi fundida e tratada termicamente com o objetivo de avaliar o impacto da diluição na dureza e fases formadas comparativamente a uma amostra de referência sem diluição. Microscopia Eletrônica de Varredura, Laser Confocal e difração de raios-X foram utilizados para caracterizar a microestrutura. A diluição foi determinada pelo método da razão de áreas e a dureza Vickers medida na seção transversal dos revestimentos. Os resultados indicaram a diluição aumenta com o aumento da corrente de deposição e também é fortemente influenciada pelo substrato. Diluição entre 5 e 29% foi medida para os revestimentos processados sobre aço API 5L X70 e entre 22 e 51% para o substrato de mais baixa baixa condutividade térmica, AISI 316 L. Os revestimentos apresentaram microestrutura composta por dendritas de γ (Ni-CFC) e região interdendrítica enriquecida em Molibdênio e Níbio, contendo carbonetos. Diferenças na microestrutura e propriedades dos revestimentos podem ser associados com a interação com cada substrato. A maior fração de carbonetos e menor diluição promoveram maior dureza nos revestimentos processados sobre API 5L X70, enquanto a baixa condutividade térmica do aço AISI 316 L levou à maior diluição e maior teor de ferro em solução sólida nestes revestimentos, induzindo a menor dureza do depósito. Apesar disso, a corrente de deposição levou à maior variação na dureza, comparativamente ao tipo de substrato de aço. Já o desempenho em desgaste dos revestimentos foi afetado significativamente tanto pela corrente de deposição quanto pelo substrato de aço. Melhor desempenho foi verificado para os revestimentos depositados sobre aço carbono API 5L X70, como consequência da menor diluição, maior refino da estrutura e maior fração de carbonetos presentes.

Palavras-chave: Plasma com Arco Transferido (PTA) Liga de Níquel, Liga 625, relação Microestrutura-Propriedades.

ABSTRACT

Nickel-based alloy Inconel 625 is utilized to protect components of aircrafts, power generation and oil refinery components due to its toughness and corrosion resistance. Ni-based alloy hardfacing is frequently applied to protect steel components surface. These properties are related with the chemical composition and microstructure of coatings, which depend on the processing parameters and the steel substrate composition to be protected. Plasma Transferred Arc (PTA) weld surfacing has been studied for coatings to several applications, exhibiting many advantages. This paper assessed the impact of dilution on Ni-based alloy IN 625 microstructure and properties, deposited by Plasma Transferred Arc (PTA) on two substrates: API 5L X70 carbon steel and AISI 316 L stainless steel. Differences due to the interaction with the substrate were maximized analyzing single track coatings processed with three different deposition current intensities: 120, 150 and 180 A. Atomized Nickel-based alloy was molten and heat treated to evaluate hardness and formed phases as a reference sample, as no dilution is involved. Scanning electron and Laser confocal microscopy and X-ray diffraction analysis were performed to characterize the microstructure and phases formed. Dilution was determined thru the area ratio method and Vickers hardness measured on coatings transverse section. Results indicated increasing dilution with the deposition current increase and substrate also influenced dilution. Dilution ranging from 5 to 29% was measured on coatings processed on the API 5L X70 steel and from 22 to 51% on the lower thermal conductivity AISI 316L steel substrate. Coatings exhibited microstructure composed by γ dendrites (Ni-FCC) and rich interdendritic region with higher Molybdenum and Niobium contents, with dispersed carbides. Differences on coatings microstructure and properties can be associated to the interaction with each substrate. Higher carbides fraction and lower dilution account for the higher coating hardness when processing on API 5L X70 whereas on the low thermal conductivity AISI 316L that experienced higher Iron content and dilution and, therefore, lower hardness. Wear performance of coatings was influenced by the deposition current and the substrate steel. Better performance was observed for coatings deposited on Carbon API 5L X70 steel, as a consequence of lower dilution, lower dendrite arm spacing (DAS) and higher carbides volume fraction.

Keywords: Plasma Transferred Arc (PTA), Nickel-based Alloy, IN625 alloy, Relation Microstructure-Properties.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1 – PREVISÃO DE PRODUÇÃO NACIONAL DE PETRÓLEO (BRASIL, 2013).....	17
FIGURA 2 – TOCHA DE PLASMA COM ARCO TRANSFERIDO (EUTECTIC, 2014).	30
FIGURA 3 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DOS PROCESSOS TIG E PTA (ADAPTADO DE BRACARENSE, 2000; MARCONI, 2002; SILVA, 2010).....	31
FIGURA 4 – ESQUEMA DO PROCESSO DE PLASMA COM ARCO TRANSFERIDO (BRACARENSE, 2000).	33
FIGURA 5 – RELAÇÃO ENTRE CORRENTE DE SOLDAGEM E DILUIÇÃO PARA DIFERENTES TAXAS DE ALIMENTAÇÃO DE PÓ E VAZÕES DE GÁS DE PLASMA (SILVA, 2012).	36
FIGURA 6 – FLUXOGRAMA EXPERIMENTAL ADOTADO PARA A AVALIAÇÃO DOS REVESTIMENTOS DE LIGA IN 625.	39
FIGURA 7 – EQUIPAMENTO DE PLASMA COM ARCO TRANSFERIDO (PTA) UTILIZADO	41
FIGURA 8 – MARCAÇÃO E CORTE DO SUBSTRATO DURANTE A PREPARAÇÃO PARA A DEPOSIÇÃO POR PTA.	41
FIGURA 9 – SUBSTRATOS COM A SUPERFÍCIE PREPARADA POR LIXAMENTO PARA A DEPOSIÇÃO.....	42
FIGURA 10 – DEPOSIÇÃO DO REVESTIMENTO IN 625 POR PTA.....	42
FIGURA 11 – PARÂMETROS UTILIZADOS PARA AVALIAR A GEOMETRIA DOS REVESTIMENTOS: ÂNGULO DE MOLHABILIDADE (θ), ESPESSURA DE REFORÇO (T) E LARGURA DO CORDÃO (W). ...	43
FIGURA 12 – SEÇÃO TRANSVERSAL DO CORDÃO DO DEPOSITO	44
FIGURA 13 – DESENHO ESQUEMÁTICO MOSTRANDO A LOCALIZAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA ADOTADOS PARA A CARACTERIZAÇÃO DA GEOMETRIA DOS CORDÕES E DA MICROESTRUTURA.....	44
FIGURA 14 – FOTOGRAFIA DE CORPO DE PROVA ADOTADO PARA A CARACTERIZAÇÃO DA GEOMETRIA DOS CORDÕES E DA MICROESTRUTURA.	45

FIGURA 15 – FOTOGRAFIA DA COQUILHA DE COBRE UTILIZADA PARA DEPOSIÇÃO DA LIGA.....	46
FIGURA 16 – CORPO DE PROVA SEM DILUIÇÃO OBTIDO PELA DEPOSIÇÃO DA LIGA IN 625 NA CAVIDADE DE COQUILHA DE COBRE.....	46
FIGURA 17 – FIGURA ESQUEMÁTICA MOSTRANDO A REGIÃO UTILIZADA PARA A ANÁLISE DA MICROESTRUTURA DOS REVESTIMENTOS.	48
FIGURA 18 – FIGURA ESQUEMÁTICA MOSTRANDO A MEDIÇÃO DO ESPAÇAMENTO DE BRAÇOS DENDRÍTICOS.....	49
FIGURA 19 – METODOLOGIA E LOCALIZAÇÃO DAS MEDIDAS DE DUREZA VICKERS USADA.....	49
FIGURA 20 – PINOS EXTRAIDOS DOS REVESTIMENTOS DE IN 625 POR ELETROEROSÃO.	50
FIGURA 21 – FOTOGRAFIA MOSTRANDO O EQUIPAMENTO UTILIZADO PARA O ENSAIO DE DESGASTE PINO SOBRE DISCO. (A) MÁQUINA DE DESGASTE. (B) ENSAIO EM ANDAMENTO.	51
FIGURA 22 – GEOMETRIA DOS CORDÕES DE SOLDA DEPOSITADOS COM TRÊS CORRENTES SOBRE DOIS SUBSTRATOS.....	53
FIGURA 23 – GEOMETRIA DOS CORDÕES DE SOLDA DEPOSITADOS COM TRÊS CORRENTES SOBRE DOIS SUBSTRATOS: ÂNGULO DE MOLHABILIDADE (θ).	54
FIGURA 24 – GEOMETRIA DOS CORDÕES DE SOLDA DEPOSITADOS COM TRÊS CORRENTES SOBRE DOIS SUBSTRATOS: ESPESSURA DE REFORÇO (T).....	55
FIGURA 25 – GEOMETRIA DOS CORDÕES DE SOLDA DEPOSITADOS COM TRÊS CORRENTES SOBRE DOIS SUBSTRATOS: LARGURA (W) DOS CORDÕES.	55
FIGURA 26 – DILUIÇÃO DOS REVESTIMENTOS DEPOSITADOS POR PTA SOBRE AÇOS AISI 316L E API 5L X70 COM TRÊS DIFERENTES CORRENTES.	56
FIGURA 27 – TEOR DE FERRO CALCULADO E MEDIDO PARA OS REVESTIMENTOS DEPOSITADOS POR PTA SOBRE AÇOS AISI 316L E API 5L X70.....	57

FIGURA 28 – MICROSCOPIA DE LASER CONFOCAL DA LIGA DE NÍQUEL IN625 DEPOSITADOS SOBRE AÇOS AISI 316L E API 5L X70.	58
FIGURA 29 – ESPAÇAMENTO DE BRAÇOS DENDRÍTICOS PARA OS REVESTIMENTOS DE LIGA IN 625.....	59
FIGURA 30 – MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA NO MODO ELÉTRONS RETROESPALHADOS PARA OS REVESTIMENTOS DE LIGA DE NÍQUEL IN625 DEPOSITADOS SOBRE AÇOS AISI 316L E API 5L X70.....	60
FIGURA 31 – FRAÇÃO DE CARBONETOS INTERDENDRÍTICOS NOS REVESTIMENTOS.	61
FIGURA 32 – FASES FORMADAS PARA OS REVESTIMENTOS DEPOSITADOS COM CORRENTE DE (A) 120A, (B) 150A E (C) 180 A, SOBRE AÇO API 5L X70.....	62
FIGURA 33 – FASES FORMADAS PARA OS REVESTIMENTOS DEPOSITADOS COM CORRENTE DE (A) 120A, (B) 150A E (C) 180 A, SOBRE AÇO AISI 316L.	63
FIGURA 34 – DUREZA DOS REVESTIMENTOS DE LIGA IN 625 SOBRE AÇO AISI 316L.	66
FIGURA 35 – DUREZA DOS REVESTIMENTOS DE LIGA IN 625 SOBRE AÇO API 5L X70.....	66
FIGURA 36 – COMPARATIVO DA DUREZA MÉDIA DOS REVESTIMENTOS DE LIGA IN 625.	67
FIGURA 37 – FASES FORMADAS PARA A LIGA IN 625 FUNDIDA EM COQUILHA E SOLUBILIZADA.....	68
FIGURA 38 – FASES FORMADAS PARA A LIGA IN 625 FUNDIDA EM COQUILHA, SOLUBILIZADA E ENVELHECIDA A 500 ⁰ C POR 8 H.	68
FIGURA 39 – FASES FORMADAS PARA A LIGA IN 625 FUNDIDA EM COQUILHA, SOLUBILIZADA E ENVELHECIDA A 850 ⁰ C POR 8 H.	69
FIGURA 40 – COMPARATIVO DA DUREZA VICKERS DESENVOLVIDA PARA AS AMOSTRAS SEM DILUIÇÃO TRATADAS TERMICAMENTE E PARA OS REVESTIMENTOS.	70
FIGURA 41 – CURVAS DE DESGASTE OBTIDAS PARA OS REVESTIMENTOS DE LIGA IN 625 SORE API 5L X70.	71

FIGURA 42 – CURVAS DE DESGASTE OBTIDAS PARA OS REVESTIMENTOS DE LIGA IN 625 SORE AISI 316L.	71
FIGURA 43 – CURVAS DE DESGASTE OBTIDAS PARA OS REVESTIMENTOS DE LIGA IN 625 SORE API 5L X70.	72
FIGURA 44 – CURVAS DE DESGASTE OBTIDAS PARA OS REVESTIMENTOS DE LIGA IN 625 SORE AISI 316.	72
FIGURA 45 – COMPARATIVO DO EFEITO DA CORRENTE E DO SUBSTRATO SOBRE OS COEFICIENTES DE DESGASTE DOS REVESTIMENTOS DE LIGA IN 615.	73

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – ESPECIFICAÇÃO DA COMPOSIÇÃO QUÍMICA DA LIGA IN625 CONFORME A SPECIAL METALS.....	24
TABELA 2 – PROPRIEDADES MECÂNICAS DA LIGA IN 625	25
TABELA 3 – RELAÇÃO DE DUREZA ENTRE A DUREZA HB E DUREZA HV DA LIGA IN 625	25
TABELA 4 – CONDUTIVIDADE TÉRMICA DE AÇOS CARBONO E AÇOS INOXIDÁVEIS.....	26
TABELA 5 – CLASSIFICAÇÃO DOS AÇOS API EM FUNÇÃO DO LIMITE DE ESCOAMENTO	27
TABELA 6 – ESPECIFICAÇÃO DE COMPOSIÇÃO QUÍMICA PARA O AÇO X70 ..	28
TABELA 7 – ESPECIFICAÇÃO DE COMPOSIÇÃO QUÍMICA PARA O AÇO SAE/AISI 316L.....	29
TABELA 8 – COMPOSIÇÃO QUÍMICA DOS MATERIAIS UTILIZADOS (% EM PESO)	40
TABELA 9 – PARÂMETROS DE DEPOSIÇÃO UTILIZADOS PARA A PRODUÇÃO DOS REVESTIMENTOS NICRMO.....	43
TABELA 10 – VALORES GEOMÉTRICOS DOS CORDÕES DE SOLDA DEPOSITADOS	53
TABELA 11 – PROPORÇÃO DE ELEMENTOS POR EDS NA MICROESTRUTURA (% EM PESO).....	64
TABELA 12 – DUREZA MÉDIA DOS REVESTIMENTOS	65

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AISI	American Iron and Steel Institute
API	American Petroleum Institute
ARBL	Aço Carbono de Alta Resistência Baixa Liga
bpd	Barris por dia
CFC	Estrutura cristalina cúbica de face centrada
DEMEC	Departamento de Engenharia Mecânica
EDS	Energy Dispersive Spectroscopy
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
HV	Dureza Vickers
I(A)	Unidade de intensidade de corrente elétrica o Ampère
IN 625	Liga INCONEL 625
Keyhole	Técnica de Soldagem a Plasma
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura
NaCl	Cloreto de Sódio
Ni	Símbolo químico do Níquel
NiCrMo	Sistema de liga Níquel Cromo Molibdênio
MME	Ministério de Minas e Energia
PAW	<i>Plasma Arc Welding</i> (Soldagem a Arco Plasma)
PTA	Plasma a Arco Transferido : processo de soldagem a plasma
SCC	<i>Stress Corrosion Cracking</i> (Fissuração por Corrosão devido íons de cloro)
TCC	Estrutura cristalina Tetragonal de Corpo Centrado
TIG	Tungsten inert gas – processo de soldagem a arco com eletrodo de tungstênio e gás
UFPR	Universidade Federal do Paraná
UNS	<i>Unified Numbering System</i> (Sistema de Numeração Unificado)
V	Velocidade de avanço da tocha a plasma em cm/min

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	17
2 OBJETIVOS	20
2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	20
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
3.1 ELEMENTO NÍQUEL.....	22
3.2 LIGA DE NÍQUEL INCONEL 625 (IN625).....	23
3.2.1 Composição Química da Liga IN625.....	24
3.2.2 Propriedades Mecânicas da Liga IN 625.....	25
3.3 SUBSTRATOS UTILIZADOS.....	26
3.3.1 Aço Carbono Microligado API 5L X70.....	27
3.3.2 Aço Inoxidável Austenítico AISI 316L.....	28
3.4 PROCESSO DE PLASMA COM ARCO TRANSFERIDO (PTA).....	29
3.5 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DO PTA.....	32
3.6 PARÂMETROS ELÉTRICOS.....	34
3.7 VANTAGENS E DESVANTAGENS DO PTA.....	36
3.8 MICROESTRUTURA DE REVESTIMENTOS DE LIGAS DE NÍQUEL.....	37
4 MATERIAIS E MÉTODOS	39
4.1 MATERIAIS.....	40
4.2 PROCEDIMENTO DE DEPOSIÇÃO, DILUIÇÃO E AMOSTRAS PARA CARACTERIZAÇÃO.....	41
4.3 ESTUDO DO EFEITO DA DILUIÇÃO.....	45
4.4 PROCEDIMENTOS DE CARACTERIZAÇÃO.....	47
4.4.1 Difração de Raios-X.....	47
4.4.2 Análise Química por Absorção Atômica.....	47
4.4.3 Metalografia.....	48
4.4.4 Dureza Vickers.....	49
4.4.5 Desgaste por Partículas Duras.....	49
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	52
5.1 GEOMETRIA DOS CORDÕES E DILUIÇÃO.....	52
5.2 DILUIÇÃO E TEOR DE FERRO.....	56
5.3 MICROESTRUTURA DOS REVESTIMENTOS.....	58
5.4 FASES FORMADAS NOS REVESTIMENTOS.....	61
5.5 DUREZA DOS REVESTIMENTOS.....	65
5.6 ESTUDO DA DILUIÇÃO: FUSÃO EM COQUILHA.....	67

5.7 AVALIAÇÃO COMPARATIVA DO DESEMPENHO EM DESGASTE	70
6 CONCLUSÕES.....	74
7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	75
REFERÊNCIAS.....	77
APÊNDICE A.....	82

1 INTRODUÇÃO

A produção de petróleo no Brasil atualmente se aproxima a 2 milhões de barris por dia (bpd). Entretanto, um novo ciclo de desenvolvimento com base no crescimento econômico e a descoberta de novos campos aponta para aumento de produção em cerca de 5 milhões de bpd até 2022, figura 1. Mesmo com o significativo aumento da produção, é prevista a duplicação das reservas, chegando-se a cerca de 40 bilhões de barris de petróleo e 1,5 trilhão de metros cúbicos de gás natural. (BRASIL, 2013)

FIGURA 1 – PREVISÃO DE PRODUÇÃO NACIONAL DE PETRÓLEO (BRASIL, 2013)



O governo brasileiro, através do Ministério de Minas e Energia (MME), prevê que os investimentos na exploração e produção de petróleo e gás natural cheguem à R\$ 625 bilhões no período entre 2013 e 2022 (BRASIL, 2013). Mas esta não é só uma realidade no Brasil. Grande parte da nova oferta de petróleo no mundo provém de jazidas situadas no mar, com 70% das principais descobertas de petróleo na última década. Desde 2005, o volume das descobertas em águas ultraprofundas (acima de 1.500 metros de lâmina d'água) tende a deslocar a produção para essas áreas nas próximas décadas (FGV, 2012).

Em conjunto com as descobertas, é certa a necessidade de desenvolvimento de tecnologia para o atendimento da exploração e produção destes novos campos, que estão localizados em profundidades cada vez maiores. Os campos de petróleo do pré-sal, quase que em sua totalidade, são compostos por petróleo do tipo médio, de baixa concentração de enxofre (BRASIL, 2013).

A maior parte dos componentes metálicos deteriora-se com o uso quando expostos a ambientes oxidantes ou corrosivos (PETROBRAS, 2002). Constantemente, a engenharia busca materiais de desempenho superior para a fabricação de peças que operam em condições agressivas, já que o aumento da vida útil traz grandes benefícios operacionais, reduzindo as paradas para substituição ou manutenção, estendendo campanhas de produção e aumentando a competitividade.

A fabricação de componentes maciços de ligas metálicas resistentes à deterioração ou que esta seja lenta, poderia inviabilizar economicamente uma atividade de exploração ou produção, devido aos elevados custos. A redução ou total eliminação da oxidação pode ser obtida com menor custo a partir de técnicas de revestimento para proteção superficial, sendo as mais comuns: pintura, galvanização, aspersão térmica, soldagem, entre outros.

A aplicação de revestimentos protetores inicialmente era requerida para proteção de conjuntos e componentes mecânicos contra a corrosão. Porém, devido ao avanço de pesquisas no desenvolvimento de novos materiais, atualmente, os revestimentos são utilizados também para elevar a resistência ao desgaste, isolamento térmico e elétrico e contra incompatibilidades químicas e biológicas (PAREDES, 2012).

De acordo com os processos de aplicação de revestimentos protetores, podemos classificar os processos de aplicação em três grupos (PAREDES, 2012):

- Aqueles que envolvem fusão do metal e do material de aporte.
- Aqueles que envolvem somente a fusão do material de aporte.
- Aqueles que envolvem um processo de difusão.

É de extrema importância que sejam analisadas as mudanças superficiais causadas por um ambiente ou por uma condição de trabalho, para determinar a seleção do material para o revestimento e seu processo de aplicação (SCHEID, 2007).

O processamento de revestimentos por plasma de arco transferido (PTA), para proteger os componentes e tubulações com ligas de alto desempenho, é um procedimento atrativo. Conforme SILVA *et al.* (2012), algumas aplicações inviabilizam a utilização de outros processos que não o PTA, como é o caso da Aspersão Térmica, onde ocorre a união por “ancoramento” mecânico e não metalúrgico por soldagem, com possibilidade de formação de porosidade e óxidos.

Ligas à base de níquel são usadas para prolongar a vida útil de componentes de engenharia em diferentes setores industriais, devido a uma associação de alta resistência mecânica e excelente resistência à corrosão. Esta associação permite a utilização do Níquel e suas ligas para a proteção de componentes em uma ampla gama de ambientes agressivos. Assim, as ligas deste sistema são utilizadas amplamente na indústria química, petroquímica e naval, além de equipamentos como turbinas aeronáuticas e de usinas termoeletricas, reatores nucleares e dispositivos de processamento de alimentos, conforme GUOQING *et al.* (2013), FERNANDES *et al.* (2011/2012), KESAVAN *et al.* (2011) e HOU *et al.* (2009).

Considerando o destacado interesse das ligas para várias aplicações, o objetivo geral deste trabalho foi estudar o efeito das condições de processamento sobre revestimentos NiCrMo (IN 625) obtidos por PTA sobre substratos de aço AISI 316L e API 5L X70 e determinar a sua influência sobre as características dos cordões, diluição, microestrutura, propriedades.

Para tal, a liga foi depositada por PTA sobre substratos de aço AISI 316L e API 5L X70, utilizando três diferentes intensidades de corrente de deposição no arco principal: 120, 150, 180 A. Os revestimentos foram produzidos a partir de cordões únicos e caracterizados inicialmente quanto à geometria e diluição. O efeito da corrente de deposição sobre a microestrutura e propriedades foi avaliado a partir de microscopia ótica, laser Confocal e eletrônica de varredura, dureza Vickers e difração de raios-X. Finalmente, os revestimentos foram avaliados comparativamente com a liga fundida sem diluição, que foi utilizada como amostra de referência para os revestimentos na avaliação da dureza e das fases formadas. Ensaios de desgaste abrasivo por deslizamento foram utilizados para avaliar de forma comparativa o efeito da corrente de deposição e do substrato sobre os revestimentos obtidos.

2 OBJETIVOS

O objetivo geral deste projeto é estudar o efeito da corrente de deposição e do substrato de aço sobre as características dos revestimentos de liga de Níquel IN 625 obtidos por Plasma com Arco Transferido. Para tal, a geometria dos cordões, diluição, microestrutura, fases e propriedades foram estudadas para as diversas condições de processamento.

2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os principais objetivos específicos deste trabalho são:

- a) Avaliar a influência da corrente de deposição e do substrato sobre a geometria e diluição dos cordões de liga IN 625 depositados por Plasma a Arco Transferido (PTA).
- b) Determinar a influência da corrente de deposição e do substrato sobre a microestrutura e fases desenvolvidas nos revestimentos.
- c) Avaliar o efeito das diferentes condições de processamento sobre a dureza e o desempenho em desgaste.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A utilização de revestimentos na área do petróleo cresce a cada dia como resultado do interesse na redução de custo, na busca por aumento de desempenho e segurança operacional e da necessidade de soluções para problemas novos de engenharia, relacionados à exploração das reservas do pré-sal brasileiro.

Uma potencial redução de custo pode ser obtida pela aplicação de ligas de elevado custo e propriedades de desempenho superior às superfícies de componentes, permanecendo os aços na base ou estrutura de tais componentes. As propriedades superficiais superiores elevam o tempo médio entre falhas, principalmente àquelas relacionadas a processos de desgaste e corrosão.

Finalmente, surgem novos desafios na indústria do petróleo, relacionados às condições operacionais das reservas do pré-sal. Condições complexas de operação, que envolvem ambientes corrosivos em meios contendo soluções aquosas salinas (água do mar), CO_2 e H_2S , requerem ligas especiais ou revestimentos capazes de operar em tais ambientes. Associado à corrosão, os componentes estão sujeitos a processos de falha por fadiga, corrosão-fadiga e corrosão sob tensão (SCC – “Stress Corrosion Cracking”). As aplicações de superligas a base de Níquel vêm aumentando em função da crescente demanda por materiais que resistam a estes ambientes agressivos.

Neste contexto, a pesquisa na área de engenharia de superfícies, especialmente na produção de revestimentos pela técnica de PTA, ganha importância especial na busca por soluções que potencialmente apresentem melhor desempenho.

A revisão bibliográfica apresenta aspectos relacionados ao Níquel e a características da liga de Níquel Inconel 625 e ao processo de deposição por Plasma com Arco Transferido (PTA). Para complementar, estão apresentados alguns aspectos metalúrgicos em torno da deposição, com a revisão dos principais fatores que influenciam na qualidade dos revestimentos soldados e na metalurgia da liga utilizada.

3.1 ELEMENTO NÍQUEL

O elemento níquel possui símbolo químico Ni, número atômico 28, densidade de 8,9 g/cm³, na temperatura de 20°C, ponto de fusão de 1453°C e estrutura cristalina cúbica de faces centradas (CFC).

Superliga é a denominação dada as ligas a base de Níquel, Cobalto ou Ferro, com determinadas características mecânicas, químicas e térmicas, tais como: alta resistência a corrosão, pequena redução da resistência em altas temperaturas e adequação a aplicações de risco e de ordem médica (RODRIGUES, 2007).

Nas ligas a base de níquel, a estrutura cúbica de faces centradas da matriz de Níquel γ pode ser endurecida por soluções sólidas, precipitação de carbonetos e / ou endurecimento por precipitação de compostos intermetálicos. Ferro, Cromo, Molibdênio, Tungstênio, Titânio e Alumínio são endurecedores por solução sólida no níquel. Para aplicações a altas temperaturas, são preferidos os elementos grandes em solução sólida como Molibdênio e Tungstênio, por serem fortes endurecedores e também pelos seus baixos coeficientes de difusão. Como o Níquel não é um formador de carboneto, o carbono pode reagir com os elementos de liga para formar carbonetos do tipo MC, M₆C, M₇C₃ e M₂₃C₆ (onde M é o metal formador de carbonetos), dependendo da temperatura, embora o M₂₃C₆ seja o mais importante e influente nas propriedades mecânicas em temperatura ambiente. A precipitação da fase intermetálica gama primária γ' (Ni₃(Al, Ti)) numa matriz de alto teor de Níquel também proporciona reforço para o material, principalmente após o tratamento térmico (ASM HANDBOOK, 1992).

O sistema liga NiCrMo pode ser usado para fabricar componentes que atendem a uma ampla gama de requisitos de serviço, como alta temperatura, elevadas tensões e ambientes corrosivos e oxidantes como em válvulas e assentos de válvulas (CAMERON, 2014), árvore de natal molhada (SERRA, 2010) e equipamentos de processo petroquímico para prospecção e refino de petróleo (REALUM, 2014). Além disso, estas ligas apresentam uma boa soldabilidade, facilitando procedimentos de revestimento. No entanto, a influência da diferente interação com determinado tipo de substrato (diluição) pode afetar as propriedades e o comportamento dos revestimentos, justificando a realização deste trabalho.

3.2 LIGA DE NÍQUEL INCONEL 625 (IN625)

A liga de Níquel-Cromo-Molibdênio INCONEL[®] 625 é uma marca registrada da Special Metals Corporation e suas subsidiárias. A liga recebe comercialmente vários nomes, sendo os mais comuns Inconel 625, Alloy 625, Nickel 625, Chornin 625, Altemp 625, Nickelvac 625 e Haynes 625. A designação da liga, conforme o *Unified Numbering System* (Sistema de Numeração Unificado) é UNS N06625, conforme norma W.Nr. 2.4856. Neste trabalho, a liga INCONEL[®] 625 será referenciada como Inconel 625 e sua abreviação será IN 625.

A liga IN 625 é utilizada para aplicações que requerem alta resistência à corrosão e elevada resistência mecânica sem tratamento térmico. Esta liga apresenta excelente versatilidade de fabricação, sendo uma opção interessante para revestimentos superficiais de componentes de equipamentos sujeitos à corrosão em meio aquoso salino, como é o caso dos componentes para extração de petróleo offshore. A temperatura de trabalho varia desde valores negativos (para meios criogênicos) até 982°C (SPECIAL METALS, 2013 ; SILVA, 2012).

A excelente resistência à corrosão da liga IN625 em uma ampla gama de temperaturas e pressões é a principal razão para a sua ampla utilização na indústria química. A elevada resistência mecânica permite que seja aplicada, por exemplo, em recipientes com paredes mais finas ou tubos onde seja possível o revestimento com outros materiais, melhorando assim a transferência de calor e reduzindo o peso. Estas ligas também podem estar presentes em algumas aplicações que requerem a combinação de resistência à tração e resistência à corrosão, como: na fabricação de tubos, vasos de reação, colunas de destilação, trocadores de calor, tubulações de transferência e válvulas (SPECIAL METALS, 2013).

No sistema de liga Níquel-Cromo-Molibdênio (NiCrMo), a liga de Níquel Inconel 625 (IN 625) recebe Nióbio, um endurecedor por solução sólida, que em conjunto com o Molibdênio, proporcionam elevada resistência sem a necessidade de tratamento térmico, podendo ainda induzir à formação de carbonetos. Mais alto teor de Nióbio também pode levar à formação de precipitados γ'' (Ni_3Nb) com estrutura tetragonal de corpo centrado (TCC) ou Ni_3Nb com estrutura cristalina ortorrômbica, durante um tratamento térmico de envelhecimento, antes de ser exposta a alta temperatura (ASM HANDBOOK, 1992).

Precipitação de fase intermetálica γ'' tetragonal pode proporcionar um aumento significativo da resistência do material, enquanto a fase com estrutura ortorrômbica do Ni_3Nb induz a uma diminuição da dureza. Cromo maior que 15% (% em peso) é adicionado à liga de Níquel para elevar a resistência à oxidação e à carburização para temperaturas superiores a 760°C (ASM HANDBOOK, 1992).

3.2.1 Composição Química da Liga IN625

A composição química da liga IN 625 utilizada neste trabalho é apresentada na Tabela 1, conforme especificação apresentada pela empresa Special Metals.

TABELA 1 – ESPECIFICAÇÃO DA COMPOSIÇÃO QUÍMICA DA LIGA IN625 CONFORME A SPECIAL METALS.

ELEMENTO	COMPOSIÇÃO IN 625
	% especificação SPECIAL METALS
Ni	58,0 mínimo
Cr	20,0 - 23,0
Mo	8,0 - 10,0
Si	0,5 máximo
C	0,1 máximo
Fe	5,0 máximo
Nb	3,15 - 4,15
Mn	0,5 máximo
Oxigênio	Não especificado
Ti	0,4 máximo
Al	0,4 máximo

FONTE: SPECIAL METALS (2013)

Esta composição química confere alta resistência à corrosão, devido a presença do Cromo e do Níquel. O elevado teor de Molibdênio confere maior resistência contra a corrosão em frestas e furos. O Nióbio permite a estabilização da liga durante a fabricação, prevenindo fratura intergranular. Além disso, a grande quantidade de Níquel elimina a possibilidade de fratura devido a íons de cloro (Stress Corrosion Cracking - SCC) (SPECIAL METALS, 2013).

3.2.2 Propriedades Mecânicas da Liga IN 625

As propriedades mecânicas de resistência à tração, limite de escoamento e dureza nominais em temperatura ambiente são apresentados na Tabela 2.

TABELA 2 – PROPRIEDADES MECÂNICAS DA LIGA IN 625

FORMA E CONDIÇÃO	RESISTÊNCIA A TRAÇÃO		LIMITE DE ESCOAMENTO		DUREZA (BRINELL)
	ksi	MPa	ksi	MPa	
HASTE, BARRA, PLACA					
Laminado	120-160	827-1103	60-110	414-758	175-240
Recozido	120-150	827-1034	60-95	414-655	145-220
Solubilizada	105-130	724-896	42-60	290-414	116-194
FOLHA, TIRA					
Recozido	120-150	827-1034	60-90	414-621	145-240
TUBOS, ESTIRADOS A FRIO					
Recozido	120-140	827-965	60-75	414-517	-
Solubilizada	100-120	689-827	40-60	276-414	-

FONTE: SPECIAL METALS (2013)

Conforme BAPTISTA (2011), a relação entre dureza Brinell e dureza Vickers não é linear, porém, apresenta proximidade numérica para uma grande faixa de valores. A correlação aproximada das faixas de dureza Brinell e Vickers disponíveis no boletim técnico da IN 625 são apresentadas na tabela 3.

TABELA 3 – RELAÇÃO DE DUREZA ENTRE A DUREZA HB E DUREZA HV DA LIGA IN 625

FORMA E CONDIÇÃO	DUREZA HB (BRINELL)	DUREZA HV (VICKERS)
HASTE, BARRA, PLACA		
Laminado	175-240	183-252
Recozido	145-220	152-231
Solubilizado	116-194	122-204
FOLHA, TIRA		
Recozido	145-240	152-252

FONTE: SPECIAL METALS (2013)

3.3 SUBSTRATOS UTILIZADOS

Os aços são as ligas metálicas de maior utilização de engenharia, por diversas razões: o baixo custo, a facilidade de obtenção a partir dos minérios, a disponibilidade e a possibilidade de ampla variação da resistência mecânica e propriedades, obtidas por meio da mudança na composição química, pelo adequado processamento termomecânico e por tratamentos térmicos. Estas são algumas razões que justificam a ampla pesquisa em torno da produção de revestimentos sobre substratos de aço.

Neste trabalho, revestimentos foram produzidos sobre dois substratos diferentes de aço: aço carbono API 5L X70 e aço inoxidável AISI 316L. Estes aços são utilizados na indústria do Petróleo, tanto na produção quanto nas operações de refino. Considerando as importantes diferenças observadas na composição química destes dois substratos, são esperadas variações nas características dos revestimentos.

Outro aspecto relacionado aos substratos que influencia os revestimentos depositados é a condutividade térmica do substrato. Os aços estudados apresentam importante diferença na condutividade térmica, tabela 4. Considerando um determinado aporte térmico, aços de menor condutividade térmica devem apresentar maior aquecimento durante o processamento dos revestimentos, podendo resultar em diferentes níveis de interação (diluição).

TABELA 4 – CONDUTIVIDADE TÉRMICA DE AÇOS CARBONO E AÇOS INOXIDÁVEIS

MATERIAL	CONDUTIVIDADE TÉRMICA k (J/msK)
Aço Carbono	41,0
Aço Inoxidável Austenítico	24,9

FONTE: KOU (2002)

Neste trabalho, a discussão está voltada para o efeito da composição química e da condutividade térmica do substrato sobre as características dos revestimentos. Não foram discutidas as alterações que ocorrem na interface dos revestimentos com os substratos nem mesmo as alterações ocorridas na microestrutura do substrato na zona termicamente afetada (ZTA). Mesmo assim, um breve descritivo dos substratos é apresentado a seguir.

3.3.1 Aço Carbono Microligado API 5L X70

Neste trabalho, um dos substratos de aço utilizado foi escolhido pela sua larga aplicação para a produção de tubos para a indústria do petróleo. São aços Carbono microligados, também classificados como aços de alta resistência e baixa liga – ARBL.

A descrição geral dos aços ARBL considera algumas premissas. Estes aços apresentam baixo Carbono, na faixa de 0,05 a 0,30% em peso para obter alta tenacidade, boa conformabilidade e soldabilidade. Devem conter um ou mais dos seguintes elementos, fortes formadores de carbonetos: Vanádio, Nióbio ou Titânio. Estes aços devem ainda conter o certo teor de elementos que promovem endurecimento por solução sólida, como Manganês e Silício. Finalmente, elementos microligantes como Cálcio, Zircônio ou terras raras (Cério e Lantânio) são adicionados para controle da forma das inclusões de sulfetos e elevação da tenacidade (TOTTEN, 2006).

A norma API 5LD (AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE, 2005) classifica os aços para dutos na indústria do petróleo conforme a sua composição química e resistência mecânica. A classificação considera uma numeração relacionada à tensão de escoamento mínimo do material na unidade psi (lb/in²), conforme Tabela 5 (BREITENBACH, 2012).

TABELA 5 – CLASSIFICAÇÃO DOS AÇOS API EM FUNÇÃO DO LIMITE DE ESCOAMENTO

GRAU DO AÇO API 5L	LIMITE DE ESCOAMENTO (kpsi)		RESISTÊNCIA A TRAÇÃO (kpsi)	
	MÍNIMO	MÁXIMO	MÍNIMO	MÁXIMO
X42	42	72	60	110
X46	46	76	63	110
X52	52	77	66	110
X56	56	79	71	110
X60	60	82	75	110
X65	65	87	77	110
X70	70	90	82	110
X80	80	100	90	120

FONTE: BREITENBACH (2012)

O aço API 5L X70 apresenta teor de carbono menor que 0,26% (em peso), teor de Manganês acima de 1,20% e adições de Nióbio, Vanádio e Titânio, que somadas não ultrapassam a 0,15%. Dependendo da microestrutura desejada e da prática de laminação, outros elementos podem ser adicionados. A especificação da composição química do aço API 5L X70 utilizado neste trabalho é apresentada na Tabela 6 (AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE, 2004).

TABELA 6 – ESPECIFICAÇÃO DE COMPOSIÇÃO QUÍMICA PARA O AÇO X70

SUBSTRATO	COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO AÇO CARBONO MICROLIGADO (% EM PESO)					
	C	Mn	P	S	Cr	outros (Nb, V, Ti)
API 5L X70	≤0,26	≤1,65	≤ 0,025	≤ 0,015	≤ 0,2	≤0,15

FONTE: API 5L (2004)

3.3.2 Aço Inoxidável Austenítico AISI 316L

Comparativamente ao substrato de aço Carbono microligado, o aço inoxidável austenítico encontra aplicação onde há necessidade de melhor desempenho frente à corrosão. Por seu custo mais elevado, a aplicação deve ser analisada com critério. Ainda assim, um desempenho superior pode ser requerido, o que justifica a aplicação de revestimentos de superligas em determinadas regiões.

Os aços inoxidáveis são ligas ferrosas com teor de Cromo acima de 11 % em peso. Existem diversas séries dentro desta classe, classificadas de forma geral de acordo com a microestrutura à temperatura ambiente. A série de aços inoxidáveis austeníticos apresenta microestrutura austenítica (CFC) a temperatura ambiente. A estrutura é obtida pela adição de elementos estabilizadores da austenita, como Manganês, Nitrogênio e Níquel. (WOLFART JUNIOR, 2002).

A série 300 apresenta teor de Carbono baixo, especialmente pela propriedade principal desta classe de aços que é a disponibilização do Cromo para a formação de uma película óxidos que promovem a redução da taxa de corrosão. Quando o teor de Carbono é elevado, a formação de carbonetos de Cromo pode levar à redução do desempenho quanto à corrosão além de causar, muitas vezes, outros fenômenos que degradam o material, como a “Sensitização” (WOLFART JUNIOR, 2002).

Na série 300, o teor de Níquel está na faixa de 3,5 a 37% em peso, enquanto o teor de Cromo está na faixa de 15 a 26%. O Manganês normalmente é de 2,00% e os teores de Fósforo e Enxofre encontram-se desde 0,04 a 0,20% e 0,03 a 0,15% respectivamente. Esta série pode apresentar ainda outros elementos como Molibdênio, Cobre, Titânio, Nióbio, Tântalo e Nitrogênio. Esta série de aços inoxidáveis é especialmente utilizada em aplicações onde a resistência à corrosão e a conformabilidade sejam requisitos importantes de projeto. Neste projeto, um dos substratos utilizados para revestimento foi o aço inoxidável AISI 316L, normalmente utilizado na indústria do petróleo pelo menor teor de Carbono e maior teor de Molibdênio, tabela 7.

TABELA 7 – ESPECIFICAÇÃO DE COMPOSIÇÃO QUÍMICA PARA O AÇO SAE/AISI 316L

SUBSTRATO	COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO AÇO INOXIDÁVEL AUSTENÍTICO (% EM PESO)								
	C_{máx.}	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	N
AISI 316L	0,03	2,0	0,75	0,045	0,03	16 - 18	10 - 14	2 - 3	0,1

FONTE: SAE J405 (1998)

3.4 PROCESSO DE PLASMA COM ARCO TRANSFERIDO (PTA)

O plasma é considerado o quarto estado da matéria. Quando determinados gases recebem elevada energia, algumas de suas propriedades são modificadas pela elevação extrema de sua temperatura. Este processo é chamado de ionização e consiste na criação de elétrons livres e íons entre os átomos do gás. A ionização dá características de condutor ao gás, classificando assim este gás como plasma. (STURROCK, 1994; HAZELTINE *et al.*, 2004). Podem ser encontradas diversas citações atuais quanto à utilização do plasma, como soldagem, corte, fusão, deposição de metais e de não metais.

Os processos denominados de “PLASMA”, como nos casos do PTA, PAW (Plasma Arc Welding) e PLASMA SPRAY, os processos de deposição têm em comum com a soldagem o uso de um plasma com as mesmas características, que são a alta densidade de energia e direcionalidade do arco (BRANDI, 1992, DIAZ, 1999).

A expressão arco plasma descreve uma família de processos que utiliza um arco elétrico constricto devido ao bocal de constrição. Os materiais utilizados podem ser na forma de arame ou pó atomizado, metálicos ou cerâmicos. A utilização de materiais particulados aumenta em muito a versatilidade do processo (REINALDO, 2008).

O processo de revestimento por plasma com arco transferido (PTA), é um processo de soldagem a arco elétrico, por ocorrer a união metalúrgica entre o material depositado e substrato (RIBEIRO, 2007).

Conforme relatado por BRACARENSE (2000) e SANTOS (2003), o processo de plasma por arco transferido pode ser considerado uma evolução do processo de soldagem TIG. A diferença fundamental entre os processos consiste na constrição, ou colimação, do arco elétrico (plasma) via bico constritor, resultante da passagem do arco através de um orifício de diâmetro reduzido. A figura 2 apresenta um arranjo típico da tocha do PTA, onde o arco elétrico está colimado pelo orifício do bico constritor.

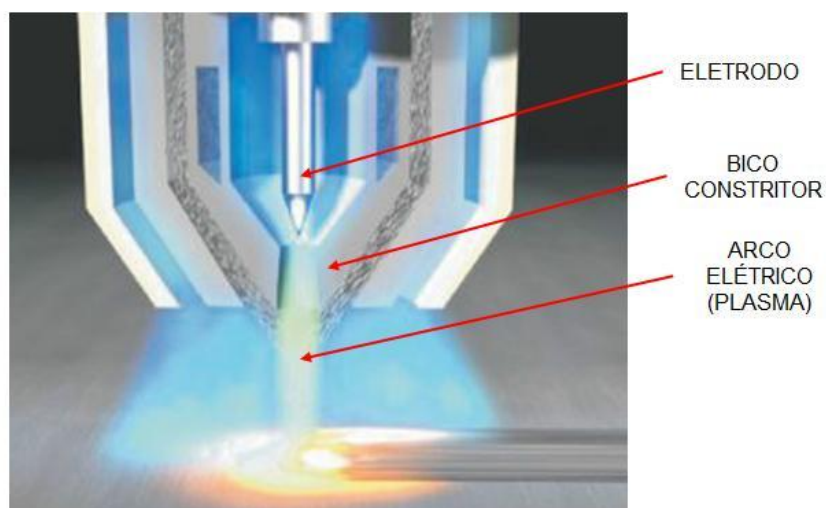


FIGURA 2 – TOCHA DE PLASMA COM ARCO TRANSFERIDO (EUTECTIC, 2014).

Outra diferença considerável nos processos PTA e TIG está no posicionamento do eletrodo. No TIG o eletrodo fica visível e poderá ocorrer seu contato com a peça em soldagem, enquanto no PTA o eletrodo fica no interior do bocal, sendo direcionado sobre uma pequena área (BRACARENSE, 2000; SANTOS, 2003; SILVA, 2009).

A figura 3 mostra o corte transversal esquemático das tochas TIG e PTA, onde mostra a existência do bocal de constrição do PTA e o posicionamento do eletrodo para ambos processos.

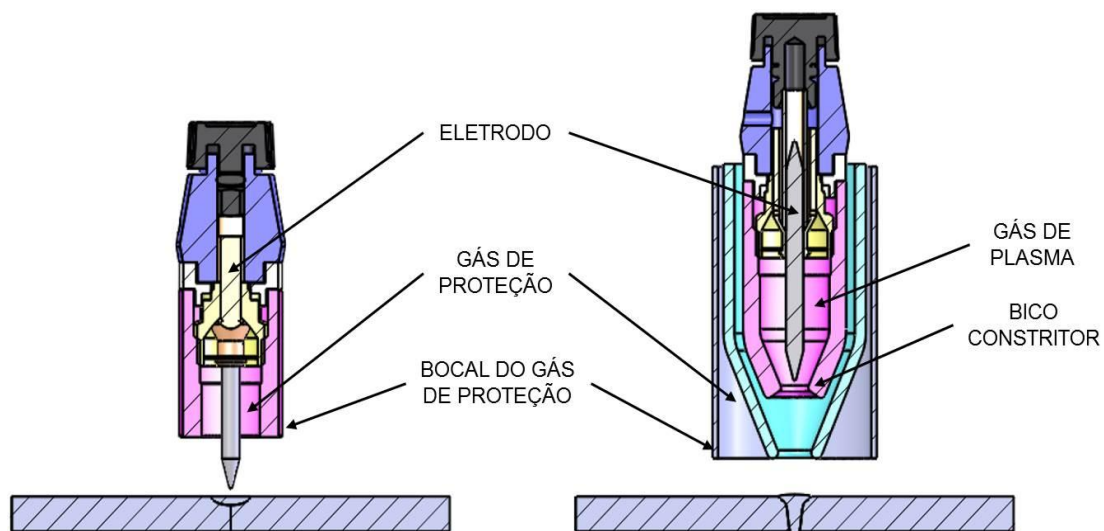


FIGURA 3 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DOS PROCESSOS TIG E PTA (ADAPTADO DE BRACARENSE, 2000; MARCONI, 2002; SILVA, 2010).

A tecnologia empregada no processo de revestimento por PTA é atualmente de domínio de diversos centros de pesquisa e empresas. Entretanto, devido às mudanças contínuas de solicitações mecânicas requeridas em aplicações industriais, tal como o caso da descoberta de novos campos de petróleo Offshore, os materiais processados por PTA requerem pesquisa e caracterização.

KOU (2002) especifica o processo de soldagem plasma por arco transferido como PAW. Porém, apesar da similaridade construtiva, suas aplicações e parametrizações são diferentes do processo PTA. O PAW surgiu diretamente da evolução da soldagem TIG, através da maior constrição do arco, ocorrendo na maior penetração. O PTA é utilizado fundamentalmente para revestimento, onde é buscada baixa diluição e penetração (BRANDI *et al.*, 1992).

Dentre os parâmetros do PTA, os principais que o diferenciam do PAW são: a corrente e a velocidade de avanço de deposição. Porém, diversos outros parâmetros influenciam significativamente o cordão de solda, gerando benefícios metalúrgicos como o refino microestrutural e ausência de respingos, ocorrendo um maior controle da poça de fusão, manipulando a geometria e o acabamento do cordão (SILVA, 2012).

Os parâmetros manipuláveis por ajuste, do processo PTA são (SILVA *et al.*, 2012):

- Corrente de deposição;
- Composição química do pó;
- Granulometria do pó;
- Trajetória e velocidade das partículas do pó, considerando a dinâmica e o comportamento térmico;
- Taxa de alimentação do pó;
- Vazão dos gases de plasma, arraste e proteção;
- Distância entre o bico e a peça;
- Recuo do eletrodo.

Além destes parâmetros ajustáveis, outros fatores influenciam as características dos revestimentos, tais como os parâmetros geométricos relacionados à tocha pelo diâmetro do bico constritor, distância do ponto focal do pó até a poça de solda, ângulo dos canais injetores do pó e circuito de refrigeração da tocha.

3.5 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DO PTA

O equipamento do processo PTA consiste de uma fonte de calor, formada por uma fonte de corrente para o arco principal e uma fonte de corrente pra o arco piloto, uma tocha, formada por eletrodo de tungstênio e bico constritor, e no caso do aporte de pó, um alimentador de pó é utilizado (SILVA, 2012).

Para o funcionamento dos equipamentos principais, são necessários outros equipamentos tais como: transporte dos gases necessários para a chama plasma, para o transporte do pó e para proteção da poça de fusão e jato plasma. A figura 4 mostra o equipamento de PTA um arranjo esquemático do equipamento de Plasma com Arco Transferido.

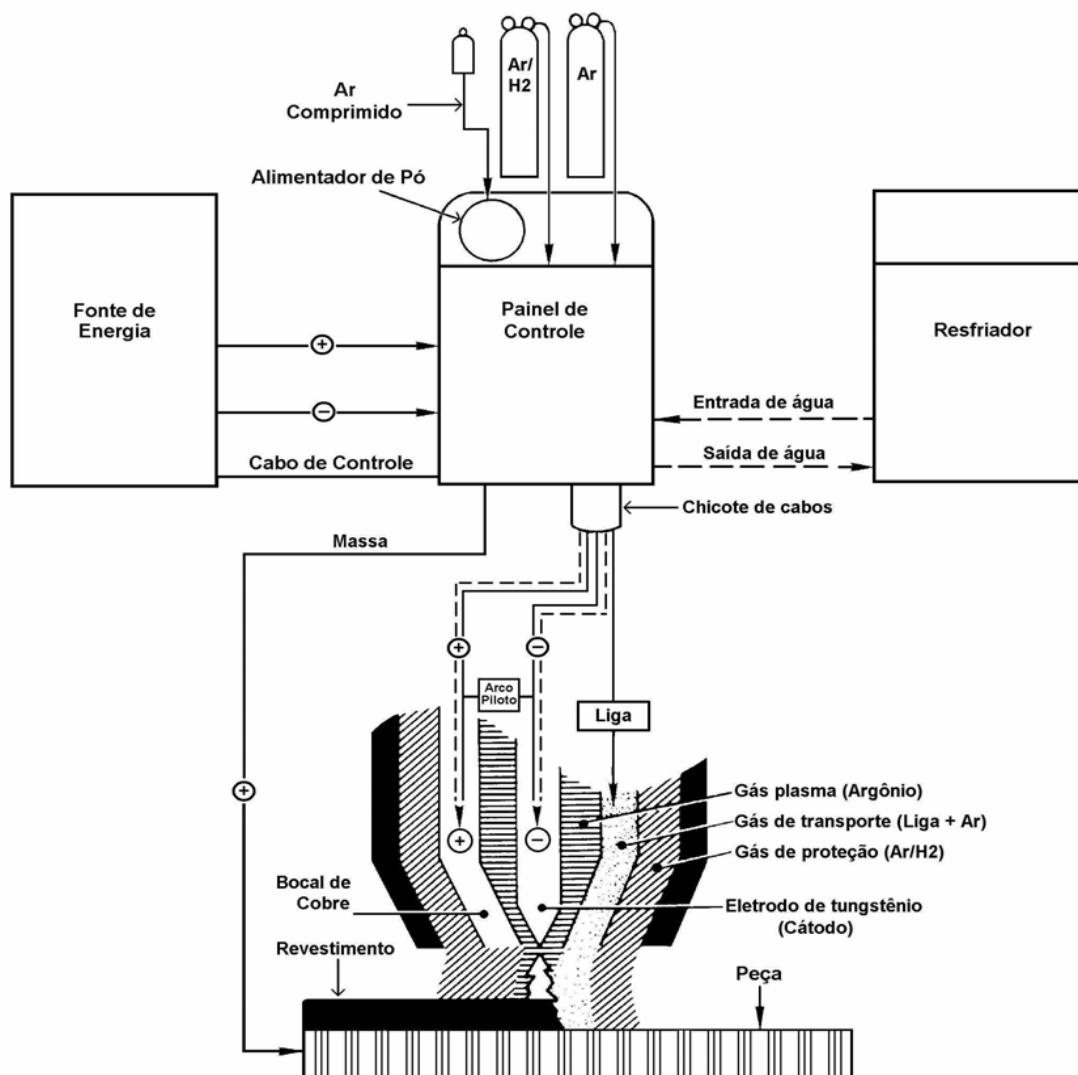


FIGURA 4 – ESQUEMA DO PROCESSO DE PLASMA COM ARCO TRANSFERIDO
(BRACARENSE, 2000).

O equipamento de aplicação de revestimento por plasma incorpora 3 sistemas de gás. Esses gases devem ser quimicamente inertes para reduzir o desgaste do eletrodo e para proteger a peça fundida da atmosfera. O suprimento de gás mais interno é chamado de gás plasma, ou gás central, o qual é quase sempre o argônio. O gás plasma ajuda a gerar o feixe de plasma e protege o eletrodo de tungstênio. O gás mais externo, também chamado gás de proteção, provê uma cobertura inerte sobre a poça fundida, para protegê-la da oxidação e contaminação (FOLTRAN, 2000).

Geralmente emprega-se como gases de proteção o argônio ou uma mistura de argônio e hidrogênio. E o terceiro sistema de escoamento de gás, chamado de gás de transporte, é utilizado para carrear o material consumível durante a aplicação do revestimento. O gás de transporte pode ser o argônio, hélio, ou uma mistura de argônio e hidrogênio (FOLTRAN, 2000).

O eletrodo de tungstênio utilizado em uma tocha plasma é não consumível e encontra-se recolhido em um bocal através do qual o gás plasma flui (REINALDO, 2008). Tendo em vista que o eletrodo fica localizado no interior do bico constritor da tocha de soldagem, não é possível a abertura do arco por contato. O processo inicia utilizando um arco piloto, gerado por uma unidade de alta frequência, que produz a ionização da região situada entre a ponta do eletrodo e o bico constritor, abrindo assim um pequeno arco entre o eletrodo e o bico constritor, denominado de arco não transferido ou piloto (DÍAZ, 2009).

O jato de plasma gerado pelo arco piloto em contato com o substrato, se torna uma espécie de condutor elétrico, conectando-o ao eletrodo de tungstênio. Desta forma, quando a fonte de energia é acionada, já existe um caminho preferencial de gás ionizado e condutor de eletricidade, facilitando a abertura do arco transferido entre o eletrodo e o substrato (DÍAZ, 2009).

Todo este processo eleva a temperatura e o grau de ionização do arco, aumentando assim a taxa na qual a energia é transferida do arco para o substrato.

A soldagem a plasma também pode ser realizada pela técnica do arco não transferido, onde o arco é estabelecido entre o eletrodo e o orifício de constrição. Neste processo, a peça é mantida fora do circuito elétrico e são alteradas as condições de transferência de calor à peça. Porém esta técnica não será abordada por não ser escopo deste projeto.

3.6 PARÂMETROS ELÉTRICOS

A potência do arco principal e o calor aportado à peça dependem fortemente da corrente do arco principal. Os defeitos de soldagem advêm essencialmente de irregularidades no calor aportado à peça e à poça fundida, ou seja, dependem da corrente (SILVA, 2012).

MARCONI (2002) relatou que a influência da corrente sobre o calor transferido ao pó é baixa, porém o aumento da corrente resulta na redução do tempo em que o pó fica recebendo calor no arco. Por outro lado, o aumento da corrente leva a maior aporte de calor ao substrato o que, conseqüentemente, altera a diluição. Conforme DEUIS *et al.* (1998) e SILVA (2012), o valor ótimo de corrente é o valor mínimo que resulte na máxima taxa de fusão de pó para determinada taxa de alimentação.

De acordo com BOND *et al.* (2005), em baixos níveis de corrente espera-se uma estrutura bem refinada, porém com a possibilidade de ocorrência de depósitos com descontinuidades e partículas não fundidas. Para maiores intensidades de corrente obtêm-se elevada diluição com o substrato. Com a elevação da corrente, a dureza dos depósitos será reduzida, bem como poderá ocorrer oxidação sobre o cordão, onde a microestrutura poderá apresentar granulometria até mais grosseira do que a obtida com arame. Elevados valores de diluição poderão resultar no comprometimento das propriedades do revestimento.

Existe uma relação direta entre a corrente de soldagem e a diluição do revestimento com o substrato, figura 5. Pode-se verificar que para que a variação de corrente para um revestimento realizado com taxa de alimentação de pó de 10 kg/h e vazão do gás de plasma de 4 l/min, a diluição varia de 2% para 30%, pela elevação da corrente de soldagem de 250 para 400 A.

Vale destacar ainda que existem outros parâmetros que influenciam na diluição, tais como a taxa de alimentação do pó e a vazão do gás de plasma. Para deposições que utilizam corrente de 200 A e vazão do gás de plasma de 4 l/min, a diluição varia aproximadamente de 1% para 15% com a redução da taxa de alimentação de pó de 8 kg/h para 5 kg/h.

Finalmente, outra comparação importante trata da vazão do gás de plasma. Para uma deposição com taxa de alimentação de pó de 6 kg/h, vazão do gás de plasma de 4 l/min (interpolação entre 5 e 8 kg/h) e corrente de deposição de 300 A, o valor de diluição aproxima-se a 30 %. Reduzindo-se a vazão do gás, de 4 para 1 l/min, a diluição aproxima-se a 4%, mostrando que diversos fatores afetam significativamente no resultado obtido para a diluição ao substrato.

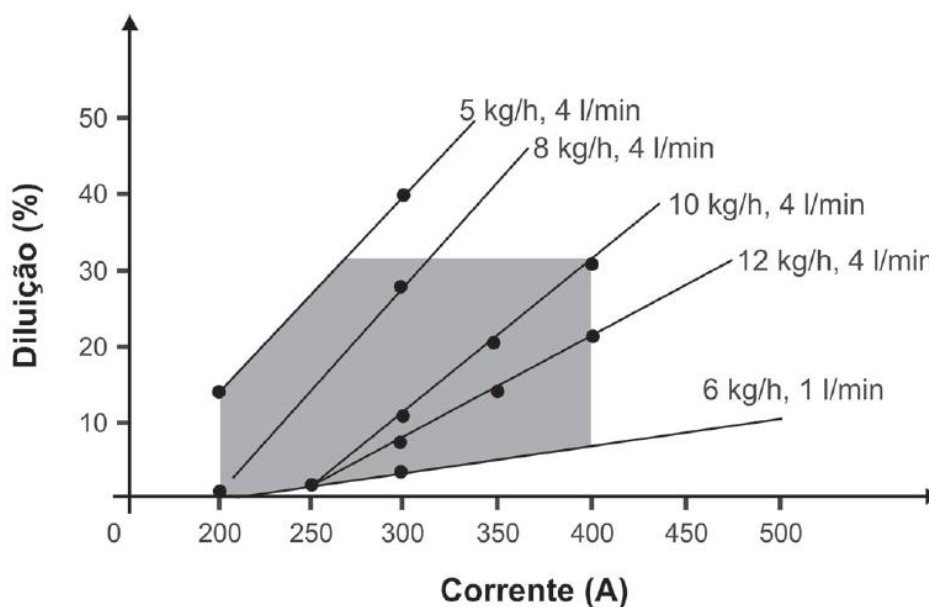


FIGURA 5 – RELAÇÃO ENTRE CORRENTE DE SOLDAGEM E DILUIÇÃO PARA DIFERENTES TAXAS DE ALIMENTAÇÃO DE PÓ E VAZÕES DE GÁS DE PLASMA (SILVA, 2012).

3.7 VANTAGENS E DESVANTAGENS DO PTA

Considerando os excelentes resultados obtidos nas características funcionais de revestimentos por PTA, como baixa diluição e baixo aporte de energia (baixas distorções), quando comparado a outros processos de soldagem, este processo é uma alternativa considerável para operações de revestimento por soldagem (KUWABARA *et al.*, 2003).

Conforme relatado em diversos trabalhos como de Brandi (1992), Santos (2003), Reinaldo (2008), Graf (2009), e Díaz (2009), dentre as principais vantagens do PTA estão:

- Estabilidade direcional focal do arco;
- Baixo aporte de energia, implicando em baixas distorções;
- Baixa diluição entre o material depositado e o substrato;
- Elevada qualidade do revestimento depositado;
- Homogeneidade do cordão de solda;
- Versatilidade na seleção do material de adição na forma de pó.
- As características do PLASMA se mantêm para pequenas variações da distância tocha-peça.

Porém, conforme mencionado por Brandi (1992), Reinaldo (2008) e Graf (2009), algumas desvantagens do processo podem ser apresentadas quando comparado a outros processos convencionais de soldagem e/ou deposição superficial, tais como:

- Equipamento de custo elevado e necessita de instalação permanente;
- Necessidade de acessórios especiais no caso em que as superfícies a serem revestidas não sejam planas ou cilíndricas;
- Maior qualificação do operador para configuração precisa dos ajustes.
- Difícil utilização fora da posição 90°.

3.8 MICROESTRUTURA DE REVESTIMENTOS DE LIGAS DE NÍQUEL

Revestimentos obtidos por soldagem são caracterizados pela composição variável e por uma cinética de solidificação que influenciam na microestrutura do depósito (SALVINO, 2013). As variações na composição química derivam da diluição do material depositado com o metal de base durante a soldagem. Para a cinética de solidificação, as condições de controle do resfriamento irão determinar a formação estrutural de solidificação e o grau de refinamento destas estruturas.

A diluição é definida como a participação do material do substrato no depósito. No caso de revestimentos, ela constitui em um fator importante a ser considerado em relação à deposição, uma vez que uma diluição elevada pode alterar as características da liga depositada, devido à maior presença de elementos do substrato no revestimento, impactando nas características mecânicas do mesmo (SANTOS, 2003).

A solidificação tem início com o aparecimento de nova fase sólida. O aparecimento e o crescimento posterior de partículas sólidas caracterizam o modo de formação da microestrutura em metais e ligas metálicas em momentos sucessivos de tal modo que aspectos cinéticos, térmicos, químicos e termodinâmicos estão fortemente relacionados (REIS, 2009).

O crescimento dendrítico é uma forma comumente encontrada em metais fundidos, e o grau de refinamento das dendritas influencia diretamente nas propriedades mecânicas, na resistência à corrosão e nos tratamentos térmicos posteriores dos produtos fundidos. Estas estruturas formam-se com um teor de

soluto diferente da média da liga. Essa diferença da concentração de soluto do centro das dendritas para a região interdendrítica é causada pela diferença de solubilidade entre as fases líquida e sólida (ROSA, 2004).

Os principais parâmetros afetados pelo processo de transferência de calor durante a solidificação são as velocidades de solidificação e as taxas de resfriamento (em percentual), e conseqüentemente os tempos de solidificação. A velocidade de solidificação refere-se ao deslocamento da interface sólido/líquido com relação ao tempo. A taxa de resfriamento remete a diminuição da temperatura em função do tempo, ou seja, quanto calor está sendo extraído da peça em um determinado instante da solidificação, podendo ser determinada pelo produto da velocidade de solidificação com o gradiente térmico (GARCIA, 2001).

Fernandes *et al.* (2011) descreve revestimentos, obtidos por PTA, de liga com elevado teor de Níquel obtidos sobre substratos de Ferro Fundido e indica a formação de microestrutura dendrítica de solidificação, independente da corrente de deposição utilizada. Nas regiões interdendríticas, relata a formação de carbonetos associados à diluição e elementos de liga presentes no pó de deposição original.

Da mesma forma, Kesavan *et al.* (2011), realizou a deposição de liga com elevado teor de Níquel sobre aço inoxidável austenítico, onde para todas as variações na corrente de deposição e no envelhecimento acelerado, observou a formação de estrutura dendrítica, com variações nos espaçamentos interdendríticos com o processo. Nestes trabalhos, o processo deposição não considerou pré-aquecimento e teve resfriamento dos depósitos ao ar, indicando que uma microestrutura tipicamente dendrítica pode ser obtida para revestimentos de ligas de Níquel.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

O objetivo deste trabalho foi estudar, caracterizar e avaliar a liga de Níquel do sistema NiCrMo (IN 625), comercialmente conhecida por Inconel 625, depositada pela técnica de Plasma com Arco Transferido (PTA) sobre dois substratos de aço utilizados na indústria do petróleo: AISI 316L e API 5L X70. Através da caracterização e avaliação destes revestimentos buscou-se compreender o impacto da corrente de deposição e dos diferentes substratos sobre a geometria dos cordões, diluição, microestrutura e propriedades dos revestimentos produzidos.

A composição química resultante da interação liga-substrato é intermediária entre a nominal do material de adição e do substrato, dependendo da diluição ou grau de interação com o substrato. Uma vez que a corrente de deposição afeta o grau de interação da liga de deposição com o substrato, por meio da diluição, variações nas microestruturas e propriedades são esperadas. A figura 6 mostra um fluxograma geral detalhando a metodologia aplicada ao estudo.

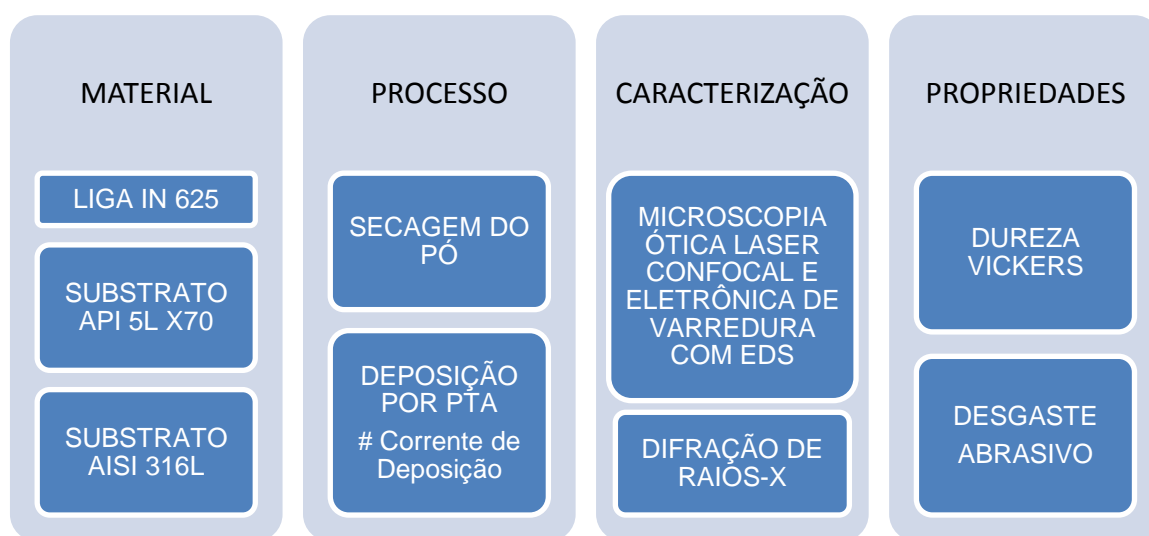


FIGURA 6 – FLUXOGRAMA EXPERIMENTAL ADOTADO PARA A AVALIAÇÃO DOS REVESTIMENTOS DE LIGA IN 625.

4.1 MATERIAIS

A liga NiCrMo (IN 625) na forma de pó atomizado com granulometria entre 90 e 150 μm foi depositada por PTA sobre substratos de aço inoxidável AISI 316L e aço carbono API 5L X70, com dimensões de 100 x 100 x 12,5mm e 100 x 100 x 10,0mm, respectivamente. Os substratos de aço foram escolhidos por sua utilização na indústria do petróleo, já que este projeto visa desenvolver materiais para este setor. As chapas dos substratos utilizados apresentam diferenças na espessura, porém esta diferença não afeta os resultados encontrados, visto que para ambas as espessuras, a transferência de calor apresentada durante a deposição é bidimensional. A composição dos materiais utilizados está conforme tabela 8.

TABELA 8 – COMPOSIÇÃO QUÍMICA DOS MATERIAIS UTILIZADOS (% EM PESO)

LIGA ATOMIZADA DE ALIMENTAÇÃO PARA PTA									
Liga / Elemento	Ni	Cr	Mo	Si	C	Fe	Nb	Ti	Al
NiCrMo (IN 625)*	Bal.	21,40	9,10	0,39	0,1	1,10	3,15	<0,10	<0,10
SUBSTRATOS DE AÇO									
Substrato 1	%C	%Mn	%Si	%P	%S	%Cr	%Ni	%Mo	%Al
AISI 316L**	0,02	1,35	0,43	0,03	0,008	16,78	10,12	2,13	0,002
Substrato 2	%C	%Mn	%Si	%P	%S	%Cr	%Ti	%Nb	%V
API 5L X70***	0,17	1,40	0,21	0,02	0,003	0,005	0,015	0,041	0,034

* CERTIFICADO HÖGANAS: EN 10.204.3.1 LOTE 1.423.945

** CERTIFICADO ACESITA Nº 66019, CORRIDA DO AÇO 4406981.

*** AVALIADO PELA UFRGS, LAMEF.

O equipamento de PTA utilizado para a deposição da liga de Níquel IN 625 está instalado no Laboratório de Engenharia de Superfícies do Departamento de Engenharia Mecânica (DEMEC) na Universidade Federal do Paraná (UFPR), figura 07.



FIGURA 7 – EQUIPAMENTO DE PLASMA COM ARCO TRANSFERIDO (PTA) UTILIZADO

4.2 PROCEDIMENTO DE DEPOSIÇÃO, DILUIÇÃO E AMOSTRAS PARA CARACTERIZAÇÃO

Para estudar o efeito da corrente de deposição sobre a microestrutura e propriedades da liga NiCrMo depositados por PTA, foram revestidas chapas de aço inoxidável AISI 316L e API 5L X70 com espessuras de 12,5 mm e 10,0 mm, respectivamente. As chapas foram cortadas nas dimensões de 100 mm x 100 mm, figura 8.

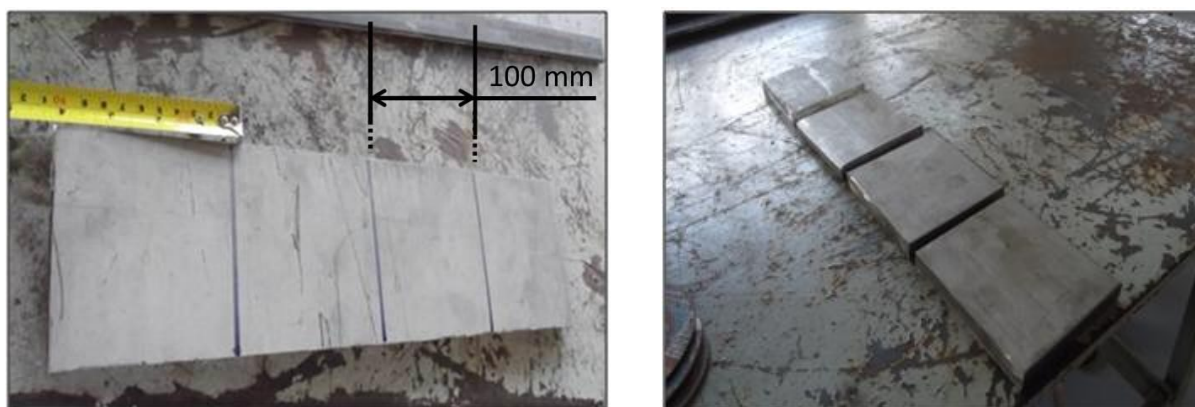


FIGURA 8 – MARCAÇÃO E CORTE DO SUBSTRATO DURANTE A PREPARAÇÃO PARA A DEPOSIÇÃO POR PTA.

Antes da deposição, a liga atomizada foi levada à estufa para secagem por 24h. A superfície das chapas (substratos) foi preparada a partir de lixamento para remoção da oxidação superficial, que inviabiliza a deposição e prejudica a abertura de arco elétrico, gerando defeitos na soldagem, figura 9.

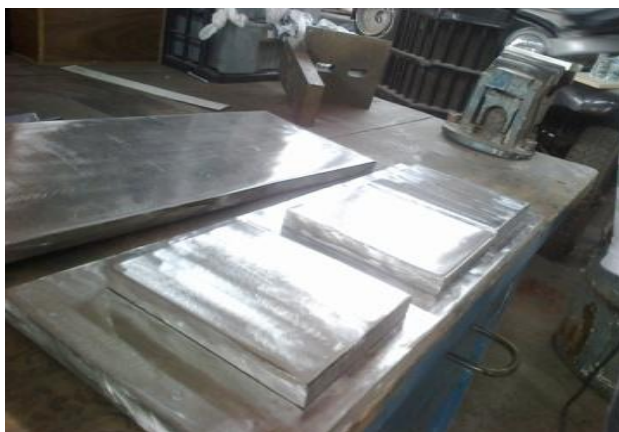


FIGURA 9 – SUBSTRATOS COM A SUPERFÍCIE PREPARADA POR LIXAMENTO PARA A DEPOSIÇÃO.

Os revestimentos da liga NiCrMo foram produzidos por PTA na forma de cordões únicos, figura 10. Os substratos não foram pré-aquecidos para a deposição. Após a deposição dos cordões com 100 mm de comprimento, os revestimentos resfriaram ao ar, sem controle da taxa de resfriamento.



FIGURA 10 – DEPOSIÇÃO DO REVESTIMENTO IN 625 POR PTA

Os revestimentos foram processados em condições controladas e com parâmetros fixos do equipamento de PTA, de forma permitir a avaliação do efeito da variação da corrente de deposição ou corrente do arco principal, tabela 9.

TABELA 9 – PARÂMETROS DE DEPOSIÇÃO UTILIZADOS PARA A PRODUÇÃO DOS REVESTIMENTOS NiCrMo.

PARÂMETRO	VALOR
Vazão do Gás de Plasma (l/min)	2
Vazão do Gás de Proteção (l/min)	15
Vazão do Gás de Transporte (l/min)	2
Corrente do Arco Principal (A)	120, 150, 180
Taxa de Alimentação	Constante em volume
Velocidade de Avanço (mm/min)	100
Distância Tocha / Substrato (mm)	10
Diâmetro do Eletrodo (mm)	3,125
Gás Utilizado	Argônio

A geometria dos cordões foi avaliada através do ângulo molhabilidade (Θ), espessura de reforço (t) e largura (w) das amostras, conforme figura 11.

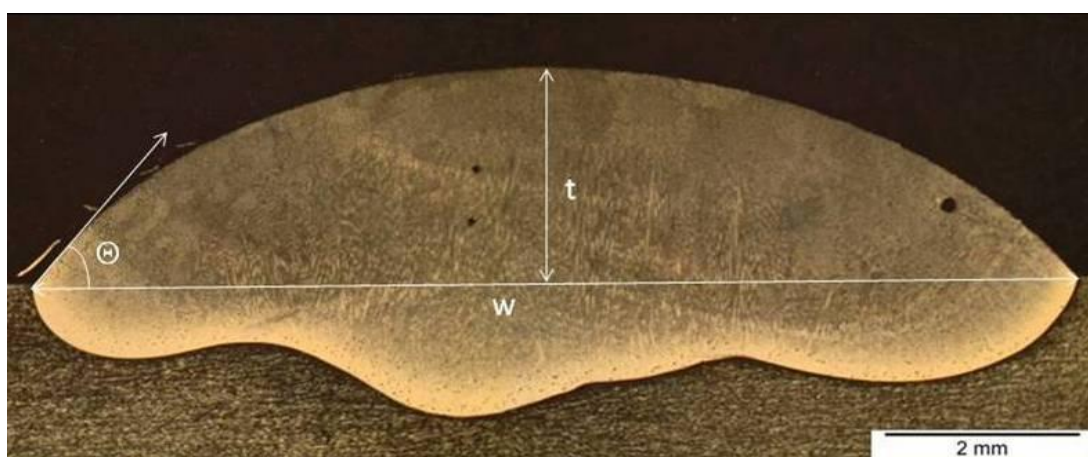


FIGURA 11 – PARÂMETROS UTILIZADOS PARA AVALIAR A GEOMETRIA DOS REVESTIMENTOS: ÂNGULO DE MOLHABILIDADE (Θ), ESPESSURA DE REFORÇO (t) E LARGURA DO CORDÃO (w).

A diluição foi calculada a partir da razão entre a área do substrato fundida e a área total fundida, medidas na seção transversal dos depósitos, conforme figura 12 e equação 1.

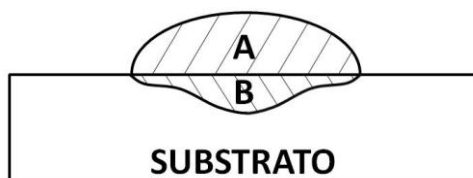


FIGURA 12 – SEÇÃO TRANSVERSAL DO CORDÃO DO DEPOSITO

$$D [\%] = \frac{\text{Área Fundida do Substrato}}{\text{Área Fundida Total}} \times 100 = \frac{B}{A+B} \times 100 \quad (1)$$

As áreas foram medidas por meio de microscopia ótica realizada em três amostras para cada corrente de deposição, de cordões diferentes, sendo apresentada a média encontrada. Foram descartados 20 mm de cada extremidade do cordão e tomada a região central para as análises deste trabalho, figura 13.

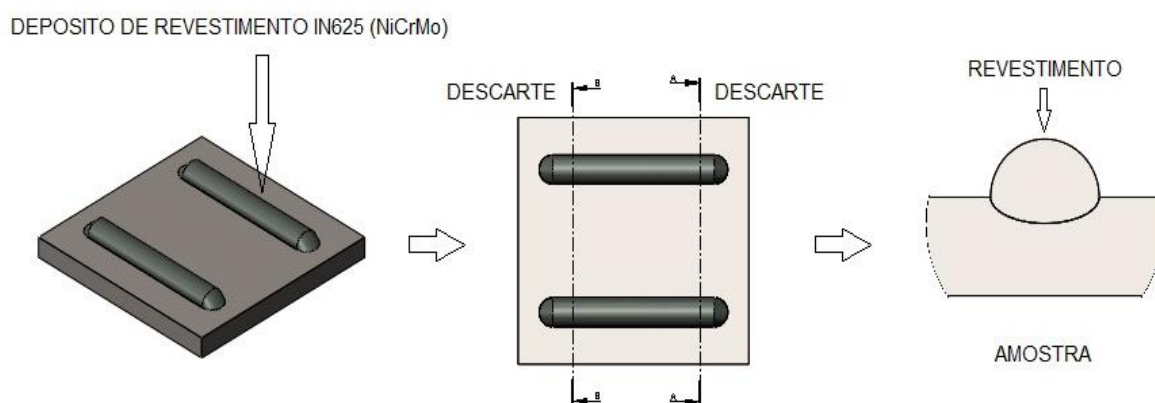


FIGURA 13 – DESENHO ESQUEMÁTICO MOSTRANDO A LOCALIZAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA ADOTADOS PARA A CARACTERIZAÇÃO DA GEOMETRIA DOS CORDÕES E DA MICROESTRUTURA.

A análise metalográfica foi realizada em três amostras para cada corrente de deposição, para cada substrato, no laboratório de Materiais da UFPR. As amostras foram adequadamente preparadas com embutimento, lixamento, polimento e ataque, figura 14.

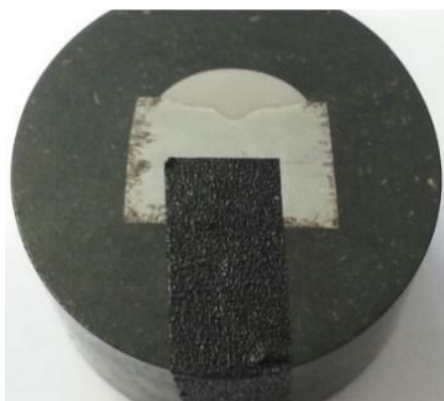


FIGURA 14 – FOTOGRAFIA DE CORPO DE PROVA ADOTADO PARA A CARACTERIZAÇÃO DA GEOMETRIA DOS CORDÕES E DA MICROESTRUTURA.

Os revestimentos produzidos foram analisados por microscopia Laser Confocal e eletrônica de varredura com EDS (espectrometria por energia dispersiva) para a caracterização da microestrutura e, conjuntamente com análises por difração de raios-X foram identificadas as fases formadas para as diferentes condições de deposição e substratos.

Foram realizados ensaios de dureza Vickers para avaliar a uniformidade dos cordões obtidos e a influência da condição de deposição e tipo de substrato sobre esta propriedade. Ao final os revestimentos foram avaliados a partir de ensaios de desgaste abrasivo por deslizamento.

4.3 ESTUDO DO EFEITO DA DILUIÇÃO

Para a realização do estudo do efeito da diluição da liga IN 625 com os substratos sobre as propriedades, a liga em pó atomizada foi depositada através do equipamento de PTA diretamente na cavidade de uma coquilha de cobre, com seção transversal de dimensões 5 x 5 mm, refrigerada com água, figura 15.

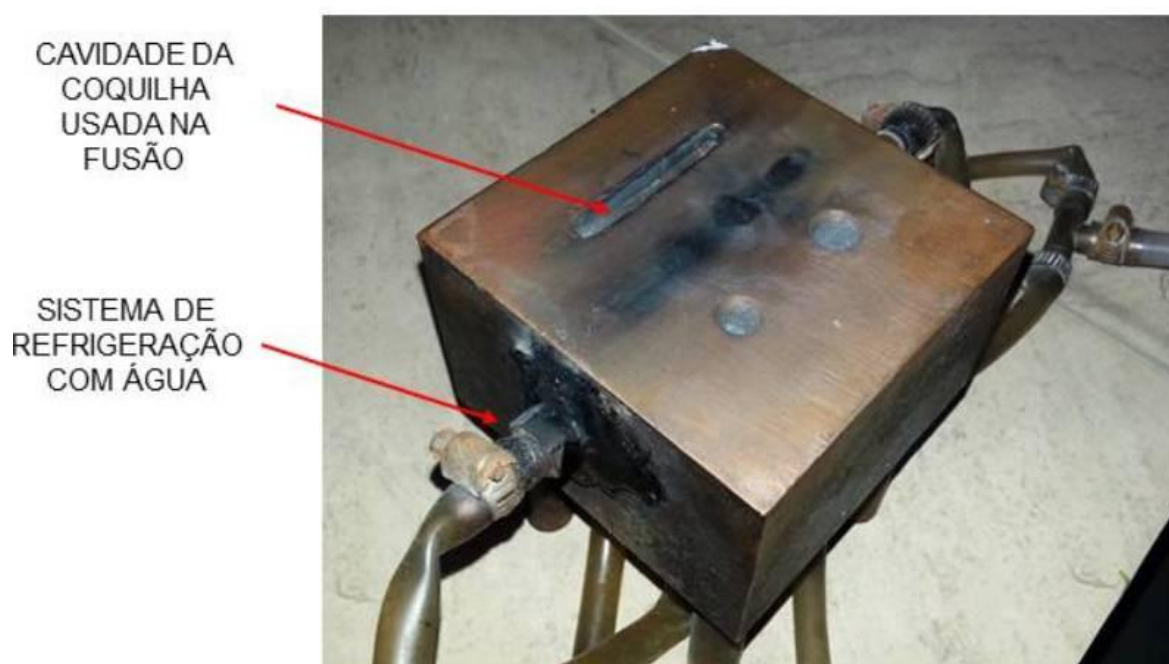


FIGURA 15 – FOTOGRAFIA DA COQUILHA DE COBRE UTILIZADA PARA DEPOSIÇÃO DA LIGA

Desta forma, foram produzidos corpos de prova sem diluição, que foram adotados como referência para a dureza e fases formadas, figura 16. É importante destacar que não houve controle sobre a taxa de resfriamento aplicada à amostra produzida em coquilha e, assim, a microestrutura e o grau de refinamento (DAS – espaçamento de braços dendríticos) não foram avaliados nestas amostras.

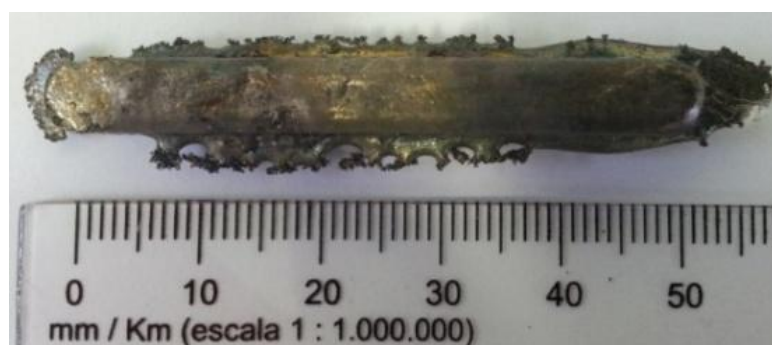


FIGURA 16 – CORPO DE PROVA SEM DILUIÇÃO OBTIDO PELA DEPOSIÇÃO DA LIGA IN 625 NA CAVIDADE DE COQUILHA DE COBRE.

As amostras fundidas em coquilha foram tratadas termicamente a fim de delimitar a potencial variação da dureza da liga sem diluição.

Para o tratamento térmico, as amostras foram solubilizadas na temperatura de 1150⁰C por um tempo de 2 h e então resfriadas em água com forte agitação. As amostras foram então envelhecidas a 500⁰C e a 850⁰C durante 8 h para o mapeamento da dureza e das fases formadas na condição solubilizada e com diferentes condições de envelhecimento. Estes parâmetros foram escolhidos com base nas informações de parâmetros para tratamento térmico de ligas não ferrosas (ASM HANDBOOK).

4.4 PROCEDIMENTOS DE CARACTERIZAÇÃO

Este capítulo dedica descrição sucinta das técnicas de caracterização usadas neste trabalho.

4.4.1 Difração de Raios-X

Análises por difração de raios-X foram utilizadas para a identificação das fases formadas nas diversas condições de deposição. As análises tiveram como parâmetros: radiação K- α Cu, varredura de 0 a 120⁰, passo angular de 0,05⁰ e tempo de exposição por canal de 1 s. As análises foram realizadas em amostras dos revestimentos que tiveram a superfície preparada a partir de lixamento e polimento metalográfico do topo dos cordões.

4.4.2 Análise Química por Absorção Atômica

O teor de ferro influencia significativamente as propriedades dos revestimentos soldados. Por esta razão, além da estimativa (cálculo) do teor de ferro por meio da diluição, foi realizada a análise química por absorção atômica do teor de ferro dos revestimentos. Para tal, a região de reforço dos cordões foi removida por corte abrasivo e os fragmentos do revestimento foram utilizados para a medida do teor de ferro a partir da técnica quantitativa.

Portanto, determinou-se o teor de ferro médio dos revestimentos e, uma possível variação ao longo da espessura dos revestimentos não foi avaliada.

4.4.3 Metalografia

A análise metalográfica foi adotada como técnica de suporte às caracterizações realizadas. Amostras foram preparadas a partir de procedimentos metalográficos padrão de corte com refrigeração, embutimento em resina termofixa (baquelite), lixamento a úmido para granulometrias entre #220 e 1200 e polimento com pano de feltro e abrasivo alumina. Ataque metalográfico eletrolítico foi aplicado para visualizar a microestrutura dos revestimentos com ácido oxálico saturado em água destilada por 3 s. A microestrutura foi caracterizada a partir de microscopia laser Confocal e eletrônica de varredura associada a análises por EDS na região central dos cordões, figura 17.

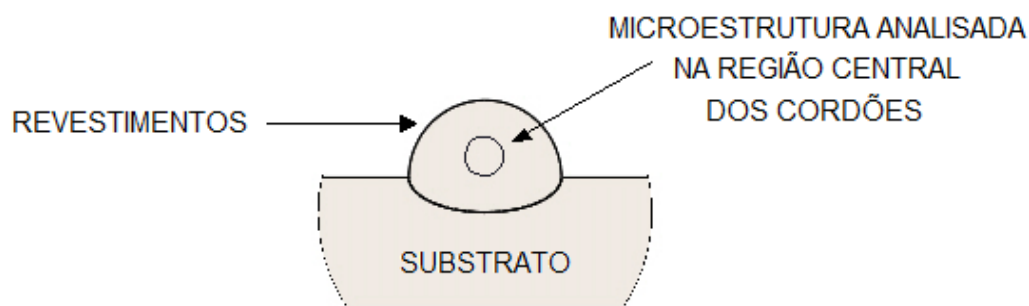


FIGURA 17 – FIGURA ESQUEMÁTICA MOSTRANDO A REGIÃO UTILIZADA PARA A ANÁLISE DA MICROESTRUTURA DOS REVESTIMENTOS.

A estrutura de solidificação dos revestimentos foi caracterizada pelo grau de refinamento da estrutura dendrítica, por meio da medição do espaçamento de braços dendríticos, DAS, figura 18.

O DAS foi determinado a partir da média de 50 medidas, realizadas na microestrutura da região central dos cordões para cada condição. Adicionalmente, a fração de carbonetos formados na microestrutura dos revestimentos foi determinada através da análise de área das imagens da microscopia eletrônica de varredura, a partir do software Olympus Soft Image Solutions.

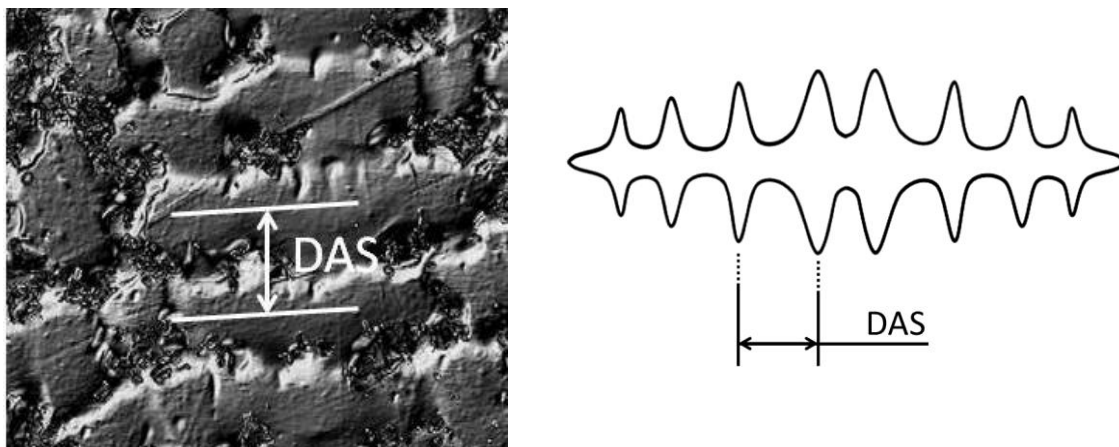


FIGURA 18 – FIGURA ESQUEMÁTICA MOSTRANDO A MEDIÇÃO DO ESPAÇAMENTO DE BRAÇOS DENDRÍTICOS.

4.4.4 Dureza Vickers

O método de dureza Vickers foi utilizado com carga de 0,5 kgf para avaliar a uniformidade dos cordões por meio de perfis de dureza e também do efeito do processamento sobre as propriedades em cada condição, figura 19.

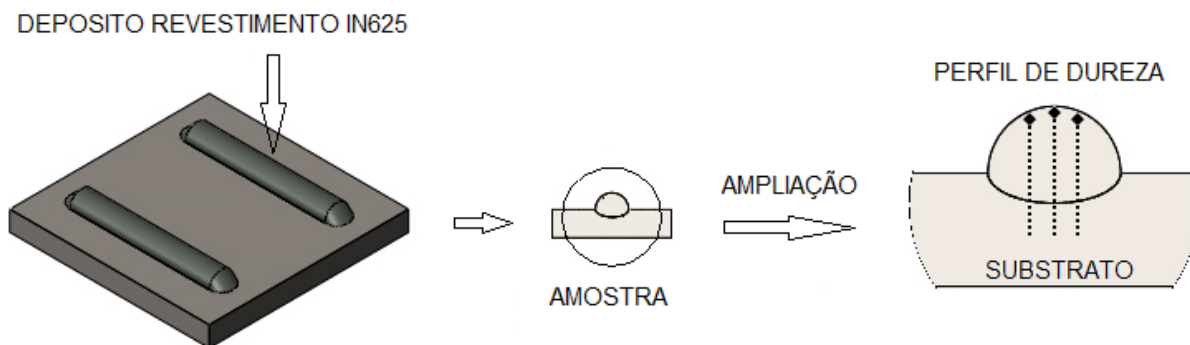


FIGURA 19 – METODOLOGIA E LOCALIZAÇÃO DAS MEDIDAS DE DUREZA VICKERS USADA.

4.4.5 Desgaste por Partículas Duras

Nesta pesquisa, o ensaio de desgaste abrasivo a dois corpos tipo pino sobre disco sem lubrificação foi utilizado para correlacionar o desempenho da liga depositada nas diferentes condições sobre a resistência ao desgaste.

Para tal, foram confeccionados pinos nas dimensões 4 x 4 x 10 mm, utilizando eletroerosão, figura 20. Apenas uma das extremidades do pino apresentou a liga de interesse. Os ensaios foram conduzidos em temperatura ambiente com carga de 500 gf, deslizando os pinos sobre uma contraface de papel abrasivo de carbeto de silício (SiC) com granulometria #600.

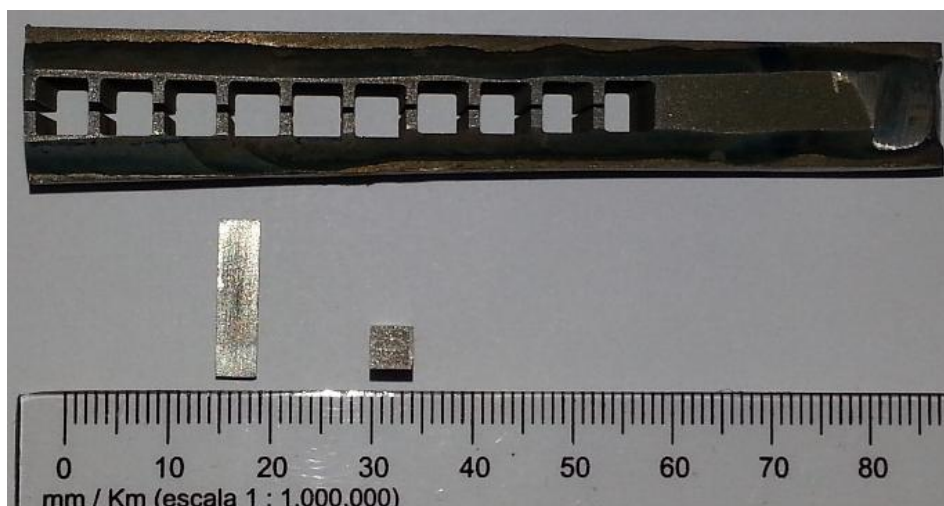


FIGURA 20 – PINOS EXTRAIDOS DOS REVESTIMENTOS DE IN 625 POR ELETROEROSÃO.

Escolheu-se Carbeto de Silício pelo fato de que é um abrasivo de elevada dureza (2500HV) com a granulometria de #600, tendo em vista a série de ligas de Níquel não apresenta elevada resistência ao desgaste abrasivo (BRAGATTO JUNIOR, 2014). A carga de 500 gf está condicionada ao uso de papel abrasivo de Carbeto de Silício, ou seja, cargas mais elevadas podem levar ao rasgamento do papel e conseqüente perda dos resultados.

Os pinos foram pesados antes do ensaio e a perda de massa determinada em função da distância percorrida, sendo apresentado o valor médio para cinco pinos de cada condição. O desgaste foi realizado com deslizamento em 125 m sobre a mesma trilha, sendo então o ensaio interrompido e os pinos pesados. A cada reinício do ensaio, uma nova trilha de desgaste foi utilizada.

Cuidado especial foi adotado para que cada amostra fosse desgastada em trilhas com o mesmo diâmetro de disco, a fim de evitar diferenças do consumo do abrasivo da contra face. Com isto, um determinado ponto na trilha do disco teve o mesmo número de passagens pelo pino em 125 m percorridos.

A figura 21 apresenta uma fotografia do equipamento utilizado para os ensaios de desgaste por deslizamento, em (a) a máquina de desgaste e em (b) o detalhe do ensaio em andamento.

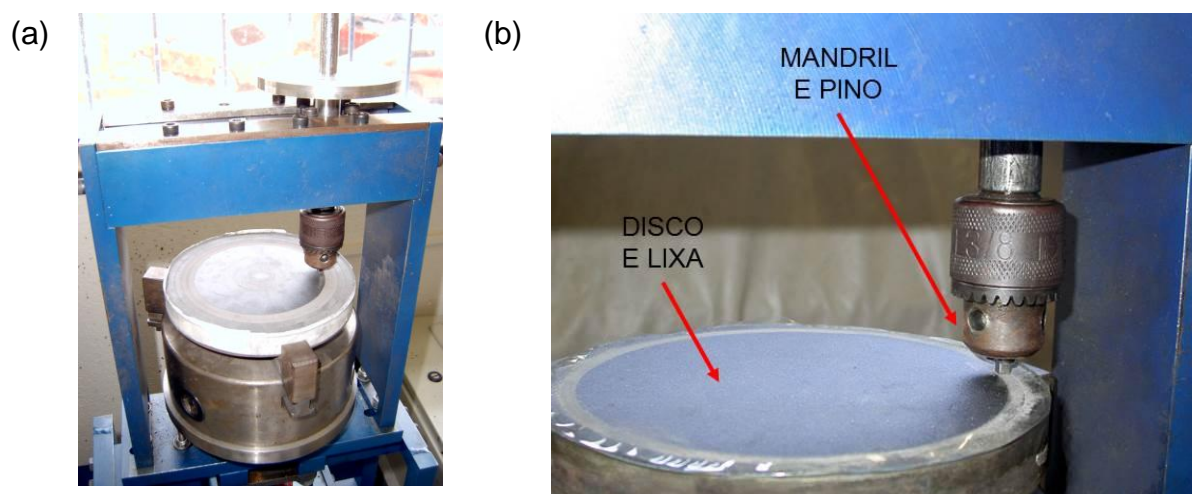


FIGURA 21 – FOTOGRAFIA MOSTRANDO O EQUIPAMENTO UTILIZADO PARA O ENSAIO DE DESGASTE PINO SOBRE DISCO. (A) MÁQUINA DE DESGASTE. (B) ENSAIO EM ANDAMENTO.

O coeficiente de perda de massa em desgaste foi determinado a partir do comportamento dos revestimentos. Normalmente, um comportamento linear é observado, permitindo a determinação do coeficiente angular da função linear. Sendo o eixo Y a perda de massa e o eixo X a distância de deslizamento, determina-se a taxa de perda de massa mg/m para cada condição de processamento.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados obtidos nesta pesquisa serão apresentados primeiramente em termos de geometria dos cordões, o que indica características associadas à produção prática de áreas revestidas. Em seguida, uma análise do efeito da corrente de deposição e do tipo de substrato sobre a diluição, microestrutura e propriedades será apresentada. Ao final, será analisado o efeito das condições de processamento e do tipo de substrato sobre a resistência ao desgaste dos revestimentos de liga IN 625.

5.1 GEOMETRIA DOS CORDÕES E DILUIÇÃO

Os revestimentos de liga IN 625 depositados por PTA apresentaram ausência de defeitos superficiais, tais como trincas, porosidades, mordeduras, falta de fusão e defeitos de interface, indicando que os parâmetros do processamento da liga sobre os aços estudados foram adequados. Esta avaliação está de acordo com as previsões de boa soldabilidade para a liga estudada, GATTO *et al.* (2004). Por outro lado, existe informação limitada sobre impacto da diluição e substrato sobre a liga IN 625 processada por PTA.

Diferenças na geometria dos depósitos foram avaliadas e relacionadas com as características do substrato de aço e com a corrente de deposição, figura 22. Os valores geométricos obtidos dos cordões de solda da liga IN625, sobre os substratos API 5L X70 e AISI 316L, estão apresentados na tabela 10.

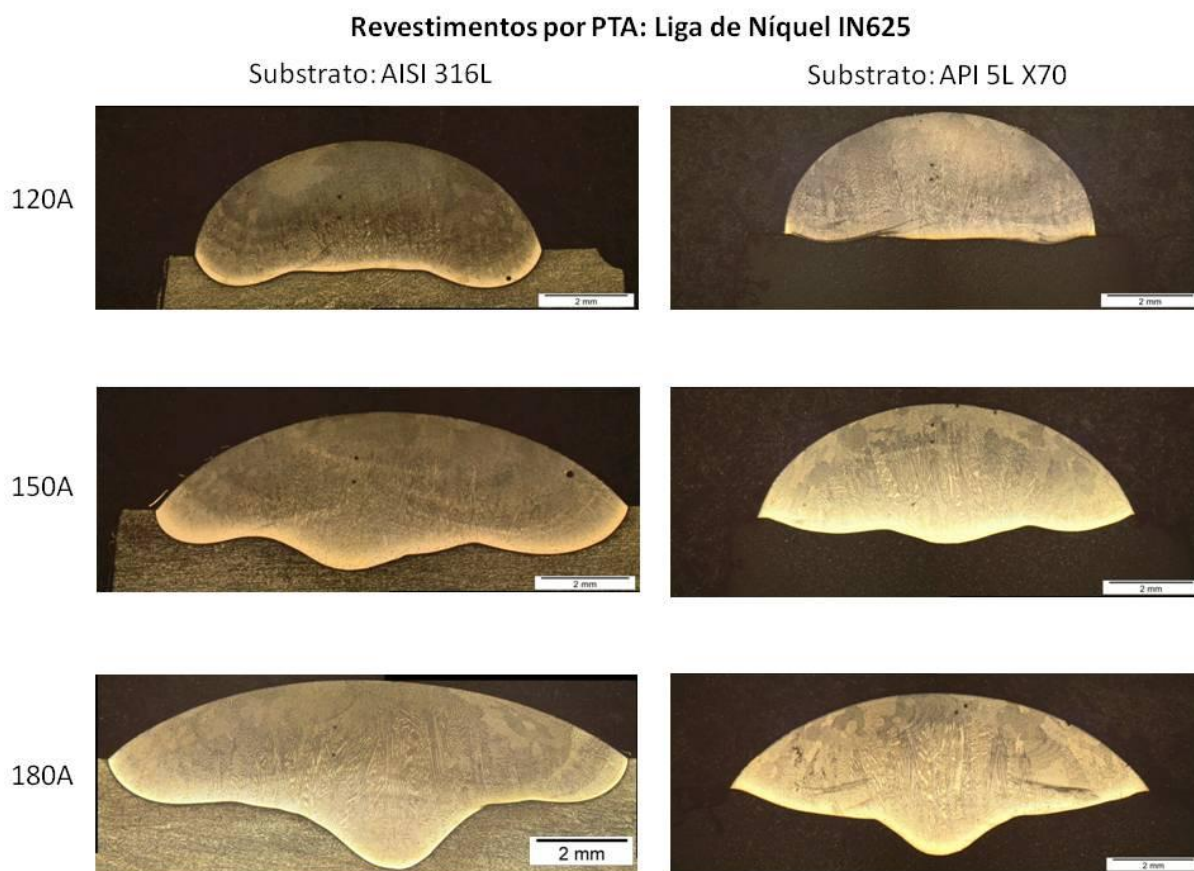


FIGURA 22 – GEOMETRIA DOS CORDÕES DE SOLDA DEPOSITADOS COM TRÊS CORRENTES SOBRE DOIS SUBSTRATOS

TABELA 10 – VALORES GEOMÉTRICOS DOS CORDÕES DE SOLDA DEPOSITADOS

CORRENTE DE DEPOSIÇÃO (A)	SUBSTRATO					
	API 5L X70			AISI 316L		
	θ (°)	t (mm)	w (mm)	θ (°)	t (mm)	w (mm)
120	83,0	3,0	7,4	72,0	2,8	8,5
150	63,6	2,7	9,1	48,1	2,4	10,9
180	54,2	2,4	10,3	37,0	2,1	12,1

Para a corrente de deposição utilizada na deposição da liga sobre aço API 5L X70, os revestimentos apresentaram uma inferior molhabilidade, confirmado pelo ângulo de molhamento (θ) mais elevado, maior espessura de reforço (t) e menor largura (w) de reforço do revestimento, quando comparados com os revestimentos depositados sobre o aço AISI 316L com menor condutividade térmica.

O controle do ângulo de molhamento é importante sempre que for necessária a proteção de grandes áreas usando sobreposição de cordões. A baixa molhabilidade pode causar falta de fusão e vazios entre os cordões, podendo comprometer a qualidade de áreas revestidas. A fim de minimizar os efeitos deletérios da molhabilidade, algumas vezes se faz necessária a adoção de maior sobreposição ou otimização das condições de processamento, entretanto, estes fatores contribuem para uma maior diluição.

O processamento da liga de níquel IN 625 ligou resultou em revestimentos com um ângulo de molhabilidade (θ) variando entre 37 e 72° para o AISI 316L e entre 54 e 83° para o API 5L, ocorrendo redução do ângulo com a elevação da corrente de deposição, conforme figura 23.

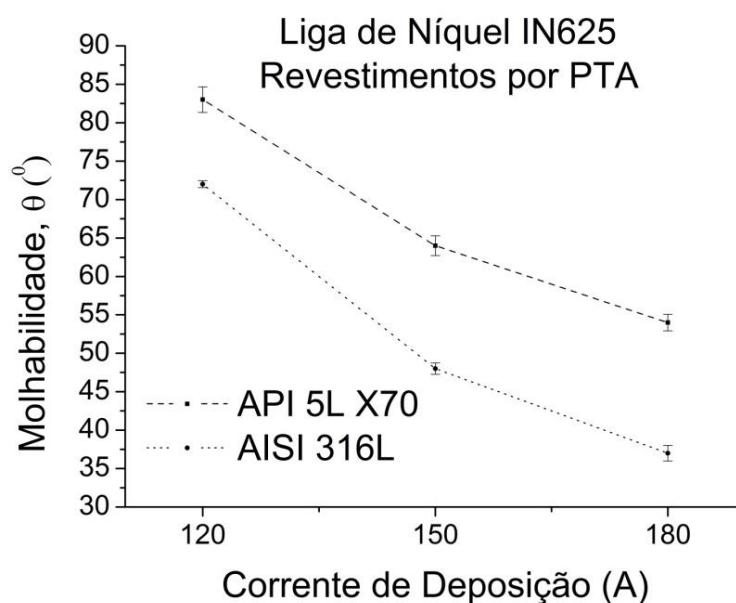


FIGURA 23 – GEOMETRIA DOS CORDÕES DE SOLDA DEPOSITADOS COM TRÊS CORRENTES SOBRE DOIS SUBSTRATOS: ÂNGULO DE MOLHABILIDADE (θ).

Os revestimentos processados apresentaram espessura de reforço (t) variando entre 2,1 e 2,8 mm para AISI 316L e 2,4 e 3,0 mm para API 5L X70, ocorrendo redução da espessura de reforço com a elevação da corrente de deposição, conforme figura 24.

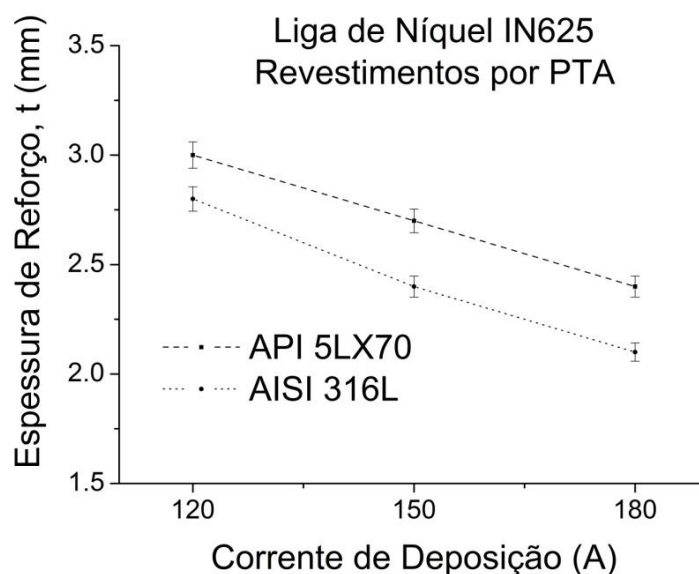


FIGURA 24 – GEOMETRIA DOS CORDÕES DE SOLDA DEPOSITADOS COM TRÊS CORRENTES SOBRE DOIS SUBSTRATOS: ESPESSURA DE REFORÇO (t).

Os revestimentos processados apresentaram largura dos cordões (w) variando entre 8,5 e 12,1 mm para AISI 316L e entre 7,4 e 10,3 mm para API 5L X70, ocorrendo elevação da espessura de reforço com a elevação da corrente de deposição, conforme figura 25.

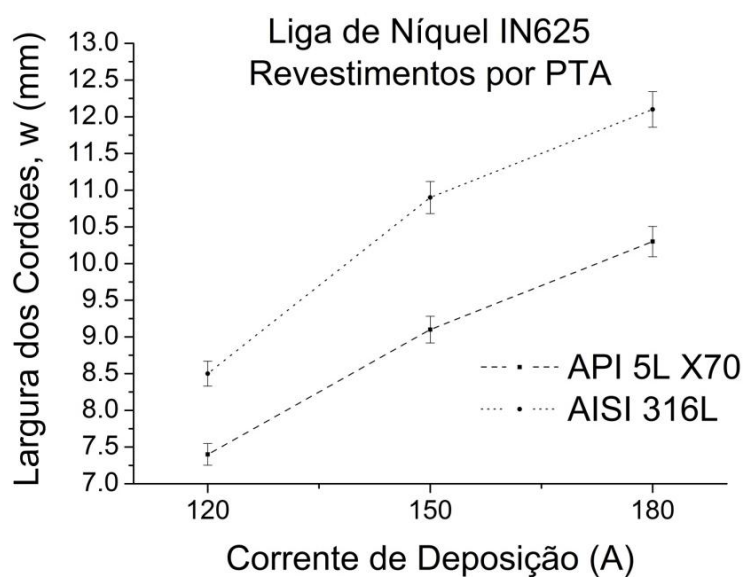


FIGURA 25 – GEOMETRIA DOS CORDÕES DE SOLDA DEPOSITADOS COM TRÊS CORRENTES SOBRE DOIS SUBSTRATOS: LARGURA (w) DOS CORDÕES.

5.2 DILUIÇÃO E TEOR DE FERRO

A diluição apresentou relação linear de aumento com a corrente, de acordo com relatos da literatura (SILVA, 2012), e variou de 22 a 51% para a deposição sobre o aço AISI 316L e de 5 a 29% para a deposição sobre aço API 5L X70, figura 26. O aumento da diluição está associado a elevação da corrente do arco plasma através da elevação do aporte térmico na soldagem.

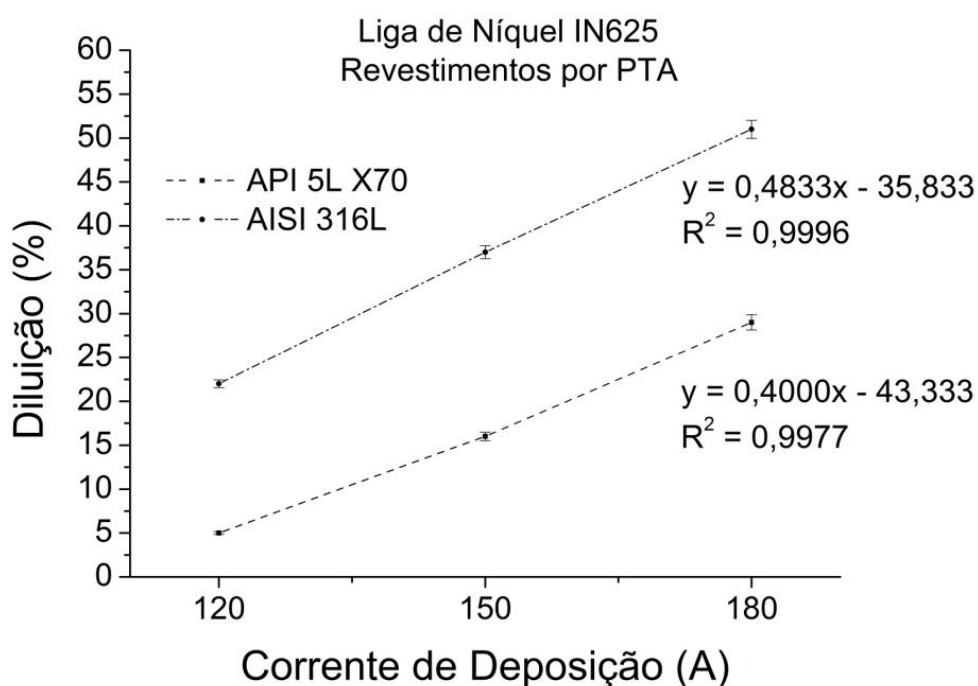


FIGURA 26 – DILUIÇÃO DOS REVESTIMENTOS DEPOSITADOS POR PTA SOBRE AÇOS AISI 316L E API 5L X70 COM TRÊS DIFERENTES CORRENTES.

Diluição superior foi observada para os revestimentos sobre substrato de aço inoxidável. Isto pode ser justificado pela menor dissipação de calor do mesmo, em decorrência da menor condutividade térmica.

Apesar do menor teor de ferro (70 % em peso de ferro) do substrato AISI 316L, uma diluição superior foi medida em revestimentos processados sobre este substrato, o que resultou em maior teor de ferro presente na composição química resultante nos revestimentos, quando comparados com aqueles processados sobre substrato de aço API 5L X70.

Enquanto o teor medido foi determinado a partir de análise química por absorção atômica, o teor calculado foi determinado conforme equação 2.

$$\%Fe_c = (D * Fe) + ((100 - D) * IA) \quad (2)$$

onde, $\%Fe_c$ é o percentual de ferro calculado, D (%) é a diluição medida pelo método das áreas, Fe (% em peso) é o teor de ferro do substrato e IA (% em peso) é o teor de Ferro da liga IN 625.

O teor de ferro medido a partir de análise química por absorção atômica e calculado a partir da diluição mostraram valores próximos e coerentes para os revestimentos depositados sobre aço API 5L X70, figura 27. Por outro lado, Os valores medidos foram significativamente inferiores aos valores calculados para os revestimentos depositados sobre aço AISI 316L. Isto se deve à metodologia utilizada, que considerou a remoção da região de reforço dos cordões. Considerando as diferenças de diluição, o reforço representa um menor volume para a análise química e menor representatividade em relação ao valor calculado pela diluição nesta condição.

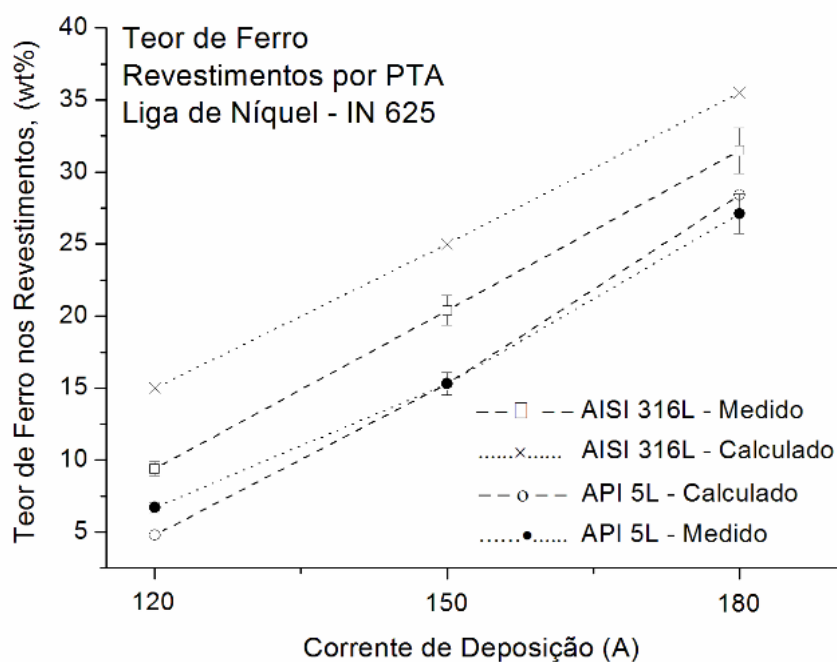


FIGURA 27 – TEOR DE FERRO CALCULADO E MEDIDO PARA OS REVESTIMENTOS DEPOSITADOS POR PTA SOBRE AÇOS AISI 316L E API 5L X70.

É importante destacar que, quanto maior o teor de ferro dos revestimentos (maior diluição), menor o percentual de elementos de liga como Cromo, Molibdênio e Nióbio presente nos revestimentos. Assim, uma vez que a liga IN 625 é endurecida por soluções sólidas, a redução do teor de elementos de liga pode levar a importante redução da dureza.

5.3 MICROESTRUTURA DOS REVESTIMENTOS

Os revestimentos exibiram microestrutura dendrítica de solidificação, figura 28. A microestrutura é composta por uma estrutura hipoeutética com dendritas de Níquel γ (Ni-CFC) e interdendrítico não lamelar contendo carbonetos, seguindo a previsão da literatura de FERNANDES *et al.* (2011).

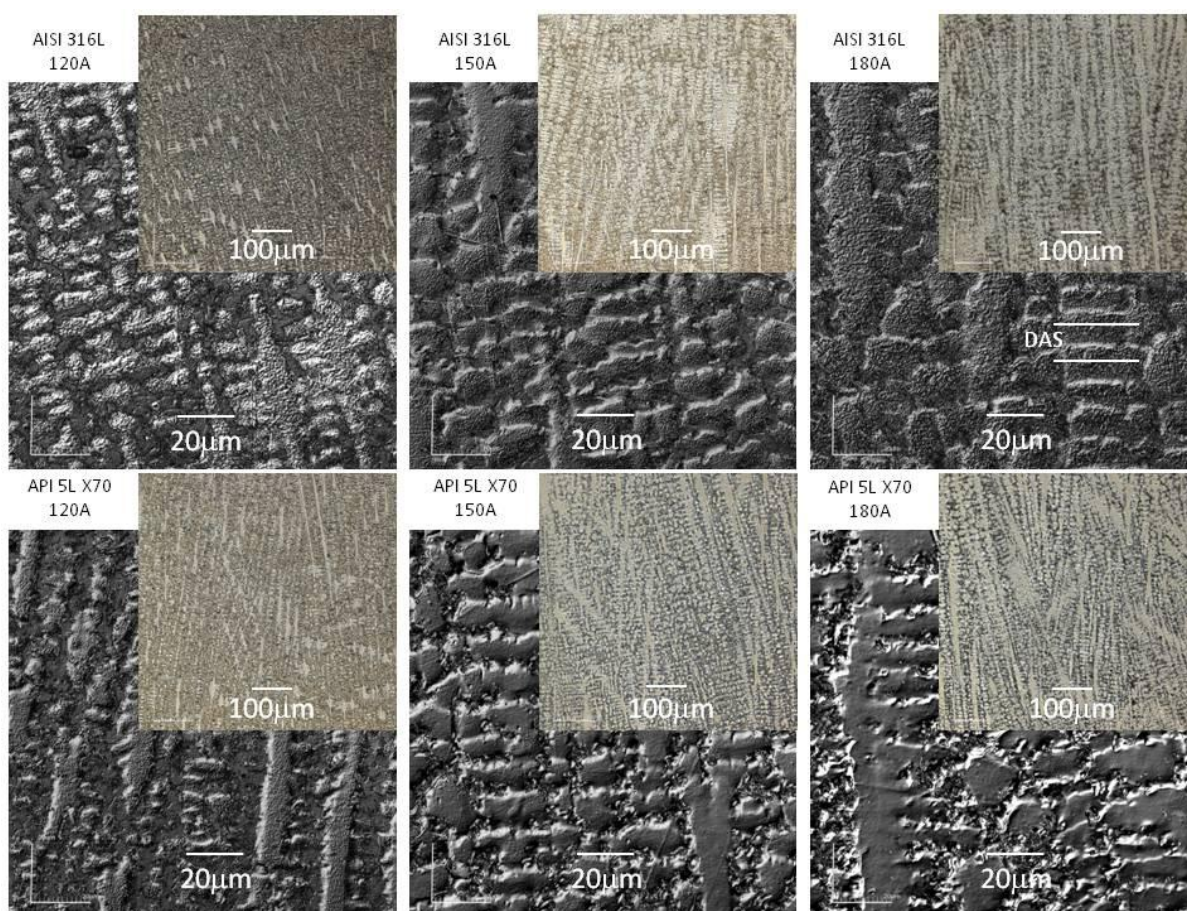


FIGURA 28 – MICROSCOPIA DE LASER CONFOCAL DA LIGA DE NÍQUEL IN625 DEPOSITADOS SOBRE AÇOS AISI 316L E API 5L X70.

Observou-se o aumento do espaçamento de braços dendríticos (DAS) como consequência do aumento na corrente de deposição e, para a mesma corrente de deposição, o revestimento aplicado ao substrato AISI 316L apresentou maior DAS, por consequência da menor condutividade térmica deste substrato. Entretanto, pode-se observar que a corrente de deposição influenciou mais significativamente o grau de refinamento da microestrutura, figura 29.

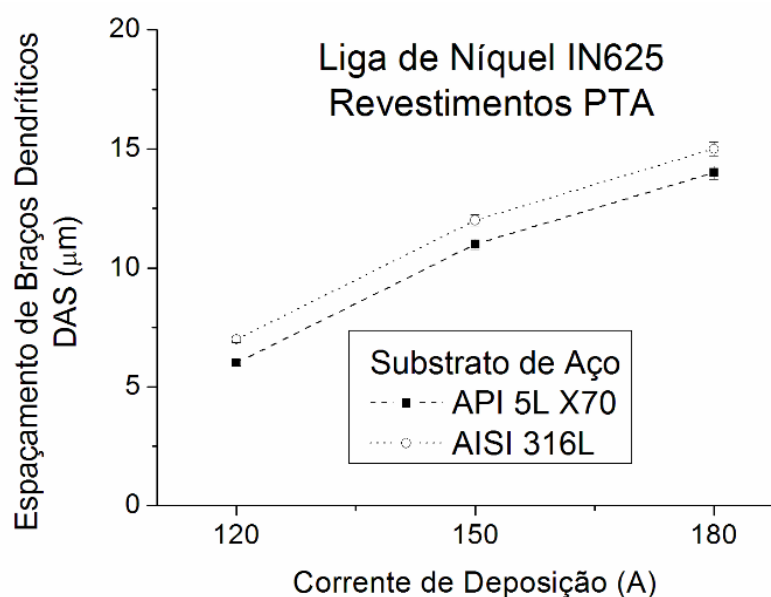


FIGURA 29 – ESPAÇAMENTO DE BRAÇOS DENDRÍTICOS PARA OS REVESTIMENTOS DE LIGA IN 625.

A partir das análises em microscópio eletrônico de varredura com modo de elétrons retroespalhados, verificou-se a formação de carbonetos nas regiões interdendríticas, figura 30. Microestrutura e distribuição de fases similar foi obtida para todas as condições de revestimento estudadas.

A formação de carbonetos nas regiões interdendríticas ocorreu como consequência do teor de carbono da liga depositada (0,10% em peso), do teor de carbono dos substratos (AISI 316L: 0,02% e API 5L X70: 0,17%) e da presença de elementos de liga formadores de carbonetos como: Cromo, Molibdênio e Nióbio. Uma fração de carbonetos de Molibdênio (brancos) entre 1,5 e 2,5% foi determinada para os revestimentos estudados, figura 31. Revestimentos obtidos por PTA para uma liga de elevado teor de Níquel indicaram a formação de carbonetos nas regiões interdendríticas de solidificação, conforme FERNANDES *et al.* (2011).

A partir da comparação dos revestimentos sobre os dois substratos, pode-se observar que a fração de carbonetos de Molibdênio foi similar para a mesma corrente de deposição. Entretanto, os revestimentos depositados sobre aço API 5L X70 apresentaram fração um pouco superior, como consequência do mais elevado teor de carbono deste aço.

Em adição, a maior condutividade térmica do aço Carbono levou à formação de carbonetos mais refinados e mais uniformemente distribuídos. Observou-se ainda que a maior corrente de deposição leva a menor fração de carbonetos, como consequência da maior diluição aos substratos, figuras 30 e 31. Apesar de baixa, a fração de carbonetos foi reduzida em até 60% considerando o efeito do substrato e da corrente de deposição concomitantemente.

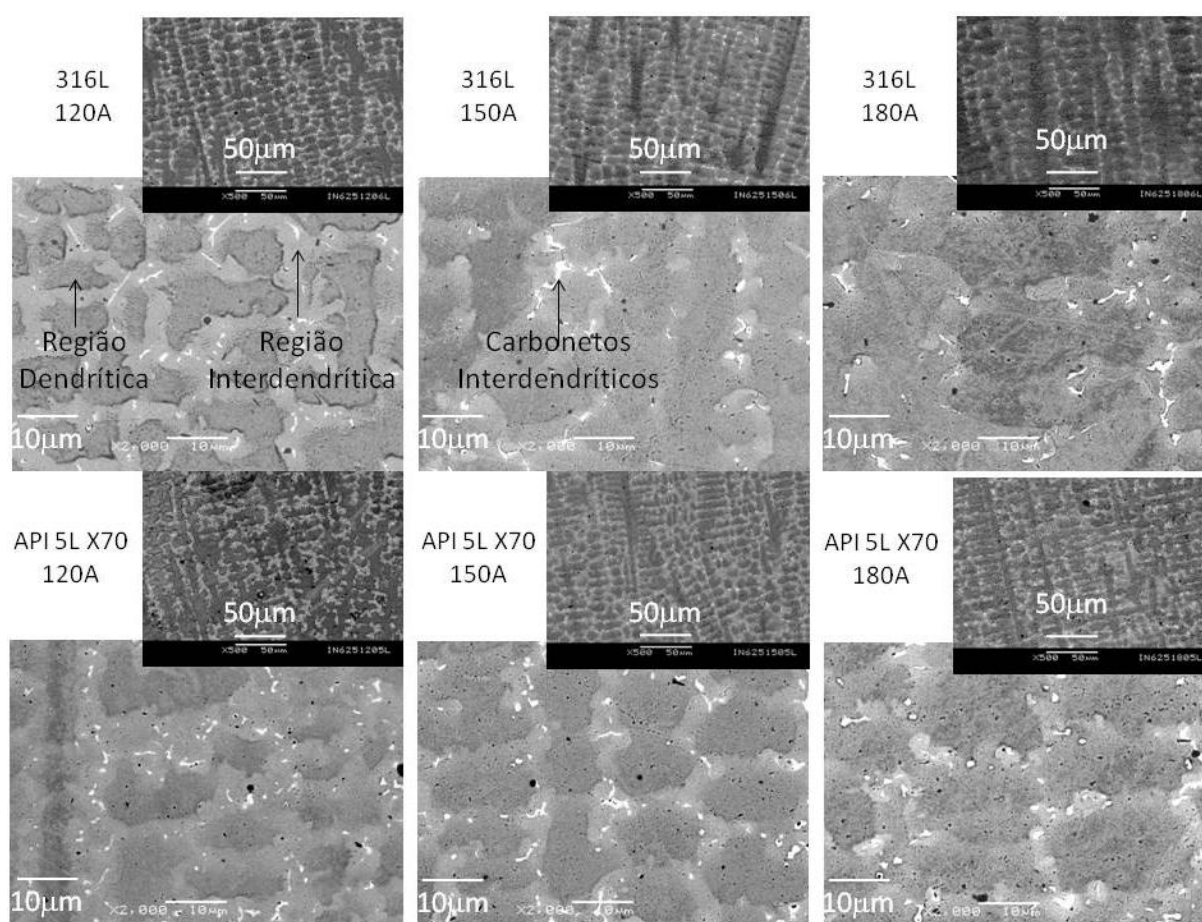


FIGURA 30 – MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA NO MODO ELÉTRONS RETROESPALHADOS PARA OS REVESTIMENTOS DE LIGA DE NÍQUEL IN625 DEPOSITADOS SOBRE AÇOS AISI 316L E API 5L X70.

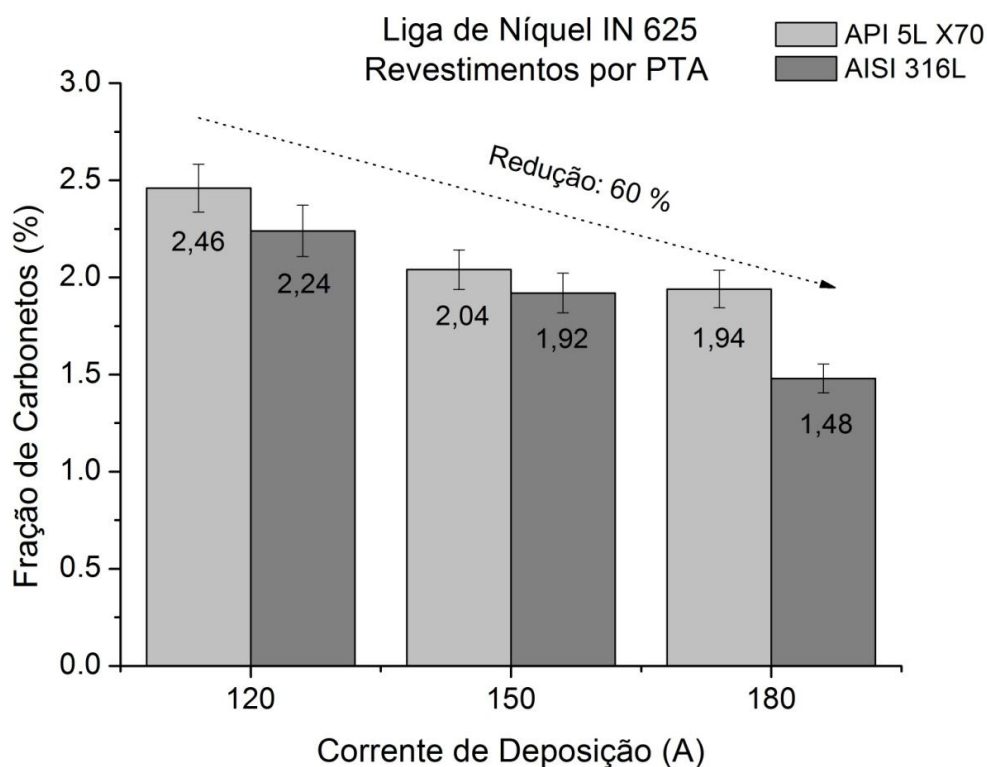
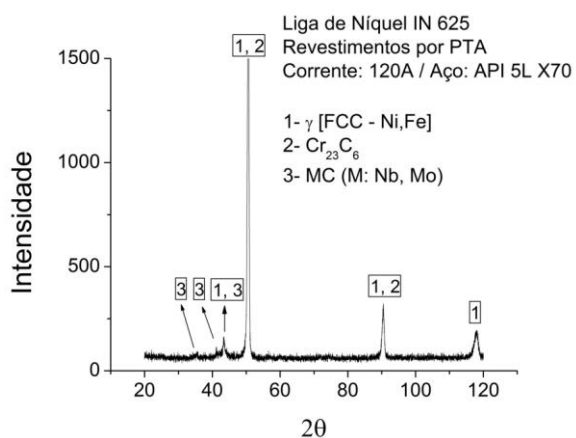


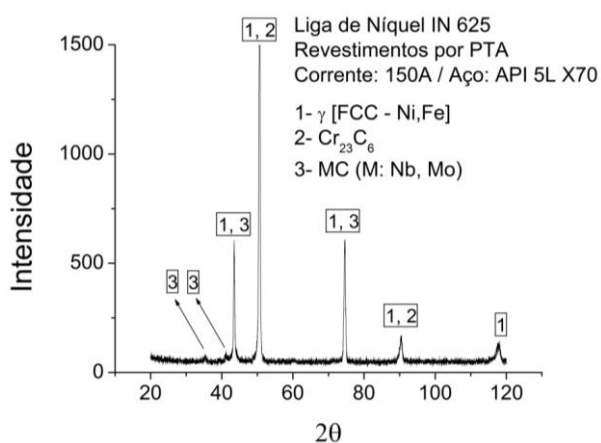
FIGURA 31 – FRAÇÃO DE CARBONETOS INTERDENDRÍTICOS DE MOLIBDÊNIO NOS REVESTIMENTOS.

5.4 FASES FORMADAS NOS REVESTIMENTOS

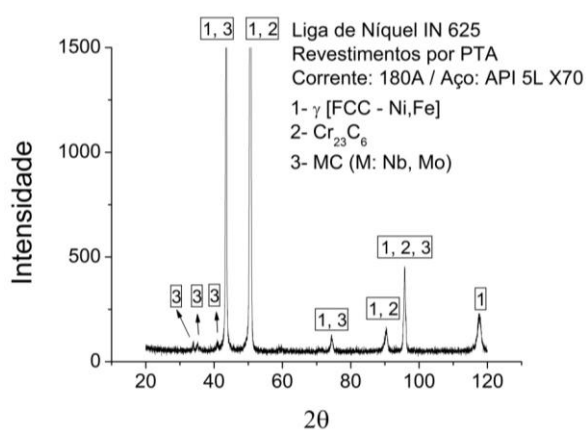
A partir das análises por difração de raios-X, foi possível confirmar a formação das fases γ (Ni-CFC) e região interdendrítica com carbonetos dispersos tipo $M_{23}C_6$ (M: Cromo) e MC (M: Molibdênio e Nióbio), para todas as condições de deposição, figuras 32 (a), (b), (c) e 33 (a), (b), (c). Os resultados mostram coerência com as previsões, que apontam os elementos Cromo, Molibdênio e Nióbio presentes na liga IN 625, como potenciais elementos formadores de carbonetos (ASM HANDBOOK, 1992). Adicionalmente, o Ferro proveniente do aço faz solução sólida substitucional na fase γ (Ni-CFC).



(a) 120A

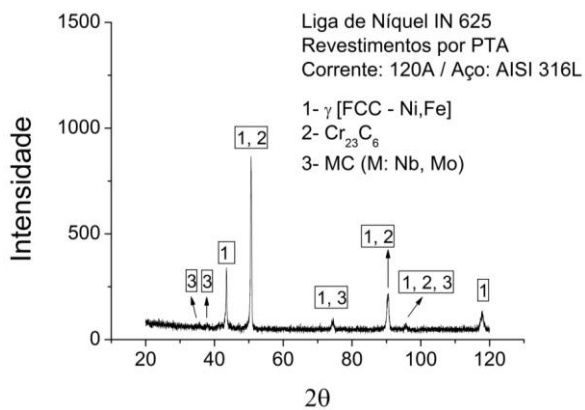


(b) 150A

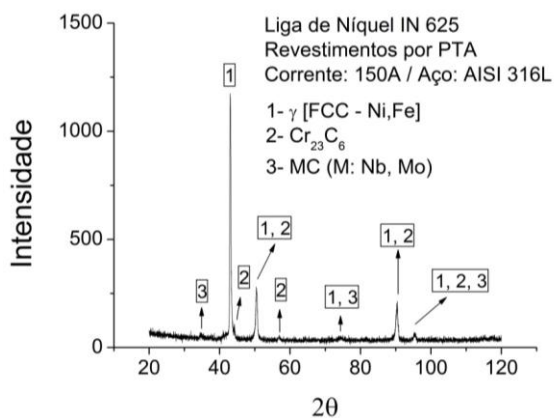


(c) 180A

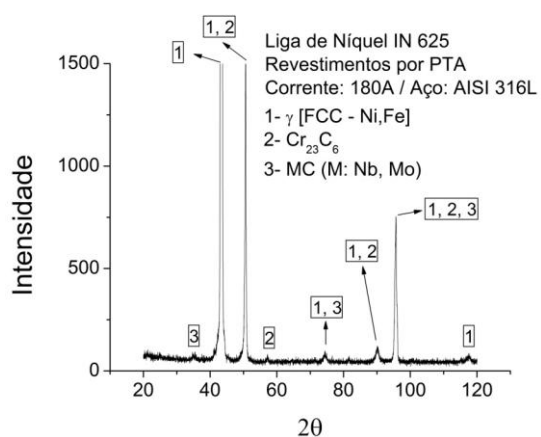
FIGURA 32 – FASES FORMADAS PARA OS REVESTIMENTOS DEPOSITADOS COM CORRENTE DE (a) 120A, (b) 150A E (c) 180 A, SOBRE AÇO API 5L X70.



(a) 120A



(b) 150A



(c) 180A

FIGURA 33 – FASES FORMADAS PARA OS REVESTIMENTOS DEPOSITADOS COM CORRENTE DE (a) 120A, (b) 150A E (c) 180 A, SOBRE AÇO AISI 316L.

Análise química pontual realizada sobre a microestrutura analisada indicou a distribuição similar para o ferro e o cromo nas fases dendrítica e interdendrítica, devendo ser destacada a concentração dos elementos Molibdênio e Nióbio na região interdendrítica, conforme relata a literatura por FERNANDES *et al.* (2011) e HOU *et al.* (2009), tabela 11.

TABELA 11 – PROPORÇÃO DE ELEMENTOS POR EDS NA MICROESTRUTURA (% EM PESO).

IN 625 sobre AISI 316L									
I (A)	Ni	Fe D	Fe ID	Cr D	Cr ID	Nb D	Nb ID	Mo D	Mo ID
120	Bal.	16,73	14,93	21,00	21,54	0,81	2,91	5,22	7,15
150	Bal.	26,98	24,17	20,77	20,48	0,91	3,17	4,64	6,11
180	Bal.	37,39	32,39	20,27	20,50	0,59	1,97	3,94	5,80
IN 625 sobre API 5L X70									
I (A)	Ni	Fe D	Fe ID	Cr D	Cr ID	Nb D	Nb ID	Mo D	Mo ID
120	Bal.	5,78	4,13	20,83	19,72	1,52	6,99	6,28	8,98
150	Bal.	18,53	14,97	19,20	19,45	0,60	4,59	5,64	7,75
180	Bal.	31,43	30,33	15,17	16,82	0,55	4,15	3,38	4,31
M D: onde M é o metal e D indica EDS sobre as dendritas.									
M ID: onde M é o metal e ID indica EDS na região interdendrítica.									

HOU *et al.* (2009) realizaram análise detalhada em revestimentos de ligas de Níquel e apontaram que o decréscimo do teor de Molibdênio, que é consequência da maior diluição, pode alterar a dinâmica de nucleação e/ou a composição da liga, resultando na redução das regiões interdendríticas.

FERNANDES *et al.* (2011) também relatam que o Molibdênio e o Carbono mudam a taxa de nucleação heterogênea durante a solidificação. Estes elementos normalmente segregam para os contornos de grão, retardando o seu crescimento. Portanto, a diluição e o aporte térmico na soldagem (corrente de deposição) ditam o espaçamento dendrítico (DAS) ou grau de refinamento da microestrutura.

É importante destacar ainda que os elementos Ferro e Cromo se distribuem uniformemente na microestrutura dos revestimentos, apresentando pequena diferença quando comparadas as regiões dendrítica e interdendrítica (tabela 11).

Observou-se ainda que, como o aço AISI 316L apresenta 16,78 % (% em peso) de Cromo, o teor deste elemento apresentou menor redução nos revestimentos obtidos. Já os revestimentos sobre aço API 5L X70 mostraram maior redução, já que este substrato não contém Cromo.

5.5 DUREZA DOS REVESTIMENTOS

A dureza média dos revestimentos é apresentada na tabela 12.

TABELA 12 – DUREZA MÉDIA DOS REVESTIMENTOS

CORRENTE DE DEPOSIÇÃO (A)	DUREZA MÉDIA DOS REVESTIMENTOS DE IN 625 (HV)	
	API 5L X70	AISI 316L
120	233	224
150	224	213
180	196	187

Os revestimentos apresentaram dureza uniforme ao longo da espessura, figuras 34 e 35. O aumento da corrente de deposição induziu a redução da dureza dos revestimentos, como consequência da maior diluição e de uma estrutura menos refinada (maior DAS). A maior diluição levou à redução no conteúdo elementos de liga endurecedores por solução sólida e, adicionalmente, levou à redução da fração de carbonetos. Estes fatores interagem conjuntamente e justificam a redução observada.

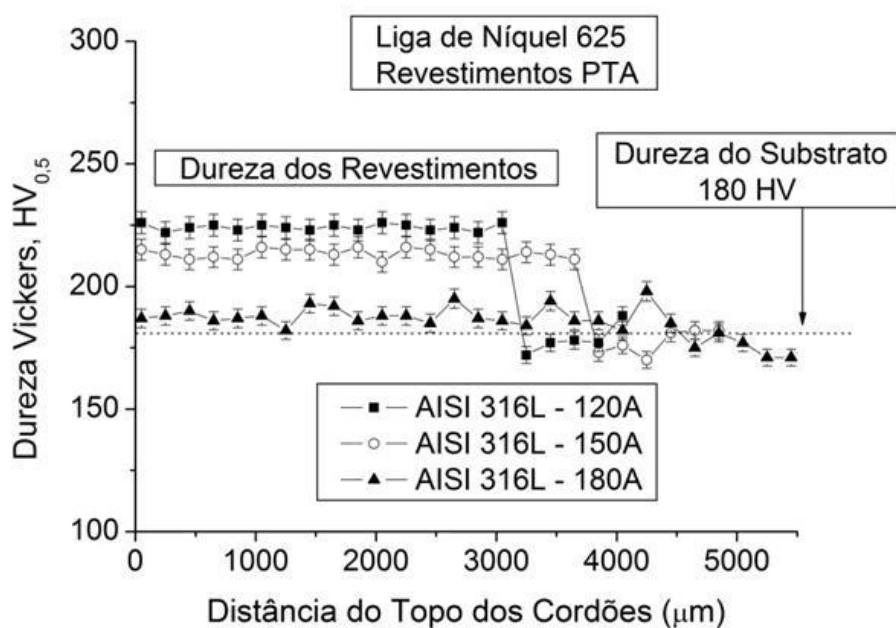


FIGURA 34 – DUREZA DOS REVESTIMENTOS DE LIGA IN 625 SOBRE AÇO AISI 316L.

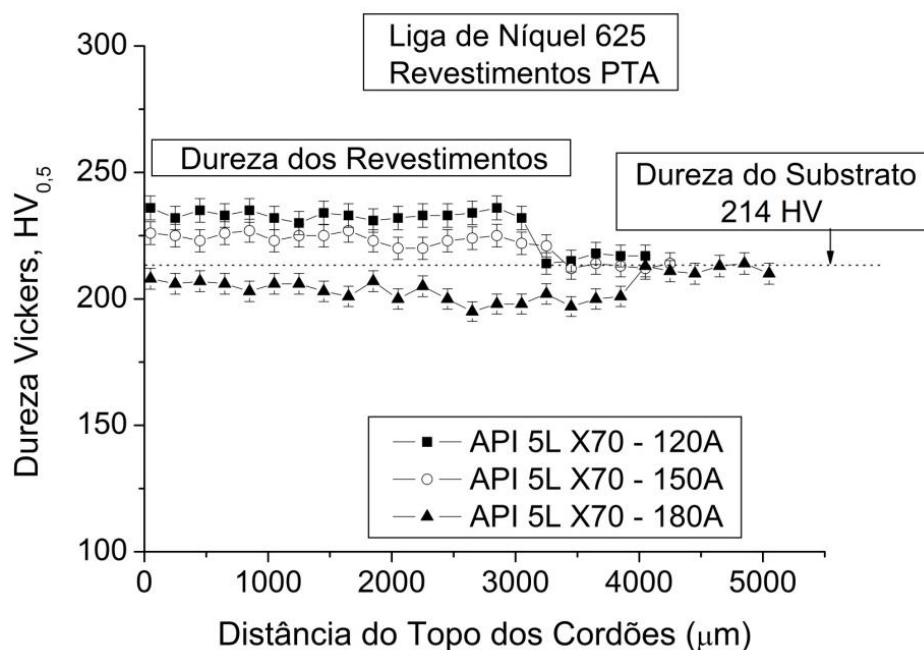


FIGURA 35 – DUREZA DOS REVESTIMENTOS DE LIGA IN 625 SOBRE AÇO API 5L X70.

A dureza superior observada para os revestimentos sobre aço API 5L X70 está relacionada à menor diluição, que induz a um maior teor de elementos em solução sólida (Mo, Nb), maior fração de carbonetos e maior refinamento da microestrutura.

A partir da análise comparativa da dureza média obtida para os revestimentos processados nas diferentes condições, pode-se observar que a corrente de deposição promove a maior redução nesta propriedade, alcançando 17%, figura 36. A deposição sobre diferentes substratos resulta em pequena redução da dureza, entre 4 e 5%, independentemente da corrente. A corrente de deposição influenciou mais significativamente a dureza em decorrência do seu efeito sobre a diluição e fração de carbonetos. O uso do aço inoxidável de baixa condutividade térmica eleva a diluição, o que leva a uma redução extra. A diferença máxima encontrada, considerando os dois efeitos (corrente e substrato) atingiu 20%.

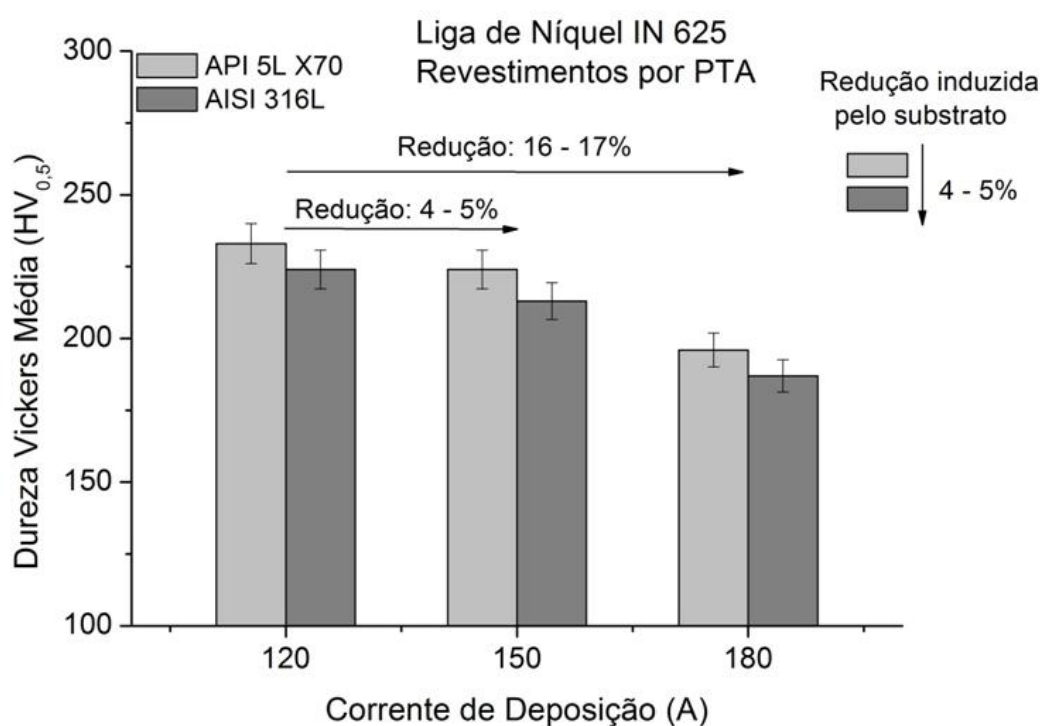


FIGURA 36 – COMPARATIVO DA DUREZA MÉDIA DOS REVESTIMENTOS DE LIGA IN 625.

5.6 ESTUDO DA DILUIÇÃO: FUSÃO EM COQUILHA

Uma amostra de referência foi fundida, tratada termicamente e caracterizada quanto à dureza e fases formadas, a fim de permitir a avaliação do efeito da diluição sobre os revestimentos por PTA.

Análises por difração de raios-X mostraram que as fases formadas não foram afetadas pelo processamento por PTA (corrente de deposição) e pelo substrato revestido, desenvolvendo as fases γ (Ni-CFC) e carbonetos de Cromo $M_{23}C_6$ e M_7C_3 e carbonetos de Molibdênio e Nióbio tipo MC, figura 37 a 39.

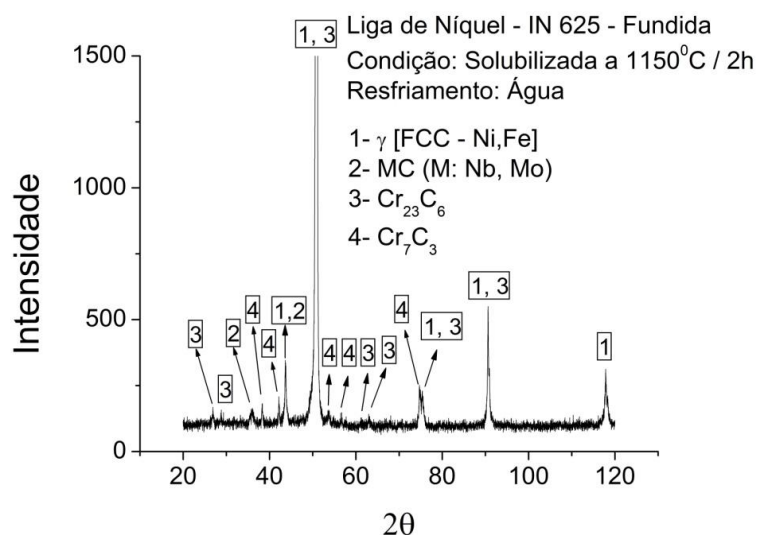


FIGURA 37 – FASES FORMADAS PARA A LIGA IN 625 FUNDIDA EM COQUILHA E SOLUBILIZADA.

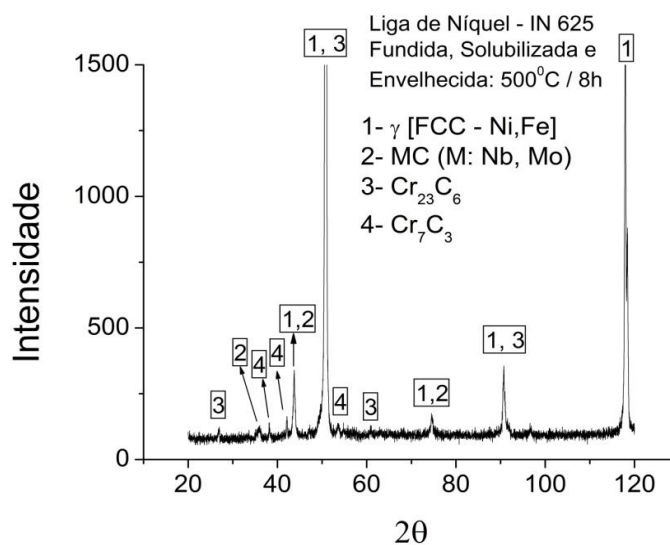


FIGURA 38 – FASES FORMADAS PARA A LIGA IN 625 FUNDIDA EM COQUILHA, SOLUBILIZADA E ENVELHECIDA A 500°C POR 8 H.

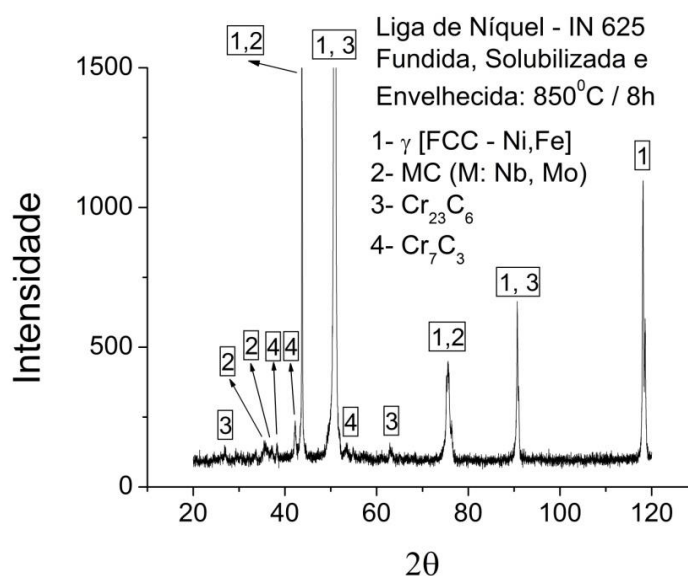


FIGURA 39 – FASES FORMADAS PARA A LIGA IN 625 FUNDIDA EM COQUILHA, SOLUBILIZADA E ENVELHECIDA A 850°C POR 8 H.

É importante destacar a presença do carboneto M_7C_3 de Cromo formado na fusão da liga sem diluição, fase que não está presente nos revestimentos soldados. Este carboneto é uma das fases que pode se formar quando Carbono e Cromo estão presentes. Como é um tipo de carboneto que se forma somente com o elemento Cromo nas superligas de Níquel, a sua formação pode estar relacionada ao maior teor deste elemento encontrado em amostras sem diluição (teor nominal da liga), ASM HANDBOOK (1992).

A dureza nas amostras fundidas e nos revestimentos foi então analisada de forma comparativa. Pode-se verificar que a faixa de dureza dos revestimentos é muito similar à dureza nas amostras fundidas, figura 40.

Os revestimentos depositados sobre aço API 5L X70 apresentaram dureza pouco superior na condição depositada com 120 A de corrente. Isto se deve ao maior refinamento da microestrutura decorrente da elevada taxa de resfriamento na soldagem e da menor diluição (5%). Desta forma, o efeito deletério da diluição, que normalmente leva à redução na dureza, é minimizado e ainda ocorre um grande refinamento da microestrutura nestes revestimentos soldados.

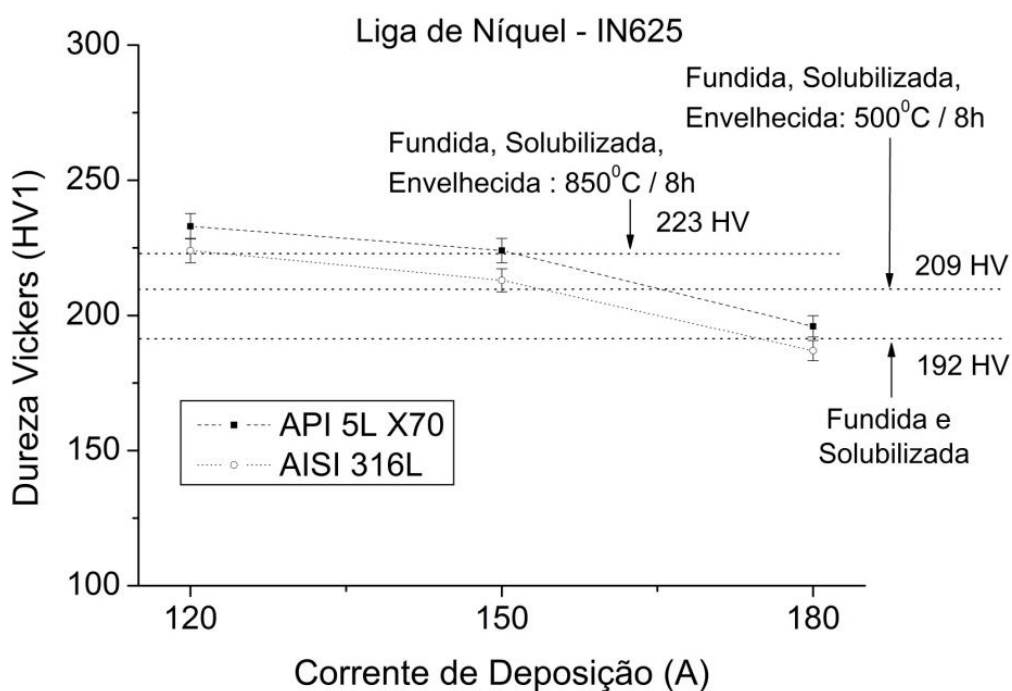


FIGURA 40 – COMPARATIVO DA DUREZA VICKERS DESENVOLVIDA PARA AS AMOSTRAS SEM DILUIÇÃO TRATADAS TERMICAMENTE E PARA OS REVESTIMENTOS.

5.7 AVALIAÇÃO COMPARATIVA DO DESEMPENHO EM DESGASTE

Ensaio de desgaste abrasivo por deslizamento foram realizados nas diferentes condições de deposição, a fim de avaliar comparativamente o desempenho. Os revestimentos de liga IN 625 não são revestimentos de elevada resistência ao desgaste, o que faz a maior parte dos trabalhos de pesquisa estudar a resistência à corrosão e outras propriedades diferentes do desgaste.

Por esta razão, decidiu-se avaliar de forma comparativa a resposta destes revestimentos ao desgaste por deslizamento. Adicionalmente, conforme a equação de Holm-Archard (RABINOWICZ, 1995), a taxa de desgaste é inversamente proporcional à dureza para ligas metálicas. Desta forma, uma vez que dureza foi reduzida em até 20 %, espera-se a redução proporcional do desempenho em desgaste.

Os revestimentos apresentaram uma relação linear entre a perda de massa e a distância de deslizamento, permitindo a fácil estimativa da taxa ou coeficiente de perda de massa, figuras 41 e 42.

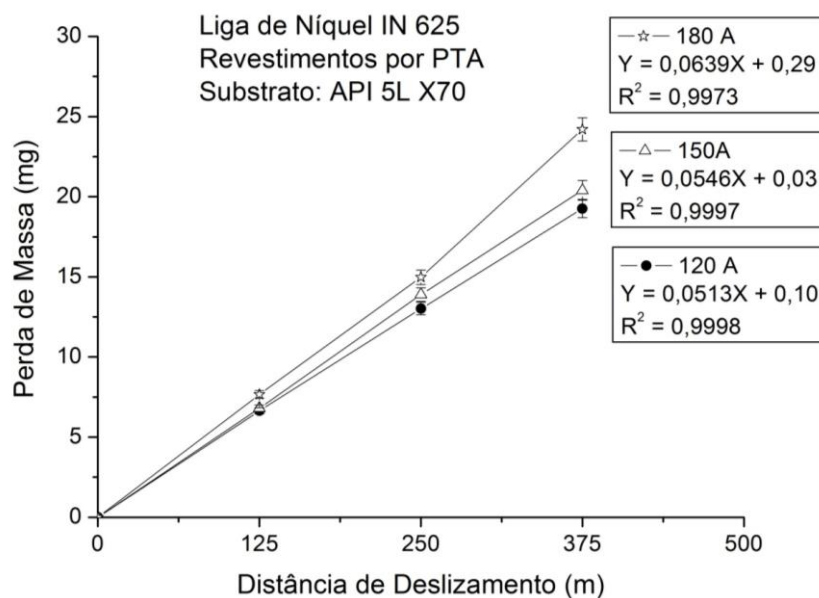


FIGURA 41 – CURVAS DE DESGASTE OBTIDAS PARA OS REVESTIMENTOS DE LIGA IN 625
SORE API 5L X70.

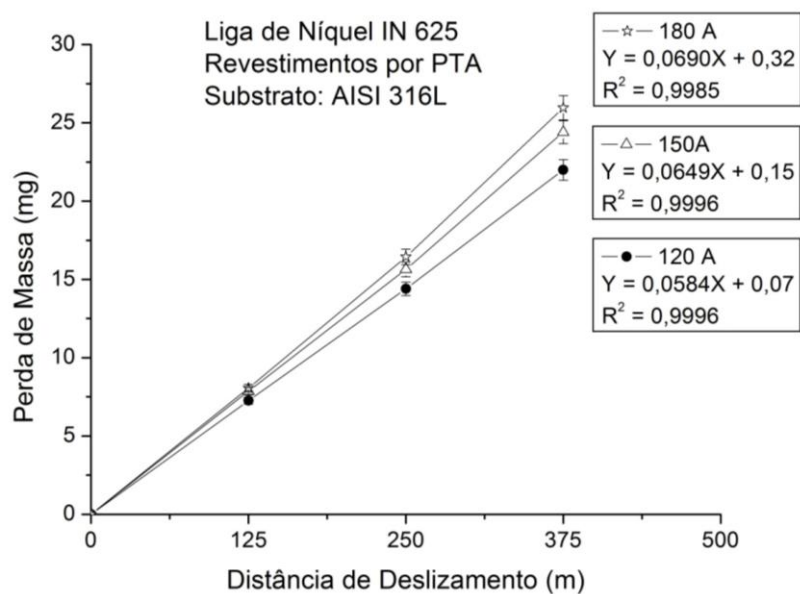


FIGURA 42 – CURVAS DE DESGASTE OBTIDAS PARA OS REVESTIMENTOS DE LIGA IN 625
SORE AISI 316L.

Os revestimentos apresentaram aumento da taxa de perda de massa com o aumento da corrente de deposição, figuras 43 e 44. O incremento verificado para a taxa de perda de massa mostrou correlação com o observado para a dureza. Assim, à medida que a corrente aumentou e a dureza foi reduzida, a taxa de perda de massa aumentou, alcançando até 24,2 %.

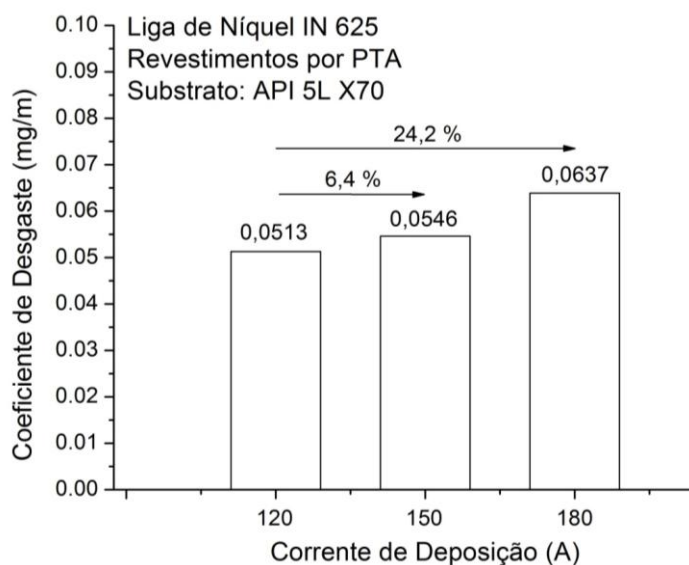


FIGURA 43 – CURVAS DE DESGASTE OBTIDAS PARA OS REVESTIMENTOS DE LIGA IN 625 SORE API 5L X70.

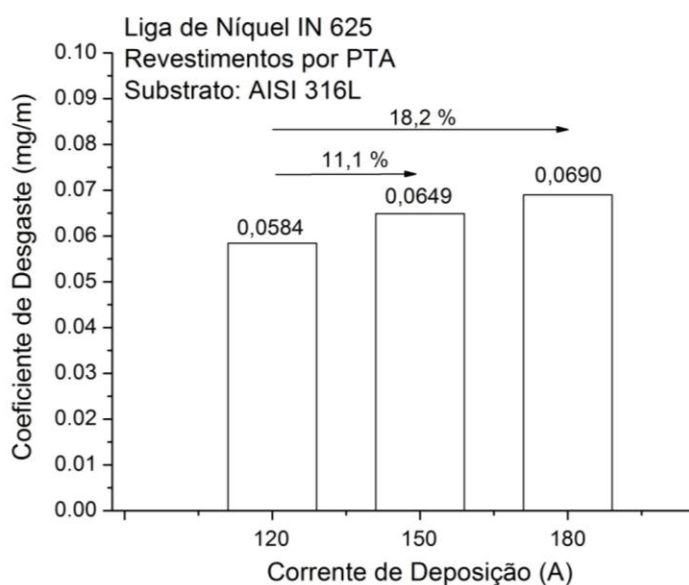


FIGURA 44 – CURVAS DE DESGASTE OBTIDAS PARA OS REVESTIMENTOS DE LIGA IN 625 SORE AISI 316.

A partir da análise do efeito da corrente e do substrato sobre o desempenho em desgaste dos revestimentos pode-se observar que, ao contrário da dureza na qual a corrente apresentou efeito mais significativo, o desgaste mostrou influência importante de ambos, corrente de deposição e substrato, figura 45.

Os revestimentos sobre AISI 316L apresentaram maior taxa de perda de massa, e o incremento em relação aos revestimentos depositados sobre aço API 5L X70 alcançou 19 %. A diferença está associada à menor condutividade térmica do aço, que promove a maior diluição, microestrutura menos refinada e diferente tamanho e distribuição de carbonetos formados. A diferença de desempenho entre a melhor e a pior condição atingiu 34%.

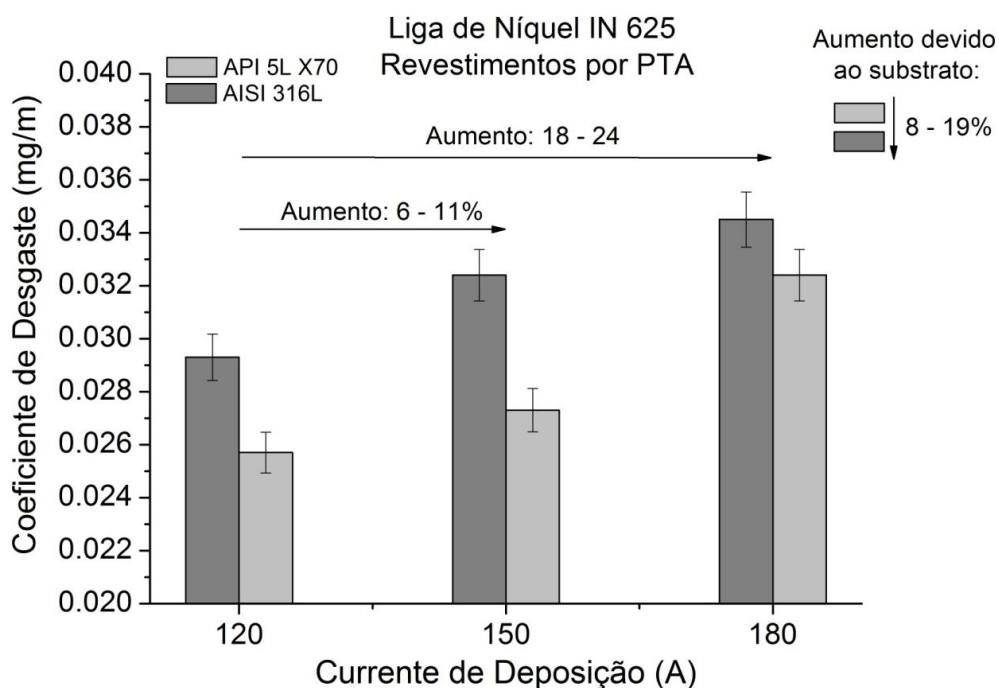


FIGURA 45 – COMPARATIVO DO EFEITO DA CORRENTE E DO SUBSTRATO SOBRE OS COEFICIENTES DE DESGASTE DOS REVESTIMENTOS DE LIGA IN 615.

As avaliações em desgaste mostraram que o desempenho dos revestimentos não depende unicamente da dureza. Fatores ligados à microestrutura como grau de refino, que por sua vez afeta a distribuição de carbonetos, altera a taxa de perda de massa. Isto destaca a importância deste tipo de avaliação mesmo para revestimentos menos resistentes ao desgaste como a liga de Níquel IN 625.

6 CONCLUSÃO

Considerando a proposta deste trabalho de pesquisa, para o estudo do efeito da corrente e do substrato sobre as características e propriedades de revestimentos da liga de Níquel IN 625 por PTA, pode-se concluir que:

- Revestimentos livres de defeitos de soldagem podem ser obtidos para as correntes avaliadas, independentemente do substrato utilizado. Cordões com maior largura e menor ângulo de molhamento, os quais são mais adequados ao processamento de áreas revestidas, foram obtidos para maiores correntes de deposição sobre o aço AISI 316L.

- A diluição apresentou relação linear e crescente com a corrente de deposição. Maior diluição foi obtida para os revestimentos IN 625 sobre aço AISI 316L, em decorrência da menor condutividade térmica deste substrato.

- A composição química do substrato influenciou as características dos revestimentos por meio da diluição. Uma maior diluição resulta em menor dureza, para os dois substratos, como consequência do menor conteúdo de soluções sólidas e menor fração de carbonetos.

- O presente estudo permite concluir que a corrente de deposição e o substrato afetam a dureza dos revestimentos, sendo a corrente o fator mais significativo. Isto decorre do efeito sobre três fatores concomitantemente: soluções sólidas, grau de refinamento (DAS) e fração de carbonetos.

- A maior dureza dos revestimentos sobre aço API 5L X70 foi resultado da menor diluição, maior refino da microestrutura e maior fração e uniformidade de distribuição dos carbonetos.

- Apesar das mudanças de composição química observadas nos revestimentos a partir das avaliações de teor de ferro e EDS, a produção de amostras com diluição zero permitiu mostrar que os revestimentos desenvolvem fases e dureza similares à da liga sem diluição.

- O comportamento em desgaste dos revestimentos é afetado significativamente pela corrente de deposição (que dita a interação com o substrato – diluição) e pelo tipo de substrato. Ao contrário da dureza, o desgaste apresenta dependência importante destes dois fatores os quais, somados, podem induzir diferenças de até 34 % sobre o desempenho dos revestimentos.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Considerando os avanços obtidos a partir da realização deste trabalho de mestrado e das importantes informações a respeito do efeito do processamento sobre a microestrutura e propriedades dos revestimentos de liga de Níquel IN 625 por PTA sobre diferentes substratos, apontam-se algumas sugestões de continuidade, conforme segue:

- Importantes informações sobre a geometria dos cordões foram mapeadas e servirão de base para o desenvolvimento e para a produção de revestimentos de área em componentes com a liga IN 625.

- Medidas do teor de ferro médio dos revestimentos indicaram uma relação linear e direta com a corrente de deposição. Sugere-se a avaliação do efeito do teor de ferro sobre a resistência à corrosão destes revestimentos a partir do levantamento das curvas de voltametria cíclica.

- Uma vez que a deposição por PTA da liga de Níquel IN 625 sobre os aços AISI 316L e API 5L X70 indicou excelente facilidade de processamento, poderão ser realizados estudos de adição de elementos endurecedores por solução sólida ou de elementos formadores de carbonetos ou intermetálicos para elevar a resistência ao desgaste de revestimentos.

- Os revestimentos de liga IN 625 poderão ser avaliados quanto à sua estabilidade em elevada temperatura, visando aplicações específicas para turbinas, componentes de fornos industriais, etc.

- Os revestimentos estudados poderão ser avaliados quanto a processos de falha relacionados à operação de unidades de produção de petróleo. Nestes, algumas vezes estão sujeitos a corrosão sob-tensão, corrosão-fadiga, etc.

- Outro aspecto importante do processamento de áreas está relacionado à usinabilidade destes revestimentos. Assim, estudos poderão ser realizados para avaliar os esforços de usinagem, acabamento ou retífica dos revestimentos por PTA.

- Um importante estudo deve ser iniciado, a fim de avaliar a influência da sobreposição de cordões sobre as características microestruturais obtidas durante a fabricação de componentes revestidos.

- Avaliação do efeito da taxa de resfriamento sobre a microestrutura e propriedades dos revestimentos, já que esta característica não foi avaliada.

A condução de avaliações nas condições críticas de produção de petróleo, especialmente em corrosão, corrosão-fadiga e corrosão sob-tensão, permitiria compreender melhor a relação entre a diluição e interação com o substrato e o desempenho dos revestimentos.

REFERÊNCIAS

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. **API SPECIFICATION 5LD. Specification for CRA Clad or Lined Steel Pipe**. 3^o edition. API Publishing Services. EUA, 2005.

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. **API SPECIFICATION 5L. Specification for Line Pipe**. 4^o edition. API Publishing Services. EUA, 2004.

ASM HANDBOOK, **Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials**, Volume 02, p. 1363 – 1403, ASM International, 1992.

BAPTISTA, C. **Medidas de Dureza**. Apostila de disciplina: Ensaios de Materiais. São Paulo: USP, 2011.

BOND, D., OKIMOTO, P. C., D'OLIVEIRA, A. S. C. M. **Efeito da Intensidade de Corrente nas Características de Revestimentos Soldados com Material de Adição Atomizado**. In: III COBEF, Joinville, 2005

BRACARENSE, A. Q. **Soldagem a Plasma – PAW**. Apostila de disciplina: Processo de Soldagem. Belo Horizonte: UFMG, 2000.

BRAGATTO JUNIOR, L. C. Resistência ao desgaste microabrasivo de revestimentos de superligas a base de Níquel depositados por soldagem TIG com alimentação de arame a frio. Trabalho de conclusão de curso. Vitória: UFES, 2014.

BRANDI, S. D.; WAINER, E.; MELLO, F. D. H. **Soldagem – Processos e Metalurgia**. Editora Edgard Blücher. São Paulo, 1992.

BRASIL, MME, EPE. **Plano Decenal de Expansão de Energia 2022**. Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética. Brasília: MME/EPE2013.

BREITENBACH, J. O. **Avaliação da Influência do Entalhe em Corpos de Prova Ensaçados a Baixa Taxa de Deformação em Meio Etanol**. Dissertação de Mestrado. Porto Alegre: UFRGS, 2012.

BRUNETTI, C. **Intermetálicos NiAl processados *in-situ* por plasma arco transferido: efeito da diluição nas propriedades mecânicas e no comportamento tribológico**. Tese de Doutorado. Curitiba: UFPR, 2012.

CAMERON VALVES. **Expertise Valves**. Disponível em: <http://www.c-a-m.com/Forms/Resource.aspx?ResourceID=b3921e5f-825c-4ace-9698-b41838c1d>. Acesso em: maio 2014.

DEUIS, R.L., YELLUP, J. M., SUBRAMANIAN, C. **Metal-matrix composite coatings by PTA surfacing**. Composites Science and Technology, v.58, n. 2, p. 299-309, 1998.

DÍAZ, V. V.; DUTRA, J. C.; D'OLIVEIRA, A. S. C. M. **Uma contribuição ao processo de soldagem plasma de arco transferido com adição de pó (PTA) para posições forçadas.** In: XXXV CONSOLDA, Piracicaba, 2009.

EUTECTIC Corporation. **Catálogo Geral de Aspersão Térmica Metalização.** 2º Ed. disponível em: http://www.eutectic.com.br/catalogos/catalogo_aspersao_termica.pdf. Acesso em: setembro 2014.

FERNANDES, F., LOPES, B., CAVALEIRO, A., RAMALHO, A. LOUREIRO, A. **Effect of arc current on microstructure and wear characteristics of a Ni-based coating deposited by PTA on gray cast iron.** Surface and Coatings Technology. v.205, p.4094–4106, 2011.

FERNANDES, F., CAVALEIRO, A., LOUREIRO, A. **Oxidation behavior of Ni-based coatings deposited by PTA on gray cast iron.** Surface and Coatings Technology. v.207, p.196–203, 2012.

FGV PROJETOS, **O Mercado do Petróleo: Oferta, Refino e Preço.** Publicação: Estudos e Pesquisas. Fundação Getúlio Vargas, edição nº 15, 2012.

FOLTRAN, B. de B. **Comparação dos revestimentos de superligas à base de Cobalto (Co-Cr-W-C) depositados por eletrodo revestido, plasma por arco transferido e laser.** Dissertação de Mestrado. Curitiba: UFPR, 2000.

GARCIA, A. **Solidificação: Fundamentos e Aplicações.** Ed. da Universidade Estadual de Campinas – Unicamp. Campinas, 2001.

GATTO, A.; BASSOLI, E.; FORNARI, M. **Plasma Transferred Arc deposition of powdered high performances alloys: process parameters optimisation as a function of alloy and geometrical configuration.** Surface and Coatings Technology. v.187, p. 265–271, 2004.

GIMENES Jr., L. **Soldagem a Plasma.** Infosolda 2003 , disponível em: <http://www.infosolda.com.br/artigos/processos-de-soldagem/417-solda-a-plasma>. Acesso em: fevereiro 2014.

GRAF, K. **Estabilidade a Alta Temperatura de Revestimentos de Hastelloy C depositados por PTA.** Dissertação de Mestrado. Curitiba: UFPR, 2004

GRAF, K. **Desenvolvimento de Revestimentos NbAl por PTA.** Tese de Doutorado. Curitiba: UFPR, 2009.

GUOQING, C.; XUESONG, F.; YANHUI, W.; SHAN, L.; WENLONG, Z.; **Microstructure and wear properties of nickel-based surfacing deposited by plasma transferred arc welding.** Surface and Coatings Technology. v.228, p.276–282, 2013.

HAZELTINE, R.D.; WAELBROECK, F.L.. **The Framework of Plasma Physics**. Ed. Westview Press. EUA, 2004.

HOU, Q. Y., HUANG, Z. Y., SHI, N., GAO, J. S. **Effects of molybdenum on the microstructure and wear resistance of nickel-based hardfacing alloys investigated using Rietveld method**. Journal of Materials Processing Technology. v.209, p.2767–2772, 2009.

KEJELIN, N. Z., BUSHINELLI, A. J. A., BOHÓRQUEZ, C. H. N. **Soldagem Dissimilar do aço X-60 com INCONEL 625**. Disponível em: http://www.labsolda.ufsc.br/noticias/2007/soldagem_dissimilar.pdf. Acesso em: outubro 2013.

KESAVAN, D., KAMARAJ, M. **Influence of aging treatment on microstructure, wear and corrosion behavior of a nickel base hardfaced coating**. Wear. v.272, p.7–17, 2011.

KOU, S. **Welding Metallurgy**. Second edition. Ed. John Wiley & Sons: EUA, 2002.

KUWABARA, E. Y., GRAF, K.; D'OLIVEIRA, A. S. C. M. **Revestimentos de Ni reforçados por WC depositados por PTA**. In: II COBEF, Uberlândia, 2003.

MARCONI, M. I. **Riporti duri com polveri saldate com il processo P.T.A. (Plasma ad Arc Trasferito)**. Livro online, 2002. Disponível em www.plasmateam.com. Acesso em: maio 2014.

PETROBRAS. **Química Aplicada – Corrosão**. Apostila do curso de formação de operadores de Refinaria. Curitiba: UNICEMP, 2002.

RABINOWICZ, E. **Friction and wear of materials**, 1995. Second edition. Ed. John Willey and Sons. EUA, 1995.

REALUM. **Boletim INCONEL 625**. Disponível em <http://www.realum.com.br/inconel2.php>. Acesso em: junho 2014.

REINALDO, P. R. **Influência dos parâmetros de processamento por PTA e do substrato, na resistência ao desgaste de um revestimento a base de Ni**. Dissertação de Mestrado. Curitiba: UFPR, 2008.

REIS, B. P. **Influência da Estrutura de Solidificação nas Condições de Solubilização da Liga Al-4,0%Cu**. Dissertação de Mestrado. Porto Alegre: PUCRS, 2009.

RIBEIRO, H. O. **Desenvolvimento de ligas para revestimentos por PTA resistentes à cavitação**. Tese de Doutorado. Florianópolis: UFSC, 2007.

RODRIGUES, M. A. **Análise dos desgastes de ferramentas de metal duro revestidas no fresamento da liga a base de níquel – Inconel 625 – depositada em forma de revestimento metálico**. In: IV COBEF, São Pedro, 2007.

ROSA, Daniel M. **Caracterização da Microestrutura Dendrítica na Solidificação Vertical Descendente de Ligas Al-Cu**. Dissertação de Mestrado. Campinas: UNICAMP, 2004.

SAE J405 Standard. Chemical Compositions of SAE Wrought Stainless Steels, 1998.

SALVINO, I. M.; FERREIRA, A.F.; RIBEIRO, C.N. **Simulação da Transição Colunar-Equiaxial na Solidificação de Ligas Binárias Al-Si**. In: COBEF, Itatiaia, 2013.

SANTOS, R. L. C. **Deposição por plasma de arco transferido com corrente contínua pulsada**. Dissertação de Mestrado. Curitiba: UFPR, 2003.

SERRA, F. A. S. **Uso do aço inoxidável na área Offshore – Petrobrás**. In: I FEINOX, São Paulo, 2010.

SILVA, R. H. G.; DUTRA, J. C. **Processo PTA-P – Uma revisão da Literatura como base para inovações. Parte 1 de 2: Elementos Construtivos**. Revista Soldagem & Inspeção. São Paulo/SP, v. 17, n. 1, p. 076-085, Jan/Fev 2012.

SILVA, R. H. G.; DUTRA, J. C. **Processo PTA-P – Uma revisão da Literatura como base para inovações. Parte 2 de 2: Comportamento Térmico e Cinemático do Pó, Parâmetros e Consumíveis do Processo**. Revista Soldagem & Inspeção. São Paulo/SP, v. 17, n. 2, p. 173-183, Abr/Jun 2012.

SILVA, R. H. G.; **Inovações em equipamentos e em parametrização no processo de revestimento por plasma-pó (PTA-P)**. Tese de Doutorado. Florianópolis: UFSC, 2010.

SPECIAL METALS. **Technical bulletin INCONEL® alloy 625**, disponível em: <http://www.specialmetals.com/documents/Inconel%20alloy%20625.pdf>. Acesso em: março 2014.

STURROCK, P. A. **Plasma Physics: An Introduction to the Theory of Astrophysical, Geophysical & Laboratory Plasmas**. Ed. Cambridge University Press. Inglaterra, 1994.

TOTTEN, G. E. **Steel Heat Treatment Handbook**. Second edition. Ed. Taylor & Francis. EUA, 2006.

TORRES, R. N.; **Efeitos do Tratamento Criogênico e da Nitretação a Plasma no Coeficiente de Desgaste Abrasivo da Armadura de Pressão de Tubos Flexíveis para Petróleo**. Dissertação de Mestrado. Brasília: UNB, 2013.

UFPR. **Teses, dissertações, monografias e outros trabalhos acadêmicos: normas para apresentação de documentos científicos 2**. Curitiba: Editora UFPR, 2007.

WOLFART JUNIOR, M. **Nitreção a Plasma do Aço ABNT 316L em Baixas Temperaturas**. Tese de Doutorado. Porto Alegre: UFRGS, 2002.

APÊNDICE A

Os resultados obtidos neste estudo foram parcialmente divulgados através de trabalhos técnicos apresentados em congresso e periódico da área, conforme segue:

Microstructure and Properties of Ni-Based 625 Alloy Coatings by Plasma Transferred Arc (PTA) on Different Steel Substrate.

Tiago Jose Antoszczyszyn, Rodrigo Metz Gabriel Paes, Ana Sofia Clímaco Monteiro D'Oliveira, Adriano Scheid.

XXXIX Congresso Nacional de Soldagem, 2013, Curitiba. XXXIX CONSOLDA, 2013.

Impact of dilution on the Microstructure and Properties of Ni-Based 625 Alloy Coatings.

Tiago Jose Antoszczyszyn, Rodrigo Metz Gabriel Paes, Ana Sofia Clímaco Monteiro D'Oliveira and Adriano Scheid.

Revista Soldagem & Inspeção (Impresso), v. 19, p. 134-144, 2014.

DOI: 10.1590/0104-9224/SI1902.05