

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANA

LUCIANO DA SILVA FERREIRA

**MICROESTRUTURA E PROPRIEDADES DE REVESTIMENTOS DE LIGA
HASTELLOY C276 (NiCrMoW) OBTIDOS POR PLASMA COM ARCO
TRANSFERIDO SOBRE AÇOS API 5L E AISI 316L**

**CURITIBA
2014**

LUCIANO DA SILVA FERREIRA

MICROESTRUTURA E PROPRIEDADES DE REVESTIMENTOS DE LIGA
HASTELLOY C276 (NiCrMoW) OBTIDOS POR PLASMA COM ARCO
TRANSFERIDO SOBRE AÇOS API 5L E AISI 316L

Dissertação apresentada como requisito para obter o título de Mestre em Engenharia Mecânica do Curso de Mestrado em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Paraná, na Área de Concentração Manufatura.

Orientador: Prof. Dr. Adriano Scheid

CURITIBA
2014

Ferreira, Luciano da Silva

Microestrutura e propriedades de revestimentos de liga hastelloy C276 (NiCrMow) obtidos por plasma com arco transferido sobre aços API 5L e AISI 316L / Luciano da Silva Ferreira. – Curitiba, 2014.
77 f. : il.; grafs., tabs.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica:

Orientador: Adriano Scheid

Bibliografia: p.73-77

1. Ligas (Metalurgia). 2. Aquecimento do plasma. 3. Revestimentos.
I. Scheid, Adriano. II. Título.

CDD: 620.11

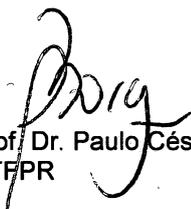
TERMO DE APROVAÇÃO

LUCIANO DA SILVA FERREIRA

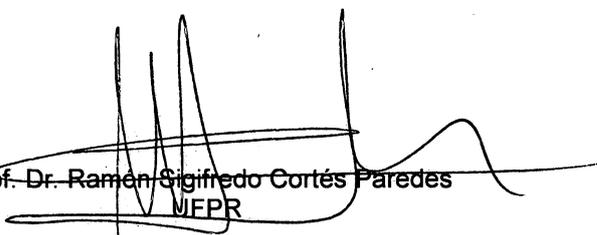
MICROESTRUTURA E PROPRIEDADES DE REVESTIMENTOS DE LIGA
HASTELLOY C276 POR PTA

Dissertação aprovada como requisito parcial à obtenção de grau de Mestre em Engenharia Mecânica, área de concentração Manufatura, no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná.

Banca Examinadora:


Prof. Dr. Paulo César Borges
UTFPR


Prof.^a Dr.^a Karin Graf
UFPR


Prof. Dr. Ramén Sigifredo Cortés Paredes
UFPR

Curitiba, 15 de dezembro de 2014.

DEDICATÓRIA

*Dedico esse trabalho
à minha filha Cecília.*

AGRADECIMENTO

A Deus, por ter me dado forças e ânimo para a realização desse trabalho.

Ao meu orientador, Professor Doutor Adriano Scheid braço amigo de todas as etapas deste trabalho pela sua atenção e dedicação.

A minha família, que sempre acreditou e me apoiou.

Aos meus amigos, que sempre me apoiaram e proporcionaram momentos de distração.

Aos meus companheiros de mestrado, professores e funcionários, que contribuíram de forma direta ou indireta na conclusão desse trabalho.

À Fundação Araucária, por investir financeiramente no meu trabalho, provendo material e equipamentos para a realização experimental.

A empresa Solve Indústria Mecânica, pelos serviços prestados e apoio técnico.

“Seja a mudança que você
quer ver no mundo!”

Mahatma Ghandi

RESUMO

Ligas de Níquel do tipo C276 são usadas para proteger componentes de equipamentos como turbinas aeronáuticas ou de geração de energia e refinarias de petróleo, especialmente devido a associação de tenacidade boa e elevada resistência à corrosão. Desempenho promissor tem sido relatado para o processamento de revestimentos pela técnica de plasma com arco transferido (PTA). Para o sistema de ligas NiCrMoW, a liga comercial conhecida como Hastelloy C276, apresenta desafio para o processamento, particularmente quando processos de soldagem estão envolvidos e, em consequência, os depósitos estão sujeitos a diferentes parâmetros de processamento e interação com o substrato. As condições de soldagem, características dos cordões produzidos, bem como a influência do substrato a ser revestido (por meio da sua diluição) demanda estudos para este sistema de ligas, especialmente para entender a influência sobre a microestrutura e propriedades. Desta forma, o objetivo deste trabalho foi o de avaliar revestimentos da liga Hastelloy C276, processados por PTA sobre substratos de aço inoxidável AISI 316L e ao carbono API 5L X70, para três diferentes níveis de corrente de deposição: 120, 150 e 180 A. A caracterização dos revestimentos foi realizada por microscopia óptica e eletrônica de varredura, difração de raios-X e dureza Vickers. Os revestimentos foram também avaliados quanto à resistência ao desgaste com determinação do coeficiente de atrito e taxa de perda de massa. Os resultados indicaram que a diluição foi fortemente influenciada pelo substrato e aumentou linearmente com a corrente de deposição. Diluição entre 5 e 25 % foram medidas para a deposição sobre aço API 5L X70 e entre 22 e 42 % sobre substrato de aço AISI 316L, sendo os valores superiores deste último associados com a menor condutividade térmica do aço inoxidável. O substrato de aço também influenciou as fases formadas em cada revestimento e, como regra geral, a dureza dos revestimentos reduziu com o aumento da diluição, como consequência da redução de elementos que promovem endurecimento por solução sólida (Mo e W) e também pelo coalescimento das estruturas dendríticas. Maior dureza dos revestimentos sobre aço API 5L X70 foi resultado da menor diluição, menor espaçamento de braços dendríticos (DAS) e maior fração de carbonetos. A taxa de perda de massa em desgaste foi afetada principalmente pela corrente de deposição, que levou a incremento de até 20 %, enquanto pequenas diferenças foram observadas para diferentes substratos. Os revestimentos com maior dureza apresentaram os menores coeficientes de atrito superficial.

Palavras-chave: Hastelloy C276. Plasma com Arco Transferido (PTA). Revestimentos. Substratos de Aço. Microestrutura e Propriedades.

ABSTRACT

Nickel-based alloy type C 276 is utilized to protect aircrafts components, oil refinery and power generation components due to an association of good toughness and high corrosion resistance. Ni-based alloy Hardfacing is frequently utilized to protect steel components. For the NiCrMoW, alloy system commercially known as Hastelloy C 276 alloy present, processing challenges, particularly when welding is involved. The Coatings properties depends on deposition parameters and also on interaction with the substrate. Welding parameters and its influence on tracks geometry as well as substrate interaction (dilution) demand research in order to understand the influence on microstructure and coatings properties. The main purpose of this work was to evaluate C 276 coatings alloy by Plasma Tranferred Arc (PTA) deposited with three different current levels, 120, 150 and 180 A, two different substrate, AISI 316L stainless steel and API 5L X70 carbon steel. Processing effect on coatings was evaluated first by tracks geometry and dilution. Coatings were then characterized by Laser, optical and scanning electron microscopy, X-ray diffraction analisys and Vickers hardness. Wear properties of coatings were evaluated by pin on disc sliding wear test. Results indicated that dilution was deeply influenced by the substrate and increased linearly with the deposition current. Dilution between 5 and 25 % was measured for deposition on API 5L X70 steel and from 22 to 42 % on AISI 316L steel substrate, the latter associated with the lower thermal conductivity of the stainless steel. The steel substrate also influenced formed phases but, as a general trend, coating hardness reduced with increasing dilution, as a consequence of reduction on alloying elements which promotes solid solution hardening (Mo and W), carbides fraction and also microstructure coarsening (measured by dendrite arm spacing – DAS). Higher hardness of coatings produced on API 5L X70 was a result of lower dilution, smaller dendrite arm spacing (DAS) and the presence of higher carbides fraction. Coatings on API 5L X70 presented the lower wear mass loss rates, in agreement to hardness results. Wear mass loss rate was affected mainly by deposition current, which induced up to 20 % increase, while lower differences was measured for different substrate steel. The higher hardness observed the lower friction coefficient.

Keywords: Hastelloy C276. Plasma Tranferred Arc (PTA). Coatings. Steel Substrates. Microstructure and Properties.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Demonstra os efeitos sobre a resistência à corrosão por pites em diferentes ligas em função do teor de Níquel e Molibdênio.....	29
Figura 2 - Teor de Molibdênio em relação à temperatura crítica de corrosão por frestas.	30
Figura 3 - MEV do revestimento de liga de níquel sem adição de alumínio.....	32
Figura 4 - Componentes do equipamento de PTA	37
Figura 5 - Equipamento para deposição por plasma com arco transferido	38
Figura 6 - Influência da Corrente do Arco Transferido na Diluição no Revestimento PTA com Arco Único	39
Figura 7 - Detalhamento da metodologia experimental adotada neste trabalho	41
Figura 8 - Esquema mostrando o detalhamento da metodologia experimental adotada para a caracterização metalúrgica dos revestimentos.....	43
Figura 9 - Esquema mostrando o detalhamento da metodologia experimental adotada para a caracterização da geometria dos cordões.....	43
Figura 10 - Esquema mostrando a forma de determinação do espaçamento de braços dendríticos (DAS)	44
Figura 11 - Esquema mostrando a preparação dos substratos utilizados	45
Figura 12 - Substratos com superfície preparada por lixamento para a deposição...	46
Figura 13 - Esquema mostrando a região de análise da microestrutura dos revestimentos.	47
Figura 14 - Esquema mostrando a metodologia usada para a realização das medições de dureza nos revestimentos.	47
Figura 15 - Esquema mostrando os pinos usinados a partir dos revestimentos depositados por PTA.....	48
Figura 16 - Fotografia mostrando o equipamento utilizado nos ensaios de desgaste tipo pino sobre disco.	49
Figura 17 - Fotografia mostrando detalhe do ensaio em andamento.	49
Figura 18 - Geometria dos cordões soldados sobre aço AISI 316L: 120A, 150A e 180A.....	51
Figura 19 - Geometria dos cordões soldados sobre aço API 5L X70: 120A, 150A e 180A.....	51

Figura 20 - Correlação linear obtida entre a corrente de deposição e a diluição dos revestimentos de liga Hasteloy C276.	52
Figura 21 - Análises por difração de raios-X em revestimentos C276 sobre API 5L X70.	54
Figura 22 - Análises por difração de raios-X em revestimentos C276 sobre AISI 316L.	54
Figura 23 - Microestrutura dos revestimentos Hasteloy C276 sobre AISI 316L (120 A).	55
Figura 24 - Microestrutura dos revestimentos Hasteloy C276 sobre AISI 316L (150 A).	56
Figura 25 - Microestrutura dos revestimentos Hasteloy C276 sobre AISI 316L (180 A).	56
Figura 26 - Microestrutura dos revestimentos Hasteloy C276 sobre API 5L X70 (120A).	58
Figura 27 - Microestrutura dos revestimentos Hasteloy C276 sobre API 5L X70 (150A).	59
Figura 28 - Microestrutura dos revestimentos Hasteloy C276 sobre API 5L X70 (180A).	59
Figura 29 - Fração de carbonetos interdendríticos para os revestimentos de liga Hasteloy C276.	60
Figura 30 - Espaçamento de braços dendríticos da estrutura da liga Hasteloy C276.	61
Figura 31 - Perfis de dureza dos revestimentos da liga Hasteloy C276 sobre AISI 316L.	62
Figura 32 - Perfis de dureza dos revestimentos da liga Hasteloy C276 sobre API 5L X70.	62
Figura 33 - Comparativo da dureza dos revestimentos da liga Hasteloy C276.	63
Figura 34 - Curvas de desgaste para os revestimentos da liga Hasteloy C276.	65
Figura 35 - Comparativo dos coeficientes de desgaste para os revestimentos da liga Hasteloy C276 sobre AISI 316L.	66
Figura 36 - Curvas de desgaste para os revestimentos da liga Hasteloy C276.	66
Figura 37 - Comparativo dos coeficientes de desgaste para os revestimentos da liga Hasteloy C276 sobre AISI 316L.	67

Figura 38 - Comparativo dos coeficientes de desgaste dos revestimentos da liga Hasteloy C276.....	67
Figura 39 - Comparativo dos coeficientes de atrito dos revestimentos da liga Hasteloy C276.....	68
Figura 40 - Largura das trilhas de desgaste formadas em ensaio em tribômetro.....	69

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Parâmetros de deposição utilizados para a produção dos revestimentos Hastelloy C276 (NiCrMoW)	45
Tabela 2 - Geometria e diluição dos cordões para os revestimentos Hastelloy C276	51
Tabela 3 - Distribuição dos elementos por EDS na microestrutura dos revestimentos de liga Hastelloy C276	53

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Efeitos dos elementos de superligas de níquel e ligas a base de ferro...	26
Quadro 2 - Especificação das propriedades químicas da liga Hastelloy C276	31
Quadro 3 - Propriedades principais das ligas de níquel	31
Quadro 4 - Condutividade térmica dos substratos utilizados.	33
Quadro 5 - Classificação dos aços API em função do limite de escoamento.....	34
Quadro 6 - Especificação de composição química para o aço X70	35
Quadro 7 - Especificação de composição química para o aço SAE/AISI 316L.....	36
Quadro 8 - Composição Química da liga utilizada e dos substratos revestidos	42

LISTA DE ABREVIATURAS SIGLAS

PTA	Plasma com Arco Transferido
NiCrMoW	Liga Hastelloy C 276
AISI	<i>American Iron and Steel Institute</i>
API	<i>American Petroleum Institute</i>
EDS	Espectrometria por energia dispersiva
NaCl	Cloreto de sódio
NiCrTi	Ferro Nimonic
rpm	Rotações por minuto
CFC	Cúbica de Face Centrada
T _m	Temperatura de fusão
MC	Carbonetos (onde M são os elementos formadores de carboneto)
M ₆ C	Carbonetos (onde M são os elementos formadores de carboneto)
M ₇ C ₃	Carbonetos (onde M são os elementos formadores de carboneto)
M ₂₃ C ₆	Carbonetos (onde M são os elementos formadores de carboneto)
MIT	Instituto de Tecnologia de Massachusetts
Mín.	Mínimo
Máx.	Máximo
g/cm ³	Grama por centímetro cúbico
kN/mm ²	Quilo Newton por milímetro quadrado
kN/mm	Quilo Newton por milímetro
l/min	Litros por minuto
mm/min	Milímetros por minuto
wt%	Percentual de Carbono em liga
ZTA	Zona Térmicamente Afetada
GTA	<i>Gás tungsten arc</i>
psi	Libra força por polegada quadada
µm	Micrômetro
DAS	Braços dendríticos
kgf	Quilograma força
ZrO ₂	Dióxido de zircônio
HRC	Dureza Rockwell C

M D M é o metal e D indica análise pontual sobre as dendritas de γ
HV_{0,5} Dureza Vickers com carga de 0,5Kgf

LISTA DE SIMBOLOS

(Θ)	Molhabilidade
(W)	Largura dos cordões
(t)	altura do reforço
°C	Graus Celsius
γ	Matriz de níquel
%	Percentual
P	Correspondente a uma fase a base de Ni-Mo-Cr.
μ	Correspondente a uma fase a base de $(Fe,Co)_7(Mo,W)_6$
k	Condutividade térmica (J/msK)
Nb	Nióbio
La	Lantânio
Y	Ítrio
Ta	Tântalo
Th	Tório
Zr	Zircônio
B	Boro
C	Carbono
W	Tungstênio
Cr	Cromo
Mo	Molibdênio
Al	Alumínio
Ti	Titânio
Fe	Ferro
Ni	Níquel
Co	Cobalto
(A)	Corrente do Arco Principal

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	19
1.1	OBJETIVOS	19
1.1.1	Objetivo Geral	20
1.1.2	Objetivos Específicos	20
1.1.3	Justificativa	20
1.1.4	Resultados esperados	21
1.1.5	Estrutura do Texto	21
2	REVISÃO DE BIBLIOGRAFIA	23
2.1	LIGAS DE NÍQUEL: HISTÓRICO	23
2.1.1	Ligas de Níquel: Propriedades	24
2.2	A LIGA HASTELLOY C276	27
2.2.1	Hastelloy C276: Características e Propriedades	28
2.3	SUBSTRATOS DE AÇO	33
2.3.1	Aço API 5L X70	34
2.3.2	Aço AISI 316L	35
2.4	PLASMA COM ARCO TRANSFERIDO (PTA)	36
2.4.1	Parâmetros Elétricos	38
3	MATERIAIS E MÉTODOS	41
3.1	MATERIAIS	42
3.2	DESENVOLVIMENTO	42
3.3	CORTE DAS CHAPAS E DEFINIÇÃO DE PARÂMETROS DE DEPOSIÇÃO DA LIGA HASTELLOY C276	45
3.4	TÉCNICAS DE AVALIAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO	46
3.4.1	Análise Metalográfica	46
3.4.2	Dureza Vickers	47
3.4.3	Análises por Difração de Raios-X	47
3.4.4	Desgaste por Partículas Duras e Coeficiente de Atrito	48
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	50
4.1	INTEGRIDADE E GEOMETRIA DOS REVESTIMENTOS	50
4.2	EFEITO DO SUBSTRATO E DO GRAU DE INTERAÇÃO SOBRE A MICROESTRUTURA	51

4.3	PROCESSAMENTO SOBRE A DUREZA E A RESISTÊNCIA AO DESGASTE	61
5	CONCLUSÃO.....	70
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	72
	REFERÊNCIAS.....	73
	REFERÊNCIA DE NORMATIZAÇÃO.....	77

1 INTRODUÇÃO

O processamento de materiais mais resistentes ao desgaste na forma de revestimentos é uma alternativa para melhorar o desempenho de componentes sujeitos a solicitações extremas em uso. Condições severas de desgaste, alta temperatura e ambientes corrosivos são alguns exemplos destas condições.

Revestimentos soldados são amplamente aplicados às superfícies de componentes de aço. Neste contexto, o processamento por Plasma com Arco Transferido (PTA) vem ganhando destaque por permitir a obtenção de baixa diluição, flexibilidade de composição química (já que a alimentação ocorre na forma de pó), produção de cordões soldados com boa qualidade, refinamento da microestrutura, dentre diversas outras vantagens.

Este processo tem sido largamente utilizado para revestir componentes com superligas, que são ligas de Ni, Fe e/ou Co, contendo elementos de liga como o cromo, tungstênio, nióbio, molibdênio, entre outros que formam fases com importantes efeitos sobre as propriedades mecânicas.

O Fe, Ni, Co, são a base das superligas enquanto uma variedade de outros elementos, mesmo em pequenas quantidades são acrescentados para alterar as propriedades mecânicas através da formação de solução sólida, carbonetos e/ou fases intermetálicas. O presente projeto tem como objetivo estudar o efeito de três intensidades de corrente de deposição e de dois diferentes substratos sobre as características geométricas dos revestimentos, microestrutura e fases formadas da liga de Níquel Hastelloy C 276 depositados por PTA.

1.1 OBJETIVOS

Os objetivos do trabalho proposto são apresentados nos parágrafos subsequentes.

1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é correlacionar o efeito da corrente de deposição e do substrato sobre as características de revestimentos de liga Hastelloy C 276 (NiCrMoW) obtidos por PTA. O estudo foi conduzido a partir da análise da geometria dos cordões, interação com o substrato (diluição), microestrutura, fases formadas e propriedades.

1.1.2 Objetivos Específicos

- I) Estudar o efeito da corrente de deposição sobre a geometria dos cordões e diluição da liga Hastelloy C 276 (NiCrMoW);
- II) Estudar o efeito do substrato sobre a geometria dos cordões e diluição da liga Hastelloy C 276 (NiCrMoW);
- III) Estudar o efeito da corrente de deposição sobre a microestrutura, fases formadas e composição química dos revestimentos de liga Hastelloy C 276;
- IV) Determinar o efeito do substrato sobre a microestrutura formada;
- V) Identificar e caracterizar os fatores responsáveis pela determinação da dureza dos revestimentos;
- VI) Determinar a correlação processamento-microestrutura-propriedades-desempenho por meio de ensaios de desgaste.

1.1.3 Justificativa

O conhecimento do efeito do substrato e do nível de interação durante o processamento (diluição) sobre a microestrutura e propriedades dos revestimentos da liga Hastelloy C 276 é de grande importância, visto que a demanda por revestimentos de superligas é crescente em vários segmentos, em especial o de óleo e gás. Essa crescente demanda se dá em função da busca pela redução de custos de produção (matéria prima e processos de fabricação) e em alguns casos, pelo aumento de vida útil (redução de manutenção preventiva e corretiva).

Assim, o presente trabalho buscou avaliar a influência da corrente de deposição e de diferentes substratos sobre a geometria dos cordões e diluição, microestrutura e fases formadas e propriedades de revestimentos da liga Hastelloy C 276 (NiCrMoW) obtidos por PTA.

A partir da deposição com corrente de deposição de 120, 150 e 180A, diferente diluição com o substrato foi obtida, permitindo avaliar o efeito da interação com os aços AISI 316L e API 5L X70. Assim, pode-se avaliar o seu efeito sobre as características dos revestimentos gerados. Os revestimentos produzidos foram ainda avaliados por meio de ensaios de desgaste, a fim de obter a correlação entre o processamento, a microestrutura e o desempenho.

1.1.4 Resultados esperados

Ao final deste projeto, espera-se:

- Avaliar e estabelecer a correlação entre a corrente de deposição e a geometria dos cordões e diluição desenvolvidas para revestimentos da liga NiCrMoW (Hastelloy C 276) sobre substratos de aço AISI 316L e API 5L X70.
- Entender a influência da corrente de deposição e do substrato sobre a microestrutura e fases formadas.
- Estabelecer a correlação entre o processamento, microestrutura, propriedades e o desempenho de revestimentos NiCrMoW.

1.1.5 Estrutura do Texto

O estudo desenvolvido e formalizado ao longo desse texto apresenta seis capítulos. Neste capítulo o tema recebe uma introdução e os respectivos objetivos, sendo gerais e específicos, os quais determinam a linha de pesquisa. Em seguida o tema ganha importância com a justificativa e os resultados esperados da pesquisa.

A partir do segundo capítulo tem-se a revisão bibliográfica do trabalho, onde é apresentado o histórico e propriedades da liga de níquel, liga hastelloy C276 (liga

utilizada para o revestimento), os dois substratos utilizados na pesquisa e as características do processo/equipamento de Plasma com Arco Transferido (PTA) com ênfase na variável parâmetro elétrico.

O terceiro capítulo traz os materiais e métodos utilizados na pesquisa, como corte de chapas, preparação dos corpos de prova, técnicas de avaliação e caracterização.

No quarto capítulo, adentrar-se-á no tema central desta pesquisa, o qual apresenta os resultados e discussões referentes à correlação do efeito da corrente de deposição e dos substratos sobre as características de revestimentos da liga Hastelloy C276 obtidos por PTA.

No quinto capítulo são apresentadas as conclusões seguidas de sugestões de trabalhos futuros no sexto e último capítulo. Após estes capítulos, apresentam-se as referências utilizadas para consulta e normatização.

2 REVISÃO DE BIBLIOGRAFIA

Neste capítulo será apresentado uma revisão sobre a literatura nos tópicos das (i) ligas de Níquel; (ii) liga Hastelloy C276, juntamente com as características, propriedades e aplicação; e (iii) PTA (Plasma com Arco Transferido). Da mesma forma, serão abordados estudos realizados na presente área e sua aplicação nas investigações sobre o comportamento da interação da liga depositada por PTA com o substrato.

2.1 LIGAS DE NÍQUEL: HISTÓRICO

A história do Níquel, como liga, teve início no século XVII, com peças decorativas, de fabricação chinesa, levadas para a Europa pelas Companhias das Índias Orientais, além de artefatos (armas, ferramentas e moedas) encontrados em território chinês. Neste período era conhecido como liga branca, Pai-Thong ou cobre branco. No século XVIII, na região da Saxônia da Alemanha, mineiros tentaram fundir minérios de cobre branco e defrontaram com a dificuldade em forjar tal material. Frente à dificuldade chamaram o minério de amaldiçoado, chamando-o de “*Old Nickel*” Cobre ou “*Kupfer*” – Níquel. Minérios semelhantes foram descobertos em outras regiões e também chamados Níquel, em função da forte resistência a deformação (MANKINS e LAMB, 1997, p. 1363).

Mankis e Lamb (1997, p. 1363) destacam que somente em 1751, após cinco anos de pesquisa do Departamento de Minas da Suécia, finalmente foi possível separar e identificar o novo elemento que recebeu o nome de Níquel.

Ao longo dos anos surgiram uma série de avanços na metalurgia do Níquel, avanços esses responsáveis pelo condicionamento, para este elemento, da indústria nos dias de hoje. Os autores Mankis e Lamb (1997, p. 1363) citam alguns destes avanços:

- A descoberta da alta resistência da liga de níquel-cobre à corrosão atmosférica, água contendo NaCl (cloreto de sódio) e vários ácidos e soluções alcalinas;

- Pesquisas envolvendo ligas de níquel-cromo, corroborando para a descoberta da liga Nimonic (NiCrTi), a qual é utilizada em altas temperaturas principalmente resistência a fluência;
- O trabalho de Elwood Haynes em níquel-cromo e cobalto-cromo ligas binárias, contado por Gray (1981, p.20) que é utilizado para aplicações de resistência ao desgaste e oxidação;
- O trabalho de Paul D. Merica, que trata do uso do níquel em ferro fundido, bronze e aço, e a descoberta do mecanismo de endurecimento, de ligas a base de níquel, por precipitação do Al e Ti, mecanismo esse que é utilizado até os dias de hoje (WHITE, 1963, P. 160);
- O trabalho de desenvolvimento durante a década de 1920 de ligas de níquel-molibdênio, que levou à descoberta da liga Hastelloy, conhecidos pela sua elevada resistência à corrosão;
- O desenvolvimento do turbo-compressor, de liga hastelloy (endurecidas por precipitação), para motores de aeronaves, que operam em temperaturas elevadas (650-815°C), e altas rotações (20.000 a 30.000 rpm), entre outras.

2.1.1 Ligas de Níquel: Propriedades

O níquel, como liga ou em sua forma elementar, contribui significativamente para o desenvolvimento industrial, e continua sendo extensivamente empregado em pesquisas e desenvolvimentos que demandam materiais de alta resistência à corrosão, corrosão sob tensão, desgaste e ambientes envolvendo em altas temperaturas.

Uma das características que favorece a aplicação de níquel em ligas é a sua capacidade de solubilização, ou seja, apresenta solubilidade total com o níquel e cobre, solubilidade variada entre o ferro, cromo e níquel, o que possibilita uma extensa gama de ligas entre os constituintes.

A matriz de níquel (γ) apresenta estrutura Cúbica de Face Centrada (CFC) a qual pode ser endurecida por solução sólida, precipitação de carbonetos e endurecimento por precipitação de outras fases (fases intermetálicas).

Mankis e Lamb (1997, p. 1365) destacam que os elementos cobalto, ferro, cromo, molibdênio, tungstênio, vanádio, titânio e alumínio são endurecidos por solução sólida de níquel. O que viabiliza esse processo é a diferença do diâmetro atômico entre níquel e esses elementos na casa de 1 a 13%. Quando exposto a altas temperaturas, acima de $0,6T_m$ (T_m - temperatura de fusão), a manutenção da resistência depende da difusão, a qual é lenta quando os elementos molibdênio e tungstênio estão presentes devido ao grande tamanho destes átomos, o que mantém o efeito de endurecimento por solução sólida.

O níquel não é um formador de carbonetos. A formação de carbonetos ocorre através da reação de outros elementos de liga (W, Cr, Mo e Fe) com o carbono. Os carbonetos presentes na matriz de níquel (γ) podem ser benéficos ou prejudiciais, dependendo da operação da liga. Mankis e Lamb (1997, p. 1366) citam que os carbonetos encontrados em ligas de níquel com maior frequência são: MC, M_6C , M_7C_3 e $M_{23}C_6$ (onde M são os elementos formadores de carboneto). Geralmente MC é grande e em forma de blocos de carboneto, com distribuição aleatória e, normalmente, não desejado. Almeida (2013, p. 11) destaca que os carbonetos MC são formados mais frequentemente por titânio, nióbio e háfnio.

Carbonetos do tipo M_6C apresentam-se geralmente na forma de blocos. São formados nos contornos de grão e podem ser utilizados para controlar o tamanho de grão. Esses carbonetos podem impactar negativamente a ductilidade e à resistência mecânica. Já os carbonetos M_7C_3 (predominantemente Cr_7C_3) podem causar fragilização se aglomerados, formando películas contínuas nos contornos de grãos. Isso ocorrerá se submetido, durante um período prolongado, a altas temperaturas. Finalmente, os Carbonetos $M_{23}C_6$, exercem grande influência nas propriedades mecânicas. (MANKINS e LAMB, 1997, p. 1366).

Almeida (2013, p. 11) acrescenta que “a microestrutura ideal é uma cadeia de pequenas partículas globulares discretas nos contornos de grão, porém filmes, lamelas, placas e células também são observados”. Destaca ainda que a resistência à fratura é prejudicada em função de formação de filmes contínuos nos contornos de grão.

O endurecimento por precipitação dado por γ' , Ni₃ (Al, Ti) em uma matriz de níquel confere ao material um reforço expressivo. A fase intermetálica formada possui uma estrutura CFC (Cúbica de Face Centrada) semelhante a ordenação da matriz, com uma distorção de rede de 1% (ou menor) comparado à estrutura matriz γ , ou seja, o precipitado é coerente a matriz. Essa correlação proporciona uma baixa energia superficial e estabilidade prolongada (MANKINS e LAMB, 1997, p. 1366).

As fases precipitadas dependem da composição química da liga e do tipo de tratamento térmico e do tempo de exposição ao qual o material é submetido antes de ser utilizado ou mesmo quando submetido a altas temperaturas por longo tempo de exposição. O Quadro 1 resume os efeitos da adição de vários elementos a superligas de níquel e ligas a base de ferro.

Quadro 1 - Efeitos dos elementos de superligas de níquel e ligas a base de ferro.

Efeito	Base de Ferro	Base de Níquel
Reforçadores de solução sólida	Cr, Mo	Co, Cr, Fe, Mo, W, Ta
Tipo de formadores de carboneto	Ti	W, Ta, Ti, Mo, Nb
M7C3	-	Cr
M23C6	Cr	Cr, Mo, W
M6C	Mo	Mo, W
Ni ₃ (Al, Ti)	Al, Ni, Ti	Al, Ti
Aumento da temperatura de γ'		Co
Endurecimento precipitados e / ou compostos intermetálicos	Al, Ti, Nb	Al, Ti, Nb
Resistência à oxidação	Cr	Al, Cr
Melhora a resistência à corrosão a quente	La, Y	La, Th
Resistência Sulfuração	Cr	Cr
Aumenta a ductilidade à ruptura	B	B(a), Zr

FONTE: MANKINS,W.L., LAMB,S., 1997.

As ligas de níquel possuem uma grande gama de aplicações, sendo que a maioria envolve a resistência à corrosão e / ou resistência ao calor. Mankis e Lamb (1997, p. 1370-1371) destacam algumas destas aplicações:

- Turbinas a gás de aeronaves: discos, câmaras de combustão, parafusos, carcaças, eixos, sistemas de exaustão, estojos, lâminas, palhetas, bases de queimadores, turbinas, reversores;
- Turbina de usina a vapor: parafusos, lâminas, reaqueladores gás;

- Motores alternativos: turbocompressores, válvulas de descarga, tomadas quentes, assento de inserções da válvula;
- Conformação: ferramentas de trabalho a quente;
- Aplicações médicas: usos em Odontologia, dispositivos protéticos;
- Veículos espaciais: revestimentos aerodinamicamente aquecidos, peças de motor de foguete;
- Bandejas, luminárias, esteiras, cestos, ventiladores, silenciadores forno;
- Equipamento para tratamento térmico;
- Sistemas de energia nuclear: Mecanismos de controle de comando das barras, hastes de válvulas, molas, dutos;
- Química e petroquímica: parafusos, ventiladores, válvulas, vasos de reação, tubulações, bombas;
- Equipamento de controle de poluição: lavadores, equipamento de dessulfuração de gás de combustão;
- Metais usinas de processamento: fornos, turbinas, exaustores;
- Sistemas de gaseificação e liquefação do carvão: trocadores de calor, reaquecedores, tubulações; e
- Papel e celulose: tubos, lâminas, equipamentos de branqueamento, purificadores.

2.2 A LIGA HASTELLOY C276.

Nesta seção, uma abordagem mais extensa será realizada para a liga Hastelloy C 276, já que é objeto de estudo neste projeto. A liga será aplicada por plasma com arco transferido (PTA) na forma de revestimentos sobre dois tipos de substrato (aços API 5L X70 e AISI 316L) e diferentes correntes de deposição, sendo avaliada a geometria dos cordões e a diluição, a microestrutura e as fases formadas e as propriedades do revestimento por meio da dureza e taxa de desgaste.

2.2.1 Hastelloy C276: Características e Propriedades.

A liga de níquel Hastelloy C276 está enquadrada no grupo de “superligas”. É uma liga níquel-cromo-molibdênio com adição de tungstênio projetado para ter excelente resistência à corrosão em uma ampla gama de ambientes severos.

O baixo teor de carbono minimiza a precipitação de carboneto durante a soldagem, mantendo assim a resistência ao ataque intergranular nas zonas afetadas pelo calor de juntas soldadas (SPECIAL METALS CORPORATION, 2004, p. 1).

O alto teor níquel e molibdênio (Figura 1) conferem elevada resistência à corrosão por pites, enquanto o cromo confere resistência a meios oxidantes. Possui extraordinária resistência a uma grande gama de meios químicos, os quais incluem oxidantes fortes, tais como férrico e cloretos cúpricos, meios aquecidos e contaminados (orgânicos e inorgânicos), cloro, ácido fórmico e ácido acético, anidrido acético, água do mar e soluções de salinas.

Mankis e Lamb (1997, p. 1371-1372) ressaltam que os pites podem ter diversas causas. Alguns produtos químicos (principalmente sais de iodetos e particularmente cloretos) são identificados como produtores de pite. Os metais passivados são particularmente suscetíveis a pites em ambientes de cloreto, especialmente cloretos de oxidação (cloreto férrico, de cobre, e mercúrio). Os íons de cloreto acumulam em áreas anódicas e penetram o filme passivo nestes pontos. Uma vez que o produto de corrosão contendo cloreto é hidrolisado para o ácido clorídrico, a acidez aumenta à medida que o cloreto migra no ânodo, promovendo aumento da taxa de corrosão ao longo do tempo. Reações autoaceleradas deste tipo são descritas como reações autocatalíticas. O efeito de molibdênio adicionado às ligas de níquel oferece maior resistência a estes tipos de cloreto, tornando a liga mais resistente, Figura 1.

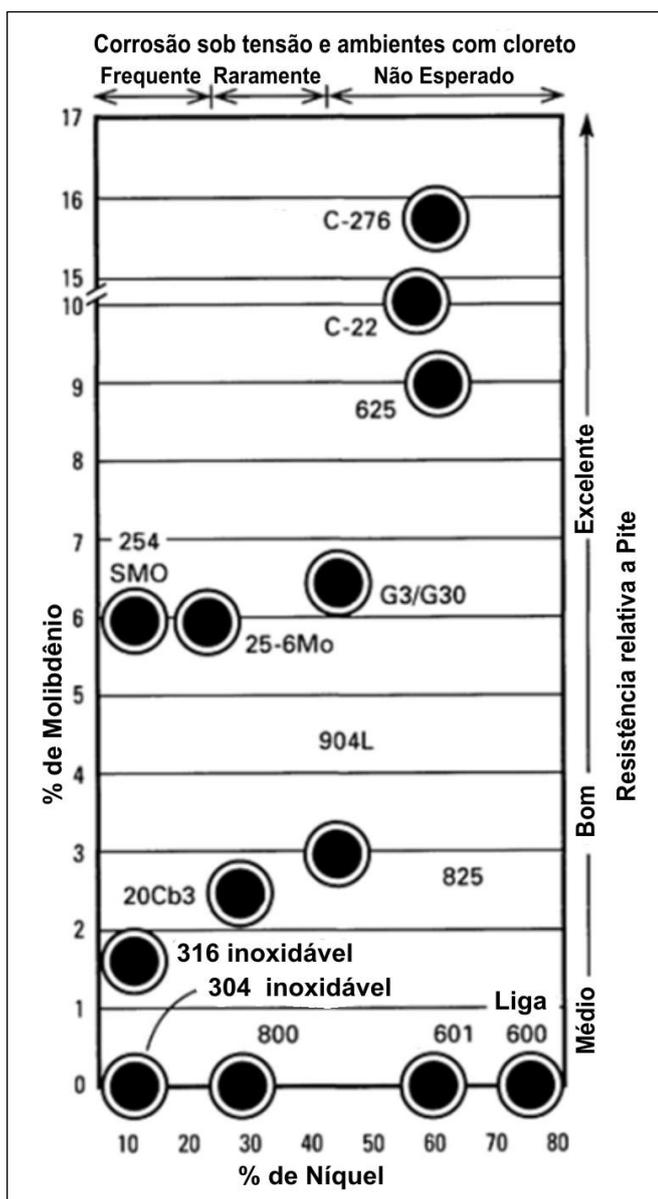


Figura 1 - Demonstra os efeitos sobre a resistência à corrosão por pites em diferentes ligas em função do teor de Níquel e Molibdênio

FONTE: MANKINS, W.L., LAMB, S., 1997.

Observa-se na Figura 1 que a resistência relativa à corrosão por pite aumenta à medida que o teor de molibdênio é aumentado e, entre as ligas de níquel que contêm molibdênio, a C276 é a que apresenta a maior resistência relativa à corrosão por pite.

Os autores apresentam outro teste que compara as características de corrosão de ligas de níquel a fim de determinar a resistência relativa à corrosão por frestas em ambientes oxidantes contendo cloretos.

Para o teste utilizou-se materiais de referência do Instituto de Tecnologia (MIT) os quais foram submetidos a uma solução de 6% de cloreto férrico a fim de determinar a resistência relativa à corrosão por frestas. Esse método tem por objetivo de identificar a influencia do percentual de molibdênio com relação ao aumento da temperatura em relação com a fresta crítica.

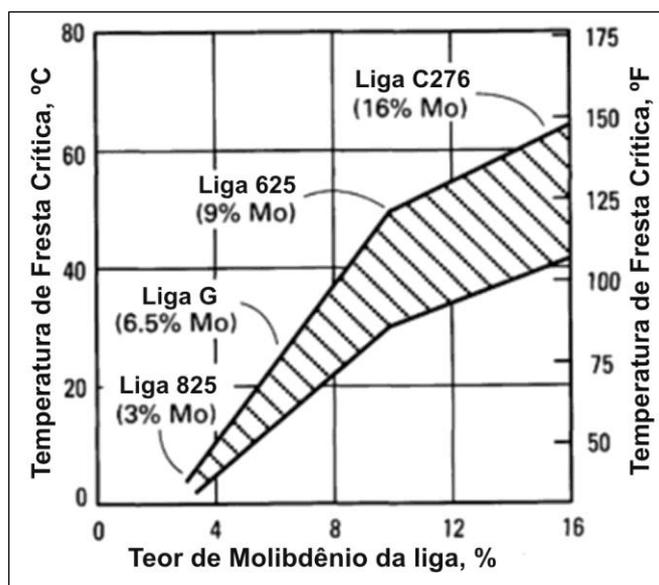


Figura 2 - Teor de Molibdênio em relação à temperatura crítica de corrosão por frestas.

FONTE: MANKINS,W.L., LAMB,S., 1997.

Observa-se que o aumento do teor de molibdênio contribui para o aumento resistência à corrosão em ambientes agressivos contendo cloretos.

A liga Hastelloy C276, em função das suas características, é utilizada em processamento químico, controle de poluição, na produção de papel e celulose, tratamento de resíduos industriais e urbanos recuperação de gás natural, em controle de poluição do ar, dutos, amortecedores, purificadores, pilha de gás de reaquecedores, ventiladores e ventiladores caixa, em processos químicos, trocadores de calor, evaporadores e tubos de trocadores de calor, entre outros.

Embora existam diversas variações da liga de níquel (Hastelloy), a série C276 é a mais utilizada. O Quadro 2 apresenta a composição química da liga atomizada utilizada neste projeto, com faixa de granulometria entre 53 e 150 μ m conforme fornecedor Höganäs, numero de lote 1504894. Algumas propriedades das ligas de níquel são apresentadas no Quadro 3.

Quadro 2 - Especificação das propriedades químicas da liga Hastelloy C276

Propriedade Química	Mín. (%)	Máx. (%)
Carbono	0,10	0,14
Fósforo	0	0,025
Enxofre	0	0,01
Molibdênio	14	18
Tungstênio	3,5	5,5
Ferro	2,0	4,0
Manganês	0,9	1,5
Cromo	14,0	17,0
Silício	0,2	0,8
Oxigênio	0	0,05
Vanádio	0,2	0,8

FONTE: HÖGANÄS, 2011.

Quadro 3 - Propriedades principais das ligas de níquel

Principais Propriedades	Valor de Referência
Densidade	8,89 g/cm ³
Ponto de Fusão	1370°C
Coefficiente de expansão	11,2µm/m °C (20 – 100°C)
Módulo de Rigidez	78,6 kN/mm ²
Módulo de Elasticidade	205,5 kN/mm

FONTE: ALLOYWIRE INTERNATIONAL.

A liga Hastelloy C276 vem sendo estudada em diversos procedimentos de deposição e com diferentes níveis de interação com o substrato. De forma comparativa, destacam-se alguns trabalhos:

→ Cieslak et al. (1986) apresenta um estudo das fases formadas durante o processo de solidificação de revestimentos da liga Hastelloy C276. Durante esse processo de solidificação, segundo o autor, são formadas as fases: matriz γ^1 , fase P^2 e fase μ^3 ,

¹ Matriz γ de Níquel.

sendo essa prejudicial às propriedades mecânicas (em grandes quantidades). Embora essa fase possa prejudicar tais propriedades o teor de C, na liga, é reduzido para evitar a formação de carbonetos. O autor ainda destaca a necessidade de um tratamento térmico posterior para estabilizar a liga.

→ Almeida, (2003, p.38) apresenta também um estudo de deposição de Hastelloy por GTA (gás-tungsten-arc), destacando a formação das fases matriz γ , fase P e fase μ , sendo as fases P e μ , em menor dimensão na microestrutura do cordão de solda, como demonstrado na Figura 3.

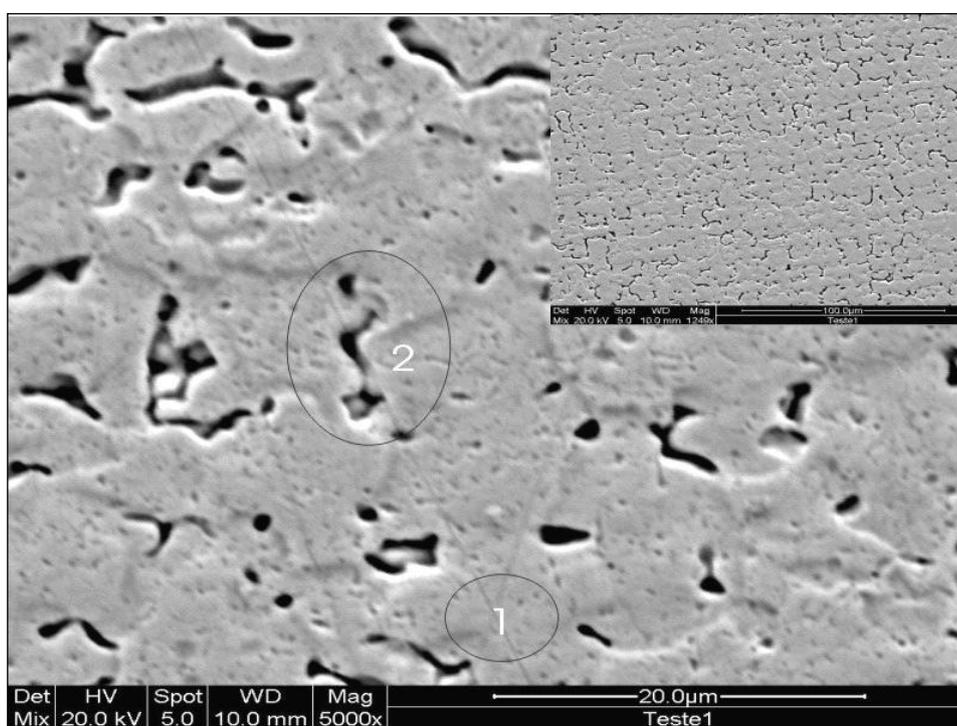


Figura 3 - MEV do revestimento de liga de níquel sem adição de alumínio.

FONTE: ALMEIDA, V. A. Buss. 2003.

→ Graf, Kuwabara e D'Oliveira (2002) completa com um estudo de envelhecimento acelerado de revestimento (Ni-Cr-Mo-W), o qual determina o pico de dureza em função da temperatura e tempo de encharque. Para a metodologia foi estabelecido o pico de dureza a 1000°C, diminuindo com temperaturas mais elevadas. O trabalho mostrou a dependência da variação de dureza com a microestrutura de revestimento desta liga, ou seja, a maior dureza de pico após o envelhecimento foi observada nos

² A fase P corresponde a uma fase a base de Ni-Mo-Cr.

³ A fase μ corresponde a uma fase a base de $(Fe,Co)_7(Mo,W)_6$.

revestimentos com intensidades de corrente de deposição mais baixas e de uma solução sólida mais saturada.

2.3 SUBSTRATOS DE AÇO

Inúmeras razões explicam a pesquisa da engenharia de superfícies de aços a partir da aplicação de revestimentos. As ligas ferrosas com até 2 wt% de Carbono são largamente usadas em projetos de engenharia. O baixo custo de obtenção e transformação, a disponibilidade de dezenas de diferentes produtos siderúrgicos laminados e a habilidade de alteração da resistência mecânica e das propriedades, configuram entre alguns aspectos que justificam o largo uso destas ligas.

Esta pesquisa estudou a aplicação de revestimentos por PTA sobre dois substratos diferentes de aço: API 5L X70 e AISI 316L. O primeiro foi escolhido por sua aplicação na indústria do Petróleo, tanto na produção quanto no refino. Os dois aços apresentam grande diferença na composição química, o que pode influenciar nas características dos revestimentos obtidos.

A composição química altera, conseqüentemente, a condutividade térmica do substrato. A diferença observada para os substratos chega próximo a 50 %, o que deverá alterar de forma significativa a taxa de resfriamento durante a solidificação e, então, o grau de refinamento da microestrutura solidificada, Quadro 4.

Quadro 4 - Condutividade térmica dos substratos utilizados.

SUBSTRATO	Condutividade térmica k (J/msK)
Aço Inox Austenítico	24,9
Aço Carbono	41,0

FONTE: KOU, 2003.

Considerando a mesma energia de deposição, substratos com menor condutividade térmica apresentarão maior aquecimento durante o processamento dos revestimentos, o que deve influenciar também o grau de interação com o substrato (diluição).

Partindo da análise da composição química e da condutividade térmica dos substratos sobre os revestimentos, possíveis alterações que ocorrem na interface

dos revestimentos com os substratos ou ocorridas na microestrutura do substrato na zona termicamente afetada (ZTA) não foram analisados.

2.3.1 Aço API 5L X70

Os aços que atendem a norma API 5LD são aplicados na fabricação de tubos para a indústria do petróleo. Dentre eles, o API 5L X70 é um aço Carbono microligado e é classificado como aço de baixa liga e alta resistência.

São aços que apresentam Carbono na faixa de 0,25 a 0,30 wt%, visando a obtenção de alta tenacidade, conformabilidade e soldabilidade. Estes aços contêm um ou mais elementos fortes formadores de carbonetos, como: Vanádio, Nióbio ou Titânio. Apresentam ainda elementos que promovem endurecimento por solução sólida, como: Manganês e Silício. Outros elementos microligantes são adicionados para controle da forma das inclusões de sulfetos e elevação da tenacidade (Cálcio, Zircônio ou terras raras, como Cério e Lantânio) (TOTTEN, 2006; BREITENBACH, 2012).

A classificação destes aços, conforme a norma API 5LD, segue padrão de composição química e resistência mecânica. Uma numeração usada está relacionada à tensão de escoamento na unidade psi (lb/in²), Quadro 5 (BREITENBACH, 2012). A especificação da composição química do aço API 5L X70 utilizado nesta pesquisa é apresentada no Quadro 6.

Quadro 5 - Classificação dos aços API em função do limite de escoamento

Grau	Limite de escoamento (psi)		Resistência a tração (psi)	
	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
X42	42.000	72.000	60.000	110.000
X46	46.000	76.000	63.000	110.000
X52	52.000	77.000	66.000	110.000
X56	56.000	79.000	71.000	110.000
X60	60.000	82.000	75.000	110.000
X65	65.000	87.000	77.000	110.000
X70	70.000	90.000	82.000	110.000
X80	80.000	100.000	90.000	120.000

FONTE: BREITENBACH, 2012.

Quadro 6 - Especificação de composição química para o aço X70

Substrato	Aço Carbono Microligado					
	%C	%Mn	%P	%S	%Cr	Outros (Nb, V, Ti)
API 5L X70	≤0,24	≤1,40	0,025	0,015	0,005	≤0,15

FONTE: API 5LD, 2009.

2.3.2 Aço AISI 316L

Os aços inoxidáveis da série 300 são utilizados em ambientes corrosivos. Apresentam um custo mais elevado, requerendo análise criteriosa na seleção. Desta forma, o seu uso é justificado para várias aplicações e, às vezes, pode precisar de proteção adicional.

Aços inoxidáveis são ligas ferrosas com teor de Cromo acima de 11 % em peso. Dentre as diversas séries, a microestrutura dita a numeração para a classificação. A série 300 de aços inoxidáveis austeníticos apresenta a microestrutura da austenita (CFC) estável em temperatura ambiente. A estrutura é obtida pela adição de elementos estabilizadores, como Manganês, Nitrogênio e Níquel (JUNIOR, 2002).

Esta série 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 (JUNIOR, 2002).

O teor de Níquel varia entre 3,5 e 37%, enquanto o teor de Cromo entre 15 e 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. Pode conter ainda adições de Molibdênio, Cobre, Titânio, Nióbio, Tântalo e Nitrogênio. É uma série especialmente utilizada em aplicações onde a resistência à corrosão e a conformabilidade são os principais requisitos de projeto. O segundo substrato escolhido para esta pesquisa foi o aço AISI 316L, Quadro 7.

Quadro 7 - Especificação de composição química para o aço SAE/AISI 316L

SAE/AISI 316L									
Substrato	%C _{máx.}	%Mn	%Si	%P	%S	%Cr	%Ni	%Mo	%N
AISI 316L	0,03	2,00	0,75	0,045	0,030	16 - 18	10 - 14	2 - 3	0,10

FONTE: SAE J405, 1998.

2.4 PLASMA COM ARCO TRANSFERIDO (PTA)

O processo de Plasma de Arco Transferido Alimentado por Pó teve origem na década de 1960, o qual foi patenteado pela Union Carbide Co., em 03/11/1961 com o título de “Procedimento e Aparato para Aporte de Pó Metálico, Depositado e Soldado com Plasma de Arco Transferido”. (GONÇALVES e DUTRA, 2012, v.17, nº1 p.77).

Como o próprio nome diz, o processo consiste na deposição de pó metálico com o auxílio Plasma (coluna de arco elétrico), resultando em uma deposição metálica soldada com taxas moderadas de deposição.

Gonçalves e Dutra (2012. p, v.17, nº1 77) explica o processo de PTA a partir de seus componentes. A fonte de calor é uma plasma térmico, a qual permite uma variação de temperatura, como exemplo uma temperatura aproximada de 16700°C. Essa energia é controlada por uma fonte de corrente do arco principal e outra para o arco piloto (arco transferido), as quais são transferidas para a tocha⁴ de soldagem. O pó, que será depositado, é armazenado em um recipiente no sistema e transferido através de um alimentador de pó, Figura 4.

⁴ Não existe um desenho universal de tocha em função da grande variedade de aplicação industrial. “a tocha plasma industrial é um aparato eletroquímico e térmico capaz de transformar energia elétrica em energia térmica”. (GONÇALVES, DUTRA, 2012, p.78).



Figura 4 - Componentes do equipamento de PTA

FONTE: GONÇALVES e DUTRA, 2012.

A Figura 5 mostra o esquema do equipamento de PTA, que está sendo utilizado no presente projeto. O processo se dá pela abertura do arco piloto. Um arco secundário é aceso por uma unidade de alta frequência, sendo que esse arco secundário é fechado assim que o principal é acionado. Outro mecanismo que facilita a abertura do arco é a passagem forçada do gás por um orifício de parede fria. Esta mudança gera uma diferença de temperatura que, por sua vez, reduz a densidade do arco o que faz com que os elétrons adquiram mais energia, podendo assim ionizar outros átomos. 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.

O processo incorpora três sistemas de gás. O primeiro é chamado de gás de plasma, que normalmente é o argônio. O segundo gás é chamado de gás de proteção. O terceiro sistema de gás é o de escoamento, sendo chamado de gás de transporte, é utilizado para carrear o material consumível durante a aplicação do revestimento. Por utilizar metal de adição na forma de pó, o PTA permite atualmente, somente a deposição de algumas ligas, porém num futuro próximo, pode-se transformar na deposição de um amplo espectro de metais e fácil variação na composição química entre camadas, uma vez que não se tornaria restrito à disponibilidade de arames comerciais. Nesta técnica, os pós são adicionados a um sifão, caem por gravidade e são arrastados pelo gás de transporte através de dutos que o direcionam até a tocha. Nela, um eletrodo estabelece um plasma com a peça a ser depositada e, quando o pó atravessa este plasma, funde e forma a poça de fusão do revestimento que está sendo aplicada, Figura 5.

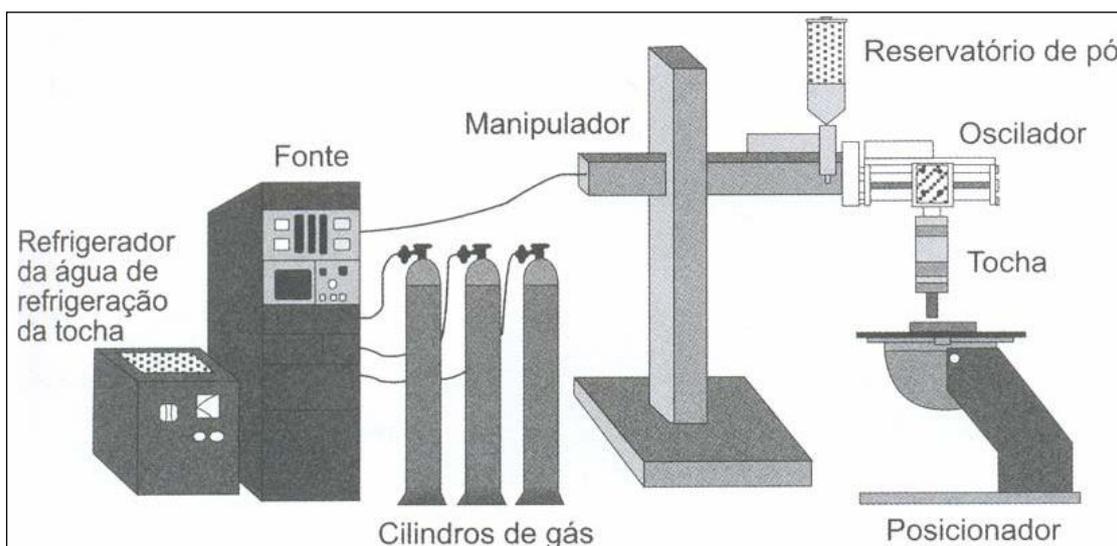


Figura 5 – Esquema do equipamento de deposição por plasma com arco transferido

FONTE: GONÇALVES e DUTRA, 2012.

Segundo Tigrinho (2009, p. 25) características principais do processo de plasma com arco transferido são:

- Estabilidade do arco, mesmo com correntes baixas, devido ao bocal constritor;
- Concentração da energia, devido às características colimadas do feixe de plasma, proporcionando uma menor zona termicamente afetada (ZTA);
- Baixa sensibilidade a variações da distância da tocha;
- Uma vez que o eletrodo encontra-se na parte interna da tocha, a probabilidade de gerar inclusões de tungstênio nos cordões é praticamente nula.

2.4.1 Parâmetros Elétricos

Como mencionado na seção 2.2, o presente projeto tem como objetivo em avaliar as propriedades do revestimento de Hastelloy C276 em dois substratos, sendo o aço API 5L e AISI316L. Todavia, faz-se necessário também a variação de corrente dentro de cada processo, pois a corrente está diretamente ligado ao aporte de calor no substrato, que por muitas vezes se desdobram em problemas de soldagem que serão apontados em uma breve revisão de literatura na seção

seguinte. Uma vez que a corrente de deposição altera a diluição, o efeito do substrato sobre os revestimentos poderá ser estudado para diferentes níveis de interação.

2.4.1.1 Parâmetro Elétrico: Corrente

A corrente, como destaca Tigrinho (2009, p. 26), deve estar em consonância com os demais parâmetros de processo, ou seja, o “aumento da corrente deve ser acompanhado de aumento da taxa de alimentação do pó de adição, a fim de evitar o aumento excessivo da diluição”, essa razão é demonstrada na Figura 6.

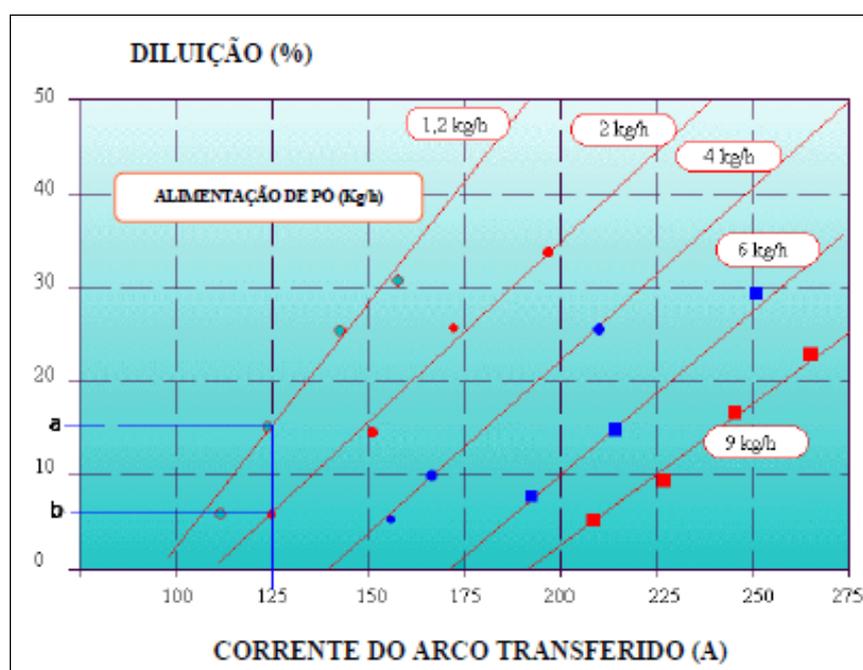


Figura 6 - Influência da Corrente do Arco Transferido na Diluição no Revestimento PTA com Arco Único

FONTE: MARCONI, M; MARCONI, B., 2013.

O autor ainda destaca que a seleção da corrente está diretamente condicionada a composição química do pó, substrato e da espessura do revestimento a ser depositado.

Assim, uma breve revisão bibliográfica de problemas soldagem destaca a necessidade de um estudo sobre a variação de corrente:

→ Gonçalves e Dutra (2012, v.17, nº2 p, 176) destacam que os defeitos de soldagem, em grande parte, são oriundos de variações no aporte de calor na poça fundida e nas peças, que nada mais é que a dependência da corrente. “correntes muito baixas acarretam em falta de fusão nas laterais do cordão e por outro lado, correntes altas causam excesso de diluição”;

→ Bond, et al. (1996) cita que valores altos de corrente (aproximadamente 250A) causam redução de dureza e grandes oxidações sobre o cordão depositado em função da diluição, em contra partida valores baixos de corrente (aproximadamente 70A) também são maléficos ao cordão, causando descontinuidade no mesmo. A autora acrescenta também que a corrente atua sobre os agregados do pó metálico depositado, os quais atuam com nucleantes, modificando a solidificação;

→ Huang, et al. (1996) contribui citando que o efeito nocivo de correntes demasiadamente altas é a tendência à formação de trincas, o que pode ser resolvido por oscilação da tocha de soldagem;

→ Diaz (2005) cita que a diluição possui influencia direta na composição química, microestrutura e porosidade dos depósitos, a qual é dependente a corrente de deposição. Destaca ainda que valores elevados de diluição proporciona uma ampla zona afetada de calor nos substrato e dependendo da liga ocasiona redução na dureza de revestimento. Acrescenta ainda que baixos valores geram indícios de má aderência do revestimento

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O Objetivo deste trabalho foi estudar, caracterizar e avaliar a liga de Níquel do sistema NiCrMoW, comercialmente conhecida por Hastelloy C 276, depositada pela técnica de Plasma com Arco Transferido (PTA) sobre dois diferentes substratos de aço API 5L X70 e AISI 316L e compreender a influência da corrente de deposição e do tipo de substrato sobre a microestrutura e propriedades dos revestimentos produzidos.

Uma vez que a corrente de deposição altera o aporte térmico na soldagem e, como consequência, a diluição com o substrato, espera-se obter diferentes graus de interação entre a liga atomizada para deposição com composição química nominal conhecida e com os substratos adotados. Esta interação promove a alteração da composição química dos revestimentos, resultando em percentuais de elementos de liga intermediários entre a composição nominal de adição e do substrato, dependendo da diluição desenvolvida.

Os revestimentos foram caracterizados quanto à geometria dos cordões obtidos, microestrutura, dureza e difração de raios-X. Ensaio de desgaste por deslizamento tipo pino sobre disco foram realizados, a fim de avaliar o efeito da diluição com o substrato sobre potencial comportamento em serviço de revestimentos. O coeficiente de atrito foi determinado por ensaios em tribômetro. A Figura 7 mostra o detalhamento da metodologia adotada.

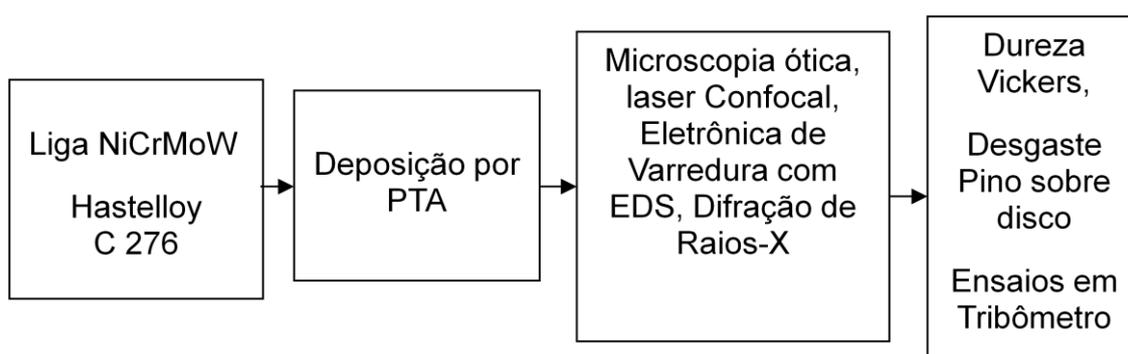


Figura 7 - Detalhamento da metodologia experimental adotada neste trabalho

3.1 MATERIAIS

A liga de níquel Hastelloy C 276 foi fornecida pela empresa Höganäs, na forma atomizada com tamanho de partícula entre 53 e 150 μm de tamanho, apresentando cerca de 50% com tamanho de 70 μm , cuja composição química é certificada, Quadro 2. Os substratos de aço utilizados neste projeto foram o aço inoxidável AISI 316L e o aço carbono API 5L X70, com composição química verificada, Quadro 8.

Quadro 8 - Composição Química da liga utilizada e dos substratos revestidos

Liga Hastelloy C276 – Atomizada									
Liga / Elemento	Ni	Cr	Mo	Si	C	Fe	W	V	Mn
Hastelloy C276	Bal.	15,4	15,9	0,6	0,10	3,1	4,5	0,6	1,1
Substratos Revestidos									
Substrato 1	%C	%Mn	%Si	%P	%S	%Cr	%Ni	%Mo	%Al
Aço 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
Aço API 5L X70	0,17	1,40	0,21	0,02	0,003	0,005	0,015	0,041	0,034

FONTE: SAE J405, 1998; HÖGANÄS, 2012.

3.2 DESENVOLVIMENTO

Os revestimentos da liga NiCrMoW foram processados por PTA sobre substratos de aço API 5L X70 e AISI 316L na forma de cordões únicos. As chapas não foram pré-aquecidas antes da deposição. Os cordões foram depositados com comprimento de 100 mm e o conjunto (chapa + revestimentos) resfriou ao ar.

A determinação da diluição foi realizada a partir da razão entre a área do substrato fundida e a área total fundida, medidas na seção transversal dos revestimentos. As análises foram realizadas com o software Olympus Soft Imaging Solutions[®] a partir de microscopia óptica realizada para três cordões diferentes, sendo apresentado o resultado médio encontrado. As extremidades foram descartadas em 25 mm e as análises realizadas na região central do comprimento

dos cordões, bem como na região central da seção transversal dos mesmos, Figura 8.

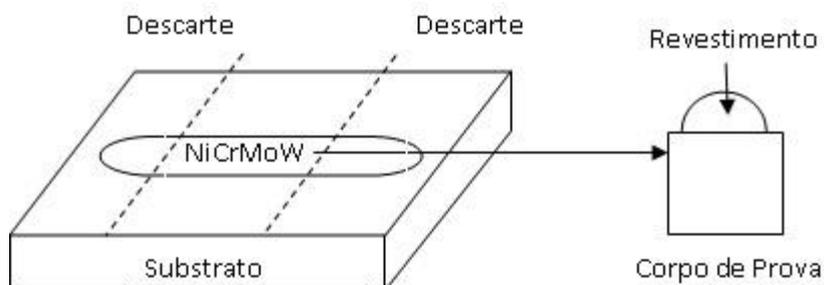


Figura 8 - Esquema mostrando o detalhamento da metodologia experimental adotada para a caracterização metalúrgica dos revestimentos

Os substratos de aço foram escolhidos por sua ampla utilização na indústria do petróleo, sendo o aço API 5L X70 de baixa resistência à corrosão, enquanto o AISI 316L com excelente resistência à corrosão. A aplicação dos revestimentos propostos representa uma alternativa para obter propriedades superiores e, potencialmente, aumentar a vida útil de componentes fabricados com estes aços.

Os revestimentos foram caracterizados a partir de microscopia óptica, quanto à diluição, geometria dos cordões, Figura 9. A geometria dos cordões foi avaliada a partir de três parâmetros: ângulo de molhabilidade (Θ), espessura de reforço (t) e largura dos cordões (W).

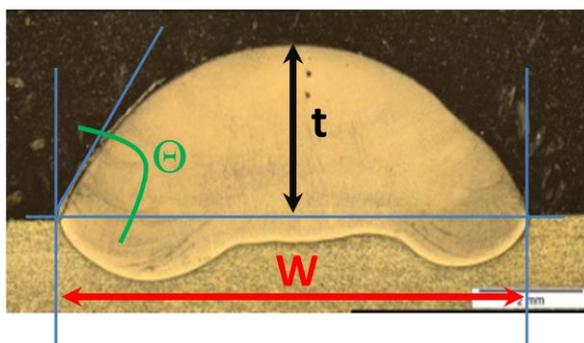


Figura 9 - Esquema mostrando o detalhamento da metodologia experimental adotada para a caracterização da geometria dos cordões

A microestrutura foi avaliada por meio de microscopia laser Confocal e eletrônica de varredura com EDS (espectrometria por energia dispersiva) e a medição do espaçamento dos braços dendríticos (DAS) realizada conforme

esquema apresentado na Figura 10, sendo apresentada a média de 30 medições. Análises por difração de raios-X foram realizadas para a identificação das fases formadas nas diferentes condições de experimentais.

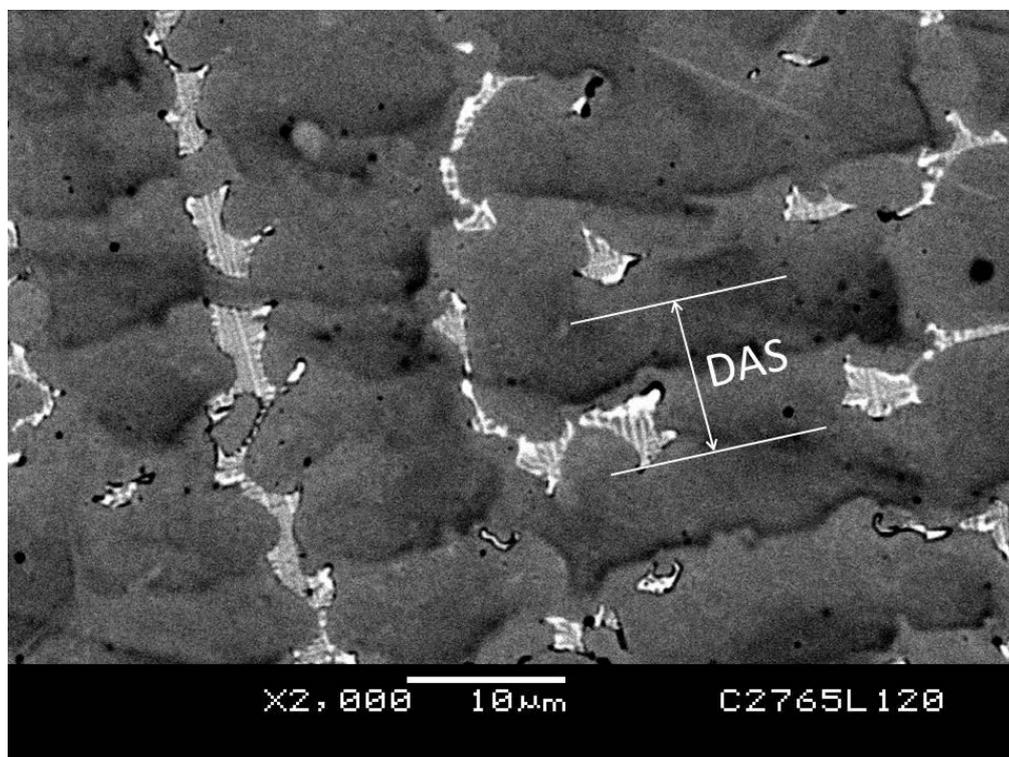


Figura 10 - Esquema mostrando a forma de determinação do espaçamento de braços dendríticos (DAS)

Dureza Vickers com carga de 0,5 kgf foi determinada para avaliar a uniformidade dos cordões obtidos e a influência da condição de deposição sobre esta propriedade e correlacionada com o desempenho em desgaste abrasivo. Para tal, testes de desgaste por deslizamento tipo pino sobre disco foram realizados para a determinação da taxa de perda de massa e sua correlação com o desempenho induzidas pelo processamento e substrato. Medida do coeficiente de atrito dos revestimentos contra esfera de ZrO_2 complementou a análise comparativa de comportamento.

A fim de avaliar o efeito da corrente de deposição e do substrato sobre os revestimentos de liga Hastelloy C276 (NiCrMoW) por PTA, as condições de deposição foram mantidas constantes e a corrente foi alterada, **Tabela 1**.

Tabela 1- Parâmetros de deposição utilizados para a produção dos revestimentos Hastelloy C276 (NiCrMoW)

Parâmetro	Valor
Vazão do Gás de Plasma (l/min)	2
Vazão do Gás de Proteção (l/min)	15
Vazão do 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

3.3 CORTE DAS CHAPAS E DEFINIÇÃO DE PARÂMETROS DE DEPOSIÇÃO DA LIGA HASTELLOY C276.

Para estudar o efeito da corrente de deposição e do substrato sobre a microestrutura dos revestimentos de liga Hastelloy C276, foram utilizadas chapas de aço inoxidável AISI 316L (12,5 mm espessura) e aço carbono API 5L X70 (10 mm espessura). As chapas foram cortadas nas dimensões de 100 mm x 100 mm, Figura 11.



Figura 11 - Esquema mostrando a preparação dos substratos utilizados

O efeito da diferente corrente de deposição foi avaliado a partir da deposição da liga atomizada e previamente ressecada por 24h. A superfície dos substratos de

aço foi preparada a partir de lixamento para remoção da oxidação superficial, que impossibilita as deposições, prejudicando a abertura de arco elétrico e gerando defeitos nos cordões soldados, Figura 12.



Figura 12 - Substratos com superfície preparada por lixamento para a deposição.

3.4 TÉCNICAS DE AVALIAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO

Neste capítulo são descritas as técnicas utilizadas na caracterização e as condições operacionais utilizadas.

3.4.1 Análise Metalográfica

A análise metalográfica foi utilizada como ferramenta-base para as caracterizações dos revestimentos. Amostras foram preparadas a partir de procedimento metalográficos padrão de corte com intensa refrigeração, lixamento a úmido para granulometrias entre #220 e 1200 e polimento com pano de feltro e abrasivo alumina. A microestrutura dos revestimentos foi revelada a partir de ataque eletrolítico utilizando ácido oxálico saturado em água destilada. A microestrutura foi caracterizada a partir de microscopia laser Confocal e eletrônica de varredura na região central dos cordões, Figura 13.

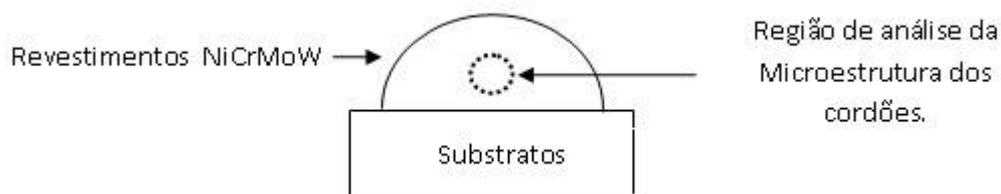


Figura 13 - Esquema mostrando a região de análise da microestrutura dos revestimentos.

3.4.2 Dureza Vickers

Os revestimentos foram caracterizados quanto à dureza utilizando um durômetro Vickers com carga de 0,5kgf. O objetivo principal foi avaliar o efeito da corrente de deposição e do substrato, bem como a uniformidade dos revestimentos (por meio dos perfis de dureza), Figura 14.

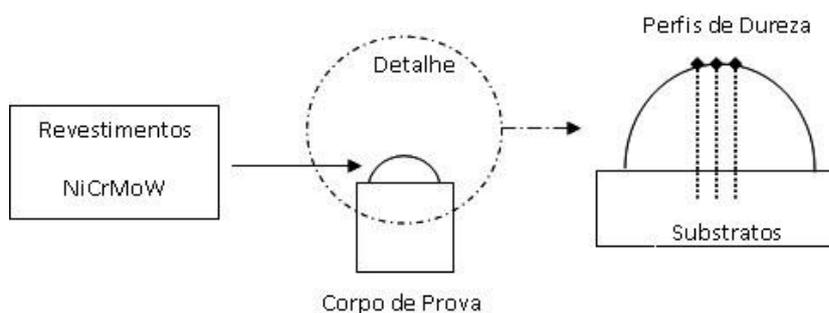


Figura 14 - Esquema mostrando a metodologia usada para a realização das medições de dureza nos revestimentos.

3.4.3 Análises por Difração de Raios-X

A caracterização das fases formadas nos revestimentos depositados nas diferentes condições experimentais foi realizada a partir de análises por difração de raios-X. Foi utilizada a radiação $K\text{-}\alpha$ Cu com varredura 2Θ de 20 a 120° , passo angular de $0,05^\circ$ e tempo de exposição por canal de 1 s. As análises foram realizadas no topo de amostras dos revestimentos, que tiveram o topo da superfície preparada a partir de lixamento e polimento metalográfico.

3.4.4 Desgaste por Partículas Duras e Coeficiente de Atrito

Os revestimentos foram avaliados quanto à taxa de perda de massa em ensaio de desgaste por deslizamento tipo pino sobre disco (abrasão a dois corpos) sem lubrificação. Para tal, pinos de desgaste com seção de 4 x 4 mm foram produzidos por eletroerosão a fio a partir dos revestimentos depositados, Figura 15. Este ensaio padronizado permite a avaliação comparativa do desempenho dos revestimentos nas diversas condições experimentais.

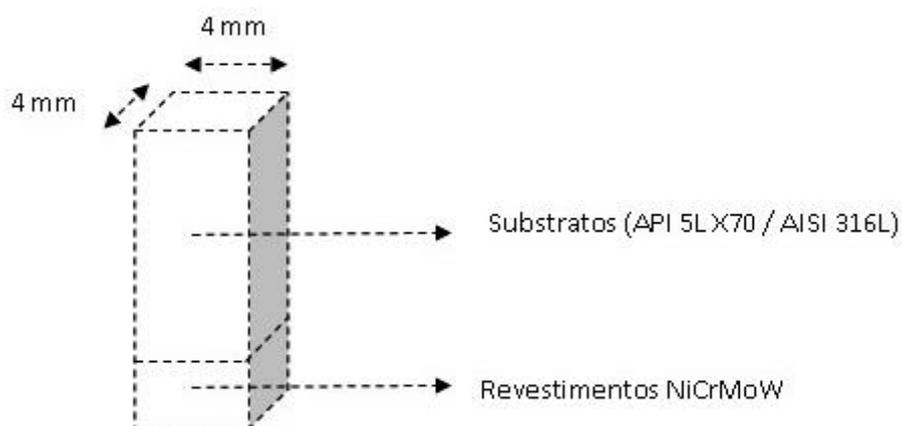


Figura 15 - Esquema mostrando os pinos usinados a partir dos revestimentos depositados por PTA.

Os ensaios foram realizados em temperatura ambiente com carga de 500gf, e realizados a partir do deslizamento com velocidade tangencial constante e controlada de 1,5 m/s sobre uma contraface de papel abrasivo (lixa) com granulometria #600 colada sobre um disco de aço temperado com dureza de 60 HRC.

A taxa de perda de massa foi determinada pela pesagem dos pinos antes do ensaio e a cada 125 m de deslizamento, percorridos sobre trilha de mesmo diâmetro. Desta forma, assegurou-se que os pinos passaram o mesmo número de vezes pelo mesmo ponto, eliminando diferenças de comprimento de trilha ou de consumo do abrasivo da contraface. Uma nova lixa foi posicionada para ensaio a cada trecho percorrido.

As Figura 16 e Figura 17 mostram uma fotografia do equipamento utilizado para as avaliações e um detalhe do ensaio em andamento.



Figura 16 - Fotografia mostrando o equipamento utilizado nos ensaios de desgaste tipo pino sobre disco.

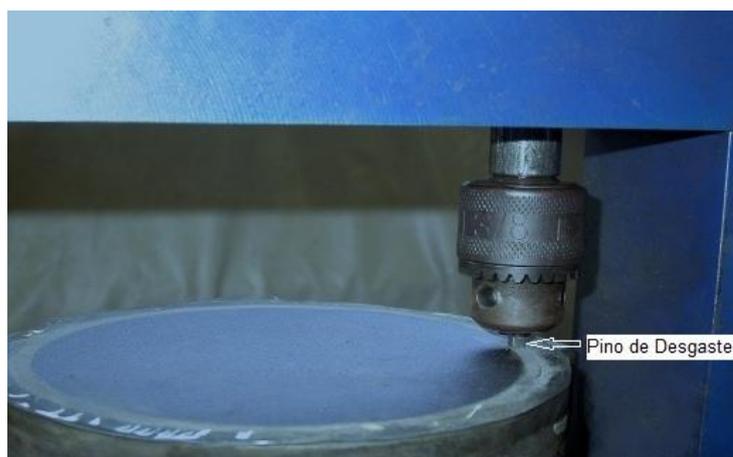


Figura 17 - Fotografia mostrando detalhe do ensaio em andamento.

Finalmente, o topo dos revestimentos foi preparado a partir de lixamento e polimento e submetido a ensaios em tribômetro linear com contracorpo esférico de ZrO_2 com 6 mm de diâmetro. O coeficiente de atrito foi determinado em um ensaio tipo esfera sobre superfície plana. A carga utilizada foi de 4,9 N, com velocidade máxima de 20 mm/s e distância de deslizamento de 150 m.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados desta pesquisa são apresentados na seguinte sequência de abordagem: (i) Aspectos relacionados à integridade dos revestimentos, sendo o aspecto visual (macroscópicos) e características de processamento através da geometria dos cordões, a qual se desdobra nas particularidades associadas à produção prática de áreas revestidas; (ii) análises do efeito do substrato e grau de interação (diluição) sobre a microestrutura e fases formadas; e (iii) propriedades dos revestimentos, apresentadas por meio da dureza, taxa de perda de massa em desgaste e coeficiente de atrito, cuja finalidade foi correlacionar as características metalúrgicas dos revestimentos ao desempenho.

4.1 INTEGRIDADE E GEOMETRIA DOS REVESTIMENTOS

Inspeção visual realizada nos revestimentos depositados em ambos os substratos revelou superfícies lisas dos cordões, sem defeitos macroscópicos de processamento, como: porosidade, trincas, falta de fusão ou mordeduras. Esta avaliação macroscópica é coerente com as previsões da literatura para a integridade de revestimentos de ligas de Níquel do sistema NiCrMo (ANTOSZCZYSZYN et al., 2014). Por outro lado, o conhecimento do efeito do substrato e sua interação durante o processamento (diluição) sobre a microestrutura e propriedades dos revestimentos da liga Hasteloy C276 é ainda limitado.

A liga de Níquel apresentou diferenças na geometria dos cordões, como consequência da variação de intensidade de corrente de deposição e no substrato. Conforme esperado, a menor molhabilidade foi medida no processamento da liga C276 com 120 A de corrente de deposição, confirmado pelo maior ângulo de molhamento (Θ), espessura de reforço (t) e menor largura quando comparado às demais condições de processamento com 150 e 180 A, Tabela 2, Figura 18 e Figura 19. Também seguindo o que relata a literatura, a maior condutividade térmica do aço Carbono API 5L X70 levou ao decréscimo na molhabilidade, que foi mais significativa quanto maiores foram as correntes de deposição (ANTOSZCZYSZYN et al., 2014).

Tabela 2 - Geometria e diluição dos cordões para os revestimentos Hastelloy C276

Substrato	Avaliação	Corrente de Deposição (A)		
		120	150	180
AISI 316L	Diluição (%)	22	36	42
	Espessura (t)	2,9	2,4	2,1
	Largura (W)	9,1	11,9	11,9
	Ângulo de Molhamento (θ)	63,0	46,6	43,3
API 5L X70	Diluição (%)	5	13	25
	Espessura (t)	2,8	3,1	2,8
	Largura (W)	8,4	9,7	11,0
	Ângulo de Molhamento (θ)	64,9	51,0	48,0

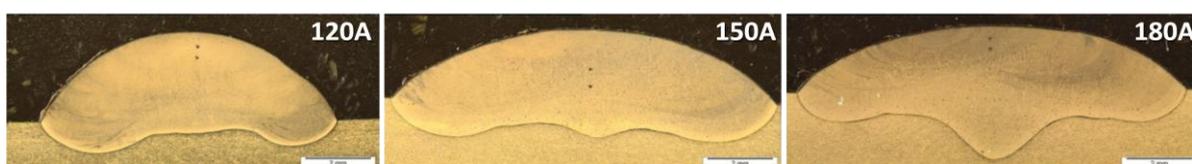


Figura 18 - Geometria dos cordões soldados sobre aço AISI 316L: 120A, 150A e 180A



Figura 19 - Geometria dos cordões soldados sobre aço API 5L X70: 120A, 150A e 180A

4.2 EFEITO DO SUBSTRATO E DO GRAU DE INTERAÇÃO SOBRE A MICROESTRUTURA

A interação com o substrato de aço (diluição) aumentou com a corrente de deposição (ANTOSZCZYSZYN et al., 2014) e os valores medidos apresentaram correlação linear e valores na faixa de 5 a 42 %, Tabela 2, Figura 20. A maior interação superior observada para os revestimentos sobre substrato AISI 316L foi consequência da menor condutividade térmica do aço inoxidável. Uma vez que a interação com o substrato (diluição) é fortemente dependente da corrente de

deposição e do substrato, ditará as soluções sólidas, formação de segunda fase e sua distribuição nos revestimentos.

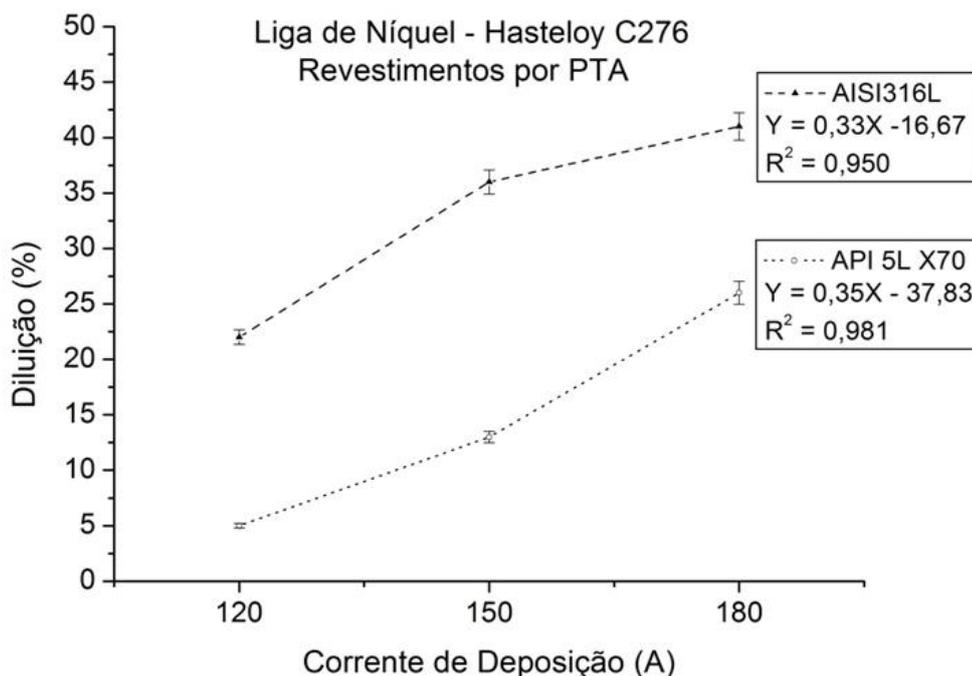


Figura 20 - Correlação linear obtida entre a corrente de deposição e a diluição dos revestimentos de liga Hasteloy C276.

Considerando que o Ferro é um elemento que desenvolve solução sólida substitucional no Níquel, maior grau de interação com o substrato induziu revestimentos com microestrutura contendo maior área de regiões dendríticas de Ni-FCC, reduzindo proporcionalmente o conteúdo de elementos de liga como Molibdênio, Tungstênio e Cromo, Tabela 3. (FERNANDES et al., 2011; YAEDU e D'OLIVEIRA, 2005; REINALDO e D'OLIVEIRA, 2013; ANTOSZCZYSZYN et al., 2014)

Tabela 3 - Distribuição dos elementos por EDS na microestrutura dos revestimentos de liga Hasteloy C276

I (A)	Revestimentos sobre AISI 316L				
	Ni	Fe D	Cr D	W D	Mo D
120	Bal.	17,00	15,91	0,73	7,70
150	Bal.	31,93	16,11	0,67	6,61
180	Bal.	35,81	16,20	0,46	6,19
I (A)	Revestimentos sobre API 5L X70				
	Ni	Fe D	Cr D	W D	Mo D
120	Bal.	8,47	15,21	1,00	10,36
150	Bal.	21,63	13,50	0,71	8,53
180	Bal.	24,56	10,37	0,57	6,77

M D: onde M é o metal e D indica análise pontual sobre as dendritas de γ Ni-CFC.

Análises por difração de raios-X revelaram a presença de fase γ [Ni, Fe] -CFC e diferentes e carbonetos nos revestimentos, Figura 21 e Figura 22. Os resultados indicaram a formação de carbonetos diferentes em função do tipo de substrato de aço utilizado.

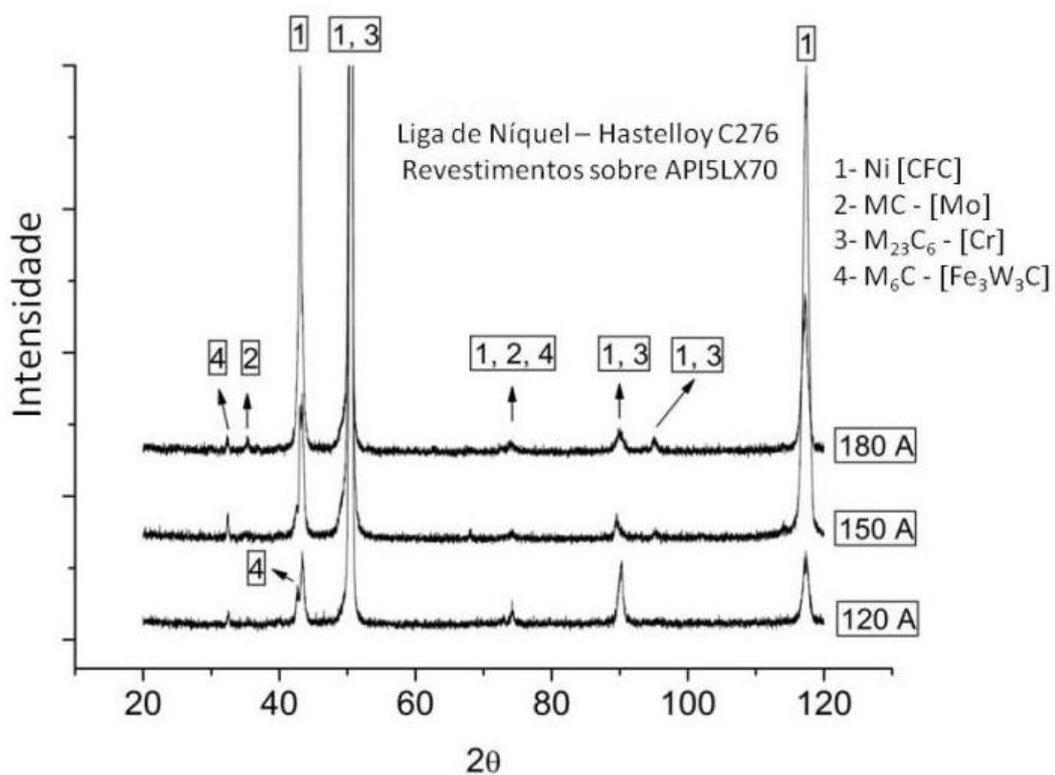


Figura 21 - Análises por difração de raios-X em revestimentos C276 sobre API 5L X70.

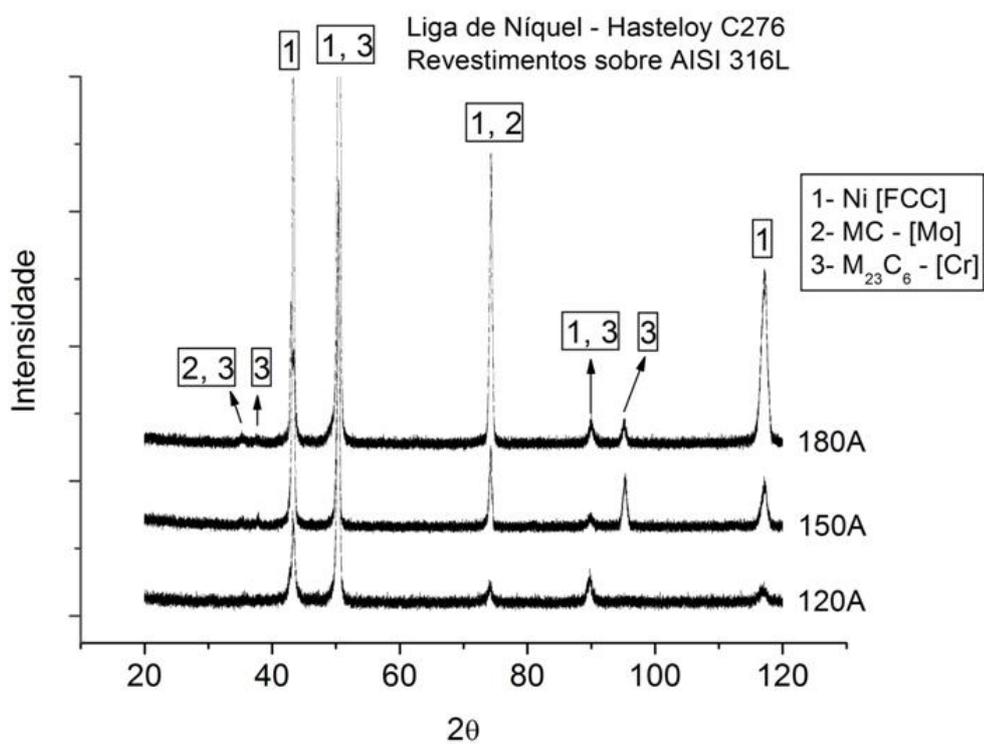


Figura 22 - Análises por difração de raios-X em revestimentos C276 sobre AISI 316L.

Observou-se uma microestrutura dos revestimentos sobre AISI 316L contendo carbonetos interdendríticos primários em bloco branco do tipo MC (M: Molibdênio, Tungstênio) e cinzas tipo $M_{23}C_6$ (M: Cromo), como resultado da maior diluição e baixa taxa de resfriamento na solidificação, Figura 23, Figura 24 e Figura 25.

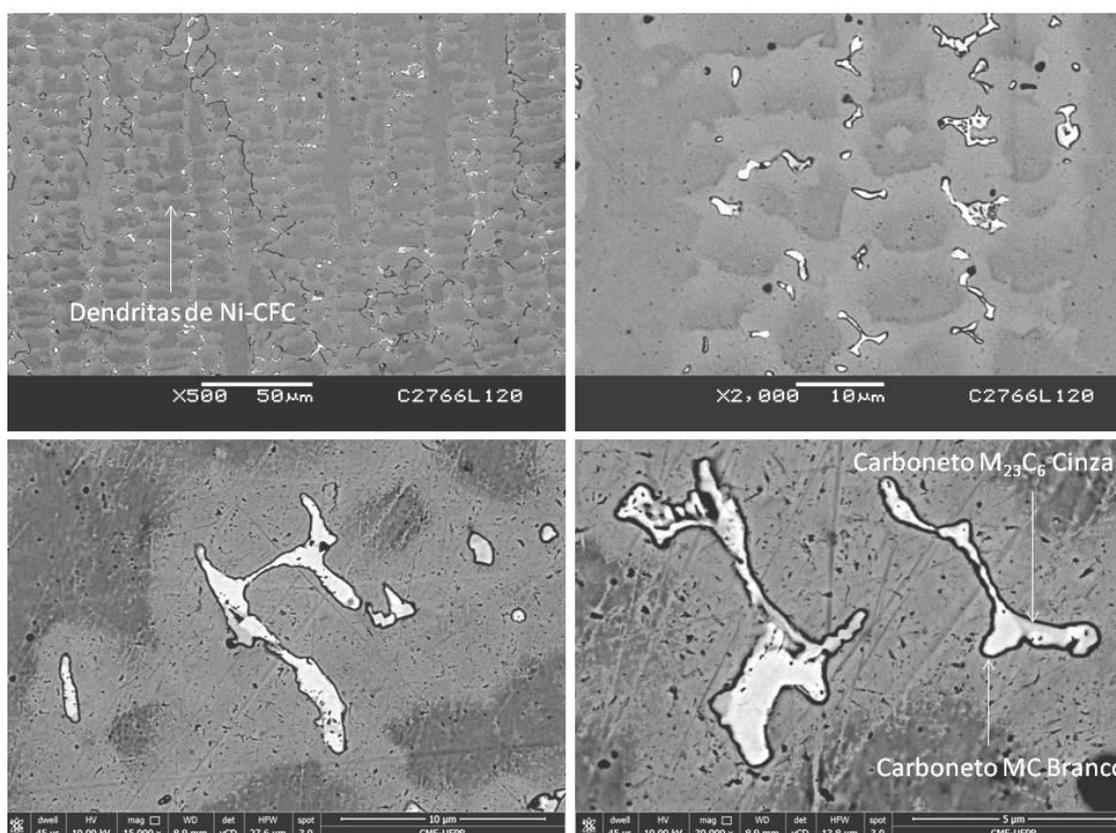


Figura 23 - Microestrutura dos revestimentos Hastelloy C276 sobre AISI 316L (120 A).

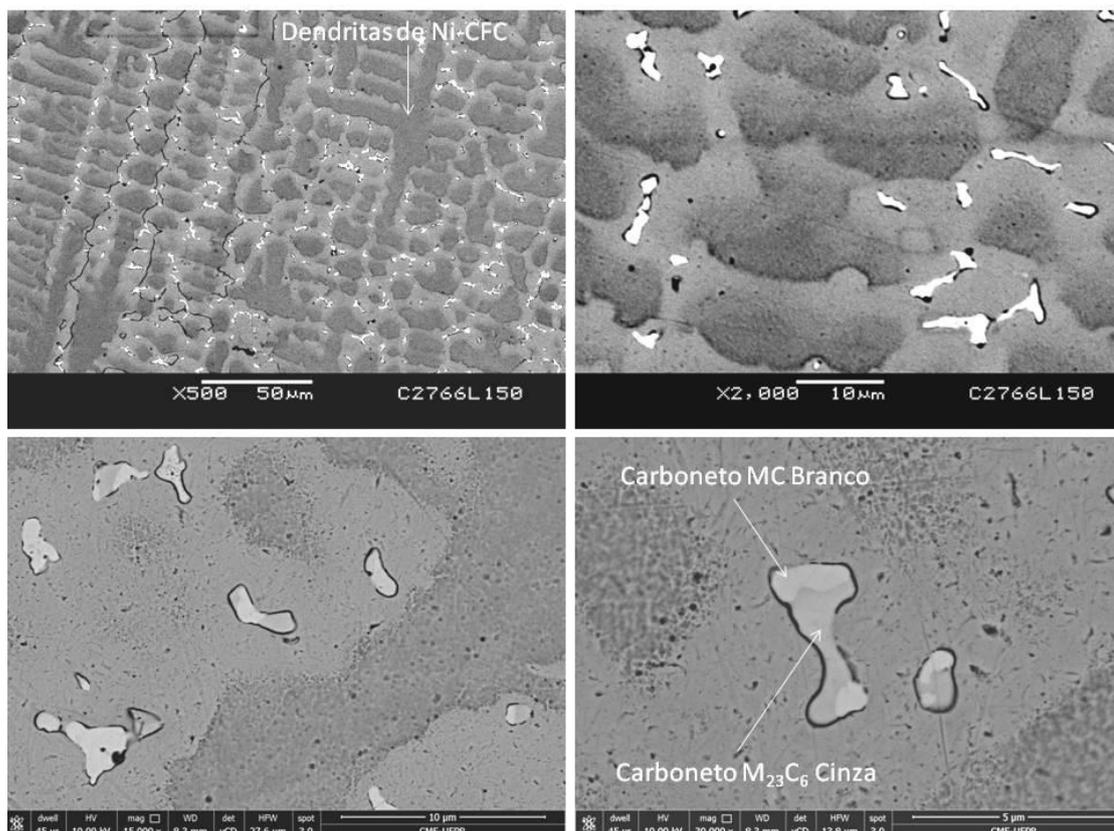


Figura 24 - Microestrutura dos revestimentos Hasteloy C276 sobre AISI 316L (150 A).

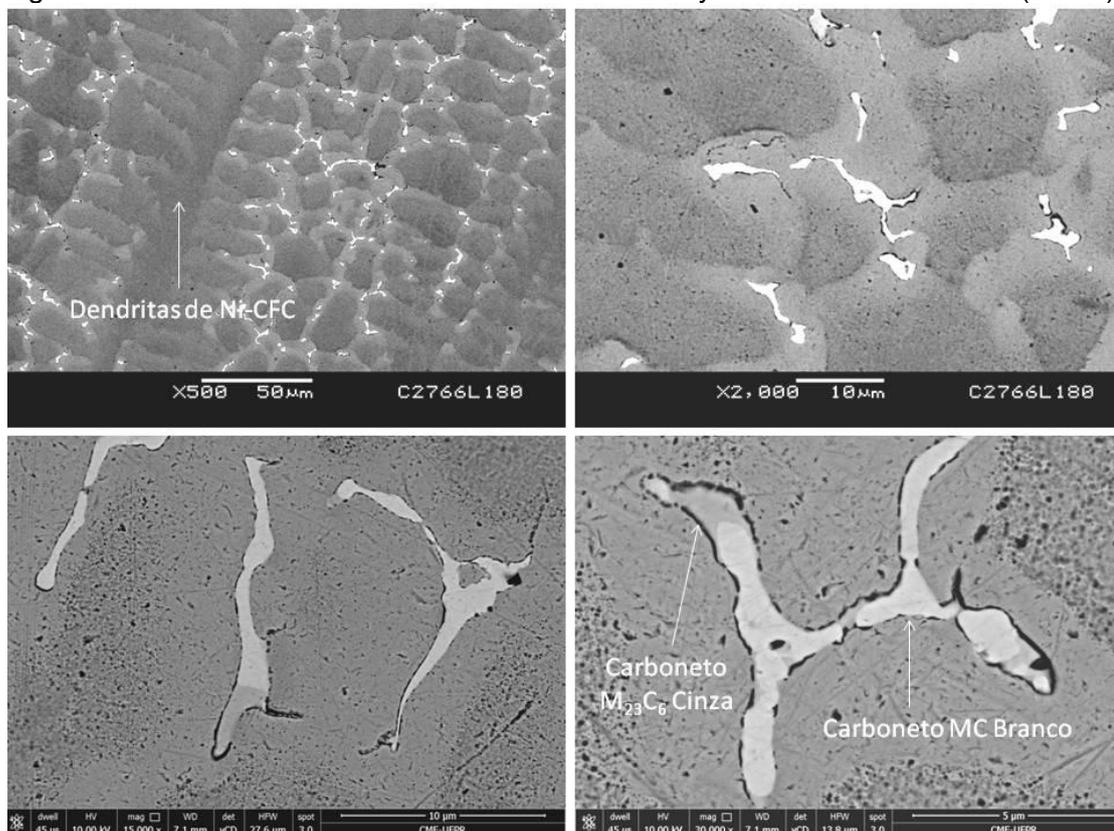


Figura 25 - Microestrutura dos revestimentos Hasteloy C276 sobre AISI 316L (180 A).

Carbonetos tipo $M_{23}C_6$ são esperados quando elevado teor de Cromo está disponível durante a solidificação. A sua relação estequiométrica pode variar desde um simples Níquel-Cromo até $Cr_{23}(Mo,W)_2C_6$ em função do teor de Molibdênio e Tungstênio presentes (AZIZ, 1993). À medida que a diluição aumenta, maior interação com o substrato aumentando o teor de Cromo é obtido na composição dos revestimentos para formar este tipo de carboneto. Esta interação é também facilitada pela baixa condutividade térmica do aço inoxidável AISI 316 L, que promove uma menor taxa de resfriamento na solidificação.

Adicionalmente, os depósitos sobre aço Carbono API 5L X70 formaram predominantemente carbonetos interdendríticos do tipo M_6C (M: Ferro – Tungstênio (Fe_3W_3C)) com morfologia eutética lamelar. Também conhecido como carboneto eta (η), o carboneto M_6C é usualmente formado quando elementos refratários como Molibdênio e Tungstênio estão disponíveis e a matriz é rica em elementos como Níquel, Ferro e Cromo. O conteúdo de Carbono pode alterar a relação estequiométrica, que pode variar desde Ni_3Mo_3C até Ni_2W_4C (AZIZ, 1993). Menor quantidade de carbonetos em blocos do tipo MC (M: Molibdênio, Tungstênio) e $M_{23}C_6$ (M: Cromo) foram formados em decorrência da menor quantidade de Cromo, Figura 26, Figura 27 e Figura 28.

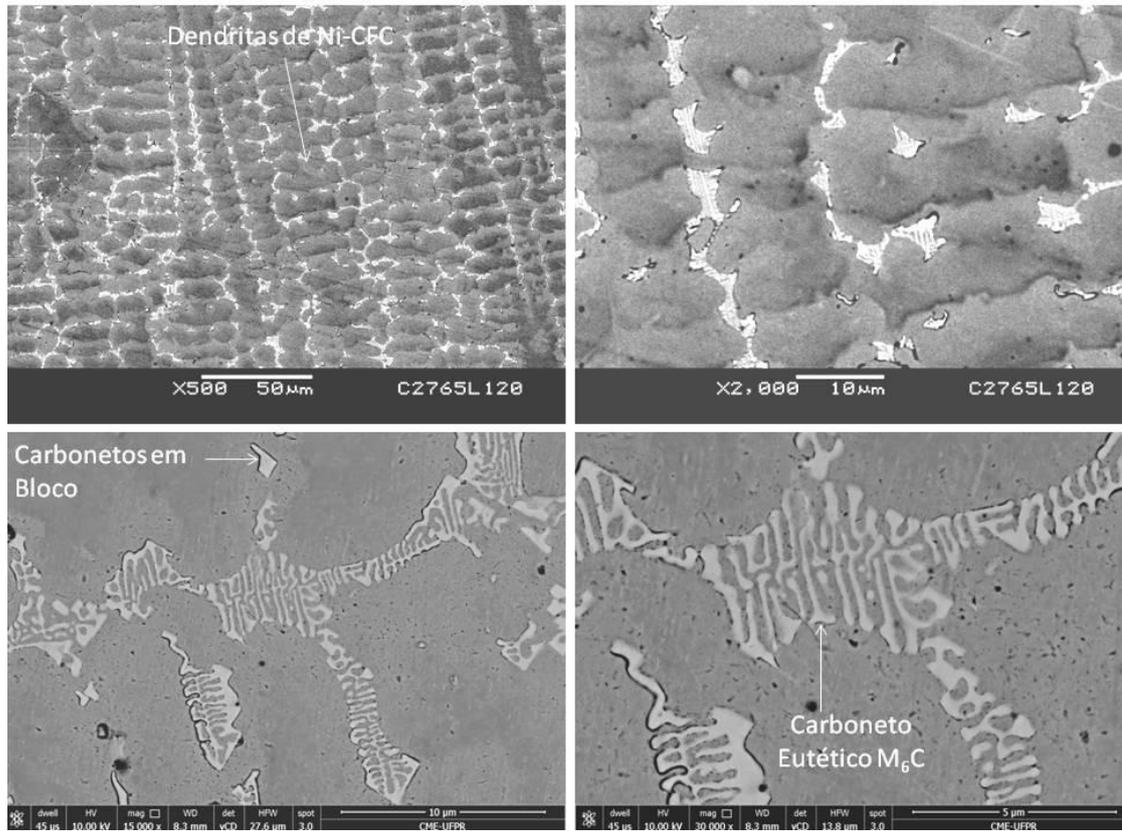


Figura 26 - Microestrutura dos revestimentos Hasteloy C276 sobre API 5L X70 (120A).

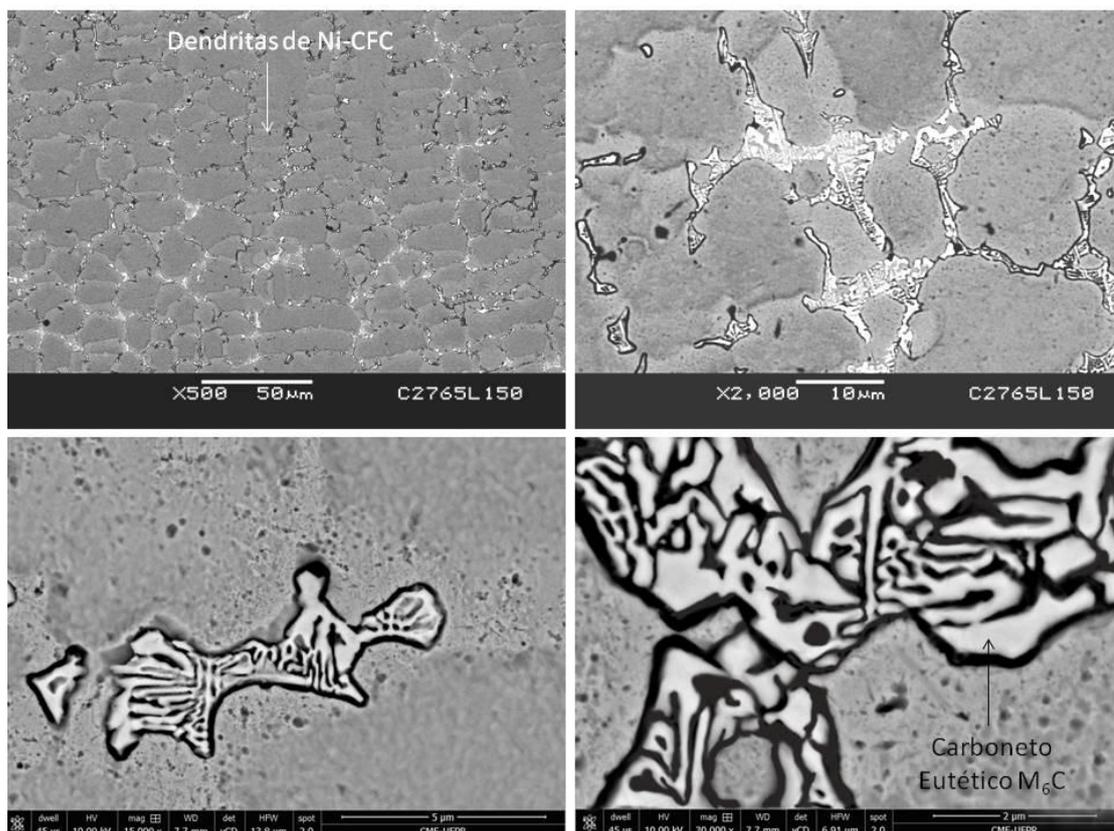


Figura 27 - Microestrutura dos revestimentos Hastelloy C276 sobre API 5L X70 (150A).

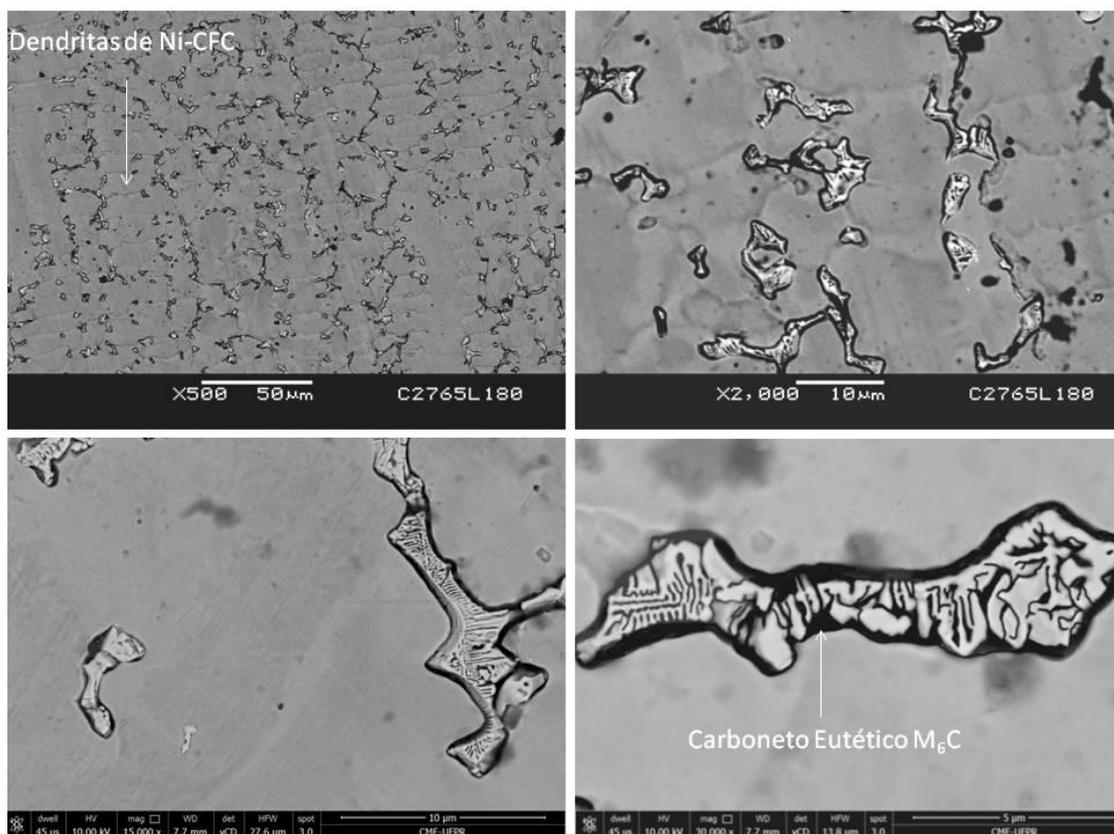


Figura 28 - Microestrutura dos revestimentos Hastelloy C276 sobre API 5L X70 (180A).

Os carbonetos lamelares eutéticos tipo M_6C formados sobre substrato de aço API 5L X70 são consequência do maior teor de Carbono disponível no metal líquido na poça de fusão (originado no substrato), e da mais elevada taxa de resfriamento na solidificação destes revestimentos (MANKINS e LAMB, 1990).

Uma vez que a interação com o substrato (diluição) foi influenciada pela corrente de deposição e pela condutividade térmica do substrato, diferente teor de Ferro nos revestimentos (wt %) alterou a proporção de elementos de liga e a fração volumétrica de carbonetos formados, Figura 29. Assim, a maior corrente de deposição levou a maior decréscimo na fração de carbonetos nos revestimentos. Além disso, o menor teor de Carbono do substrato de aço AISI 316L (0,02 wt%) ditou o menor volume de carbonetos medido nos revestimentos em comparação aos revestimentos sobre API 5L X70 (FERNANDES, et al., 2011; FERNANDES, CAVALEIRO, LOUREIRO, 2012).

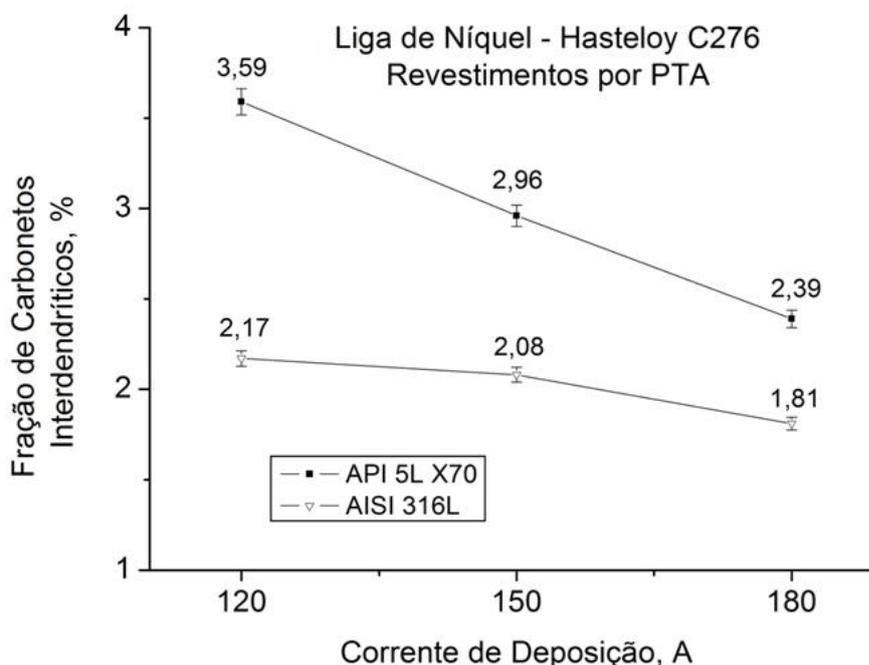


Figura 29 - Fração de carbonetos interdendríticos para os revestimentos de liga Hasteloy C276.

O espaçamento de braços dendríticos (DAS) da fase Ni-CFC foi alterado pela corrente de deposição e pela condutividade térmica do substrato de aço utilizado. Ambos, corrente de deposição e condutividade térmica do substrato, alteraram a temperatura do substrato, modificando o refinamento da microestrutura (DAS) e, portanto, a distribuição de carbonetos interdendríticos, Figura 30 (ANTOSZCZYSZYN et al., 2014).

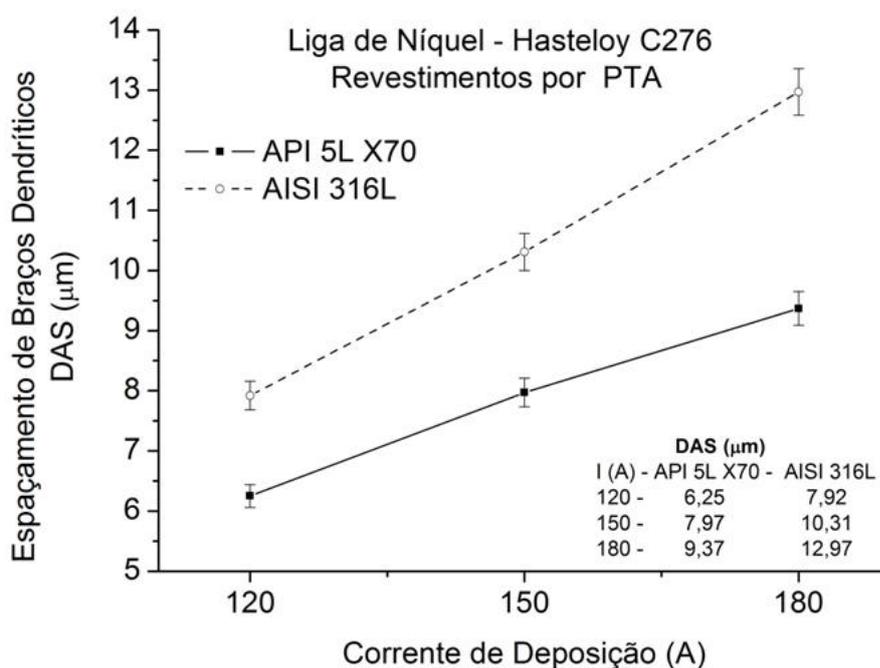


Figura 30 - Espaçamento de braços dendríticos da estrutura da liga Hasteloy C276.

4.3 PROCESSAMENTO SOBRE A DUREZA E A RESISTÊNCIA AO DESGASTE

Considerando a influência da corrente de deposição e do substrato sobre a microestrutura dos revestimentos, a dureza deve ser modificada da mesma forma, ou seja, quanto maior a diluição, menor a dureza obtida, Figura 31 e Figura 32. A interação com o substrato (diluição) foi alterada diretamente pela corrente de deposição e pelo substrato de aço. Assim, a composição química e a taxa de resfriamento na solidificação foram alteradas. Os fatores afetados por estas mudanças foram: elementos de liga em solução sólida, a fração e distribuição de carbonetos e o espaçamento de braços dendríticos (DAS).

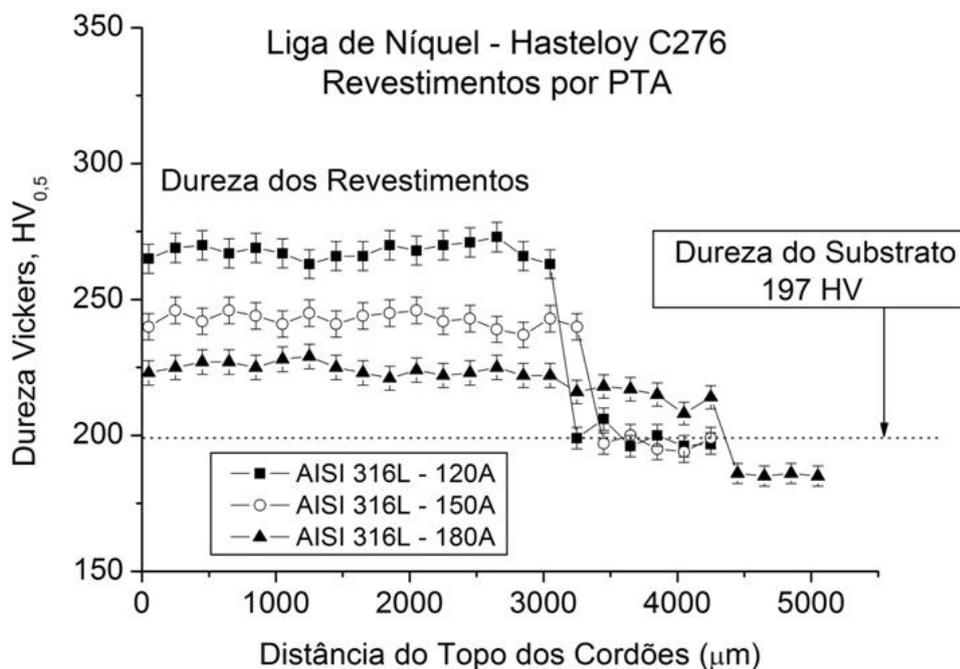


Figura 31 - Perfis de dureza dos revestimentos da liga Hasteloy C276 sobre AISI 316L.

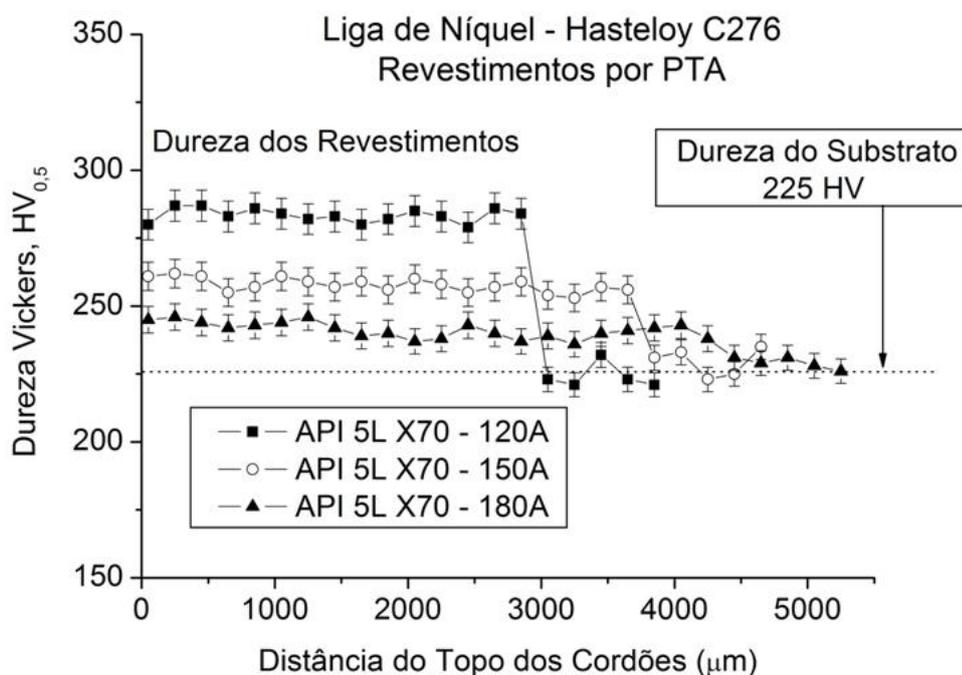


Figura 32 - Perfis de dureza dos revestimentos da liga Hasteloy C276 sobre API 5L X70.

Os revestimentos depositados sobre o aço inoxidável AISI 316 L mostraram maior diluição e redução do teor de elementos de liga que promovem endurecimento

por solução sólida. O menor teor de Carbono deste substrato induziu menor fração de carbonetos interdendríticos. Finalmente, a menor taxa de resfriamento na solidificação levou a maior espaçamento de braços dendríticos (DAS). Conforme literatura, menor dureza foi observada nestes revestimentos (ANTOSZCZYSZYN et al., 2014).

Os revestimentos de liga de Níquel apresentaram redução na dureza média entre 283 e 243 e entre 267 e 225 HV_{0,5} para os revestimentos sobre aço API 5L X70 e AISI 316L, respectivamente, como consequência da maior diluição obtida e redução do refino da microestrutura. Revestimentos sobre aço API 5L X70 exibiram dureza até 8 % superior quando comparados aos depósitos sobre AISI316 L, enquanto a diferença atingiu 15 % com o aumento da corrente de deposição para os dois substratos. Isto indicou que a interação com o substrato (diluição) é o fator mais importante que influencia a dureza, Figura 33 - Comparativo da dureza dos revestimentos da liga Hasteloy C276. Figura 33, (MANKINS e LAMB, 1990; HOU, et al., 2009; ANTOSZCZYSZYN et al., 2014).

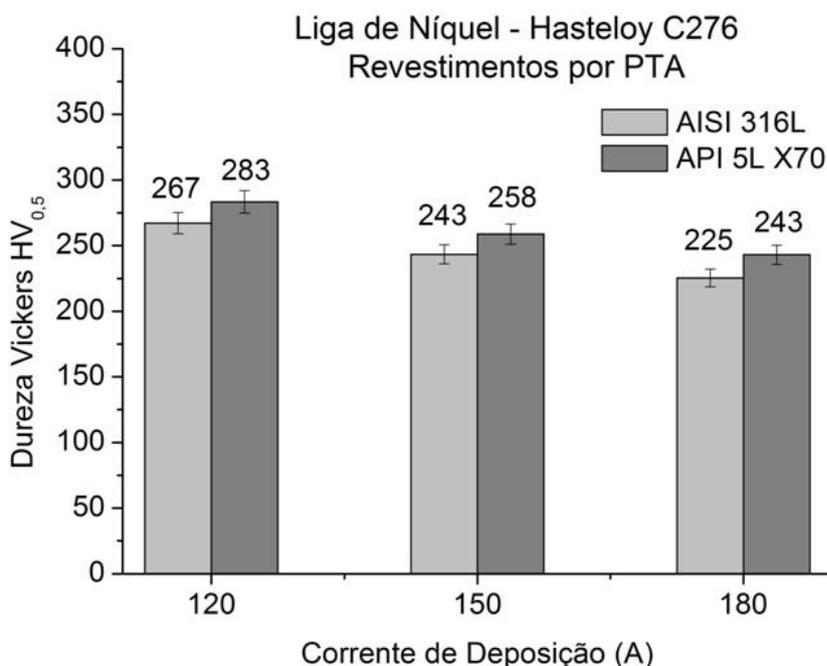


Figura 33 - Comparativo da dureza dos revestimentos da liga Hasteloy C276.

Uma pequena fração de carbonetos foi medida e variou entre 1,81 e 3,59 %, como resultado do teor de Carbono da liga C276 (0,10 wt %) e do teor de Carbono

dos substratos, (0,02 wt % e 0,17 wt %). A maior diluição e o menor teor de Carbono do aço inoxidável levaram às menores frações, as quais variaram entre 2,17 e 1,81 % para 120 e 180A respectivamente.

A mesma faixa de correntes para os depósitos sobre aço API 5L X70 levaram à fração entre 3,59 e 2,39 %. Apesar do maior volume e do diferente tipo de carboneto formado, uma menor diferença foi observada entre substratos.

Um diferente grau de refinamento da microestrutura foi observado para os revestimentos processados em substratos com diferente condutividade térmica. DAS entre 7,9 e 13,0 μm foi verificado para os revestimentos sobre AISI 316L e entre 6,2 para 9,4 μm para os depósitos sobre API 5L X70. O DAS alterou a extensão de fase γ Ni-FCC livre de carbonetos e ao mesmo tempo a distribuição dos carbonetos formados.

Adicionalmente, a redução dos elementos de liga endurecedores por solução sólida foi também verificada como consequência da maior diluição. O teor de Cromo, Molibdênio e Tungstênio foi reduzido para os revestimentos sobre API 5L X70, enquanto o Molibdênio e Tungstênio foram reduzidos para os depósitos sobre AISI 316L Tabela 2. Portanto, a dureza foi influenciada pelo teor de elementos em solução sólida na estrutura dendrítica Ni-FCC, como relatado em trabalhos anteriores (KESAVAN, KAMARAJ, 2011; HOU, et al., 2009; GUOQING, et al., 2013; ANTOSZCZYSZYN et al., 2014).

Para mapear a influência das condições de processamento por PTA sobre a resposta ao desgaste abrasivo por deslizamento, os revestimentos foram testados na condição como depositada com um conjunto fixo de parâmetros de ensaio. As alterações observadas na microestrutura e na dureza como consequência do processamento com correntes mais elevadas, levaram a aumento na taxa de perda de massa, Figura 34 a Figura 38.

Nas condições de ensaio, uma correlação linear entre a perda de massa e a distância de deslizamento permitiu a determinação do coeficiente de perda de massa, em concordância com a literatura (SCHEID, 2013). Os resultados seguiram a equação de *Holm-Archard*, que estabelece que o volume de desgaste é inversamente proporcional à dureza (RABINOWICZ, 1995).

A composição química dos revestimentos de liga C276 influenciou a taxa de perda de massa, sendo aqueles processados com corrente de 120 A (menor

diluição) foi o que apresentou a mais baixa taxa de perda de massa de 0,0455 mg/m (API 5L X70) e 0,0474 mg/m (AISI 316L). À medida que a diluição aumentou para 180A, o coeficiente de perda de massa alcançou 0,0548 a 0,0545 mg/m, respectivamente.

A maior interação com o substrato obtida pelo aumento da corrente de deposição entre 120 e 180A elevou a taxa de perda de massa em 15,6 % para os revestimentos sobre AISI 316L e 19,8% sobre API 5L X70. Seguindo a mesma tendência observada para a dureza, pequenas diferenças foram observadas na taxa de desgaste ($\leq 4\%$) para os revestimentos em diferentes substratos de aço.

O comportamento superior observado para os revestimentos depositados com corrente de 120A pode ser associado à mais alta dureza. O resultado pode ser ainda atribuído à maior fração de carbonetos, maior teor de elementos endurecedores por solução sólida e menor espaçamento de braços dendríticos (DAS) (ANTOSZCZYSZYN et al., 2014).

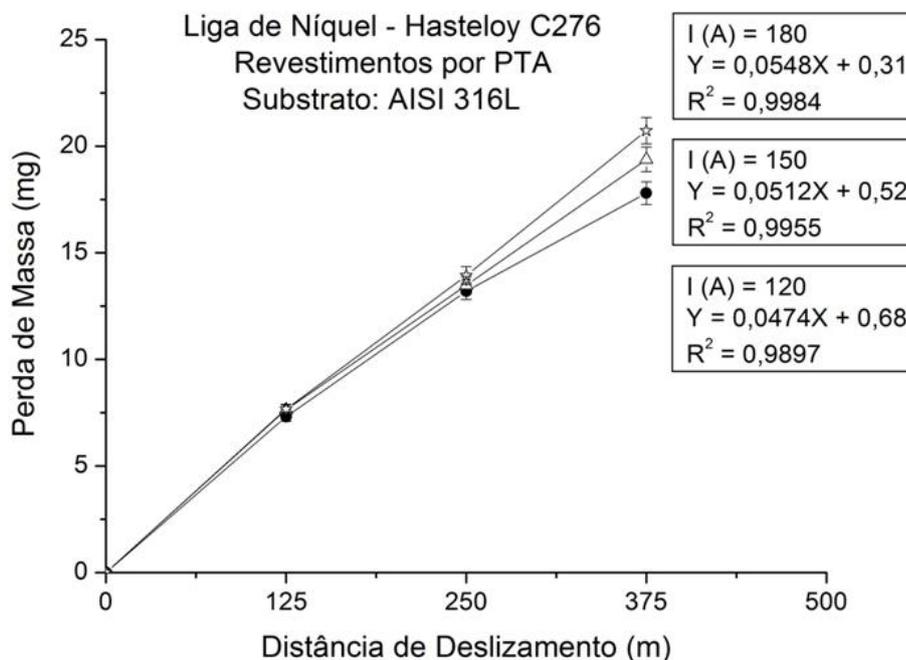


Figura 34 - Curvas de desgaste para os revestimentos da liga Hasteloy C276.

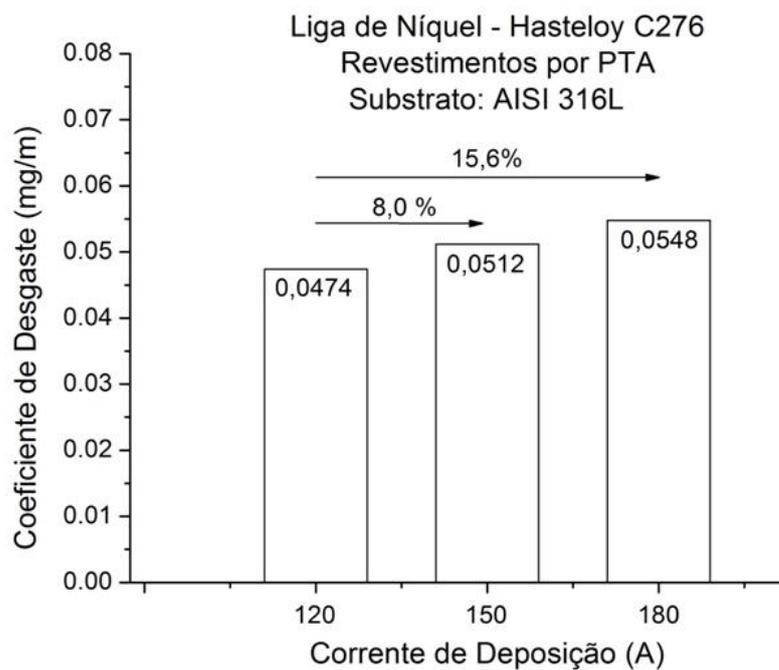


Figura 35 - Comparativo dos coeficientes de desgaste para os revestimentos da liga Hasteloy C276 sobre AISI 316L.

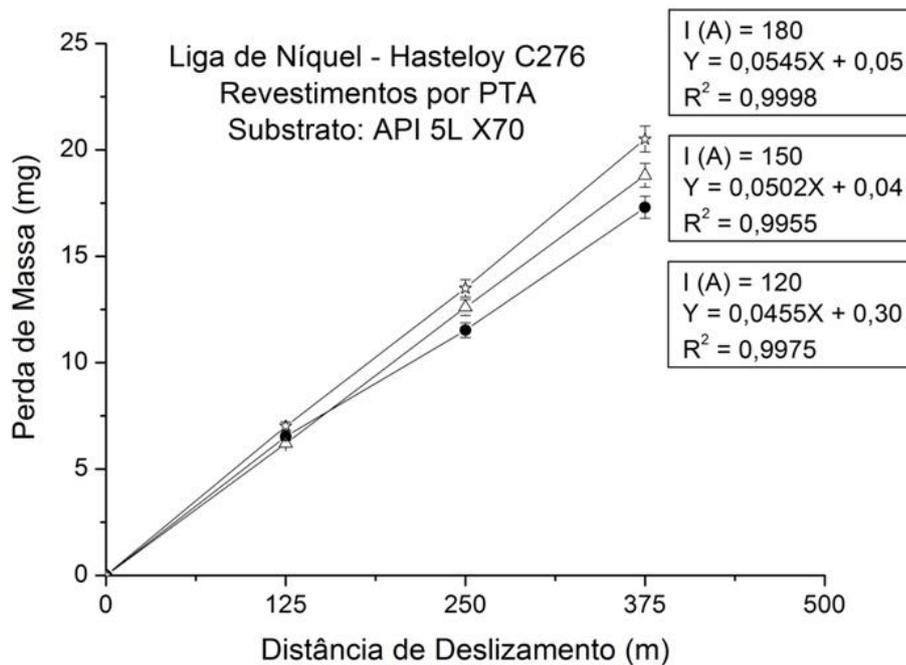


Figura 36 - Curvas de desgaste para os revestimentos da liga Hasteloy C276.

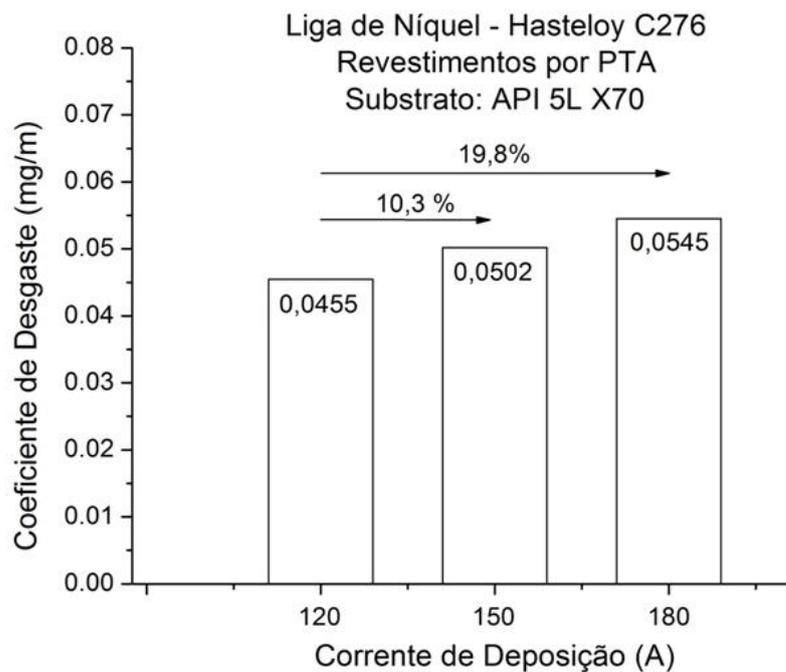


Figura 37 - Comparativo dos coeficientes de desgaste para os revestimentos da liga Hasteloy C276 sobre AISI 316L.

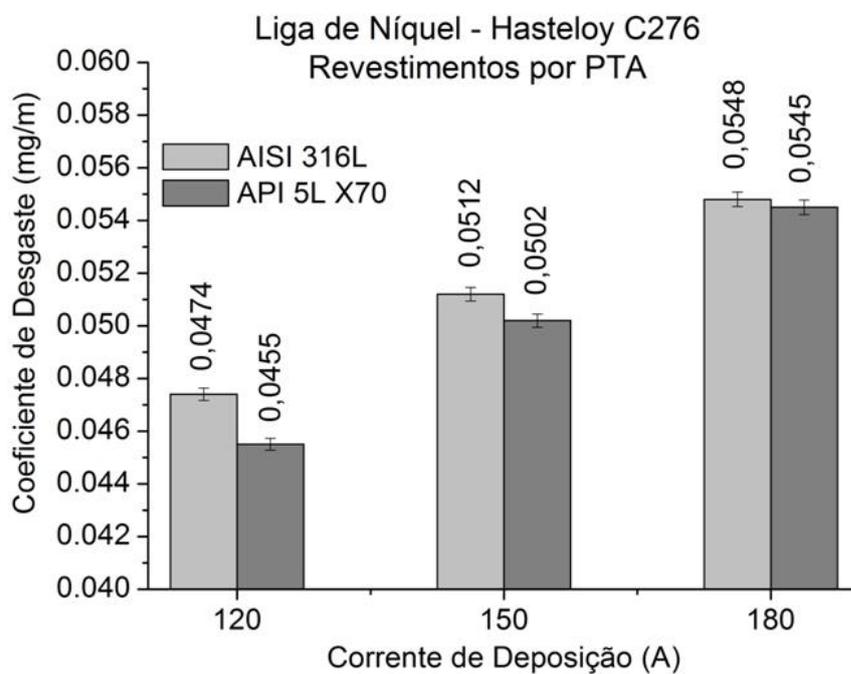


Figura 38 - Comparativo dos coeficientes de desgaste dos revestimentos da liga Hasteloy C276.

Os revestimentos foram finalmente avaliados a partir de ensaios em tribômetro linear, a fim de avaliar comparativamente o efeito das condições de

processamento sobre o coeficiente de atrito desenvolvido em relação a um contracorpo de Zircônia (ZrO_2), Figura 39.

A comparação do coeficiente de atrito dos revestimentos mostrou diferenças pequenas, mas coerentes com as tendências observadas para as medidas de dureza. O aumento da corrente de deposição levou à redução na dureza e a um mais elevado coeficiente de atrito. Acréscimos de 7,9 e 7,5 % foram observados para os revestimentos sobre aço API 5L X70 e AISI 316L, respectivamente. A maior diferença (12,2 %) foi observada entre a condição de deposição de 120A sobre o aço API 5L X70 e a deposição com 180 A sobre aço AISI 316L, decorrente do efeito concomitante do substrato e da corrente de deposição.

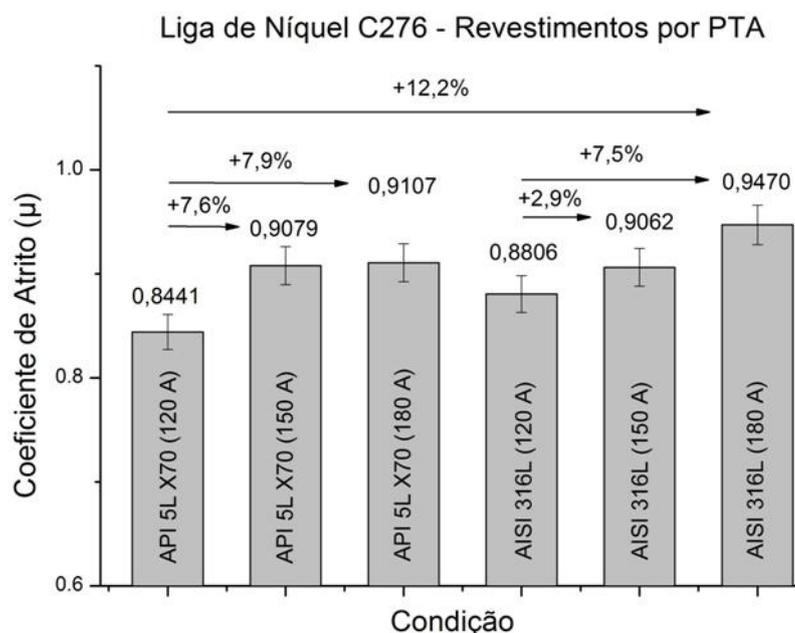


Figura 39 - Comparativo dos coeficientes de atrito dos revestimentos da liga Hasteloy C276.

Uma análise comparativa da taxa de desgaste dos revestimentos foi realizada a partir da medida da largura das trilhas formadas em ensaio em tribômetro. Os revestimentos com menor dureza apresentaram maior coeficiente de atrito e, como consequência, maior largura de trilha formada, Figura 40.

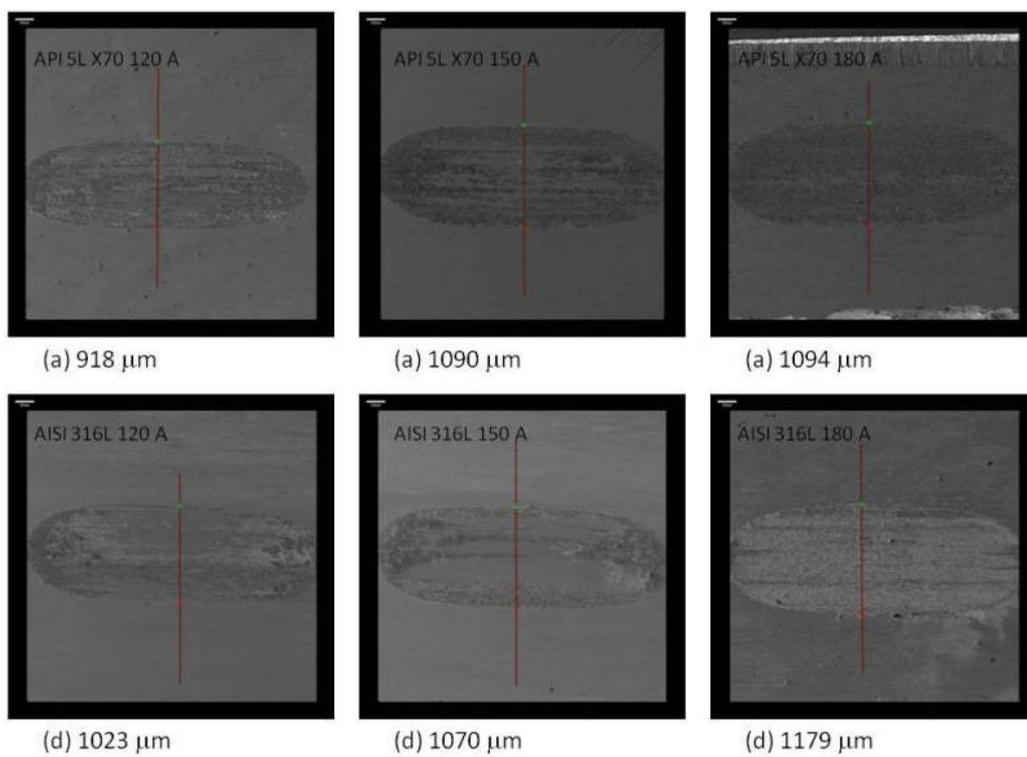


Figura 40 - Largura das trilhas de desgaste formadas em ensaio em tribômetro.

5 CONCLUSÃO

Com base na proposta deste trabalho e os resultados apresentados, pode-se concluir que:

- 1- A corrente de deposição influencia na geometria dos cordões formados. A redução da corrente de deposição provoca aumento no ângulo de molhamento, o que prejudica a obtenção de revestimentos livres de defeitos.
- 2- O tipo de substrato de aço influencia a geometria dos cordões, em decorrência da condutividade térmica.
- 3- Os revestimentos da liga Hastelloy C276 apresentam dependência da microestrutura e com a corrente adotada na deposição por PTA. Aumento na corrente de deposição resulta em uma microestrutura mais coalescida (maior DAS) o que, conjuntamente com a diluição maior, leva a alteração na composição química dos revestimentos, modificando soluções sólidas, fração e o tipo de carbonetos interdendríticos formados.
- 4- Revestimentos de liga Hastelloy C276 sobre aços API 5L X70 apresentam maior fração volumétrica de carbonetos interdendríticos quando comparados à deposição sobre AISI 316L, em decorrência da menor diluição e do maior teor de carbono deste substrato.
- 5- A dureza dos revestimentos obtidos por PTA depende de diversos fatores que atuam conjuntamente. O grau de refinamento da microestrutura (DAS), a fração e o tipo de carbonetos formados, bem como o efeito de endurecimento por soluções sólidas ditam a dureza final dos revestimentos.
- 6- O desempenho em desgaste é afetado pela corrente de deposição e pelo tipo de substrato, sendo mais significativo o efeito do primeiro. Melhor desempenho foi obtido pelos revestimentos sobre aço API 5L X70 processados com corrente de 120 A.
- 7- A taxa de perda de massa dos revestimentos é diretamente dependente da corrente de deposição para o mesmo tipo de substrato utilizado. Neste caso, a resistência ao desgaste é afetada pelo aporte térmico na soldagem que, por sua vez, altera o grau de refinamento e a diluição da liga (carbonetos e soluções sólidas).

8- O coeficiente de atrito dos revestimentos de liga Hastelloy C 276 é ditado diretamente pela dureza. O desgaste observado a partir da largura das trilhas geradas em ensaio tipo esfera sobre superfície plana (tribômetro) confirmou a correlação observada anteriormente entre a dureza e a taxa de perda de massa.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Algumas sugestões de trabalhos futuros são apresentadas conforme segue:

- Estudar o revestimento de áreas a partir da sobreposição de cordões, a serem depositados partindo da geometria obtida para cordões únicos.
- Sugere-se a avaliação do efeito da diluição sobre a resistência à corrosão destes revestimentos a partir do levantamento das curvas de voltametria cíclica.
- Estudar a estabilidade em elevada temperatura dos revestimentos de liga C276, visando aplicações específicas para turbinas.
- Avaliar os revestimentos frente a solicitações que envolvem corrosão sob-tensão, corrosão-fadiga, encontrados em aplicações na indústria do Petróleo.
- Avaliar o efeito da taxa de resfriamento (controlada) sobre a microestrutura e propriedades dos revestimentos, já que esta característica não foi avaliada diretamente.

REFERÊNCIAS

ALLOYWIRE INTERNATIONAL, **Hastelloy C276 Especificação**, disponível em: <<http://www.alloywire.com>> Acesso em 19 nov. 2013 às 23:30:00

ALMEIDA, V. A. Buss. **Obtenção in-situ de Intermetálicos Ni/Al**. Dissertação de Mestrado, PIPE-UFPR, 2003. Disponível em :< <http://www.pipe.ufpr.br/portal/defesas/dissertacao/055.pdf>>, Acesso em 16 nov. 2013 às 17:40:00

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

ANTOSZCZYSZYN, T. J., et al. **Impact of Dilution on the Microstructure and Properties of Ni-based 625 Alloy Coatings**. Soldagem e Inspeção. 2014; 19: 134 – 144.

AZIZ I, Asphahani. Corrosion of Nickel-Base Alloys, In: **ASM International, Corrosion**, 1993, Ohio, pp. 641-657.

BOND, D.; et al. Efeito da Intensidade de Corrente nas Características de Revestimentos Soldados com Material de Adição Atomizado. **Anais do Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação III COBEF**. Joinville, 2005

BREITENBACH, J. O. **Avaliação da Influência do Entalhe em Corpos de Prova Ensaiaados a Baixa Taxa de Deformação em Meio Etanol**, Dissertação de Mestrado, PPG3M, UFRGS, 2012.

CIESLAK, M.J., Headley,T.J., Romig Jr.,A.D., **The welding metallurgy of Hastelloy alloys C-4, C-22 and C-276**, *Metallurgical Transactions A (17 A)*, p. 2035-2047, 1986, Disponível em:< <http://link.springer.com/article/10.1007%2FBF02645001#page-1> >, Acesso em 16 nov. 2014 às 12:01:00

DIAZ, Víctor Manuel Vergara. **Inovação do Equipamento e Avaliação do Processo Plasma de Arco Transferido Alimentado com Pó (PTAP) Para Soldagem Fora de Posição**. 2005. 198 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005. Disponível em: <http://demec.ufpr.br/pesquisas/superficie/teses/tese_victor.pdf>. Acesso em: 10 out. 2014.

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

FERNANDES, F., et al., 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**. 2011; 205: 4094–4106.

GONÇALVES, R. H., DUTRA, J. C. PTA-P Process - A Literature Review as Basis for Innovations. Part 1 of 2: Constructive Elements. **Soldagem e Inspeção**. 2012; 17: 076-085.

GONÇALVES, R. Silva., DUTRA, Jair, **Processo PTA-P – Uma Revisão da Literatura como Base para Inovações. Parte 1 de 2: Elementos Construtivos**, UFSC Departamento de Engenharia Mecânica / LABSOLDA – Instituto de Soldagem e Mecatrônica, Florianópolis, SC, Brasil, in Soldag. Insp. São Paulo, Vol.17, Nº. 1, Jan/Mar 2012, p.076-085.

_____. **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**, UFSC Departamento de Engenharia Mecânica / LABSOLDA – Instituto de Soldagem e Mecatrônica, Florianópolis, SC, Brasil, in Soldag. Insp. São Paulo, Vol.17, Nº. 2, Abr/Jun 2012, p.173-183.

GRAF, K., KUWABARA, E.Y., D'OLIVEIRA, A S.C.M., **Plasma Transferred Arc Hardfacing with a Ni-based Alloy**, Materials Week, 2002, Disponível em: <http://demec.ufpr.br/pesquisas/superficie/artigos/2002_Materials_week_2002/mw2002_340.pdf>, Acesso em 8 nov. 2014 às 23:50:00

GRAY, R.D. **Stellite(R), A History of the Haynes Stellite Company 1912-1972**, Cabot Corporation, 1981, p 20. In: MANKINS,W.L., LAMB,S., **Nickel and Nickel Alloys**, ASM Handbook vol2., 10th edition, 1997. p. 1365

GUOQING, C., et al., Microstructure and wear properties of nickel-based surfacing deposited by plasma transferred arc welding. **Surface and Coatings Technology**. 2013; 228: 266–282.

HÖGANÄS, **Product Specification Hast C276-M (53-150µM)**, Quality System, 18/02/2011.

HOU, Q. Y., et al., Effects of molybdenum on the microstructure and wear resistance of nickel-based hardfacing alloys investigated using Rietveld method. **J. Materials Processing and Technology**. 2009; 209: 2767–2772.

HUANG, X et al. **Applications of PTA Powder Welding in Petroleum Chemical Industry**. Thermal Spray: Meeting The Challenges Of The 21 St Century: Proceedings of the 15th International Thermal Spray Conference, Beijing, p.1013-1017, 1998. Disponível em: < <http://books.google.com.br/books?id=o-wz5phUzhEC&pg=PA1015&lpg=PA1015&dq=Applications+of+PTA+Powder+Welding+in+Petroleum+Chemical+Industry&source=bl&ots=JyGZVvbw6q&sig=vrR0PkiRfq2cr8dFVa4QsRxYUfM&hl=pt-BR&sa=X&ei=2udoVLbyAYSVNoGsg9AH&ved=0CC8Q6AEwAg#v=onepage&q=Applications%20of%20PTA%20Powder%20Welding%20in%20Petroleum%20Chemical%20Industry&f=false> >, Acesso em 02 nov. 2014 às 16:45:00

JUNIOR, M. W. **Nitreção a Plasma do Aço ABNT 316L em Baixas Temperaturas**. Tese de Doutorado, PPG3M, UFRGS, 2002.

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

KOU, S., **Welding Metallurgy**, 2nd Edition, Wiley -Interscience, 2003

MANKINS, W. L. and LAMB, S. Nickel and Nickel Alloys, In: **ASM International, Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purposed Materials**, 1990, Ohio, pp.1363–1403.

_____. Nickel and Nickel Alloys, **ASM Handbook** vol2., 10th edition, 1997. pp. 1362-1404

MARCONI, M; MARCONI, B. **Powder Plasma Arc Welding of Thick Walled Pipes**, International Institute of Welding, 2005, apud TIGRINHO, J. Junior, **Superfícies Enriquecidas por Carbonetos de Tungstênio Depositados a Plasma por Arco Transferido**, Dissertação de Mestrado, PIPE-UFPR, 2005. Disponível em: <<http://www.pipe.ufpr.br/portal/defesas/dissertacao>>, Acesso em 19 nov. 2013 às 19:30:00

RABINOWICZ, E. Friction and Wear of Materials, Second ed., **Wiley Interscience**, 1995 New York, pp. 143 – 190.

REINALDO, P. R., D'OLIVEIRA, A. S. C. M. NiCrSiB Coatings Deposited by Plasma Transferred Arc on Different Steel Substrates. **Journal of Materials Engineering and Performance.** 2013; 22: 590-597.

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

Scheid, A., A. S. C. M. D'Oliveira. Effect of processing on microstructure and properties of CoCrMoSi alloy. **Mater. Res.** 16 (6), 2013, 1325-1330.

Special Metals Corporation. **INCONEL alloy C-276**, Publication Number SMC-019, Copyright ©, 2004 (Sept 04), disponível em: <<http://www.specialmetals.com/documents/Inconel%20alloy%20C-276.pdf>> Acesso em 19 nov. 2013 às 19:36:00

TIGRINHO, J. Junior, **Superfícies Enriquecidas por Carbonetos de Tungstênio Depositados a Plasma por Arco Transferido**, Dissertação de Mestrado, PIPE-UFPR, 2005. Disponível em: <<http://www.pipe.ufpr.br/portal/defesas/dissertacao>>, Acesso em 19 nov. 2013 às 19:30:00

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

WHITE, F.B. Howard., Nickel, An Historical Review, Van Nostrand, 1963, p 169. In: MANKINS,W.L., LAMB,S., **Nickel and Nickel Alloys**, ASM Handbook vol2., 10th edition, 1997. p. 1365

YAEDU, A. E., D'OLIVEIRA, A. S. C. M. Cobalt based alloy PTA hardfacing on different substrate steels. **Materials Science and Technology**. 2005; 21: 459-466.

REFERÊNCIA DE NORMATIZAÇÃO

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 14724: informação e documentação: trabalhos acadêmicos – apresentação. Rio de Janeiro: 2002. 7 p. Disponível em: < http://www.ufrgs.br/termisul/oa3/Norma_ABNT.pdf > acesso em: 17 nov. 2013, 8:35:00

_____. NBR 6023: informação e documentação: referências – elaboração. Rio de Janeiro, 2002.

_____. NBR 6027: informação e documentação: sumário - apresentação. Rio de Janeiro: 2003. 2 p.

_____. NBR 6028: informação e documentação – resumo – apresentação. Rio de Janeiro: 2003. 2 p.

_____. NBR 10520: informação e documentação: apresentação de citações em documentos. Rio de Janeiro: 2002. 7 p.

_____. NBR 6024: informação e documentação - numeração progressiva das seções de um documento escrito - Apresentação. Rio de Janeiro: 2003.