



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

PRISCILA PEREIRA BARBOSA DA SILVA

**PARAMETRIZAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE REVESTIMENTOS DE INCONEL
625 DEPOSITADOS POR PLASMA/PÓ COM ARCO TRANSFERIDO SOBRE
SUBSTRATO DE AÇO ASTM A-36**

Recife

2019

PRISCILA PEREIRA BARBOSA DA SILVA

**PARAMETRIZAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE REVESTIMENTOS DE INCONEL
625 DEPOSITADOS POR PLASMA/PÓ COM ARCO TRANSFERIDO SOBRE
SUBSTRATO DE AÇO ASTM A-36**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica do Departamento de Engenharia Mecânica, Centro de tecnologia e Geociências da Universidade Federal de Pernambuco como parte dos requisitos parciais para obtenção do título de mestre em Engenharia Mecânica.

Área de concentração: Engenharia de materiais e fabricação

Orientador: Prof. Dr. Severino Leopoldino Urtiga Filho

Coorientadora: Prof.^a Dr.^a Magda Rosângela Santos Vieira

Recife

2019

Catálogo na fonte
Bibliotecária Maria Luiza de Moura Ferreira, CRB-4 / 1469

- S586p Silva, Priscila Pereira Barbosa da.
Parametrização e caracterização de revestimentos de INCONEL 625 depositados por plasma pó com arco transferido sobre substrato de aço ASTM A-36 / Priscila Pereira Barbosa da Silva. - 2019.
76 folhas, il., tabs., abr. e sigl.
Orientador: Prof. Dr. Severino Leopoldino Urtiga Filho.
Coorientadora: Prof^a. Dr^a. Magda Rosângela Santos Vieira.
- Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2019.
Inclui Referências.
1. Engenharia Mecânica. 2. Deposição por PTA-P. 3. INCONEL 625. 4. Geometria do revestimento. 5. Diluição. I. Urtiga Filho, Severino Leopoldino (Orientador). II. Vieira, Magda Rosângela Santos (Coorientadora). III. Título.

UFPE

621 CDD (22. ed.)

BCTG/2019-140

PRISCILA PEREIRA BARBOSA DA SILVA

**PARAMETRIZAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE REVESTIMENTOS DE INCONEL
625 DEPOSITADOS POR PLASMA/PÓ COM ARCO TRANSFERIDO SOBRE
SUBSTRATO DE AÇO ASTM A-36**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica do Departamento de Engenharia Mecânica, Centro de tecnologia e Geociências da Universidade Federal de Pernambuco como parte dos requisitos parciais para obtenção do título de mestre em Engenharia Mecânica.

Aprovada em: 29/ 01/ 2019.

BANCA EXAMINADORA

Prof^o. Dr. Severino Leopoldino Urtiga Filho (Orientador)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof^o. Dr^a. Magda Rosângela dos Santos Vieira (Coorientadora)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof^o. Dr. Flávio José da Silva (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof^a. Dr^a. Roseana Florentino da Costa Pereira (Examinadora Externa)
Instituto Federal de Pernambuco

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos que me apoiaram nessa fase tão importante da minha vida, em especial:

à toda minha família, que me ensinou a base do que sou. Principalmente, aos meus pais, Mirinaldo e Jacilene, e a meu irmão, Josenildo, que me apoiam nas minhas decisões e me guiam para caminhos que me fazem uma pessoa melhor;

a Gilson, meu namorado; por estar comigo sempre; por me apoiar incondicionalmente, mesmo nos dias difíceis; por entender a importância que meus objetivos têm pra mim; por acreditar no meu potencial;

aos professores que tanto me ajudaram na minha formação. Com destaque para meu orientador, professor Severino Leopoldino Urtiga Filho e minha coorientadora professora Magda Rosângela Santos Vieira, que me deram a orientação e o suporte necessários para que este trabalho fosse realizado;

aos amigos que fiz na Universidade Federal de Pernambuco e que tornaram esses anos de dedicação mais produtivos e ao mesmo tempo mais leves;

à Ivana pelas conversas motivadoras e pelo suporte emocional de que tanto precisei;

a meus amigos do LAB 57 do INTM, pela amizade e pelo apoio técnico;

a todo pessoal do COMPOLAB;

à UFPE pela oportunidade de poder realizar este trabalho;

ao CNPq por fomentar a pesquisa através de bolsa de mestrado;

às instituições FINEP e Petrobrás.

a Deus por me fazer forte nessa jornada.

RESUMO

O presente trabalho teve como objetivo estudar o processo de revestimento por Plasma/Pó com arco transferido (PTA-P) para depositar o consumível INCONEL 625 sobre uma superfície aço ASTM A-36. Foram avaliadas a influência da velocidade de soldagem e da corrente de soldagem na geometria dos cordões de solda, no processo de diluição do revestimento e na Microdureza Vickers da liga depositada. Corpos de prova de 100x100 mm foram confeccionados a partir de uma chapa de aço ASTM A-36 de 7,5 mm de espessura, e foram utilizados como substrato para deposição da liga INCONEL 625. Os ensaios foram conduzidos por meio de um planejamento experimental, sendo investigada a influência dos parâmetros - corrente de soldagem (160 e 180 A) e velocidade de soldagem (8 e 10 mm/min) na porcentagem de diluição, mantendo-se constante os demais parâmetros de soldagem. Após obtenção dos revestimentos, foram realizados ensaios macrográficos da seção transversal para avaliar a geometria dos cordões depositado. As microestruturas das seções transversais foram avaliadas por microscopia ótica (MO) e Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), para identificar a possível presença de fases precipitadas na matriz ferrita. A composição química dessas fases e o teor de ferro difundido do metal base para o revestimento foram analisados por Espectroscopia de Energia Dispersiva de raios X. A natureza das fases precipitadas foi analisada por Difração de Raios-X (DRX) nas amostras de topo do revestimento retificadas. A microdureza Vickers foi medida com intuito de correlacionar seu resultado com o percentual de ferro difundido do metal base para o revestimento. Os resultados confirmaram a influência dos parâmetros de soldagem na diluição dos revestimentos. As morfologias dos revestimentos apresentaram-se como uma matriz γ com precipitação de segunda fase composta por Ni, Nb, Cr e Mo. O volume destas precipitações aumentou com o aumento da diluição. Isso ocorreu devido à intensificação da migração do Fe presente no metal base do revestimento através do fenômeno de difusão, com o aumento da diluição. O Fe reduziu a solubilidade do Nb e Mo da matriz γ , ocasionando a diminuição da sua dureza.

Palavras-chave: Deposição por PTA-P. INCONEL 625. Geometria do revestimento. Diluição.

ABSTRACT

The present work goal was to study the Plasma/Powder coating with transferred arc (PTA-P) to deposit the INCONEL 625 consumable on an ASTM A-36 steel surface, in order to evaluate the influence of the welding speed and the welding current on the weld bead geometry, the coating dilution process and the Vickers Microhardness of the deposited alloy. Test specimens with dimensions of 100x100 mm were made from an ASTM A-36 steel plate 7.5 mm thick and were used as substrate for deposition of the INCONEL 625 alloy. The tests were conducted through an experimental design, the influence of the parameters - welding current (160 and 180 A) and welding speed (8 and 10 mm / min) in the dilution percentage was investigated, maintaining the other welding parameters constant. After obtaining the coatings, cross-sectional macrographic tests were carried out to evaluate the deposited cords geometry. The cross sections microstructures were evaluated by optical microscopy (OM) and Scanning Electron Microscopy (SEM), to identify the possible presence of precipitated phases in the ferrite matrix. The chemical composition of these phases, as well as the diffused iron content of the base metal for the coating, were analyzed by Energy-dispersive X-ray Spectroscopy. The of the precipitated phases was analyzed by X-Ray Diffraction (XRD) in the rectified top coat samples. The Vickers Microhardness was analyzed in order to correlate its own results with the percentage of iron diffused from the base metal to the coating. The results confirmed the influence of the welding parameters on the coatings dilution. The coatings morphologies were presented as a γ matrix with second phase precipitation composed of Ni, Nb, Cr and Mo. The volume of these precipitations increased with increasing dilution. This was due to increased migration of Fe present in the base metal of the coating through diffusion phenomena, with increasing dilution. The Fe reduced the solubility of Nb and Mo of the γ matrix, causing the decrease of its hardness.

Keywords: PTA-P deposition. INCONEL 625. Welding geometry. Dilution.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 -	Perfil geométrico do cordão de solda: (a) união da junta soldada (aplicações convencionais) (b) soldagem de revestimento.....	19
Figura 2 -	Representação esquemática dos processos TIG e PTA.....	22
Figura 3 -	Representação esquemática da tocha no processo PTA-P.....	24
Figura 4 -	Representação da seção transversal de uma amostra revestida....	27
Figura 5 -	Elementos constituintes das Superligas.....	30
Figura 6 -	Estrutura cristalográfica de gama.....	32
Figura 7 -	Estrutura de cristal da fase γ'	32
Figura 8 -	Fluxograma utilizado para execução da metodologia.....	43
Figura 9 -	Esquema do processo de plasma com arco transferido.....	45
Figura 10 -	Conjunto tartilope: (a) Carrinho do tartilope (b) Gabinete de controle (c)Teclado de controle (d) Base magnética.....	46
Figura 11 -	Componentes do equipamento PTA-P: (a) Alimentador de pó; (b) Fonte de soldagem; (c) Unidade de resfriamento; (d) Tocha de soldagem.....	48
Figura 12 -	Disposição dos cordões de Revestimento.....	50
Figura 13 -	Corte das amostras para evitar o efeito de borda.....	51
Figura 14 -	Parâmetros Utilizados para avaliar a geometria dos revestimentos e a diluição.....	52
Figura 15 -	Disposição dos perfis de microdureza Vickers.....	53
Figura 16 -	Macrografia da seção transversal dos revestimentos da Liga INCONEL 625 sobre o substrato de Aço ASTM A36.....	54
Figura 17 -	Gráfico correlacionando altura de reforço com os parâmetros de processamento da liga INCONEL 625.....	56
Figura 18 -	Gráfico de correlação entre a Penetração e os parâmetros de processamentos dos revestimentos de INCONEL 625.....	57
Figura 19 -	Gráfico que relaciona os valores de largura dos cordões com os parâmetros de processamento da liga INCONEL 625.....	58
Figura 20 -	Gráfico de relação entre ângulo de molhabilidade e parâmetros de processamento da liga INCONEL 625.....	59

Figura 21 -	Gráfico de relação entre o percentual de diluição e os parâmetros de processamento da liga INCONEL 625.....	60
Figura 22 -	Imagens de Microscopia ótica do metal de solda substrato dos revestimentos: a) C160V8, b) C160V10, c) C180V8, d) 180V10.....	62
Figura 23 -	Morfologias de MEV dos revestimentos depositados por PTA-P: (a) C160V8; (b) C160V10; (c) C180V8; (d) C180V10.....	63
Figura 24 -	Relação entre o percentual de diluição e a fração de fase secundária.....	64
Figura 25 -	Microestrutura do metal de adição nas amostras: a) C160V8, b) C160V10, c) C180V8, d) 180V10.....	65
Figura 26 -	Morfologia das fases secundárias encontradas nos revestimentos na região: a) interdendrítica e b) de inclusões.....	66
Figura 27 -	Análise do precipitado: (a) MEV e (b) EDS.....	67
Figura 28 -	Resultado da análise de DRX para as amostras de topo.....	68
Figura 29 -	Média dos perfis de dureza nas seções transversais das deposições.....	70

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -	Comparação da diluição média para diferentes processos de soldagem.....	26
Tabela 2 -	Limites de composição da liga INCONEL 625.....	34
Tabela 3 -	Composição do metal de adição e do substrato.....	44
Tabela 4 -	Parâmetros utilizados no processo de soldagem PTA-P para soldagem da liga INCONEL 625.....	49
Tabela 5 -	Condição das amostras de revestimento codificadas de acordo com os parâmetros de processo utilizados.....	49
Tabela 6 -	Parâmetros de soldagem utilizados no processo de revestimento.	50
Tabela 7 -	Valores geométricos dos Cordões de INCONEL 625.....	55
Tabela 8 -	Classificação das amostras conforme o produto da diluição geométrica e o índice de convexidade.....	61
Tabela 9 -	Fração de fase precipitada presentes nas amostras, para diferentes parâmetros de processamento.....	63
Tabela 10 -	Composições químicas elementares obtidas no ensaio de EDS dos revestimentos.....	67

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ADP	Alimentados de Pó
AWS	American Welding Society
CFC	Cúbica de Face Centrada
CVD	Chemical Vapour Deposition
DRX	Difração de raios - X
EDS	Energy Dispersive Spectroscopy
GMAW	Gas Metal Arc Welding
GTAW	Gas-Shielded Tungsten Arc Welding
INTM	Instituto de Tecnologia em União e Revestimento de Materiais
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
MO	Microscopia Ótica
PAPVD	Plasma Assisted Physical Vapor Deposition
PAW	Plasma Arc Welding
PTA-P	Plasma Transferred Arc - Powder
PTAW	Plasma Transferred Arc - Wire
TIG	Tungsten Inert Gas
UR	Unidade de Refrigeração

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	13
1.1	Justificativa e Relevância.....	14
1.2	Estrutura da Dissertação.....	16
2	OBJETIVOS.....	17
2.1	Objetivo Geral.....	17
2.2	Objetivos Específicos.....	17
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	18
3.1	Soldagem de revestimentos.....	18
3.1.1	Processo de revestimento plasma a arco transferido.....	20
3.1.2	Princípios de funcionamento do PTA-P.....	22
3.1.3	Vantagens e desvantagens da deposição por PTA-P.....	24
3.1.4	Diluição.....	25
3.2	Aço ASTM A-36.....	27
3.3	Superligas.....	28
3.3.1	Superligas de Níquel.....	29
3.3.1.1	<i>Características da microestrutura.....</i>	29
3.3.1.2	<i>INCONEL 625.....</i>	32
3.3.2	Efeito dos elementos de liga.....	34
3.4	Influência dos parâmetros na deposição por PTA-P.....	36
3.4.1	Efeito da corrente de soldagem.....	36
3.4.2	Efeito da velocidade de soldagem.....	37
3.4.3	Efeito de alimentação de pó.....	37
3.4.4	Efeito da distância da tocha.....	38
3.4.5	Efeito da oscilação da tocha.....	38
3.4.6	Efeito de outros parâmetros de processo.....	39
4	PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS.....	40
4.1	Materiais.....	42
4.2	Equipamentos.....	42
4.3	Definição dos parâmetros de Revestimento por PTA.....	46
4.4	Procedimento de deposição por PTA.....	47
4.5	Procedimentos de Caracterização.....	50

4.5.1	Microscopia Ótica (MO), Microscopia Eletrônica de varredura (MEV) e Espectroscopia de Energia Dispersiva de Raios-X (EDS).....	50
4.5.2	Difração de Raios-X (DRX).....	51
4.5.3	Microdureza Vickers.....	51
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	52
5.1	Geometria dos Cordões e Diluição.....	52
5.2	Caracterização Microestrutural dos Revestimentos.....	60
5.3	Fases formadas e composição dos revestimentos.....	64
5.4	Microdureza dos revestimentos.....	67
6	CONCLUSÕES.....	69
7	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	71
	REFERÊNCIAS.....	72

1 INTRODUÇÃO

A busca pela melhoria do desempenho de peças e equipamentos que operam sob condições agressivas, visando reduzir paradas de manutenção, é um processo contínuo em muitas indústrias de manufatura (ANTOSZCZYSZYN *et al.*, 2014). Entre as formas conhecidas de mitigar o efeito de meios agressivos em peças, está o uso de materiais mais nobres como revestimento para impedir ou retardar o contato de suas superfícies metálicas com meios corrosivos.

As superligas são materiais com alta resistência ao calor, corrosão e oxidação. Por isso, são muito utilizadas na indústria aeroespacial, indústria química, plantas de potência e muitas outras aplicações que demandam componentes com alta resistência térmica e resistência à corrosão (FESHARAKI *et al.*, 2018). Existem três tipos principais de superligas, levando em consideração o elemento químico em destaque em sua composição: superligas de níquel, superligas de cobalto e superligas de ferro (DAVIS, 2000).

Os revestimentos à base de níquel são amplamente usados para melhorar a resistência à corrosão e à oxidação, bem como a resistência ao desgaste em materiais como os aços de média liga (POZA *et al.*, 2014). O INCONEL 625 é uma liga à base de níquel, que possui alta resistência à corrosão e alta ductilidade, o que o torna um material bastante utilizado na modificação de superfície de componentes de óleo e gás (ABIOYE; MCCARTNEY; CLARE, 2015). Devido à sua excelente combinação de propriedades mecânicas, à soldabilidade e à resistência à corrosão em altas temperaturas, por exposição prolongada em atmosferas agressivas, é bastante utilizado nas indústrias aeronáutica, aeroespacial, química, petroquímica e naval (SUKUMARAN; GUPTA; KUMAR, 2017).

A liga INCONEL 625 é endurecida pela adição de molibdênio e nióbio, que atuam na segregação do líquido, nas reações finais de solidificação, formando a fase γ . Também possui uma alta concentração de cromo em sua composição, que juntamente com o molibdênio, participa no aumento da resistência à oxidação e à corrosão (SUKUMARAN; GUPTA; KUMAR, 2017).

As microestruturas encontradas nas amostras submetidas ao processo PTA-P são compostas por uma matriz austenítica, com a presença de carbonetos intermetálicos de ligas finas (SUKUMARAN; GUPTA; KUMAR, 2017). A geração de

carbonetos (MC , $M_{23}C_6$ e M_6C) e precipitados (Ni_2Cr , Mo) ocorrem entre temperaturas (625 - 925 ° C). A diluição destes carbonetos ocorre a partir de 1025 ° C.

Diversos processos são utilizados para produzir revestimentos de solda em ligas à base de níquel, tais como: Gas Metal Arc Welding (GMAW), Gas-Shielded Tungsten Arc Welding (GTAW) e soldagem por explosão, bem como Plasma por arco transferido (PTA) (ANTOSZCZYSZYN *et al.*, 2014). A principal vantagem deste último deve-se a sua maior taxa de deposição, associada a um menor consumo de calor (SILVA; MURUGAN, 2013). A redução do aporte térmico, por outro lado, implica na diminuição da diluição. Assim, a composição química e as propriedades de revestimento ficam mais próximas do metal de enchimento do que o substrato, com apenas um passe realizado, reduzindo os custos de material e operação.

Os parâmetros de soldagem que mais afetam a geometria do cordão e a diluição do revestimento são: corrente, velocidade de soldagem e frequência de oscilação da tocha (TAKANO; QUEIROZ; D'OLIVEIRA, 2010), (JOURNAL; DASGUPTA; MUKHERJEE, 2014). Dentre estes, a corrente é o parâmetro que mais interfere no efeito da diluição, ou seja, pequenas variações em seus valores provocam aumentos consideráveis nos resultados de diluição (ANTOSZCZYSZYN *et al.*, 2014). O aumento da diluição devido à energia de soldagem faz com que o ferro substitua elementos como o nióbio, molibdênio e tungstênio, que endurecem a matriz por solução sólida, favorecendo a precipitação das fases secundárias. (AGUIAR, 2010).

O presente trabalho teve como objetivo principal avaliar o desempenho da aplicação do processo PTA-P da liga INCONEL 625 em operações de revestimento superficial, em substrato de aço ASTM A-36. Para tanto, foi analisada a geometria do cordão de solda (largura, altura de reforço, penetração, índice de concavidade), grau de diluição, microestrutura e microdureza, em relação aos parâmetros de soldagem (corrente de soldagem, velocidade de soldagem).

1.1 Justificativa e Relevância

A necessidade de utilização de máquinas e ferramentas em ambientes agressivos, sujeitos aos fenômenos de corrosão e desgaste, tem impulsionado diversas pesquisas nos últimos anos. Grande parte dos componentes metálicos deteriora-se ao longo do tempo, quando expostos a ambientes oxidantes ou corrosivos. Por isso, tem-se buscado desenvolver materiais que apresentem bom

desempenho quando inseridos neste tipo de ambiente, ou seja, materiais que apresentem excelentes propriedades mecânicas combinadas com boa resistência à corrosão, principalmente em elevadas temperaturas.

A fabricação de componentes maciços em materiais mais nobres e, portanto, mais resistentes à deterioração seria uma opção para mitigar os efeitos da corrosão na degradação de equipamentos. No entanto, a aquisição ou fabricação desses equipamentos em materiais maciços seria muito custosa, podendo causar até mesmo a inviabilidade de projetos.

O revestimento por soldagem é o processo em que a camada de metal de adição é depositada sobre a superfície de outro material com o objetivo de obter propriedades ou dimensões desejadas. Como apenas poucas camadas do material mais nobre são adicionados sobre um substrato com propriedades inferiores, o custo para fabricação do componente pode ser reduzido drasticamente. Além disso, a vida útil de peças, que não possuem todas as propriedades necessárias para uma aplicação específica, pode ser garantida.

Em vista dessa possibilidade, várias técnicas de recobrimento de superfícies vêm sendo largamente utilizadas na indústria (deposição química de vapor (CVD), deposição física de vapor (PVD), eletrodeposição, imersão à quente, processos de soldagem por fusão, cladeamento, aspersão térmica). O intuito destes processos é de aumentar a vida útil e reparar componentes danificados por ações de ambientes agressivos, o que pode ser obtido minimizando o dano material resultante da combinação de impacto de partículas sólidas e corrosão. Dentre os revestimentos de soldagem por fusão, encontra-se o processo de plasma por arco transferido (PTA), que tem como principais vantagens: obtenção de uma ligação metalúrgica, baixa diluição, alta densidade dos revestimentos, elevadas taxas de deposição e maiores espessuras por passe. Além disso, uma atmosfera de proteção gasosa permite a obtenção de um revestimento uniforme e livre de impurezas. (LIMA; TREVISAN, 2007).

Considerando as vantagens do processo plasma por arco transferido, ligas à base de níquel são usadas para prolongar a vida útil de componentes de engenharia em diferentes setores industriais, devido a uma associação de alta resistência mecânica e excelente resistência à corrosão.

Desta maneira, o estudo sobre a associação entre a técnica PTA-P e ligas à base de Níquel INCONEL 625 nos processos de revestimentos soldados, visando

contribuir para a utilização do Níquel e suas ligas na proteção de componentes em uma ampla gama de ambientes agressivos é relevante.

1.2 Estrutura da Dissertação

O primeiro capítulo aborda as considerações iniciais sobre o tema do estudo e as motivações; o segundo apresenta os objetivos geral e específicos desse trabalho.

O terceiro capítulo apresenta a revisão bibliográfica do tema, destacando o processo de deposição por Plasma por arco transferido e uma revisão sobre as ligas de INCONEL 625.

No capítulo 4 estão descritos os materiais utilizados, a metodologia e os ensaios utilizados para a caracterização mecânica e metalúrgica dos revestimentos. Os resultados e as discussões da pesquisa são apresentados no capítulo 5.

O capítulo 6 traz as conclusões referentes aos principais resultados obtidos. No capítulo 7, são apresentadas sugestões para desenvolvimento de trabalhos futuros. E por fim, no capítulo 8 estão as referências bibliográficas utilizadas no estudo.

2 OBJETIVOS

Os objetivos geral e específicos foram definidos de acordo com as metas que se desejou alcançar durante o trabalho, e seguem especificados abaixo.

2.1 Objetivo Geral

O objetivo deste trabalho foi desenvolver revestimentos obtidos pela deposição da liga INCONEL 625 sobre aço ASTM A-36, pela técnica de Plasma com arco transferido alimentado por pó e avaliar suas propriedades.

2.2 Objetivos Específicos

- Analisar a influência dos parâmetros do processo (corrente de soldagem e a velocidade de soldagem) nos revestimentos depositados e avaliar a diluição e a geometria dos depósitos e relacioná-los com os parâmetros do processo;
- Realizar a análise macroestrutural dos depósitos e do substrato através de microscopia ótica (MO) e microscopia eletrônica de varredura (MEV);
- Determinar a composição química elementar das fases precipitadas por meio de ensaios de Espectroscopia de Energia Dispersiva de raios X (EDS);
- Analisar a estrutura cristalina das fases precipitadas na matriz do revestimento, por difração de raios X (DRX);
- Avaliar os perfis de microdureza Vickers partindo do metal base do revestimento até o depósito, ao longo da largura do revestimento;

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

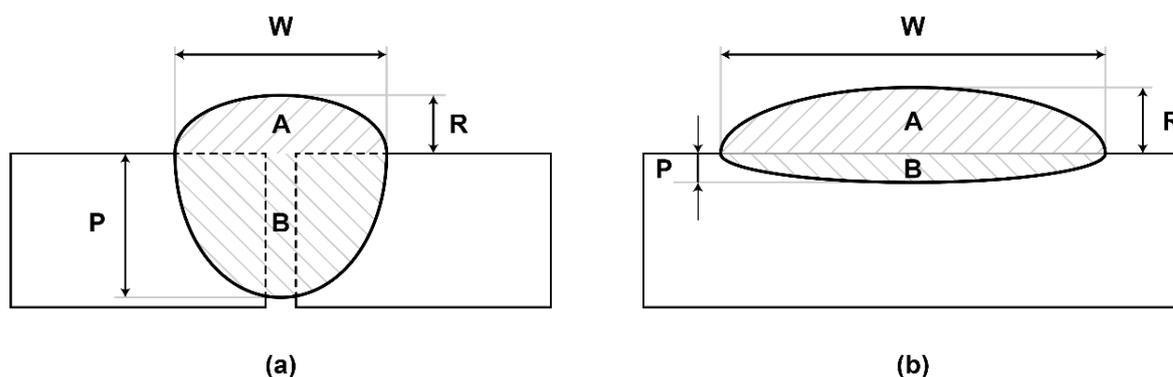
Este capítulo descreve a fundamentação teórica necessária para o desenvolvimento deste trabalho, abordando aspectos relativos ao conceito de Soldagem de revestimento, com enfoque no processo PTA-P. Também são abordadas as propriedades mecânicas e microestruturais do Aço ASTM-A36, e das Superligas de maneira geral, com destaque para o INCONEL 625. Por fim, descreve-se as influências dos parâmetros de soldagem sobre as características geométricas e microestruturais dos revestimentos.

3.1 Soldagem de revestimentos

A soldagem é uma técnica muito utilizada principalmente para união de matérias similares e dissimilares, na indústria do petróleo e afins. Além da sua importância na montagem, reparo de equipamentos e preenchimento de juntas, esta técnica também pode ser utilizada para revestimento de superfícies, conferindo a materiais menos nobres propriedades mecânicas e eletroquímicas superiores com custo reduzido.

A principal diferença entre a soldagem de revestimento e as aplicações convencionais de soldagem diz respeito à geometria do cordão de solda. Ao contrário das aplicações convencionais, em que é desejável alta penetração (P) para garantir a resistência da junta soldada, na soldagem de revestimento o perfil geométrico desejado se resume a grandes larguras do cordão (W), altos reforços (R), baixas penetrações (P) e baixos percentuais de diluição (D) - calculada como uma relação entre A e B. A obtenção deste perfil geométrico característico é importante para que o processo de revestimento permita recobrir a maior área possível com o menor número de passes, resultando em economias significativas de materiais e tempo (GOMES *et al.*, 2011).

Figura 1 - Perfil geométrico do cordão de solda: (a) união da junta soldada (aplicações convencionais) (b) soldagem de revestimento.



Fonte: Adaptado de (GOMES *et al.*, 2011).

O revestimento é obtido, geralmente, por múltiplas aplicações de cordões de solda dispostos lado a lado, produzindo sobre um substrato uma ou mais camadas de metal com características específicas. Desta forma, propriedades que não eram inerentes ao metal base são produzidas sobre a sua superfície. Além disto, dimensões originais de uma peça ou componente podem ser restauradas através do uso de revestimentos (D'OLIVEIRA; SILVA; VILAR, 2002).

Segundo AWS (1997), a soldagem de revestimento pode ser classificada quanto ao objetivo do revestimento a ser depositado em weld cladding, hardfacing, buildup e buttering. O revestimento do tipo weld cladding corresponde a uma ou mais camadas de material resistente à corrosão, geralmente com espessura mínima de 3 mm. O revestimento hardfacing, por sua vez, corresponde ao recobrimento da superfície com material duro e resistente ao desgaste, com o objetivo de reduzir a perda de material por mecanismos de desgaste como a abrasão, erosão, cavitação ou outros. O termo buildup, refere-se ao processo de deposição de um material de solda sobre a superfície de um metal base com o intuito de restaurar suas dimensões requeridas em projeto. Quanto ao termo buttering, refere-se à deposição de uma ou mais camadas de metal de solda sobre as faces de uma junta, com o propósito de reduzir a incidência de certos aspectos metalúrgicos como, difusão de elementos indesejados e a diferença de contração térmica, em materiais dissimilares, antes do preenchimento da junta.

O plasma por arco transferido, mais conhecido como PTA (Plasma Transferred Arc) é praticamente uma combinação de soldagem e aspersão térmica. Porém a grande diferença entre os dois processos é que o primeiro (PTA) promove a fusão do substrato, resultando em ligações metalúrgicas do revestimento sobre este (GOMES *et al.*, 2011). No processo, um arco piloto é aberto entre o eletrodo e o bocal. Um segundo arco (arco principal) flui, em seguida, do eletrodo para a peça, transferindo-se por aproximação. A ausência de escórias e a presença de uma atmosfera de proteção gasosa permitem um revestimento uniforme e livre de impurezas. No item 3.1.1, o processo de revestimento a plasma por arco transferido é apresentado com mais detalhes.

3.1.1 Processo de revestimento plasma a arco transferido

Quando um gás é submetido à alta temperatura, o fornecimento de energia promove a ocorrência do processo de ionização, onde átomos do gás serão transformados em íons por meio da perda de elétrons. A ionização confere ao gás propriedades condutoras, sendo este gás ionizado denominado de plasma.

A expressão arco plasma é utilizada para descrever os processos que tem o arco constricto como princípio técnico, sendo os mais comuns: soldagem, corte e revestimento. Estes processos têm como parte de seu equipamento a tocha plasma, nela está presente um bocal, no qual é recolhida a ponta de um eletrodo não consumível. O gás ioniza-se ao passar pelo arco elétrico e tem seus átomos dissociados, formando íons, que constituem o plasma.

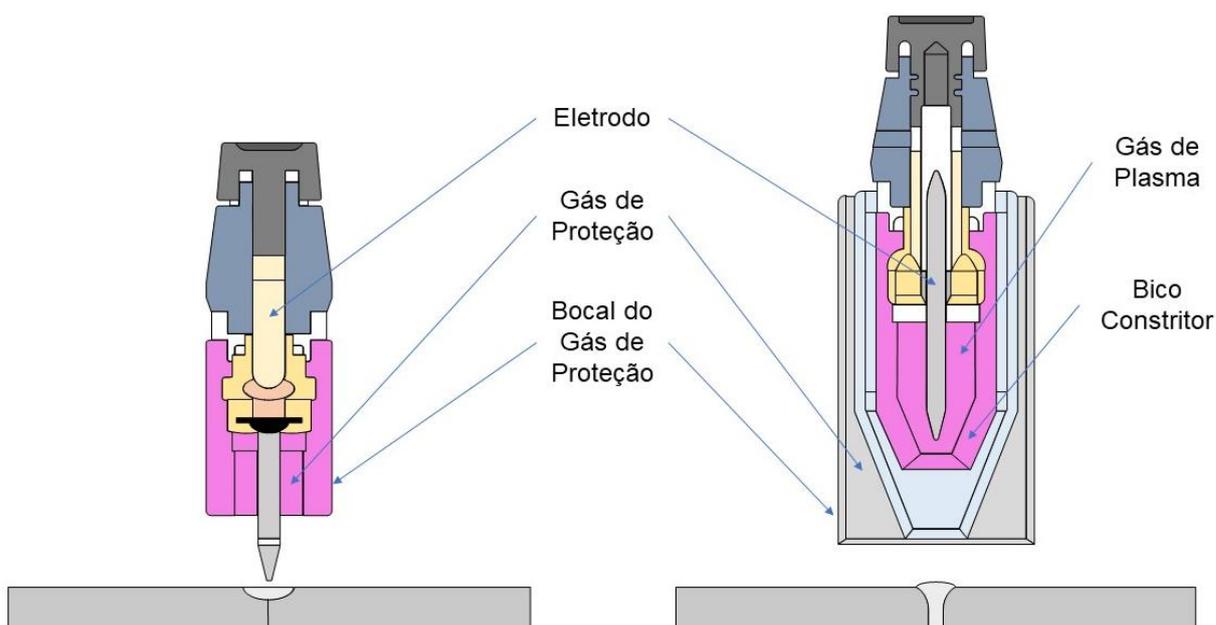
Aquecido dentro do bocal, o plasma sofre uma enorme expansão e, por ter que sair através de um orifício de pequenas dimensões adquire altas velocidades, acentuando ainda mais o fenômeno de dissociação. Quando fora do bocal os íons recombinam-se para voltar ao estado gasoso, liberando energia tal que pode elevar a temperatura para faixas acima de 2500°C. Essa energia é utilizada então para fundir o metal base e o metal de adição.

A soldagem à plasma é considerada a evolução do processo TIG (Tungsten Inert Gas), pelo fato de utilizar em ambos os processos, eletrodos não consumíveis e gases inertes. Porém, a diferença fundamental entre os dois processos está na constrição ou colimação do arco plasma na soldagem a plasma, que causa uma modificação substancial da concentração de calor na superfície da peça, tornando-a

mais favorável ao processo de soldagem. Outra diferença entre PTA-P e TIG está no posicionamento do eletrodo de tungstênio, visto que no processo TIG fica visível e pode ocorrer seu contato com a peça a ser soldada, enquanto que no PTA-P o eletrodo fica no interior do bocal, direcionado a uma pequena área (AWS, 1996).

A Figura 2 mostra o corte transversal esquemático das tochas TIG e PTA, onde se observa a existência do bocal de constrição do PTA e o posicionamento do eletrodo para ambos processos.

Figura 2 - Representação esquemática dos processos TIG e PTA



Fonte: Adaptado de (SILVA, 2010).

O processo de soldagem PTA-P, que utiliza pó metálico como material de adição, é empregado particularmente para revestimento de superfícies. A utilização de materiais particulados torna esse processo versátil, podendo ser utilizados diferentes tipos de materiais para aplicações diversas, a depender dos parâmetros de soldagem escolhidos.

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

3.1.2 Princípios de funcionamento do PTA-P

Para controle da fonte de calor utilizada no processo PTA, é necessária uma fonte de corrente para o arco principal e fonte de corrente para o arco piloto com ignitor de alta frequência; uma tocha, constituída por um eletrodo de tungstênio e o bico constritor; e um alimentador de pó, além dos gases do processo e seus respectivos controladores. (SILVA; DUTRA, 2012).

Ao processo PTA-P são incorporados fundamentalmente três fluxos de gás: gás de plasma, gás de proteção e gás de arraste de pó. Os gases devem ser quimicamente inertes para reduzir o desgaste do eletrodo e proteger a peça fundida da atmosfera oxidante. O gás de plasma, geralmente o argônio, é o gás utilizado para gerar o feixe de plasma e proteção do eletrodo de tungstênio.

O gás de proteção promove uma cobertura inerte sobre a poça fundida, protegendo-a da oxidação e contaminação. O gás geralmente empregado como gás de proteção é o Argônio ou uma mistura argônio e hidrogênio.

O arraste do material consumível durante a aplicação do revestimento é feito através do gás de transporte ou gás de arraste, que pode ser o argônio, hélio, ou uma mistura argônio e hidrogênio (FOLTRAN, 2000). Os pós consumíveis são adicionados a um sifão, localizado numa altura superior a tocha. Com isso, o consumível do processo cai por gravidade e é arrastado pelo gás de transporte através de dutos até a tocha.

O eletrodo de tungstênio não é consumido no processo e encontra-se recolhido em um bocal através do qual o gás flui. Devido à posição do eletrodo, que se encontra no interior do bico constritor da tocha de soldagem, não é possível realizar a abertura do arco por contato. Desta forma, o processo é iniciado utilizando um arco piloto, gerado por uma unidade de alta frequência, que ioniza a região situada entre a ponta do eletrodo e a peça de trabalho (DIAZ; DUTRA; D'OLIVEIRA, 2009).

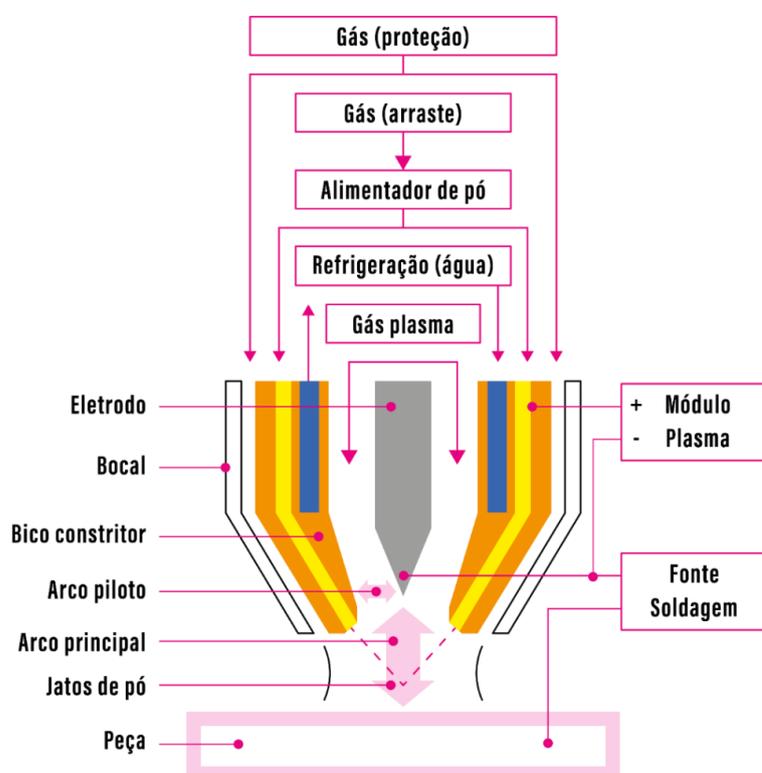
O arco piloto permite uma fácil estabilização do arco transferido e um bom controle de sua intensidade. O arco piloto também tem a função de estabilizar o arco transferido quando o plasma é resfriado pela injeção do pó e assegura o correto posicionamento da área de deposição de pó na peça de trabalho. O pó é introduzido no arco plasma através de dois ou mais orifícios localizados em um anel ao redor da saída do bocal da tocha (FAUCHAIS; HEBERLEIN; BOULOS, 2014). Quando o pó atravessa esse plasma, ele funde e forma a poça de fusão do revestimento aplicado.

Na Figura 3, é possível notar a presença de um bocal externo ao bico constritor. Entre este bocal e o bico constritor existe um canal, que é o local por onde passa o gás de proteção (no geral, o argônio) responsável por evitar o contato da poça de fusão com a atmosfera. Nota-se também, a presença de canais de alimentação de pó na tocha, por onde o consumível é transportado. O processo de carreamento ocorre por dois mecanismos: pela rotação do motor do alimentador de pó (ADP) e pelo auxílio do gás de arraste (também argônio) - que tem sua vazão controlada pela fonte de soldagem.

No processo PTA-P, dois circuitos elétricos estão presentes. Um deles é formado pelo eletrodo e o bocal e é responsável pela abertura do arco piloto. Um segundo circuito elétrico é formado entre o eletrodo e a peça de trabalho, responsável principalmente pela fusão do consumível e do substrato.

O gás de plasma, quando ionizado pelo arco piloto, torna-se uma espécie de condutor gasoso, através do qual é possível realizar a abertura do arco plasma. Quando a diferença de potencial é estabelecida pela fonte de soldagem, o arco se transfere para a peça, fundindo o metal base e o pó metálico.

Figura 3 - Representação esquemática da tocha no processo PTA-P



Fonte: Adaptado de Manual IMC Digiplus

3.1.3 Vantagens e desvantagens da deposição por PTA-P

Dentre as propriedades e resultados alcançados pelo PTA-P, quando comparados a outros processos de revestimento, destaca-se o fato de o processo resultar numa união metalúrgica (SILVA, 2010).

Além disso, o PTA-P apresenta outra característica-chave que é a colimação ou constrição, um estreitamento do diâmetro de saída do bocal da tocha, resultando na concentração da energia na superfície do substrato e aumentando a densidade de energia do processo. Quando comparado ao processo TIG, o PTA-P apresenta uma alta taxa de fusão de pó, causada pela alta concentração de energia e o formato do pó que possui uma maior área de troca de calor no sistema. Isto resulta em um melhor aproveitamento da energia do arco para uma apropriada fusão do material de adição. A melhor eficiência de fusão permite correntes menores, resultando em um menor aporte térmico, diminuindo a diluição (MARCONI; MARCONI, 2005).

Além dessas vantagens destacadas anteriormente, outros benefícios do processo são relatados em diversos trabalhos Graf (2009), Antoszczyszyn (2014) e Diaz et al. (2009) como por exemplo:

- Estabilidade direcional focal do arco;
- Baixo aporte de energia, implicando em baixas distorções;
- Alta produtividade com taxa de deposição da ordem de 10 kg/h.
- Baixa diluição entre o material depositado e o substrato;
- Elevada qualidade do revestimento depositado;
- Homogeneidade do cordão de solda;
- Versatilidade na seleção do material de adição na forma de pó.

Apesar da qualidade do processo, este apresenta algumas desvantagens quando comparado a outros de métodos deposição convencionais. Como é mostrado em Santos (2015) e Antoszczyszyn (2014):

- Equipamento de custo elevado e necessita de instalação permanente;
- Necessidade de acessórios especiais, no caso em que as superfícies a serem revestidas não sejam planas ou cilíndricas;
- Maior qualificação do operador para configuração precisa dos ajustes.
- Maior consumo de gases.

- Dificil utilização fora da posição 90°.

3.1.4 Diluição

A mistura do material depositado com o substrato, comumente denominada de diluição em soldagem, é fortemente influenciada pela variação na intensidade de corrente (PEREIRA; BENEGRÁ, 2011). O cálculo da diluição permite determinar a proporção de material do substrato que fundiu durante o processamento, contribuindo assim na formação do revestimento (GRAF, 2004). De maneira geral, a diluição é avaliada para se determinar a composição química do metal de solda e, posteriormente, tentar prever a microestrutura resultante e as suas propriedades.

Silva (2010) estudou aplicações do PTA-P na indústria do petróleo e comparou a diluição média para diferentes processos de soldagem a arco, com mesma composição do material de adição e mesmo material de base, como mostra a Tabela 1.

Tabela 1 - Comparação da diluição média para diferentes processos de soldagem

Forma do Material de Adição	Processo de Soldagem	Diluição Média
Vareta	TIG	20%
Eletrodo	ER	25%
Pó	PTA-P	3%

Fonte: Silva (2010)

As baixas diluições permitem o alcance da resistência requerida, com menor número de passes, reduzindo-se, com isto, o custo com materiais. De acordo com Hongying (2002), a diluição para o PTA-P pode ser reduzida à ordem de 5%. Esta pequena diluição, quando comparada aos demais processos, deve-se ao fato de que neste processo a energia nunca está diretamente focalizada sobre o substrato. Ao invés disso, a poça metálica está sempre sob o arco, tendendo a isolar o substrato do contato direto com o arco.

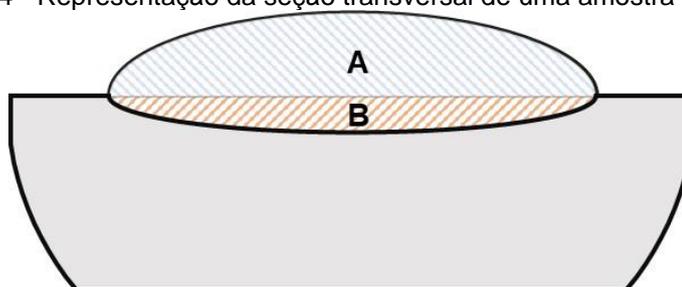
A diluição é uma das características mais importantes de um depósito PTA-P, de acordo com os requisitos de qualidade. Consiste na quantificação da mistura entre o material de base e o material de adição, resultando no metal de solda. Uma baixa diluição resulta em maior integridade da composição química do revestimento em relação a contaminações do metal de solda pelo material de base (SILVA, 2010).

O valor da diluição depende de parâmetros do processo: vazão de pó, corrente de soldagem, velocidade de soldagem, tecimento, vazão de gás de plasma, gases e materiais utilizados, diâmetro do bico constritor, granulometria do pó aportado. (SILVA, 2010).

A diluição pode ser calculada basicamente por intermédio de dois diferentes métodos:

O primeiro é o mais recorrente na literatura e consiste na relação entre a área do metal base e a área total do cordão, como ilustrado na Figura 4. Para calcular a diluição a partir dele, é preciso dividir a área transversal do material de base fundido pela área transversal total do metal de solda, como descrito na Equação 1.

Figura 4 - Representação da seção transversal de uma amostra revestida



Fonte: A autora, 2018.

$$D(\%) = \frac{B}{A + B} \quad (1)$$

No segundo método, a diluição é calculada através do teor de ferro presente na composição do revestimento. Neste método, é estabelecida uma relação entre o teor de ferro encontrado no revestimento, o teor de ferro original do metal de adição e o teor original do metal base. O método é utilizado, principalmente, para revestimentos que geram baixa diluição e assimetria do depósito, o que pode ocorrer no processo por PTA-P. A diluição é determinada pela Equação 2. Os conteúdos de ferros da expressão podem ser determinados por EDS (VIDAL, 2014).

$$D(\%) = \frac{(\text{Teor de Ferro no revestimento}) - (\text{Teor de Ferro no metal de adi\c{c}\~{a}o})}{(\text{Teor de Ferro na base})} * 100 \quad (2)$$

3.2 A\c{c}\~{o} ASTM A-36

Os a\c{c}\~{o}s carbonos possuem uma composi\c{c}\~{a}o de elementos qu\imica)s carbono, sil\ic{c}io, mangan\~{e}s, enxofre e f\~{o}sforo. Outros elementos qu\imica)s podem aparecer na sua composi\c{c}\~{a}o, por\~{e}m somente em quantidades residuais.

A quantidade de carbono presente no a\c{c}\~{o} define sua classifica\c{c}\~{a}o. Os a\c{c}\~{o}s de baixo carbono possuem um m\aximo de 0,3% deste elemento e apresentam grande ductilidade. S\~{a}o bons para o trabalho mec\~{a}nico e soldagem, n\~{a}o sendo temper\~{a}veis, utilizados na constru\c{c}\~{a}o de edif\ic{c}ios, pontes, navios, autom\~{o}veis, dentre outros usos.

Na constru\c{c}\~{a}o civil, o interesse maior recai sobre os chamados a\c{c}\~{o}s estruturais de m\~{e}dia e alta resist\~{e}ncia mec\~{a}nica, termo designativo de todos os a\c{c}\~{o}s que, devido \~{a} sua resist\~{e}ncia, ductilidade e outras propriedades, s\~{a}o adequados para a utiliza\c{c}\~{a}o em elementos da constru\c{c}\~{a}o sujeitos a carregamento. Os principais requisitos para os a\c{c}\~{o}s destinados \~{a} aplica\c{c}\~{a}o estrutural s\~{a}o: elevada tens\~{a}o de escoamento, elevada tenacidade, boa soldabilidade, homogeneidade microestrutural, susceptibilidade de corte por chama sem endurecimento e boa trabalhabilidade em opera\c{c}\~{o}es tais como corte, fura\c{c}\~{a}o e dobramento, sem que se origine(m) fissuras ou outros defeitos.

Dentre os a\c{c}\~{o}s estruturais existentes atualmente, o mais utilizado e conhecido \~{e} o ASTM A-36, que \~{e} classifica(m)do como um a\c{c}\~{o} carbono de m\~{e}dia resist\~{e}ncia mec\~{a}nica e boa soldabilidade, devido ao seu baixo teor de carbono. Desta forma, estes a\c{c}\~{o}s apresentam uma excelente capacidade de se unir ao revestimento aplicado. Colpaert (2008), classifica o a\c{c}\~{o} ASTM A-36 como uma exemplifica\c{c}\~{a}o mais cl\~{a}sica de um a\c{c}\~{o} estrutural de gr\~{a}os finos. \c{E} um a\c{c}\~{o} ferr\ic{t}ico de baixa liga e baixo teor de carbono.

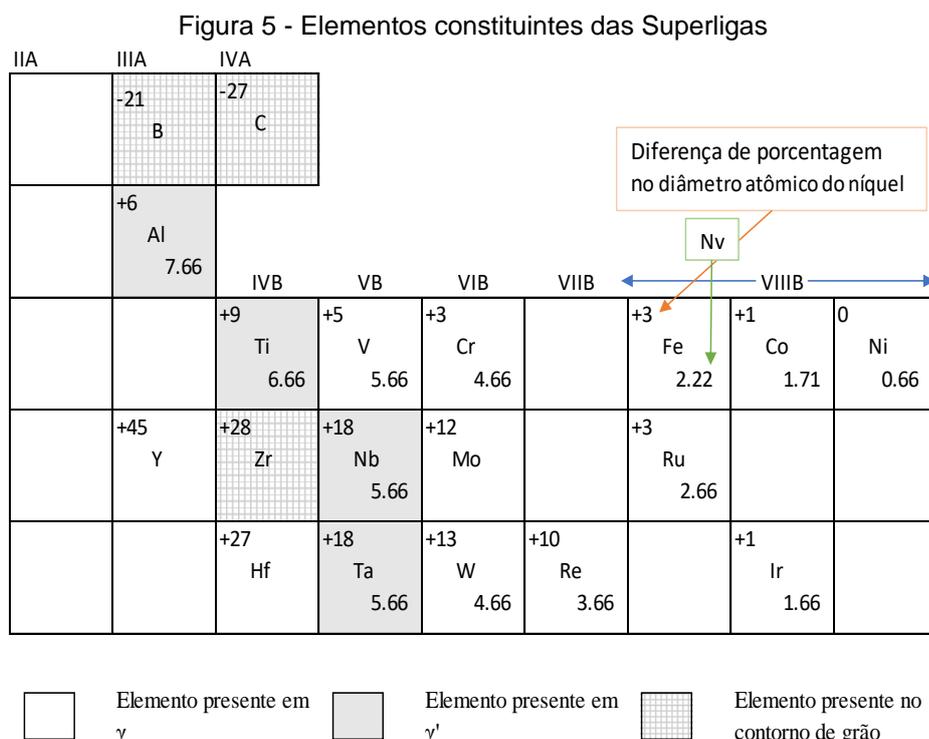
Um ponto negativo deste material \~{e} a sua baixa resist\~{e}ncia \~{a} corros\~{a}o quando expostos a ambientes oxidantes. Por isso, geralmente aparecem revestidos por materiais mais nobres, que diminuem drasticamente os efeitos do contato direto deste metal com os meios agressivos.

3.3 Superligas

As superligas constituem uma classe especial de materiais de engenharia e sua aplicação, em geral, é realizada em ambientes sujeitos a altas temperaturas, devido à sua alta resistência mecânica e à baixa degradação química, mesmo em temperaturas próximas a sua temperatura de fusão (GEDDES; LEON; HUANG, 2010). Segundo Baldan (2009), além destas propriedades (Boa resistência mecânica e resistência à corrosão em altas temperaturas) estas ligas caracterizam-se por possuírem resistência à fluência a altas temperaturas, baixa expansão térmica e boa ductilidade e são utilizadas geralmente em temperaturas acima de 540°C.

Tem-se como exemplos mais comuns de aplicações das superligas: turbinas a gás, tanto para propulsão a jato quanto para geração de eletricidade. Porém, a gama de aplicações para as quais as superligas são utilizadas, vem se expandido para muitas outras áreas, incluindo aeronaves, motores de foguetes, e também plantas de petróleo (REED, 2006).

Superligas são baseadas em elementos do Grupo VIII B e geralmente consistem em várias combinações de Fe, Ni, Co, assim como quantidades menores de W, Mo, Ta, Nb, Ti e Al. A Figura 5 apresenta os principais constituintes das superligas.



Fonte: Adaptado de (DEGLI; DI, 2007)

3.3.1 Superligas de Níquel

As superligas de níquel podem ser endurecidas por solução sólida e precipitação (ANTOSZCZYSZYN *et al.*, 2014). As primeiras (endurecidas por solução sólida) são utilizadas, geralmente, para aplicações em queimadores e combustores, em motores de turbinas a gás. Elas possuem particularmente resistência à corrosão a altas temperaturas, excelente usinabilidade e soldabilidade, porém têm menor resistência mecânica. Já as ligas endurecidas por precipitação são empregadas em casos que exigem boa resistência mecânica, mesmo em altas temperaturas e também boa resistência à corrosão e à fluência - para o caso de aplicações em paletas de turbinas e aletas de turbinas a gás.

As superligas à base de níquel são extensivamente usadas em diferentes indústrias, devido a uma associação de alta resistência e excelente resistência à corrosão. Os componentes de engenharia podem ser protegidos das condições agressivas de operação experimentadas em uma ampla gama de ambientes severos, como encontrados na indústria química, petroquímica, de reatores nucleares, de dispositivos de processamento de alimentos e instalações siderúrgicas. (ANTOSZCZYSZYN *et al.*, 2014).

Quanto à composição, as ligas endurecidas por precipitação, são as que contêm quantidades substanciais de Fe e formam uma classe distinta de ligas. Ligas reforçadas com solução sólida contêm principalmente Mo e Nb juntamente com Cr. (SUKUMARAN; GUPTA; KUMAR, 2017).

As superligas à base de níquel podem ser usadas para uma fração mais alta da temperatura de fusão e são, portanto, mais favoráveis que as superligas baseadas em cobalto e ferro-níquel em temperaturas de serviço próximas da temperatura de fusão dos materiais (GLAGE, 2007).

3.3.1.1 Características da microestrutura

As principais fases presentes em grande parte das superligas de níquel são: fase γ , fase γ' e carbonetos.

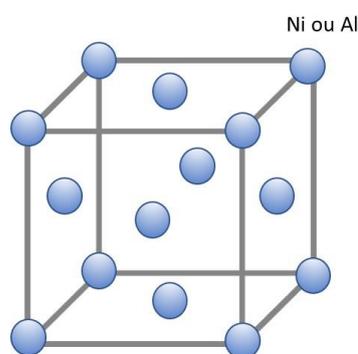
Uma microestrutura bifásica de equilíbrio é gerada, sendo constituída de gama (γ) e gama linha (γ') com uma relação cristalográfica muito incomum entre as fases γ e γ' . Ambas as fases são cúbicas de face centrada, têm dimensões de rede quase idênticas e também orientações semelhantes. Consequentemente, as duas fases são

quase coerentes. A deformação resultante desta leve falta de coerência pode trazer uma contribuição significativa para o endurecimento total da superliga (BALDAN, 2009).

- Fase γ :

As posições atômicas nas redes cristalográficas da fase γ são totalmente equivalentes e os átomos constituintes da solução sólida são distribuídos aleatoriamente, como mostra a Figura 6.

Figura 6 - Estrutura cristalográfica de gama

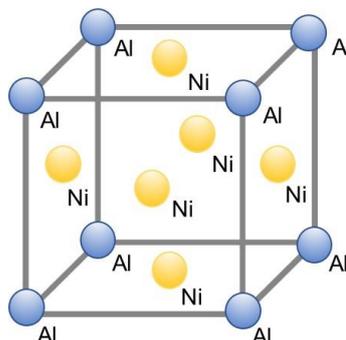


Fonte: Adaptado de (GLAGE, 2007)

A fase contínua γ não é magnética, porque o níquel possui a terceira camada eletrônica praticamente cheia, o que permite a formação de ligas com elementos endurecedores por solução sólida, sem perdas na estabilidade de fase. Os elementos de liga que compõem a matriz γ pertencem aos grupos V, VI e VII e são cobalto, ferro, cromo, molibdênio e tungstênio, já que o raio atômico destes elementos não difere muito do raio atômico do níquel (REED, 2006).

- Fase γ' :

Na fase γ' ($\text{Ni}_3(\text{Al}, \text{Ti})$) os átomos de níquel estão no centro da face e o alumínio ou átomos de titânio nas extremidades do cubo, conforme ilustrado na Figura 7.

Figura 7 - Estrutura de cristal da fase γ' 

Fonte: Adaptado de (GLAGE, 2007)

A fase γ' com uma estrutura de cristal $L1_2$ ordenada é responsável pela resistência à corrosão a elevadas temperaturas e pela excelente resistência à fluência.

A correspondência aproximada entre os parâmetros de rede matriz/precipitado (~0-1%), combinada com a compatibilidade química, permite que a fase γ' precipite de forma homogênea em toda a matriz e tenha alta estabilidade. A tensão de escoamento da fase γ' aumenta com a temperatura até 650°C. Pelo fato de a fase γ' ser relativamente dúctil, dada a precipitação, a resistência do material é melhorada sem diminuir a tenacidade à fratura da liga. (GLAGE, 2007).

O alumínio e o titânio são os principais componentes a precipitar com uma alta fração em volume na matriz. Outros elementos como cromo, háfnio, nióbio e tântalo podem ser incluídos a fase γ' . (LIU *et al.*, 2017).

Em algumas ligas modernas, a fração volumétrica do precipitado γ' é de cerca de 70%. Precipitações extremamente pequenas ocorrem sempre como esferas, porque é a forma preferencial para minimizar a energia superficial (DURAND-CHARRE, 2017). Em contraste, a energia interfacial pode ser minimizada pela formação de cubos. Assim, com o crescimento de γ' , a morfologia pode mudar de esferas para cubos ou placas, dependendo do nível de incoerência na rede matriz/precipitado da estrutura. Se a diferença aumentar, o tamanho crítico das partículas reduz, então a mudança ocorre (GLAGE, 2007).

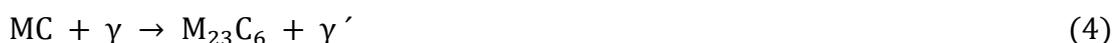
A precipitação da fase γ' é o principal mecanismo de endurecimento das superligas comerciais, devido à dificuldade encontrada pelas discordâncias presentes na matriz em se deslocar pela fase γ . Isto se dá, em parte, porque esta possui estrutura CFC atômica ordenada (VIDAL, 2014).

- Carbonetos:

O conteúdo adicionado de carbono é de aproximadamente 0,05-0,2%. Em combinação com elementos reativos e refratários, como titânio, tântalo e háfnio, forma carbonetos (por exemplo, TiC, TaC ou HfC).

Durante o tratamento térmico, estes carbonetos começam a se decompor e formam carbonetos como $M_{23}C_6$ e M_6C , que tendem a se formar nos contornos de grão. Os principais elementos M nos carbonetos $M_{23}C_6$ são cromo, ferro, tungstênio e molibdênio. Já nos carbonetos M_6C , os elementos M são geralmente molibdênio, tungstênio, cromo, cobalto e tântalo. Quando $M_{23}C_6$ é formado nos contornos de grão, o teor de cromo na matriz é reduzido e a solubilidade para γ' é aumentada nessas zonas (GLAGE, 2007).

As reações dominantes para a formação destes dois carbonetos são:



M' e M'' podem ser substituídos por cromo, cobalto, níquel ou molibdênio.

3.3.1.2 INCONEL 625

A liga de níquel-cromo INCONEL® 625 (UNS N06625 / W. Nr. 2.4856) é usada por sua alta resistência, excelente usinabilidade (incluindo a união) e excelente resistência à corrosão. Sua faixa de temperaturas de serviço vai do criogênico a 1000 °C (VERDI *et al.*, 2014).

Tabela 2 - Limites de composição da liga INCONEL 625

Elemento Químico	Limite de composição química	
	Mínimo	Máximo
Níquel	58,00	-
Cromo	20,00	23,00
Ferro	-	5,00

Molibdênio	8,00	10,00
Nióbio (mais Tântalo)	3,15	4,15
Carbono	-	0,10
Manganês	-	0,50
Alumínio	-	0,40
Titânio	-	0,40
Cobalto	-	1,00

Fonte: (SPECIAL METALS CORPORATION, 2006).

A resistência da liga INCONEL 625 é derivada do endurecimento do molibdênio e do nióbio sobre sua matriz de níquel-cromo. Estes elementos atuam na segregação do líquido, nas reações finais de solidificação, formando a fase γ (SUKUMARAN; GUPTA; KUMAR, 2017). Desta forma, tratamentos de endurecimento por precipitação não são necessários. Esta combinação de elementos também é responsável pela alta resistência a uma ampla gama de ambientes corrosivos de severidade incomum (WANG *et al.*, 2017).

As propriedades da liga INCONEL 625 que fazem dela uma excelente escolha para aplicações em água do mar são a imunidade contra ataque local (corrosão por pite e em fresta), alta resistência à corrosão-fadiga, alta resistência à tração, e resistência à trincas por corrosão sob tensão, em meios que contenham íon cloreto. Por isso, é utilizado como cabos de amarração, dutos de exaustão para barcos, revestimento para cabos de comunicação submarinos, entre outros. Potenciais aplicações são: molas, vedações, conectores de cabos, fixadores, dispositivos de flexão e componentes de instrumentos oceanográficos (SPECIAL METALS CORPORATION, 2006).

A alta resistência à tração, fluência e ruptura; boa fadiga e resistência à fadiga térmica; resistência à oxidação; e excelente soldabilidade são as propriedades da liga INCONEL 625 que a tornam interessante para o campo aeroespacial (VERDI *et al.*, 2014). Ela vem sendo usado em aplicações como sistemas de dutos de aeronaves, sistemas de exaustão do motor, tubulação de linha hidráulica e de combustíveis, anéis de proteção de turbinas e tubulação do trocador de calor em sistemas de controle (SPECIAL METALS CORPORATION, 2006).

A excelente versatilidade e resistência à corrosão do INCONEL liga 625, sob uma ampla faixa de temperaturas e pressões, é a principal razão para a sua elevada aceitação no campo de processamento químico. Por causa de sua fácil usabilidade,

uma grande variedade de componentes industriais é fabricada com este material. Sua alta resistência permite seu uso, por exemplo, em vasos com paredes ou tubulação mais finas do que é requisitado com o uso de outros materiais, melhorando assim transferência de calor e economia de peso. Algumas aplicações exigem a combinação de resistência mecânica e resistência à corrosão oferecida pela liga INCONEL 625, são elas: tubos, reatores, colunas de destilação, trocadores de calor, tubulação de transferência e válvulas (SPECIAL METALS CORPORATION, 2006).

3.3.2 Efeito dos elementos de liga

O níquel puro tem como característica uma elevada solubilidade de elementos de liga (CFC - fase γ). Devido à característica de alta solubilidade, muitos elementos de liga podem ser adicionados, proporcionando variação no comportamento da liga resultante quanto propriedades mecânicas e de resistência à corrosão. Os principais elementos de liga e seus efeitos são:

- Alumínio (Al): Auxilia na resistência à corrosão da liga através da formação de óxidos de alumínio na superfície. Além de proporcionar um aumento da resistência mecânica da liga, pois contribui para a precipitação da fase γ' (Ni_3Al) (TANCRET; BHADESHIA; MACKAY, 2003);
- Carbono (C): Forma carbonetos, que tendem a se precipitar nos contornos de grão, limitando o fenômeno do deslizamento, esta limitação, por sua vez, proporciona um aumento na resistência mecânica da liga. Porém, o teor de carbono deve ser mantido abaixo de 0,07% em peso, para evitar a formação de filmes de carbonetos no contorno de grão, pois estes prejudicam a resistência a temperaturas elevadas; (ASM, 1993).
- Cromo (Cr): Promove a formação de uma camada passivante (Cr_2O_3), que melhora a resistência à corrosão da liga em altas temperaturas. Esta camada é fina compacta e aderente, por isso, funciona como uma barreira que impede o avanço da corrosão. Os teores de cromo devem estar acima de 20% para contribuir para o aumento de resistência à corrosão, abaixo deste valor o cromo não apresenta contribuição efetiva sobre esta propriedade. Segundo ASM (1993), o cromo também pode promover uma melhoria nas propriedades mecânicas da liga, através do mecanismo de

endurecimento por solução sólida e da participação na formação de carbonetos de cromo.

- Ferro (Fe): Atua no mecanismo de aumento de resistência por solução sólida. Este elemento aumenta a solubilidade do carbono no níquel, propiciando maior resistência a altas temperaturas. Diminui a solubilidade do Mo e Nb na matriz, aumentando o potencial de segregação destes elementos. É necessário limitar o teor de ferro presente nas ligas, pois, em certas situações, pode comprometer a resistência à corrosão (TANCRET; BHADESHIA; MACKAY, 2003);
- Manganês: Atua como elemento dessulfurante, já que apresenta grande afinidade com o enxofre;
- Molibdênio: Participa da formação de carbonetos e é um forte formador de fases topologicamente compactas (TCP), que diminuem as propriedades de resistência mecânica e resistência à corrosão. Por outro lado, pode contribuir fortemente para o aumento da resistência à corrosão quando em atmosferas ácidas não oxidantes, da resistência à corrosão localizada e da resistência a temperaturas elevadas (ASM, 1993);
- Nióbio (Nb): Participa da segregação do líquido nas reações finais de solidificação e atua na formação da fase γ'' , pois participa do aumento de resistência mecânica por solução sólida e por precipitação. Isto porque, propicia a formação de alguns tipos de carbonetos. Além disto, é um forte formador de fase de Laves, que está associada às trincas de solidificação (RAMIREZ; LIPPOLD, 2004);
- Silício (Si): Elemento desoxidante que, quando presente em quantidades ideais, promove um aumento na resistência à corrosão em temperaturas elevadas. Geralmente presente em pequenas quantidades, teores menores de 0,4%, para evitar problemas de solubilidade e de trinca a quente. O teor deve ser mínimo e rigorosamente controlado em ligas contendo Fe, Co, Mo, W, visando evitar a formação de fases intermetálicas e carbonetos indesejados (ASM, 1993; TANCRET, 2003).
- Titânio (Ti): Possui efeitos similar ao alumínio em relação à formação de precipitados. Quando os dois estão presentes, torna-se necessário ajustar

suas composições de forma a ajustar as distorções na interface γ/γ' (TANCRET, 2003);

- Tungstênio (W): Atua no aumento da resistência a atmosferas ácidas não oxidantes, apresentando comportamento similar ao do molibdênio. Atua fortemente no mecanismo de resistência por solução sólida tanto na matriz γ quanto nos precipitados γ' . Não é utilizado em grandes quantidades por apresentar densidade atômica quase duas vezes maior que o molibdênio (ASM, 1993; TANCRET, 2003).

3.4 Influência dos parâmetros na deposição por PTA-P

Um grande número de relações tem sido relatado, ao longo dos anos, sobre os parâmetros de entrada de um processo de soldagem. A maioria destas relações é empírica, baseada em dados experimentais. Segundo Marques e Modenesi (2014), as seguintes relações quantitativas podem ser esperadas na soldagem:

$$P \propto \frac{I \alpha}{V \varphi}, W \propto \frac{V \varphi}{v \alpha}, h_w \propto \frac{I}{v V \alpha \varphi}, A_w \propto \frac{I V}{v \varphi} \quad (6)$$

Basicamente todos os modelos empíricos citados anteriormente são baseados em regressão linear e seus resultados dependem criticamente dos dados usados em sua criação (MARQUES; MODENESI, 2014).

Os principais parâmetros estudados na soldagem de revestimentos e seus efeitos sobre a diluição e geometria dos cordões serão apresentados a seguir.

3.4.1 Efeito da corrente de soldagem

Para Takano et al. (2010), a intensidade de corrente é o parâmetro de processos que afeta mais significativamente as características do depósito, visto que quanto maior a intensidade da corrente de processo, maior a molhabilidade, conseqüentemente, maior o nível de diluição, e menor será a dureza do revestimento.

Siva et al. (2009) acrescenta que o aumento da corrente de soldagem, aumenta o aporte térmico no metal base. Isso implica no aumento da largura do cordão de solda, resultando numa maior deposição.

Balasubramanian et al. (2009) concorda com os autores quando diz que, a corrente de soldagem possui uma relação de proporcionalidade com a porcentagem de diluição. Se a corrente aumenta, a porcentagem de diluição aumenta como consequência.

Ainda segundo Balasubramanian et al. (2009), em correntes altas, há grande geração de calor e por isso, o excesso desse calor fica disponível para fundir o substrato do material depois de fundir o pó. Essa alta geração de calor ainda aumenta a força do arco e por consequência aumenta a profundidade de penetração no substrato do material. Uma maior penetração geralmente conduz para uma alta porcentagem de diluição e isso pode ser a razão de um aumento na porcentagem de diluição quando se aumenta a corrente.

O autor ainda acrescenta que, quando em correntes baixas, a geração de calor é menor e a maior parte do calor gerado é utilizado para fundir o pó e menos calor fica disponível para fundir o substrato do material depois de fundir o pó. Além disso, a força do arco é menor nessa condição e conseqüentemente existe um decréscimo na profundidade de penetração, produzindo uma penetração de pouca profundidade.

3.4.2 Efeito da velocidade de soldagem

O aumento da velocidade de soldagem acarreta em diminuição da largura da deposição, diluição e penetração. Segundo o autor isso pode estar atribuído à redução do aporte térmico por unidade de comprimento do cordão (SIVA; MURUGAN; RAGHUPATHY, 2009).

O estudo de Balasubramanian et al. (2009) confirma que a velocidade de soldagem possui uma relação com a diluição de proporcionalidade inversa. Segundo o autor, a porcentagem de diluição diminui com o aumento dessa velocidade. Em condições de alta velocidade, o aporte térmico fornecido por unidade de comprimento do cordão de solda é baixo. Um aporte térmico menor diminui a porção de substrato fundido, conseqüentemente, diminui a profundidade de penetração, resultando em penetrações mais rasas. Penetrações rasas conduzem a baixas porcentagens de diluição e isso pode ser a razão do decréscimo da porcentagem de diluição quando a velocidade de soldagem aumenta.

3.4.3 Efeito de alimentação de pó

Quando a taxa de alimentação de pó é aumentada a diluição diminui (SIVA; MURUGAN; RAGHUPATHY, 2009). Nas taxas de alimentação de pó mais baixas, uma menor porcentagem de calor gerado é utilizada para fundir o pó e uma maior porcentagem de calor gerado é utilizado para fundir o substrato, resultando numa alta porcentagem de diluição. Por outro lado, a porção do substrato fundido é mais baixa devido a uma menor porção de calor utilizado para tal propósito, mas o excesso de metal fundido (pó) produz uma profunda penetração. Sendo esse o motivo do aumento na porcentagem de diluição em altas taxas de alimentação de pó (BALASUBRAMANIAN et al., 2009).

3.4.4 Efeito da distância da tocha

A distância da tocha apresenta uma relação inversamente proporcional com a porcentagem de diluição. Em grandes distâncias, o comprimento de arco aumenta e por isso o arco constrito se torna marginalmente divergente. Consequentemente, o aporte térmico fornecido para o material é espalhado sobre uma região mais larga e leva à queda na porcentagem de diluição em altas distâncias de tocha (BALASUBRAMANIAN et al., 2009).

3.4.5 Efeito da oscilação da tocha

Em altas frequências de oscilação da tocha, a velocidade de movimento da tocha é maior e cobre uma maior região do substrato do material. O aporte térmico fornecido por unidade de área do substrato é menor quando maiores frequências de oscilação são aplicadas e consequentemente a camada superior do substrato é fundido. Isso explica o decréscimo na porcentagem do nível de diluição quando a frequência de oscilação da tocha é mais alta. Por outro lado, velocidades de movimento da tocha mais lento cobrem apenas uma região limitada do substrato do material e por isso resultam em penetrações mais profundas e altas taxas de diluição (BALASUBRAMANIAN et al., 2009).

3.4.6 Efeito de outros parâmetros de processo

- **Temperatura de preaquecimento:** Quando a temperatura de preaquecimento aumenta, a penetração e a diluição também aumentam (TAKANO; QUEIROZ; D'OLIVEIRA, 2010).
- **Bocal de constrição:** Seu efeito é uma função da intensidade de corrente utilizada, sendo mais notável para maiores intensidades de corrente, onde ela afeta a penetração e a aparência da superfície do revestimento. Altas correntes combinadas com elevada constrição resultaram em turbulência e elevaram a penetração do revestimento na peça.
- **Vazão do gás de plasma:** Pode ser considerado um parâmetro secundário na variação de diluição. Uma vez que, a variação no fluxo implica na rigidez do arco, sendo assim um aumento no fluxo aumenta a diluição.
- **Ângulo de afiação do eletrodo:** Sua variação não afeta as características de dureza avaliadas, mostrando somente um leve efeito na penetração.

4 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

Nesse capítulo serão apresentados os materiais e metodologia experimental utilizados para preparar e caracterizar os revestimentos da liga de níquel INCONEL 625 depositado pela técnica de Plasma com Arco Transferido (PTA) sobre o aço ASTM A-36.

Inicialmente, o material do substrato foi cortado para ficar com dimensões padronizadas. Em seguida, passou por um processo de jateamento abrasivo com partículas de alumina (abrasivo) para remoção de óxidos da superfície, garantindo uma melhor condutividade elétrica e conseqüentemente uma melhor transferência do arco. Os limites de operação do processo foram selecionados, a princípio, tomando como base trabalhos da literatura. Como principais exemplos podem ser citados:

- Marimuthu (2003) discutiu os modelos matemáticos desenvolvidos para prever os efeitos principais e os efeitos de interação das variáveis PTAW no revestimento Stellite;
- Takano, Queiroz e Oliveira (2010) Analisou a influência de alguns parâmetros no processo de PTA para recobrimento de superfícies. No artigo, os parâmetros investigados foram: Efeitos da constrição da tocha com a mudança do ângulo de afiação do eletrodo e alteração e como a vazão do gás plasma altera a geometria do cordão;
- Dasgupta (2013), que teve como objetivo principal otimizar os parâmetros do cordão de solda, para alcançar a penetração mínima, o reforço máximo e a largura máxima do cordão, que proporcionava a melhor união soldada e a determinação dos parâmetros de processo correspondentes;

Depois de estabelecido o valor dos parâmetros para corrente e velocidade de soldagem, as deposições foram realizadas para avaliar os cordões quanto a geometria e a homogeneidade das camadas depositadas. Ao se atingir cordões de boa geometria e bom aspecto visual (sem mordeduras, inclusões e falta de penetração) os limites de trabalho foram estabelecidos e os parâmetros de soldagem foram selecionados. E então, os revestimentos foram depositados sobre a superfície do substrato, utilizando-se uma combinação dos parâmetros selecionados.

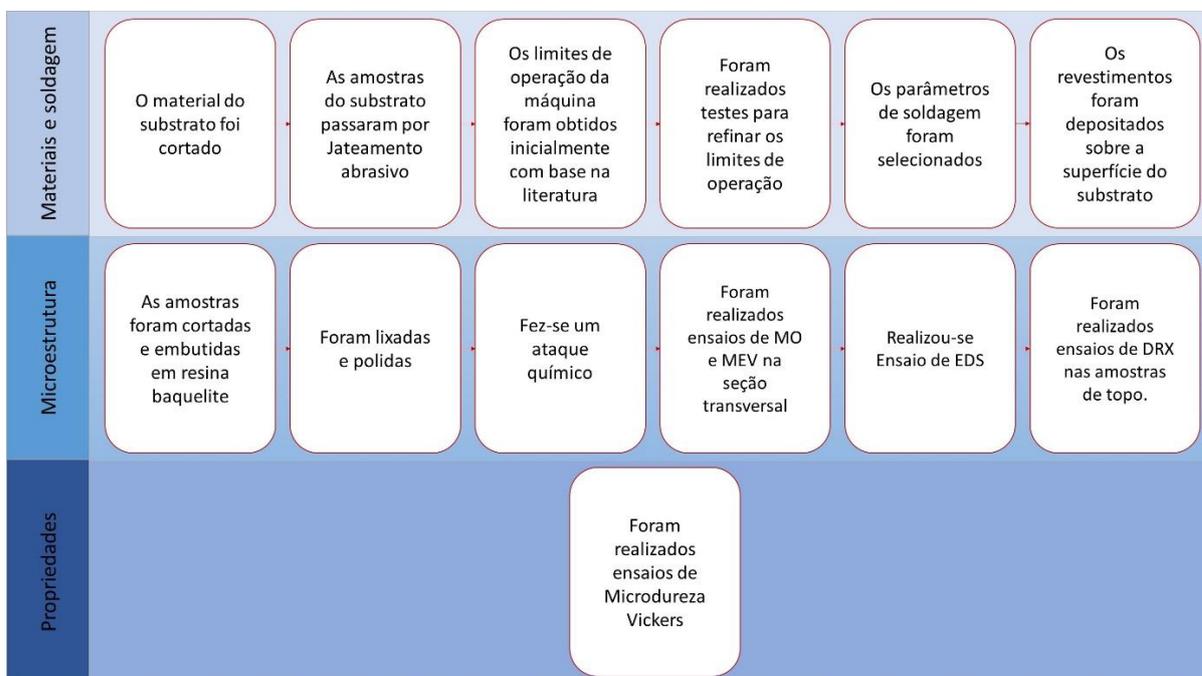
Em seguida, as amostras foram cortadas e embutidas em resina baquelite e posteriormente lixadas e polidas. Depois disso, foi realizado um ataque químico com o intuito de preparar a superfície para a análise microscópica.

Análise de observação por Microscopia ótica (MO) e Microscopia eletrônica de varredura (MEV) foram realizados na seção transversal do revestimento para caracterização da microestrutura. Na sequência, foi realizada análise por Espectroscopia de Energia Dispersiva de raios X (EDS) na seção transversal para avaliação da composição elementar de precipitados e análise de difusão de ferro para os revestimentos.

Também foram realizados ensaios de Difração de raios X (DRX), para identificação de fases precipitadas nos revestimentos. Por fim, ensaios de microdureza foram realizados na seção transversal dos revestimentos para avaliar a influência do teor de ferro difundido sobre esta propriedade.

Na Figura 8 é apresentado um fluxograma, que resume o procedimento experimental utilizado para o desenvolvimento da pesquisa. Nos itens a seguir, serão detalhadas cada etapa desenvolvida.

Figura 8 - Fluxograma utilizado para execução da metodologia.



Fonte: A autora, 2018.

4.1 Materiais

O metal de adição, na forma de pó atomizado, foi a liga de níquel INCONEL 625, fabricado pela empresa Hoganas® com granulometria na faixa de 53 - 150 µm. Esta liga foi depositada, por PTA, sobre amostras do aço ASTM A-36, com dimensões de 100 X 100 X 7,5 mm. O metal de adição foi depositado na forma de cordões simples e resfriados ao ar, sem controle da taxa de resfriamento.

A composição do metal base e do material de adição, fornecidos pelo fabricante, são apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3 - Composição do metal de adição e do substrato.

Liga atomizada INCONEL 625									
Liga/Elemento	%Ni	%Cr	%Mo	%Si	%C	%Fe	%Nb	%Ti	%Al
INCONEL 625	Bal.	21,5	9,0	0,40	≤0,03	1,4	3,8	-	-

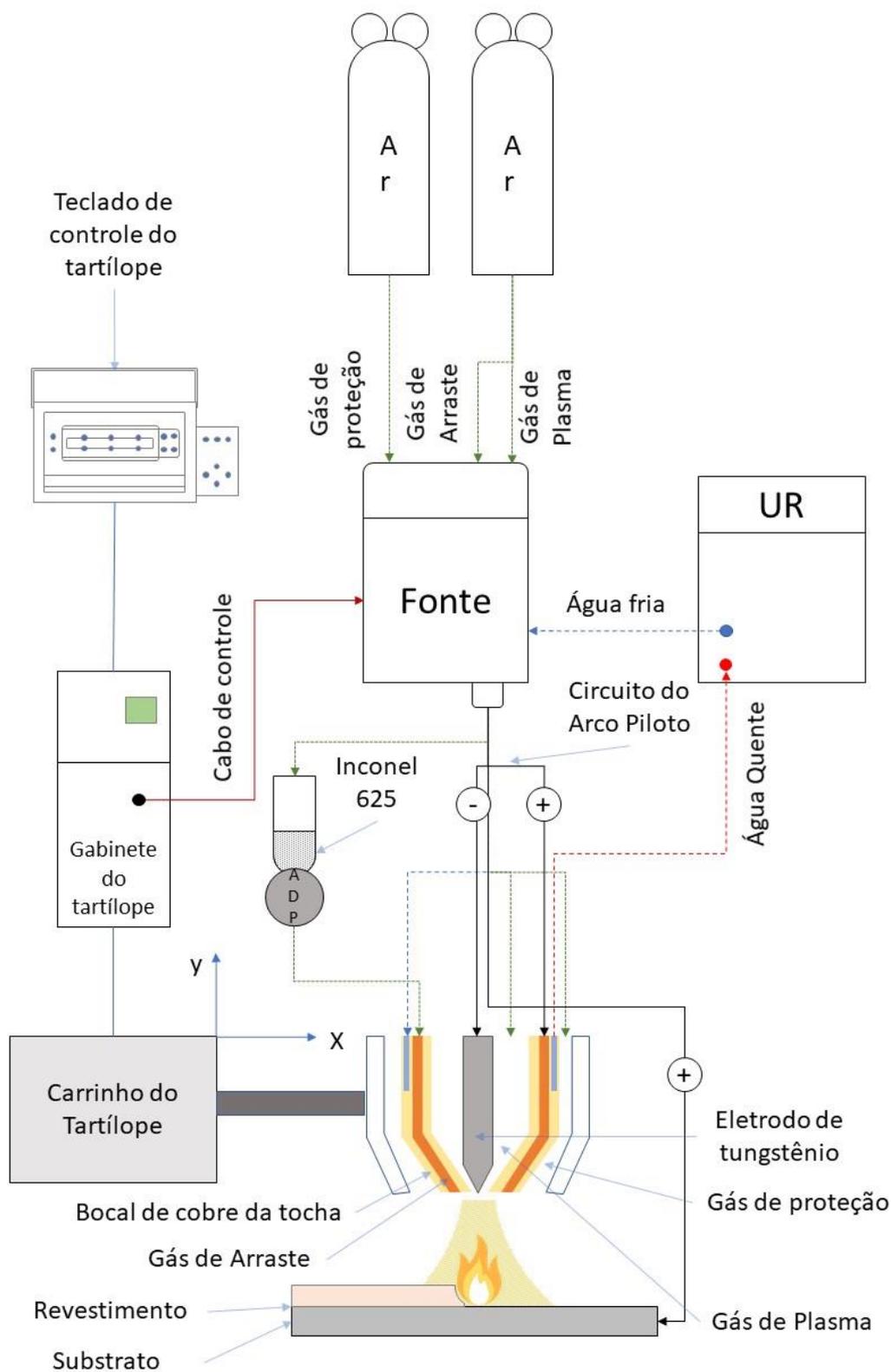
Substrato: ASTM A36									
Substrado	%C	%Mn	%Si	%P	%S	%Cr	%Ni	%Mo	%Al
ASTM A-36	0,26	-	0,40	0,04	0,05	-	-	-	-

Fonte: A autora, 2018.

4.2 Equipamentos

Para deposição dos revestimentos foi utilizado o equipamento de PTA do Instituto de Tecnologia em União e Revestimento de Materiais (INTM) da Universidade Federal de Pernambuco. Ele é composto por: 2 cilindros de gás de 99,99% argônio; fonte de alimentação; central de arrefecimento; tocha; alimentador de pó e o sistema de movimentação tartilope. Na Figura 9 é apresentada uma ilustração esquemática da máquina utilizada para as deposições e seus principais componentes.

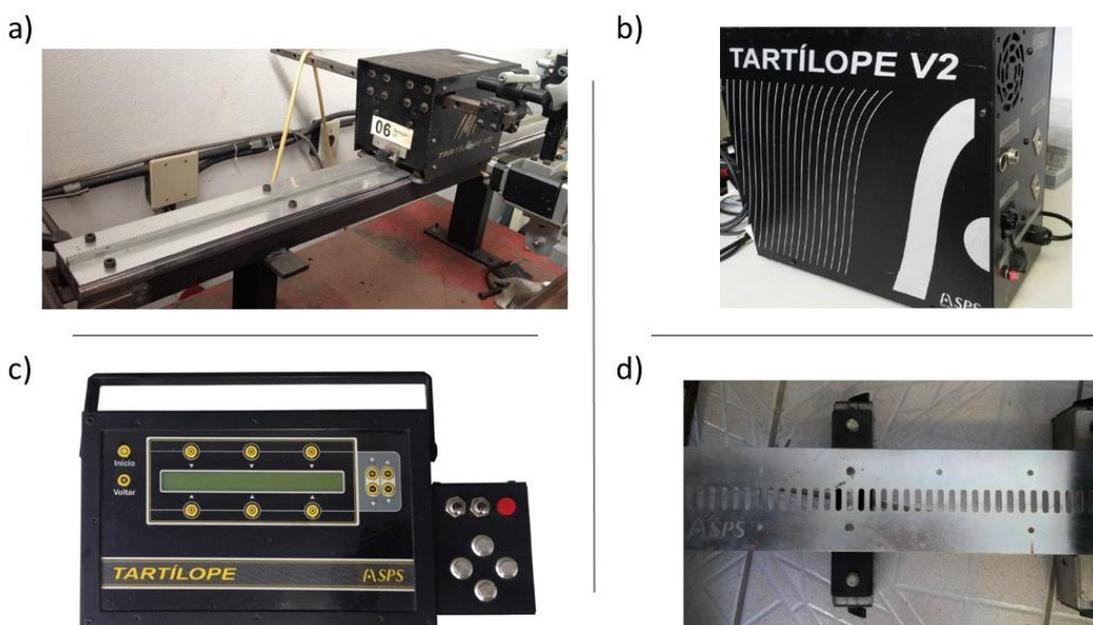
Figura 9 - Esquema do processo de plasma com arco transferido



Fonte: A autora, 2018.

O conjunto tartílope modelo V2F da SBS, utilizado no presente trabalho, é mostrado na Figura 10. Ele é composto pelo carrinho, teclado de controle, gabinete de controle e base magnética. O carrinho possui um suporte onde a tocha é posicionada. O conjunto é ligado à fonte de soldagem através do gabinete de controle e o objetivo dessa ligação é tornar o acionamento do arco plasma remoto, o que permite que o arco seja acionado diretamente pelo teclado de controle do tartílope, tornando o processo mais seguro e mais produtivo. O teclado é responsável pelo movimento do carrinho e conseqüentemente pelo movimento da tocha. Além disso, é através dele que os parâmetros de soldagem relacionados ao movimento da tocha são programados (velocidade de soldagem, frequência da tocha, tipo de tecimento).

Figura 10 - Conjunto tartílope: (a) Carrinho do tartílope (b) Gabinete de controle (c) Teclado de controle (d) Base magnética



Fonte: Adaptado de (SPS, 2018).

A tocha é posicionada no carrinho do tartílope e é ligada à fonte de soldagem e ao alimentador de pó. É nela que está presente o eletrodo de tungstênio (de Lantânio) e o bocal de cobre que, juntamente com a peça de trabalho, fecham os dois principais circuitos presentes no processo: o circuito do arco piloto (formado pelo eletrodo de tungstênio e o bocal da tocha) e o circuito do arco plasma (formado entre

o eletrodo de tungstênio e o substrato). A necessidade do primeiro circuito se dá pelo fato do processo não permitir a abertura do arco principal através do contato do eletrodo com o substrato, como ocorre, por exemplo, no processo TIG. No bocal de cobre da tocha estão presentes os canais refrigeração e os canais de transporte dos gases de arraste. É também conhecido como bocal constritor, porque é responsável pela constrição do gás de plasma, tendo grande contribuição para as altas energias provenientes do processo. Um bocal externo de cerâmica também é componente da tocha, responsável pelo direcionamento do gás de proteção.

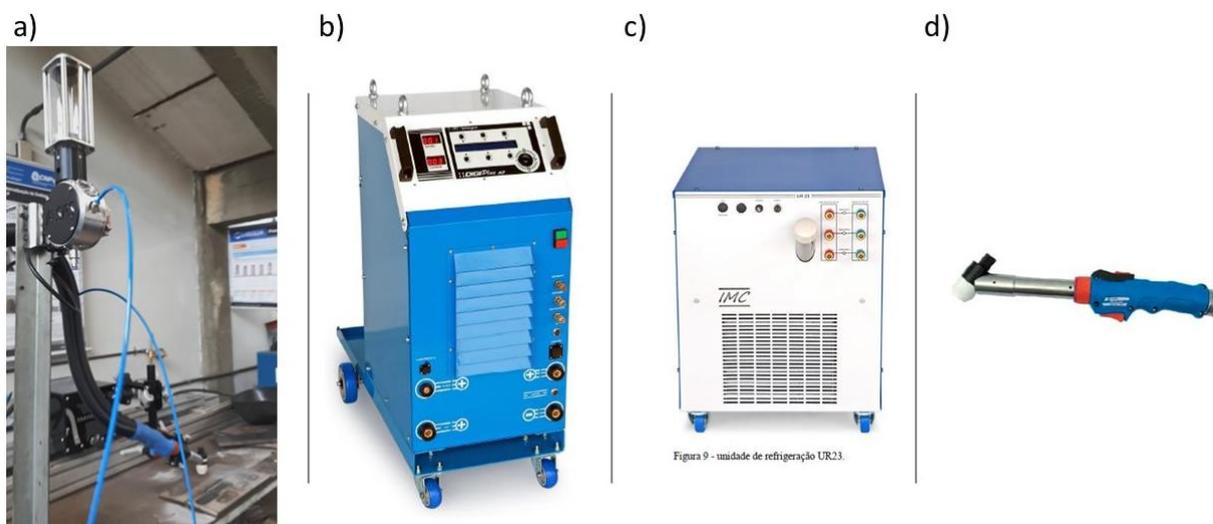
O alimentador de pó (ADP) é uma espécie de silo que comporta o material de adição em pó. Sua conexão com a fonte se justifica pela necessidade de controle do fluxo de gás de arraste e pelo controle de rotação do motor integrado ao ADP, ambos controlados pela fonte.

A fonte de soldagem é o principal componente do processo, é nela que estão conectados todos os demais elementos do PTA-P. Ela é o elemento de controle do processo, no qual o usuário pode testar e monitorar o funcionamento da unidade de refrigeração, e dos fluxos de gases, bem como, programar os parâmetros energéticos, como: intensidade de corrente, o uso de corrente pulsada, a presença de rampas, entre outros. Além disso, abertura do arco piloto também é feita sobre o comando da fonte de soldagem.

A unidade de refrigeração (UR) é um componente integrante da fonte de soldagem, responsável pelo arrefecimento da tocha e seus componentes, em especial, o eletrodo de tungstênio. Sua função, no equipamento, é de extrema importância para a preservação deste, visto que ele opera sob correntes elevadas, o que pode ocasionar fusão de seus componentes. O funcionamento da UR é controlado pela fonte de soldagem, que tem como função o acionamento da bomba que compõe esta unidade. Com isso, a água quente proveniente da tocha pode ser refrigerada na unidade e retornar fria a ela, garantindo seu contínuo resfriamento.

Na Figura 11 estão presentes os elementos do processo PTA-P utilizados neste trabalho: a tocha utilizada foi a de modelo PLP300 da TBI; o alimentador de pó (ADP) foi fabricado pela SBS; a fonte é a de modelo DIGIplus A7 ACPO, desenvolvida pela IMC – soldagem e a unidade de refrigeração foi a UR23, de mesma fabricante.

Figura 11 - Componentes do equipamento PTA-P: (a) Alimentador de pó; (b) Fonte de soldagem; (c) Unidade de resfriamento; (d) Tocha de soldagem.



Fonte: Adaptado de (IMC, 2018).

Os dois cilindros de argônio possuem conexão com a fonte de alimentação do processo. Um deles é fonte de abastecimento, tanto do gás de plasma quanto do gás de arraste do material consumível. Já o outro, abastece apenas o gás de proteção, visto que este possui vazões mais elevadas que os demais gases do processo.

4.3 Definição dos parâmetros de Revestimento por PTA

Os limites de operação teóricos da máquina foram definidos inicialmente com base na literatura. Porém, não foram encontrados na literatura trabalhos que utilizassem exatamente o mesmo equipamento e materiais utilizados nesse trabalho. Por isso, foram necessários experimentos práticos para definição mais precisa desses limites de operação. Os experimentos foram feitos tendo como parâmetro de qualidade a geometria e os aspectos visuais dos cordões.

Os limites encontrados que produziram cordões com aspectos aceitáveis e que não ocasionaram empenamento do substrato foi com a corrente variando entre 150 – 200 A e a velocidade de soldagem variando numa faixa entre (5 e 12 mm/min).

Para execução dos revestimentos foi realizado um planejamento de experimento com 4 tipos de condições. Foram definidas as seguintes variáveis: Corrente de soldagem (C) e Velocidade de soldagem (V); com o intuito de analisar

seus efeitos sobre a resposta – Porcentagem de Diluição. Os parâmetros utilizados no processo de revestimento são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 - Parâmetros utilizados no processo de soldagem PTA-P para soldagem da liga INCONEL 625

Parâmetros	Valores	Código
Corrente de soldagem (A)	160 e 180	C
Velocidade de soldagem (mm/min)	8 e 10	V

Fonte: A autora, 2019.

Os parâmetros foram distribuídos numa matriz de planejamento e aleatorizados para evitar a incidência de erros. As amostras foram codificadas de acordo com esses parâmetros, como apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 - Condição das amostras de revestimento codificadas de acordo com os parâmetros de processo utilizados

Condição	Corrente (A)	Velocidade (mm/min)
C160V8	160	8
C160V10	160	10
C180V8	180	8
C180V10	180	10

Fonte: A autora, 2019.

4.4 Procedimento de deposição por PTA

Antes da deposição, o material do substrato foi cortado em dimensões 100X100 mm e passaram por um tratamento de superfície via jateamento, para remoção de óxidos e carepa de laminação, que prejudicam a abertura do arco e podem causar defeitos de soldagem. A liga atomizada de INCONEL 625 foi aquecida em estufa à temperatura de 250°C, por 8h, para remoção da umidade e melhoria da fluidez de arraste do pó.

Os revestimentos foram depositados em condições controladas por parâmetros fixos do equipamento, os quais são apresentados na Tabela 6.

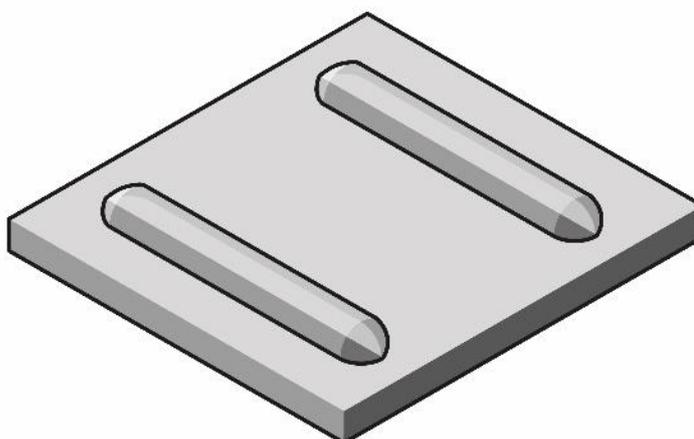
Tabela 6 - Parâmetros de soldagem utilizados no processo de revestimento.

Parametros	Valor
Gás de plasma (L/min)	3
Gás de proteção (L/min)	14
Gás de arraste (L/min)	2
Frequência de Oscilação da Tocha (Hz)	0,8
Distância tocha / substrato (mm)	12
Diâmetro do eletrodo (mm)	4
Ângulo de afiação do eletrodo (°)	30
Taxa de alimentação de pó	Volume constante

Fonte: A autora, 2019.

Um total de oito deposições foram produzidas, via tecimento triangular, na forma de cordões únicos de 100 mm de comprimento. Sobre cada chapa foram depositados dois cordões, como representado na Figura 12, que resfriaram ao ar, sem controle da taxa de resfriamento.

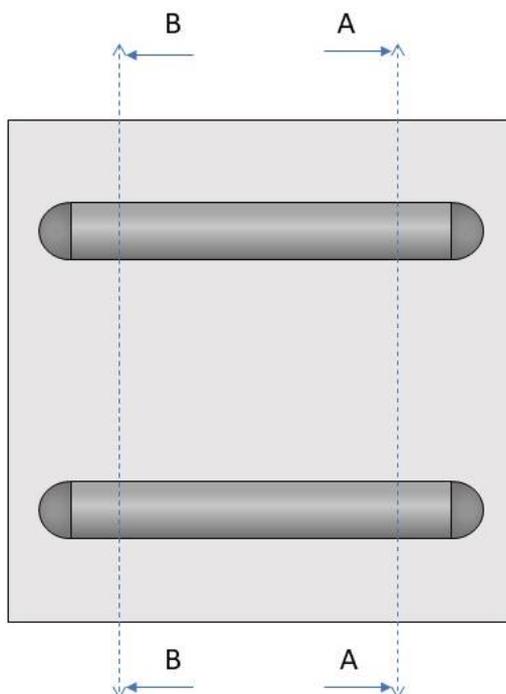
Figura 12 - Disposição dos cordões de Revestimento.



Fonte: A autora, 2019.

Parte das amostras foram desprezadas a 5 mm das extremidades para evitar os efeitos de borda, como mostra a Figura 13.

Figura 13 - Corte das amostras para evitar o efeito de borda

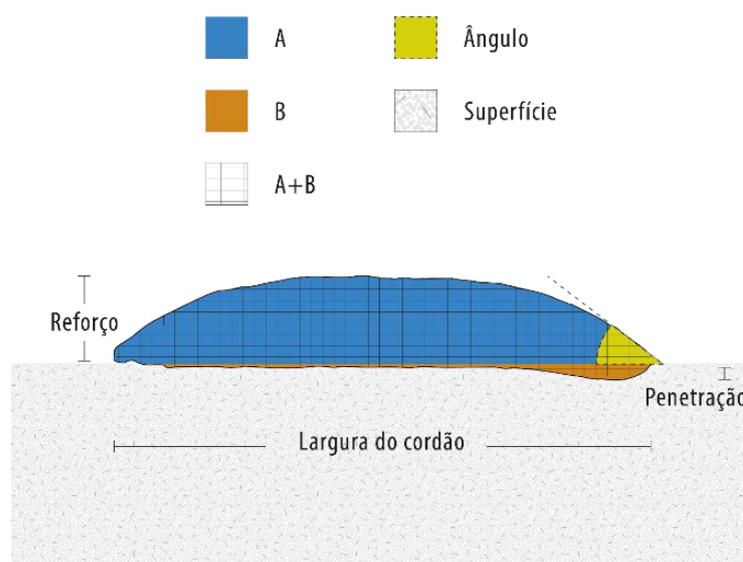


Fonte: A autora, 2019.

Foram extraídas amostras da seção transversal à direção de soldagem, localizada a 40 mm da seção de corte de uma das extremidades. As chapas foram cortadas por disco abrasivo e posteriormente, embutidas em resina Baquelite. Em seguida, as amostras foram submetidas ao lixamento com nº 1200 e foram polidas em pasta de alumina de 3 e 1 μ m, obtendo-se uma superfície de acabamento espelhado. Logo em seguida, as amostras foram submetidas ao ataque químico com uma solução com a seguinte composição: 92 ml de ácido clorídrico, 5 ml de ácido sulfúrico e 3 ml ácido nítrico; durante 5 minutos, pela técnica de imersão.

Imagens dos cordões foram obtidas por meio de um estereomicroscópio. Em seguida, os parâmetros dimensionais do cordão e porcentagem de diluição foram calculados, utilizando o software Axiovisio 4.8 da Zeiss. Os parâmetros utilizados para avaliar a geometria dos revestimentos e a porcentagem de diluição são apresentados na Figura 14.

Figura 14 - Parâmetros Utilizados para avaliar a geometria dos revestimentos e a diluição.



Fonte: A autora, 2018.

A diluição foi calculada pela razão entre a área do substrato fundida durante o processo (B) e a área total fundida durante o processo (A+B). As geometrias dos cordões medidas foram: altura de reforço, profundidade de penetração, largura do cordão e ângulo de molhabilidade.

4.5 Procedimentos de Caracterização

4.5.1 Microscopia Ótica (MO), Microscopia Eletrônica de varredura (MEV) e Espectroscopia de Energia Dispersiva de Raios-X (EDS)

Após preparação metalográfica as amostras foram analisadas quanto as suas microestruturas e composição química.

As micrografias foram obtidas através de um microscópio ótico de lâmina invertida, localizado no COMPOLAB (Laboratório de Materiais Compósitos e Integridade Estrutural) da UFPE, com o objetivo de analisar a microestrutura resultante do processo de revestimentos. Também foram realizadas imagens de microscopia eletrônica de varredura (MEV), para analisar as precipitações de fases decorrentes do processo de deposição. As composições dessas precipitações foram determinadas por meio de Espectroscopia de Energia Dispersiva de Raios-X acoplada

ao MEV, bem como a quantidade de ferro difundida do metal base para o revestimento.

4.5.2 Difração de Raios-X (DRX)

As análises de DRX foram realizadas para identificação das fases formadas nas diversas condições de deposição. Os ensaios foram conduzidos na faixa de 10° a 120° , modo de escaneamento contínuo, radiação K- α Cu, velocidade de medição $2^\circ/\text{minuto}$, passo angulador $0,05^\circ$, uma voltagem de 40 kV e corrente de 30 mA.

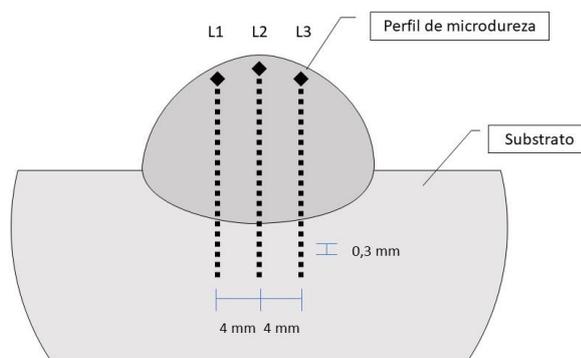
4.5.3 Microdureza Vickers

O ensaio de microdureza foi realizado com o objetivo de se verificar a dureza do revestimento depositados e a influência do fenômeno de diluição sobre essa propriedade.

Para obtenção dos perfis de microdureza Vickers, foi utilizada uma carga de 0.1 kgf durante 15 s, conforme a norma ASTM E 384-99 – “*Standard test method for microindentation hardness of materials*”. (ASTM, 1999)

Para cada amostra, linhas verticais de indentações foram realizadas ao longo da seção transversal da amostra, partindo do metal base até chegar ao topo do revestimento. Três perfis de microdureza Vickers foram realizados nas seções transversais das amostras (L1, L2, L3) e foram distanciados entre si em 4 mm. As varreduras, de um mesmo perfil vertical, foram distanciadas entre si por 0,3 mm, como apresentado na Figura 15.

Figura 15 - Disposição dos perfis de microdureza Vickers



Fonte: A autora, 2018.

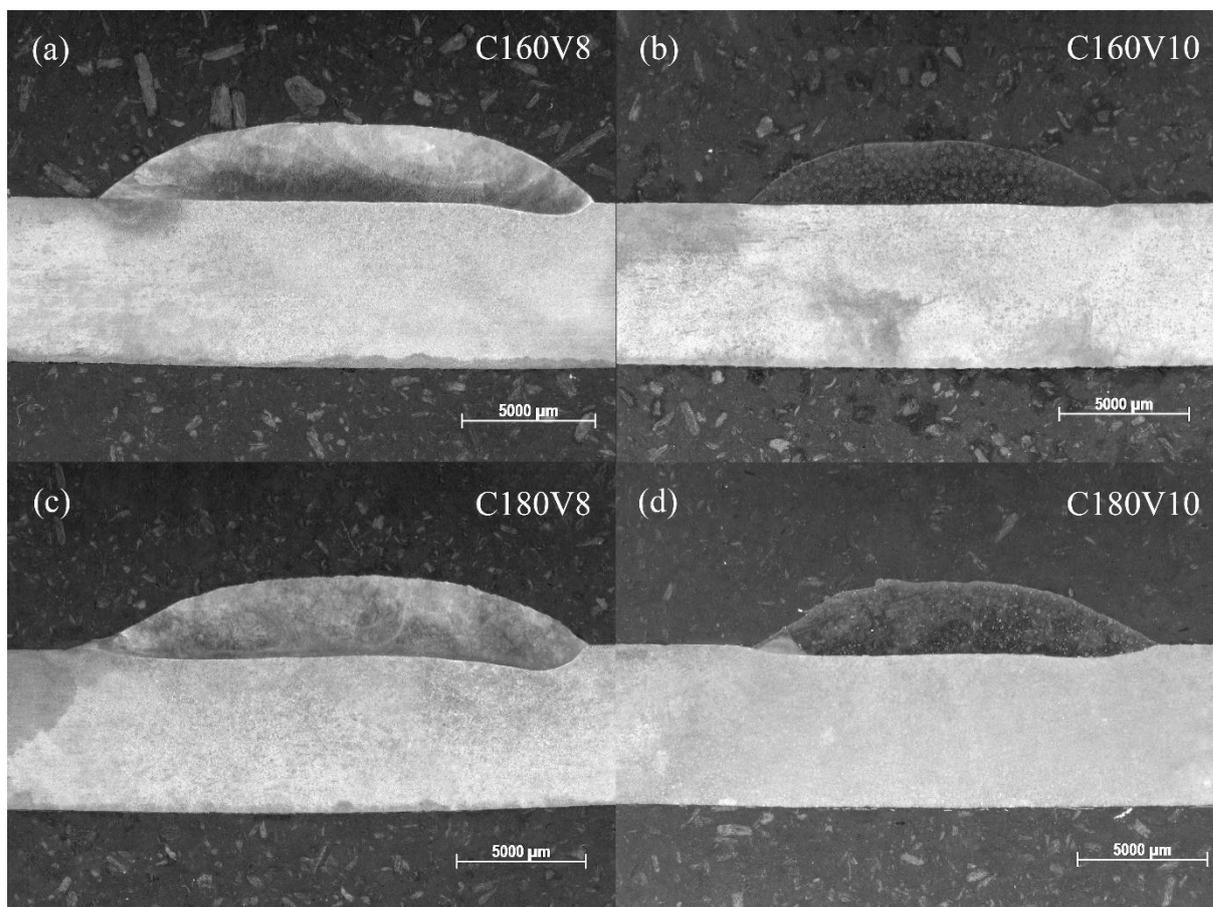
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo consiste na apresentação e discussão dos resultados correspondentes aos parâmetros geométrico e microestruturas dos revestimentos fabricados, cuja obtenção se deu a partir das condições metodológicas anteriormente citadas.

5.1 Geometria dos Cordões e Diluição

Na Figura 16, são apresentadas as imagens obtidas pela observação microscópica da seção transversal das amostras, depositadas pelo processo plasma-pó com arco transferido sobre a liga ASTM A-36. Os revestimentos não apresentaram defeitos superficiais (trincas, porosidade, mordeduras, falta de fusão e defeitos de interface), o que indica que os parâmetros de processamento da liga sobre a aço foram adequados. Cordões com bons aspectos, utilizando parâmetros similares, também foram encontrados nos estudos de Vidal (2014), em seu trabalho sobre a influência dos parâmetros do processo PTA-P na geometria de revestimentos de liga INCONEL 625 sobre Aço ASTM A-36.

Figura 16 – Macrografia da seção transversal dos revestimentos da Liga INCONEL 625 sobre o substrato de Aço ASTM A36



Fonte: A autora, 2018.

As diferenças na geometria dos cordões medidas e suas diluições calculadas estão correlacionadas com os parâmetros de processamento utilizados nos revestimentos na Tabela 7.

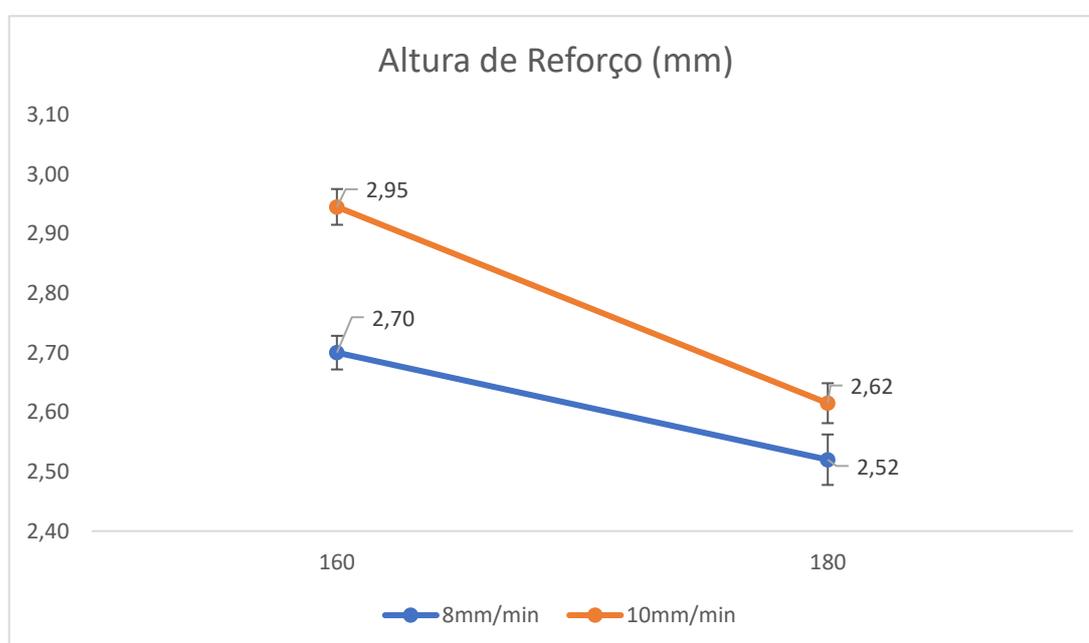
Tabela 7 - Valores geométricos dos Cordões de INCONEL 625.

Amostra	Altura de reforço (mm)	Penetração (mm)	Largura do cordão (mm)	Ângulo da molhabilidade (°)	Diluição (%)
C160V8	2,70±0,03	0,55±0,02	18,11±0,11	37,69±0,10	5,81±0,63
C160V10	2,95±0,03	0,25±0,02	15,79±0,43	39,76±1,63	3,66±0,79
C180V8	2,52±0,04	0,85±0,04	18,33±0,34	26,27±1,04	19,46±1,33
C180V10	2,62±0,03	0,68±0,05	16,73±0,18	28,03±0,63	16,84±0,27

Fonte: A autora, 2019.

Os revestimentos processados apresentaram altura de reforço variando entre 2,52 e 2,95 mm. Na Figura 17, é possível observar que a altura de reforço possui uma relação inversa com a corrente de soldagem, Pois as amostras que foram processadas sob a corrente de 160 A possuem um reforço maior que aquelas processadas a uma corrente de 180 A. Em contrapartida, a relação entre a altura de reforço e velocidade de soldagem ocorreu de maneira direta, ou seja, as alturas de reforço foram maiores nas amostras processadas sob a velocidade de 10 mm/min e menores quando processadas sob velocidade de 8 mm/min.

Figura 17 - Gráfico correlacionando altura de reforço com os parâmetros de processamento da liga INCONEL 625



Fonte: A autora, 2019.

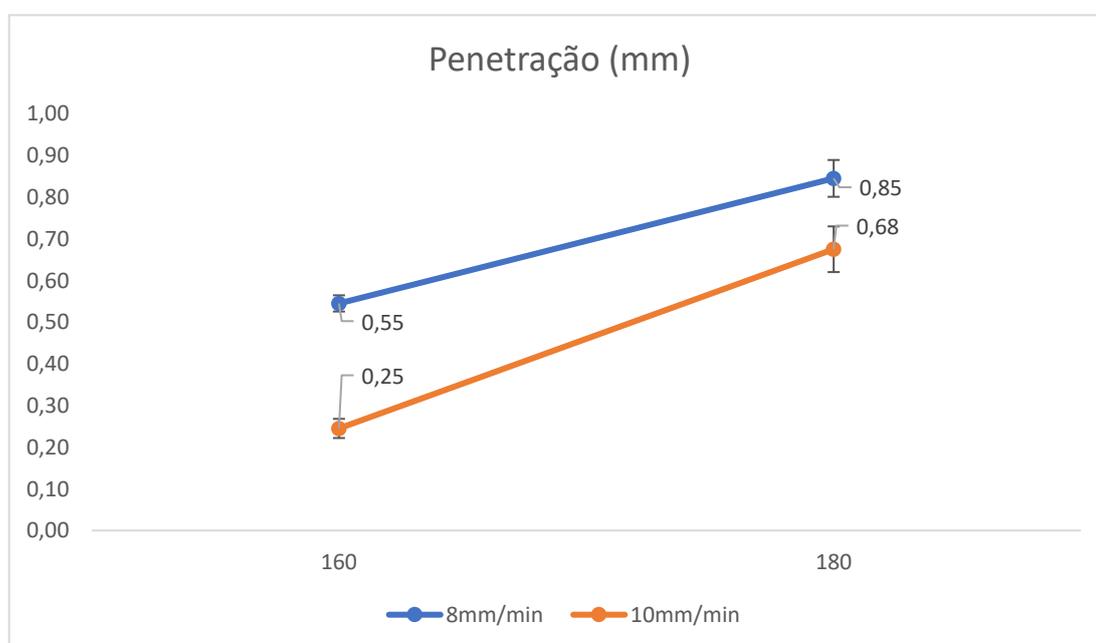
A profundidade de penetração variou entre 0,25 e 0,85 mm, nos revestimentos depositados. A penetração apresentou uma relação direta com a corrente de soldagem, com isso, as amostras que foram processadas sob a corrente de 160 A possuem valores de penetração inferior aos daquelas que foram processadas a uma corrente de 180 A.

Em relação à velocidade de soldagem, a penetração apresentou uma relação inversa, ou seja, seus valores foram menores nas amostras processadas sob a velocidade de 10 mm/min e maiores naquelas processadas sob velocidade de 8 mm/min, como pode ser notado na Figura 18.

Os resultados obtidos foram compatíveis com os obtidos por Balasubramanian et al. (2009), que relacionou o aumento da penetração à alta geração de calor, disponível para fusão do substrato, causada pelo aumento da corrente de soldagem. Segundo o autor, a alta geração de calor aumenta também a força do arco que contribui ainda mais para o aumento da penetração.

Acerca da velocidade de soldagem, Balasubramanian et al. (2009) afirma que em condições de velocidades mais altas, o aporte térmico fornecido por unidade de comprimento de cordão de solda é mais baixo. Isso resulta numa menor porção do substrato fundida, gerando penetrações mais rasas no metal base.

Figura 18 - Gráfico de correlação entre a Penetração e os parâmetros de processamentos dos revestimentos de INCONEL 625

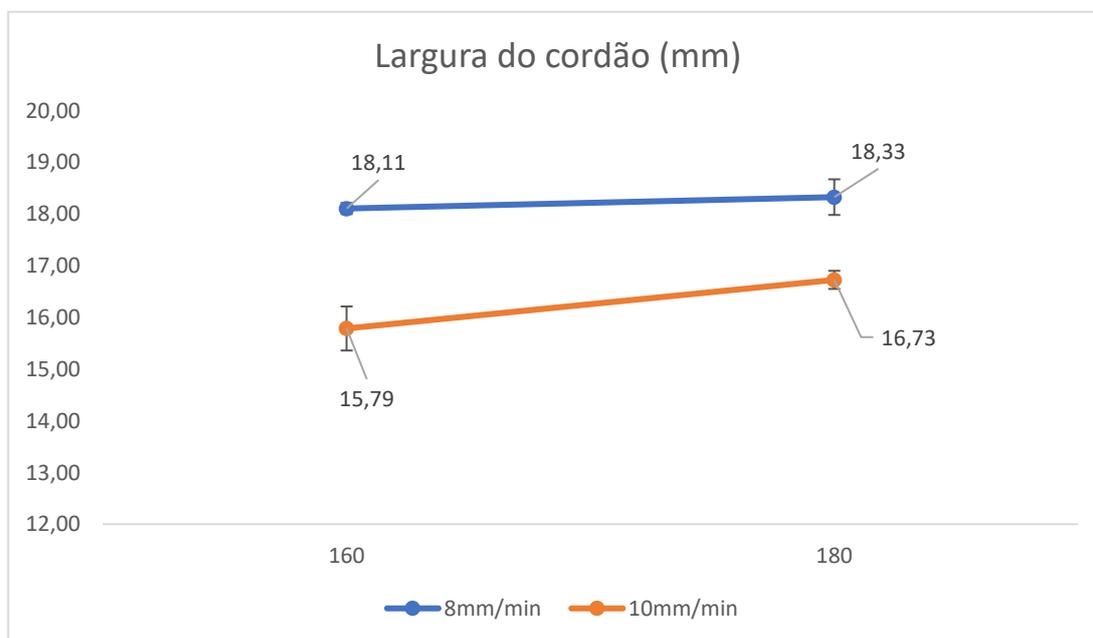


Fonte: A autora, 2019.

A largura dos cordões de solda variou entre 15,79 e 18,33 mm, nos revestimentos depositados. Ela apresentou uma relação direta com a corrente de soldagem e por isso as amostras que foram processadas sob a corrente de 160 A possuem larguras inferiores àquelas que foram processadas a uma corrente de 180 A. Em relação à velocidade de soldagem, os valores de largura apresentaram uma relação inversa, ou seja, seus valores foram menores nas amostras processadas sob a velocidade de 10 mm/min e maiores naquelas processadas sob velocidade de 8 mm/min, como mostra a Figura 19.

A relação entre a corrente de soldagem e a largura de cordão corroboram com os obtidos por Siva et al. (2009). Os autores afirmam que o aumento da corrente de soldagem, aumenta o aporte térmico no metal base, resultando no aumento da largura de cordão. A diminuição da velocidade de soldagem também aumenta o aporte térmico do processo e, por isso, também resulta em largura de cordões maiores.

Figura 19 - Gráfico que relaciona os valores de largura dos cordões com os parâmetros de processamento da liga INCONEL 625.



Fonte: A autora, 2019.

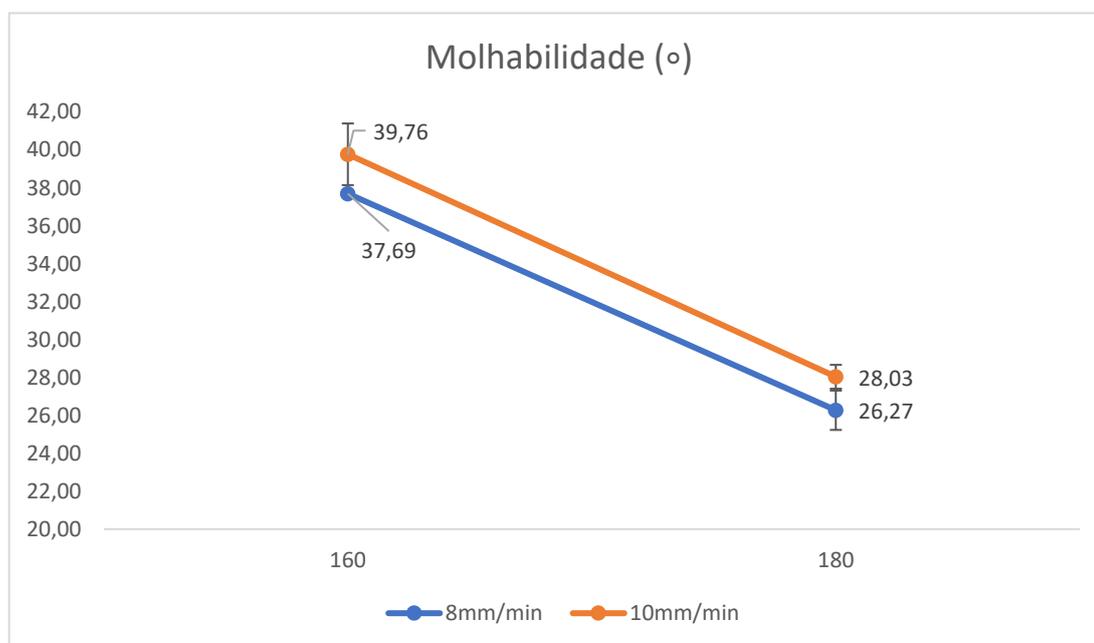
Na Figura 20 é apresentado o gráfico de correlação entre o ângulo de molhabilidade e os parâmetros de processamento utilizados para a deposição da Liga INCONEL 625. Nela é possível observar que os valores dos ângulos de molhabilidade variaram numa faixa entre 26,27° e 39,76°, nos revestimentos depositados. O ângulo de molhabilidade apresentou uma relação inversa com a corrente de soldagem e por isso as amostras que foram processadas sob a corrente de 160 A possuem ângulos maiores àquelas que foram processadas a uma corrente de 180 A. Em relação à velocidade de soldagem, os valores dos ângulos apresentaram uma relação direta, ou seja, seus valores foram maiores nas amostras processadas sob a velocidade de 10 [mm/min] e menores naquelas processadas sob velocidade de 8 [mm/min].

Os resultados obtidos são compatíveis com os resultados apresentados por Takano et al. (2010), que afirmaram em seu trabalho que quanto maior a intensidade

de corrente maior a molhabilidade (menor o ângulo), conseqüentemente, maior o nível de diluição e menor será a dureza do revestimento.

Antoszczyszyn (2014), afirma em seu estudo que o ângulo de molhamento é importante sempre que for necessária a proteção de grandes áreas usando sobreposição de cordões. A baixa molhabilidade pode causar falta de fusão e vazios entre os cordões, podendo comprometer a qualidade de áreas revestidas. A fim de minimizar os efeitos deletérios da molhabilidade, algumas vezes se faz necessária a adoção de maior sobreposição ou otimização das condições de processamento, entretanto, estes fatores contribuem para uma maior diluição.

Figura 20 - Gráfico de relação entre ângulo de molhabilidade e parâmetros de processamento da liga INCONEL 625



Fonte: A autora, 2019.

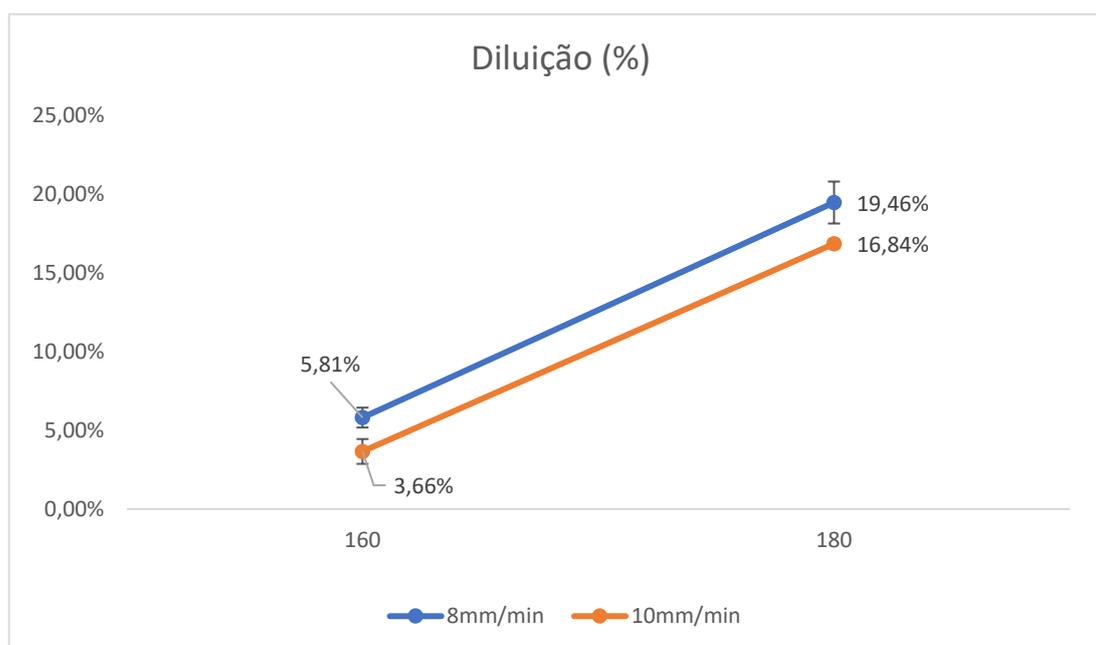
A diluição apresentou uma relação direta com a corrente de soldagem e uma relação inversa com a velocidade de soldagem. Ou seja, os valores de diluição foram maiores para a corrente de 180 A e velocidades de 8 mm/min e menores para correntes de 160 A e velocidades de 10 mm/min. Seus valores variaram numa faixa entre 3,66 e 19,46%. Na Figura 21 é apresentado um gráfico correlacionando a diluição com os parâmetros de processamento da liga INCONEL 625.

Segundo Takano et al. (2010), a intensidade de corrente é o parâmetro que mais influência significativamente as características do depósito. Balasubramanian et

al. (2009), afirma que a corrente de soldagem possui uma relação direta de proporcionalidade com a diluição, se a corrente aumenta a diluição aumenta como consequência. Para Siva et al. (2009), este aumento na diluição está atrelado ao aumento do aporte térmico, resultante do aumento da corrente.

Balasubramanian et al. (2009) afirma que a velocidade de soldagem possui uma relação de proporcionalidade inversa com a diluição. Logo, a porcentagem de diluição diminui com o aumento da velocidade. Isso ocorre devido ao baixo aporte térmico fornecido por unidade de comprimento a solda, em condições de alta velocidade. Um baixo aporte térmico implica em uma menor profundidade de penetração, que, por sua vez, resultará em baixas porcentagens de diluição (SIVA; MURUGAN; RAGHUPATHY, 2009).

Figura 21 - Gráfico de relação entre o percentual de diluição e os parâmetros de processamento da liga INCONEL 625.



Fonte: A autora, 2019.

Para atender requisitos de maior produtividade de deposições e desperdício mínimo de material nas etapas de acabamento, é desejável que os revestimentos apresentem maiores larguras, baixos ângulos de molhabilidade, baixa diluição (ligadas a baixas penetrações) e baixo índice de convexidade (reforço/largura). Desta maneira, menores esforços serão necessários para deixar a superfície revestida plana, resultando em uma menor perda de material nobre. (VIDAL, 2014)

Segundo a norma ISO 10423 (2009), valores de diluição próximos a 5% são considerados excelentes para a garantia de ótima qualidade aos revestimentos. Silva (2010), em seu estudo sobre os aspectos operacionais e metalúrgicos em revestimentos depositados pelo processo TIG em ligas de níquel, afirma que as condições adequadas para uma camada de revestimentos com boa qualidade são aquelas que tendem a minimizar os níveis de diluição. Isto acontece por conta da relação direta desta característica com as alterações químicas e conseqüentemente com as características metalúrgicas do revestimento.

Para apresentar características geométricas que atendam aos requisitos de produtividade, os revestimentos devem possuir, de maneira geral, uma menor razão entre o reforço e a largura (R/L). Esta característica está relacionada à convexidade do cordão de solda e, por isso, o índice de convexidade (R/L) da camada depositada implica no grau de planicidade da superfície (irregularidades) e na presença de defeitos, em especial a falta de fusão.

Uma combinação entre os efeitos metalúrgicos e os efeitos de geometria dos cordões pode ser obtida através do produto da diluição e do índice de convexidade das camadas depositadas. Baixos valores deste produto são requeridos para se obter revestimentos com uma melhor combinação de suas propriedades geométricas e metalúrgicas. Na Tabela 8 é apresentado o produto da diluição versus índice de convexidade dos revestimentos de INCONEL 625 depositados por PTA-P sobre diferentes condições de processamento.

Tabela 8 - Classificação das amostras conforme o produto da diluição geométrica e o índice de convexidade.

Amostra	Diluição (D)	Índice de concavidade(R/L)	D*(R/L)
C160V8	5,81%	15,58%	0,0091
C160V10	3,66%	17,90%	0,0065
C180V8	19,46%	13,94%	0,0271
C180V10	16,84%	15,45%	0,0260

Fonte: A autora, 2019.

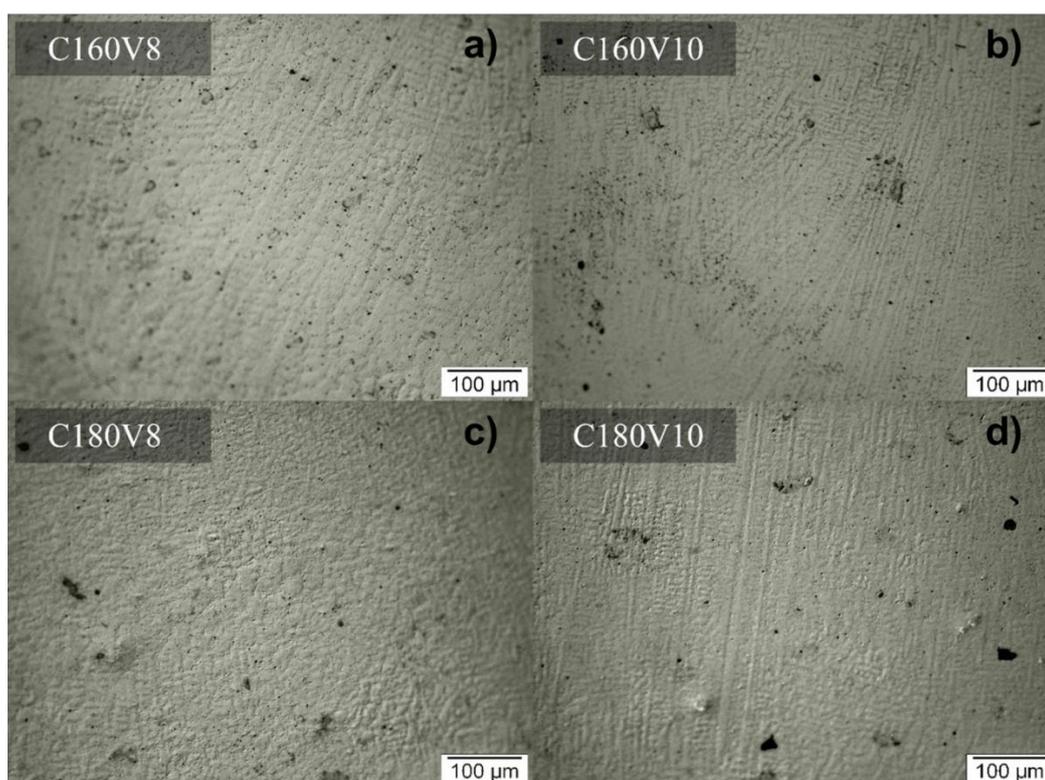
Com base nos resultados apresentados na Tabela 8 e nas condições discutidas anteriormente, a amostra C160V8 obteve um revestimento com a melhor combinação

de parâmetros. Pois, resultou em baixos valores de diluição e baixos índices de convexidade.

5.2 Caracterização Microestrutural dos Revestimentos

Na Figura 22 são apresentadas as imagens de microscopia ótica dos revestimentos, depositados sobre diferentes condições de processamento. Os revestimentos apresentaram microestrutura dendrítica de solidificação, composta por uma estrutura hipoeutética com dendritas de Níquel γ (Ni – CFC), como previsto por Fernandes et al. (2011).

Figura 22 - Imagens de Microscopia ótica do metal de solda substrato dos revestimentos: a) C160V8, b) C160V10, c) C180V8, d) 180V10



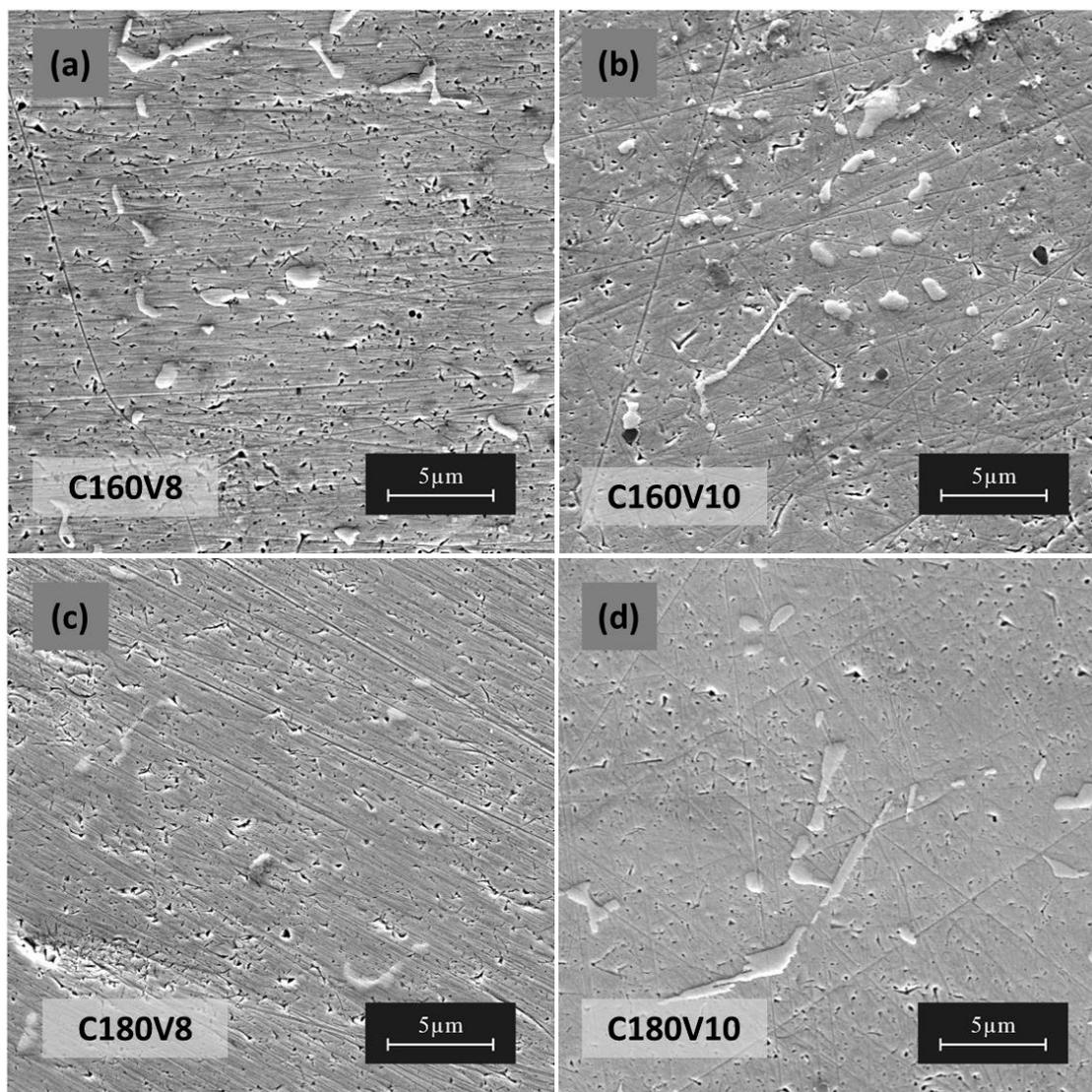
Fonte: A autora, 2019.

Não foram constatadas diferenças microestruturais significativas entre as diluições estudadas. No entanto, é possível notar que, no metal de solda, as dendritas resultantes possuem orientações diferentes em algumas regiões do corpo de prova, ou seja, uma direção de crescimento diferente. Segundo Kou (2003), isso acontece porque os grãos nucleiam e crescem na direção do gradiente térmico, como o fluxo

de calor não possui uma direção contínua na poça de fusão, aqueles grãos, que apresentarem uma orientação mais favorável, irão bloquear o crescimento dos outros.

As metalografias das seções transversais, obtidas por MEV, sobre diferentes condições de parâmetros de soldagem, são apresentadas na Figura 23.

Figura 23 - Morfologias de MEV dos revestimentos depositados por PTA-P: (a) C160V8; (b) C160V10; (c) C180V8; (d) C180V10;



Fonte: A autora, 2019.

A partir da análise em microscópio eletrônico de varredura, verificou-se a precipitação de fase secundária nos revestimentos.

As frações da fase precipitada para os diferentes parâmetros de processamentos foram medidas e são apresentadas na Tabela 9. Pode-se observar

que ela respondeu de forma inversa ao aumento do aporte térmico das deposições, desta forma, maiores energias resultam em menores frações de fases precipitadas.

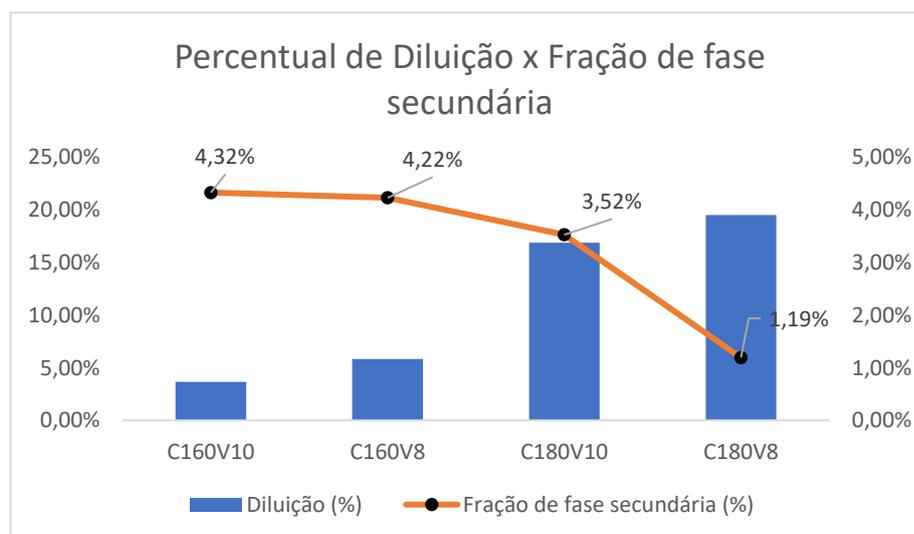
Tabela 9 - Fração de fase precipitada presentes nas amostras, para diferentes parâmetros de processamento.

Amostras	Frações de fases precipitadas (%)
C160V8	4,22
C160V10	4,32
C180V8	1,19
C180V10	3,52

Fonte: A autora, 2019.

. Antoszczyszyn (2014), associa esta diminuição nas frações precipitadas ao aumento da diluição, que é resultante de um maior aporte térmico causado pelo aumento da corrente de soldagem. A Figura 24 compara os revestimentos processados sob diferentes parâmetros. Nela é possível notar que à medida que a diluição aumenta, com o aumento do aporte térmico, a fração da fase secundária diminui, corroborando com os resultados obtidos pelo autor.

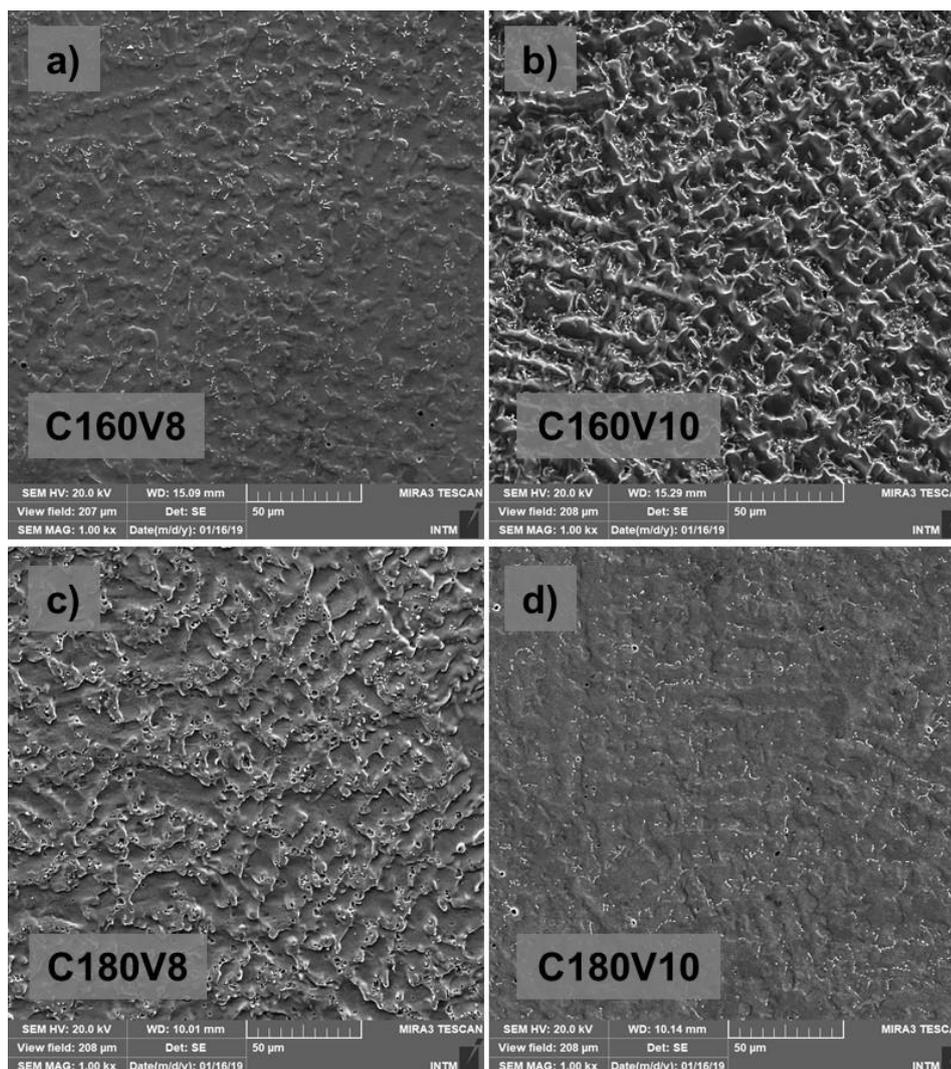
Figura 24 - Relação entre o percentual de diluição e a fração de fase secundária



Fonte: A autora, 2019.

Independente dos parâmetros de soldagem empregados, a microestrutura do metal de solda dos revestimentos apresentou uma matriz γ , com a presença de fases secundárias precipitadas nas regiões interdendríticas, como mostram as Figura 25 a), b), c) e d). As análises foram realizadas na superfície dos revestimentos a 1,55 mm da interface revestimento/substrato.

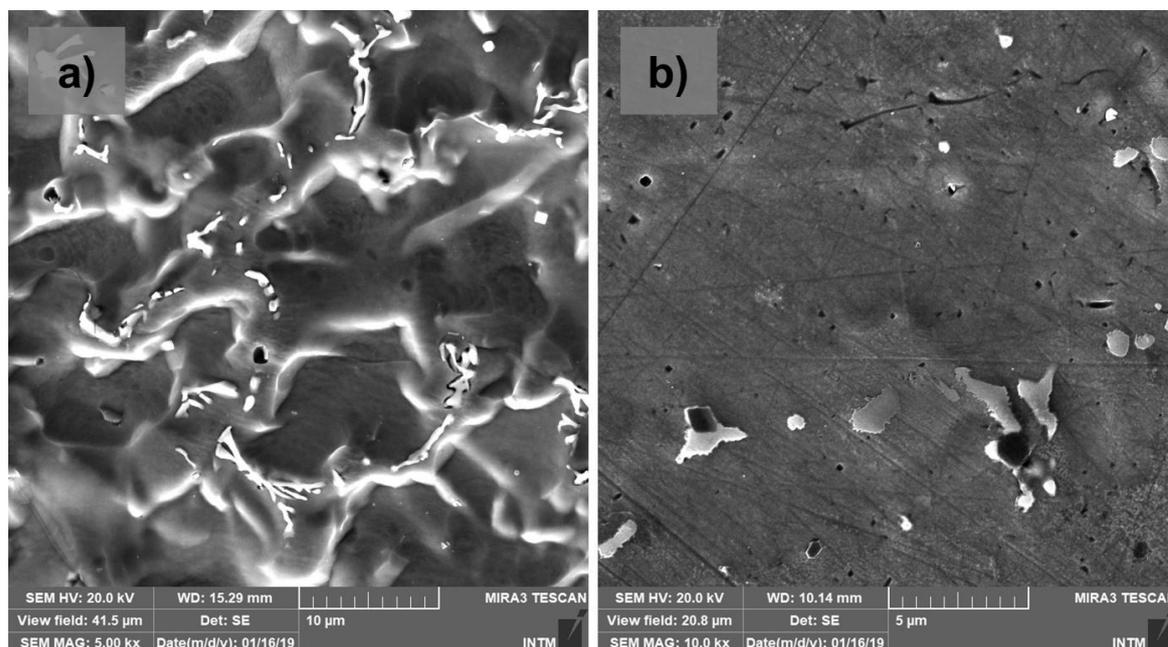
Figura 25 - Microestrutura do metal de adição nas amostras: a) C160V8, b) C160V10, c) C180V8, d) 180V10



Fonte: A autora, 2019.

As fases precipitadas apresentaram-se principalmente com morfologias disforme, recebendo esta nomenclatura devido às formas variadas que recebem quando assumem a forma do líquido remanescente. Além das regiões interdendríticas, estas fases apareceram nucleadas em torno de inclusões, como mostram as Figura 26 a) e b).

Figura 26 - Morfologia das fases secundárias encontradas nos revestimentos na região: a) interdendrítica e b) de inclusões.



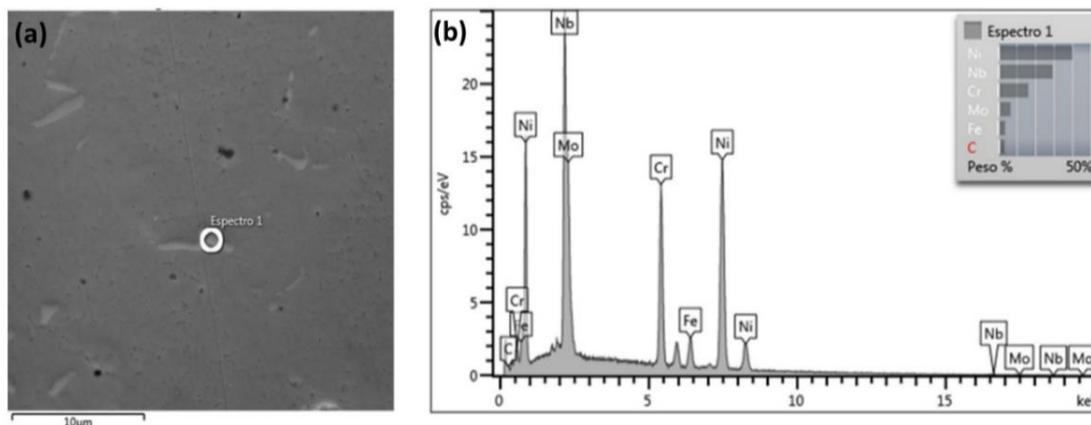
Fonte: A autora, 2019.

Aguiar (2010) associa a formação das fases secundárias durante a soldagem à ocorrência de microsegregação de elementos químicos para o líquido remanescente. Como a solidificação do metal de solda ocorre em condições fora do equilíbrio, a segregação de alguns elementos para o líquido pode ocasionar uma supersaturação do líquido no final da solidificação. Os elementos podem exceder o limite de solubilidade na fase líquida, favorecendo a precipitação de outras fases.

5.3 Fases formadas e composição dos revestimentos.

Na Figura 27, é apresentada uma análise de EDS realizada na região de precipitação, com o objetivo de identificar os elementos presentes.

Figura 27 - Análise do precipitado: (a) MEV e (b) EDS



Fonte: A autora, 2019.

A composição da precipitação da fase γ mostrada foi obtida via EDS local. Percebe-se que essa fase é composta, principalmente, pelos elementos Ni, Nb, Cr e Mo. Os resultados foram semelhantes aos obtidos por Silva (2010), que associa os elevados teores de Ni, Cr, Mo, nos precipitados, ao fato deles serem os principais constituintes da liga. Isso porque, mesmo quando o ponto de análise estiver sobre o precipitado, pode ocorrer uma interação do feixe de elétrons com a matriz.

Além da presença dos principais constituintes do INCONEL 625 (Ni, Cr e Mo), o Nb aparece como um elemento marcante na composição do precipitado, isto ocorre devido à difusão de ferro do substrato para o metal de solda, causando a redução da solubilidade do Nb e Mo. Resultados semelhantes foram obtidos por (BANOVIC; DUPONT; MARDER, 2002).

O efeito da diluição sobre os elementos de liga presentes nos revestimentos, sob diferentes parâmetros de processamento é mostrado na Tabela 10.

Tabela 10 - Composições químicas elementares obtidas no ensaio de EDS dos revestimentos.

Amostras	Diluição (%)	Elementos (%)				
		Fe	Ni	Cr	Nb	Mo
C160V10	3,66	6,82	63,93	23,43	3,29	7,68
C160V8	5,81	11,78	62,32	22,94	2,93	7,41
C180V10	16,84	26,03	53,63	20,47	2,52	6,43

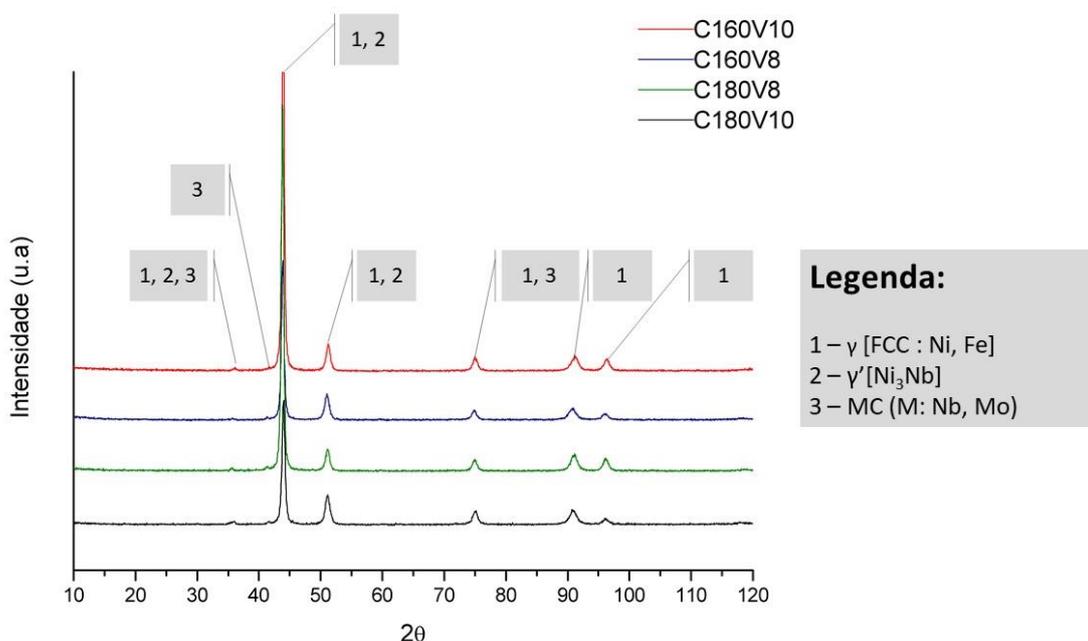
C180V8	19,46	28,83	53,36	20,3	2,47	6,14
--------	-------	-------	-------	------	------	------

Fonte: A autora, 2019.

É possível observar que o aumento na diluição nos revestimentos, afeta diretamente o teor de elementos de liga presentes nas deposições. À medida que a diluição aumenta, o teor de ferro aumenta como consequência. Já para o caso do Ni, Cr, Nb e Mo, o aumento da diluição causa uma diminuição no teor destes elementos. Os resultados corroboram com os encontrados por Banovic et al. (2002), em seu trabalho. Os autores afirmam que com o aumento da diluição, aumenta a participação do ferro no metal de solda e com isso ocorre a redução da solubilidade de elementos, como nióbio e o molibdênio. Esses elementos migram naturalmente para o líquido interdendrítico durante o processo de solidificação do metal de solda.

As análises de Difração de Raios-x foram realizadas nas amostras de topo do revestimento. A partir dos resultados obtidos, apresentados na Figura 28, foi possível observar a formação das fases γ (Fe,Ni-CFC), indicando que o ferro presente no aço e o níquel participam de uma solução sólida substitucional (ANTOSZCZYSZYN, 2014). Também foram identificados picos que sugerem a presença da fase γ' (Ni_3Nb) e de carbonetos dispersos do tipo MC (M: Molibdênio e Nióbio), em todas as condições de deposição. Os resultados são compatíveis com as previsões obtidas nos ensaios de EDS, que apontam os elementos Ni, Nb, Cr e Mo como elementos presentes na fase precipitada. Em (ASM, 1993), os elementos Cr, Mo e Nb presentes na composição da liga INCONEL 625, são descritos como potenciais formadores de carbonetos.

Figura 28 - Resultado da análise de DRX para as amostras de topo.



Fonte: A autora, 2019.

Mesmo sob condições de processamento diferentes, as amostras indicaram resultados muito semelhantes nos ensaios de DRX. Isto mostra que os parâmetros de processamento utilizados no presente trabalho, não causaram alteração na dinâmica de precipitação de carbonetos. Antoszczyszyn (2014), observou que as fases formadas não são afetadas pela corrente de deposição, o que corrobora com os resultados obtidos. Porém em estudos complementares, o autor realizou análises na liga pura, fundida e observou a presença de uma fase adicional (M_7C_3). Esta fase foi associada ao maior percentual de cromo presente na liga pura, visto que ela não sofreu difusão de elementos do substrato, resultantes do fenômeno de diluição.

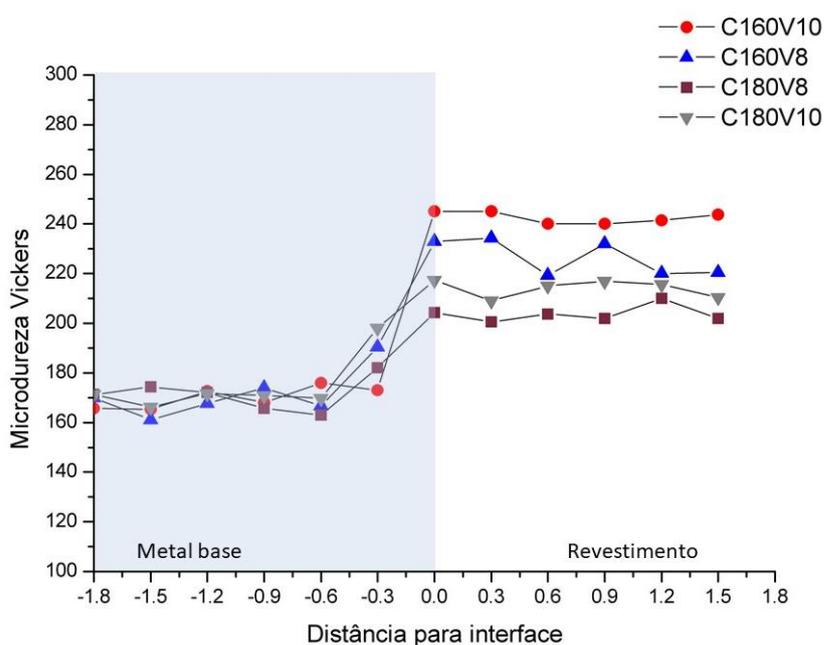
5.4 Microdureza dos revestimentos

A Figura 29 apresenta o gráfico das médias dos perfis de microdureza das três linhas medidas para cada amostra. A interface, entre o metal base e o revestimento, aparece na figura representado pela posição zero. As posições negativas são relacionadas ao metal base, enquanto que as positivas são relacionadas ao revestimento. As amostras de revestimento apresentaram média de durezas, resultantes dos três perfis de dureza, entre a faixa de 200-250HV.

É possível observar que o crescimento do aporte térmico empregado no processamento das deposições, implica no aumento da média das durezas. Como pode ser visto, amostras que foram produzidas em correntes mais altas (C180V8 e C180V10) apresentaram menores valores de microdureza. Comparando-se a microdureza dessas duas amostras, foi demonstrado que a amostra C180V8, obtida a partir de uma velocidade menor (8mm/min), apresentou os menores valores. Isso ocorre devido à substituição dos elementos de liga da matriz por Fe, que migra do metal base para o metal de solda - resultados confirmados pelos ensaios de EDS. Desta forma, a solubilidade de elementos como o Nb - responsável pelo endurecimento da solução sólida da matriz - é reduzida, resultando em precipitações de fases secundárias.

Aguiar (2010) encontrou resultados semelhantes e correlacionou a redução da microdureza ao aumento da diluição. Para o autor, o aumento da diluição em decorrência do aumento do aporte térmico, faz com que o Fe substitua elementos como nióbio, molibdênio e tungstênio da matriz, resultando em uma matriz mais dúctil, já que estes elementos endurecem a matriz por solução sólida e que favorecem a precipitação de fase.

Figura 29 - Média dos perfis de dureza nas seções transversais das deposições



Fonte: A autora, 2019.

6 CONCLUSÕES

Este trabalho avaliou a influência da diluição em revestimentos à base da superliga de níquel INCONEL 625, depositados via plasma por arco transferido (PTA-P). Cordões simples foram depositados sobre Aço ASTM A 36, com diferentes valores de corrente de soldagem (180 e 60 A) e velocidade de soldagem (8 e 10 mm/min).

As principais contribuições sobre o tema são listadas abaixo:

- Os resultados confirmaram a influência dos parâmetros de soldagem na diluição dos revestimentos. A energia de soldagem aumentou com o aumento da corrente de soldagem e diminuiu com o aumento da velocidade de soldagem. A penetração, a largura de cordão e a diluição aumentaram com o aumento desta energia, enquanto que o ângulo de contato e a altura de reforço diminuíram com o aumento da energia.
- A amostra C160V10 foi a deposição que apresentou o melhor índice de qualidade, dentro dos parâmetros estabelecidos para seleção dos cordões, combinando boas propriedades geométricas e microestruturais.
- A microestrutura do revestimento depositado foi composta por uma matriz γ (Ni-CFC) com precipitação de fase secundária γ' composta principalmente por Ni_3Nb e carbonetos de Nb e Mo, presentes nas regiões interdendríticas e inclusões. As fases foram confirmadas através dos ensaios de DRX.
- O volume destas precipitações diminuiu com o aumento da diluição. Isso ocorreu, devido ao aumento da migração do Fe presente no metal base do revestimento através do fenômeno de difusão, com o aumento da diluição.
- Maiores níveis de diluição proporcionaram menores níveis de microdureza do material. Isto ocorre porque o Fe reduziu a solubilidade do Nb e Mo da matriz γ . Esses elementos segregaram para o líquido interdendrítico

durante o processo de solidificação do metal de solda, o que fez com que a matriz se tornasse mais dúctil.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuros são sugeridos:

- Realizar estudo de resistência à corrosão dos revestimentos em diferentes condições de pH e temperatura, por meio de ensaios eletroquímicos;
- Investigar outros parâmetros de soldagem que possam influenciar no processo de diluição;
- Realizar a deposição em estruturas de maior área;

REFERÊNCIAS

- ABIOYE, T. E.; MCCARTNEY, D. G.; CLARE, A. T. Laser cladding of Inconel 625 wire for corrosion protection. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 217, n. 217, p. 232-240, 2015.
- AGUIAR, M. W. **Revestimento por soldagem MIG/MAG empregando ligas de níquel para aplicação em componentes do setor petróleo e gás**. 2010. 255 f. Tese (Doutorado em Ciência de Materiais) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2010.
- ANTOSZCZYSZYN, T. J. **Revestimentos de Ligas de níquel INCONEL 625 por Plasma com arco transferido (PTA) sobre aços API 5L X70 e AISI 316 L**. 2014. 82 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Setor de Tecnologia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2014.
- ANTOSZCZYSZYN, T. J.; PAES, R. M. G.; OLIVEIRA, A. S. C. M. D.; SCHEID, A. Impact of dilution on the Microstructure and Properties of Ni-Based 625 Alloy Coatings. **Soldagem e inspeção**, São Paulo, v. 19, n. 2º, p. 134-144, 2014.
- ASM. **ASM. Properties and Selections: Irons, Steels and High Performance Alloys**. Ohio: ASM International, v. 1, 1993.
- ASTM. **ASTM E 384-99: Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials**. ASTM Committee. [S.l.], p. 1-24. 1999.
- AWS. Welding Handbook, Material and Application. **American Welding Society**, Miami, v. 3, 1996.
- AWS. The welding Encyclopedia. **American Welding Society**, Miami, v. 2, n. 8º, 1997.
- BALASUBRAMANIAN, V.; LAKSHMINARAYANAN, A. K.; VARAHAMOORTHY, R.; BABU, S. Application of response surface methodology to prediction of dilution in plasma transferred arc hardfacing of stainless steel on carbon steel. **Journal of Iron and Steel research**, International, v. 16, n. 1, p. 44-53, 2009.
- BALDAN, R. **Processamento e Caracterização de Reatores Automotivos da Superliga MAR-M247**. Dissertação (Mestrado em Materiais Metálicos, Cerâmicos e Poliméricos) - Escola de Engenharia de Lorena, Universidade de São Paulo, Lorena, 2009.
- BANOVIC, S. W.; DUPONT, J. N.; MARDER, A. R. Dilution and microsegregation in dissimilar metal welds between super austenitic stainless steel and nickel base

alloys. **Science and Technology of Welding and Joining**, v. 7, n. 6, p. 374-383, 2002.

COLPAERT, H. **Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns**. 5^a. ed. Rio de Janeiro: Editora LTC, 2008.

DAVIS, J. R. **ASM specialty handbook: nickel, cobalt, and their alloys**. [S.I.]: ASM International, 2000.

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

D'OLIVEIRA, A. S. C. M.; SILVA, P. S. C. P. D.; VILAR, R. Microstructural features of consecutive layers of Stellite 6 deposited by laser cladding. **Surface & Coatings Technology**, v. 153, n. 2, p. 203-209, 2002.

DURAND-CHARRE, M. **The Microstructure of Superalloys**. 1. ed. London: Routledge, 2017.

FAUCHAIS, P.; HEBERLEIN, J.; BOULOS, M. I. **Thermal spray fundamentals**, 2014.

FERNANDES, F.; LOPES, B.; CAVALEIRO, A.; RAMALHO, A.; LOUREIRO, A. Effect of arc current on microstructure and wear characteristics of a Ni-based coating deposited by PTA on gray cast iron. **Surface & Coatings Technology**, v. 205, n. 16, p. 4094-4106, 2011.

FESHARAKI, M. N.; SHOJA-RAZAVI, R.; MANSOURI, H. A.; JAMALI, H. Evaluation of the hot corrosion behavior of Inconel 625 coatings on the Inconel 738 substrate by laser and TIG cladding techniques. **Optics and Laser Technology**, 2019.

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

GEDDES, B.; LEON, H.; HUANG, X. **Superalloys: Alloying and Performance**. [S.I.]: ASM International, 2010.

GLAGE, A. **Nickel-based superalloys and their application in the aircraft industry**. UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI TRENTO. [S.I.]. 2007.

GOMES, J. H. D. F.; COSTA, S. C. D.; PAIVA, A. P. D.; BALESTRASSI, P. P. Multi-Objective Optimization in Cladding of ABNT 1020 Carbon Steel Plate Using an

Austenitic Stainless Steel Cored Wire. **Soldagem e inspeção**, São Paulo, v. 16, n. 3, p. 232-242, Julho 2011.

GRAF, K. **Estabilidade a Alta Temperatura de Revestimentos de Hastelloy C Depositado por PTA**. 2004. 89 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais), Programa de Pós-Graduação em Engenharia – PIPE, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2004.

GRAF, K. **Desenvolvimento de Revestimentos NbAl por PTA**. 2009. 122 f. Tese (Dotourado em Engenharia e Ciência dos Materiais) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia – PIPE, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2009.

HONGYING, W. Investigation on the deposition rate and the dilution ratio of plasma surface welding. **China Welding**, v. 11, n. 1, p. 55-58, Mai 2002.

IMC - SOLDAGEM. **Manual Digiplus A7**. Disponível em: https://www.imc-soldagem.com.br/images/documentos/manuais/manual_Digiplus%20ACPO-%20DCPO%20e%20ACPO3C%20%20_8aEd.pdf. Acesso em: 21 nov. 2018.

ISO, BSEN. 10423: 2009. **Petroleum and Natural Gas Industries. Drilling and Production Equipment. Wellhead and Christmas Tree Equipment**. [S.I.]. 2009.

JOURNAL, I.; DASGUPTA, E. B.; MUKHERJEE, S. Optimisation of Weld Bead Parameters of Nickel Based Overlay Deposited By Plasma Transferred Arc Surfacing, 2014.

KOU, S. **Welding Metallurgy**. [S.I.]: Wiley-Interscience, 2003. 74–84 p.

LIMA, C. C.; TREVISAN, R. **Aspersão Térmica: Fundamentos e Aplicações**. 2ª. ed. São Paulo: Artliber , 2007.

MARCONI, M.; MARCONI, B. Powder Plasma Arc Welding on Thick Walled Pipes. **International Institute of Welding**, v. 11, p. 16, 2005.

MARIMUTHU, K.; MURUGAN, N. Prediction and optimisation of weld bead geometry of plasma transferred arc hardfaced valve seat rings. **Maney for the institute of Materials, Minerals and Mining**, Coimbatore, v. 19, n. 2, p. 143-149, Mai 2003.

MARQUES, P. V.; MODENESI, P. J. Algumas equações úteis em soldagem. **Soldagem & inspeção**, São Paulo, v. 19, n. 1, p. 91-102, Fev 2014.

PEREIRA, L. X.; BENEGRÁ, M. **Revestimentos alternativos para palheta de turbinas**. Programa de Apoio à Iniciação Científica - PAIC. [S.I.]: [s.n.]. 2011. p. 359-378.

POZA, P.; MÚNEZ, C. J.; GARRIDO-MANEIRO, M. A.; VEZZÙ, S.; RECH, S.; TRENTIN, A. Mechanical properties of Inconel 625 cold-sprayed coatings after laser remelting. Depth sensing indentation analysis. **Surface & Coatings Technology**, v. 243, n. 243, p. 51-57, 2014.

LIU, R.; WANG, Z.; SPARKS, T.; LIOU, F.; NEWKIRK, J. Aerospace applications of laser additive manufacturing. **Woodhead Publishing Series in Electronic and Optical Materials**, Rolla, p. 351-371, Set 2017.

RAMIREZ, A. J.; LIPPOLD, J. C. High temperature behavior of Ni-base weld metal: part II - Insight into the mechanism for ductility dip cracking. **Material Science and Engineering**, v. 380, p. 245-258, Ago 2004.

REED, R. C. *The Superalloys Fundamentals and Applications: Superalloys for turbine disc applications*, 2006.

SANTOS, A. C. D. **Avaliação da Resistência à corrosão de revestimentos da liga UNS NO6625 depositados pelo processo PTA-P**. 2015. 123 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória. 2015.

SILVA, C. C. **Revestimentos de liga de níquel depositados pelo processo TIG com alimentação de arame frio - Aspectos operacionais e metalúrgicos**. 2010. 326 f. Tese (Doutorado em Ciência de Materiais) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2010.

SILVA, C. C.; AFONSO, C. R. M.; RAMIREZ, A. J.; MOTTA, M. F.; MIRANDA, H. C.; FARIAS, J. P. Aspectos Metalúrgicos de Revestimentos Dissimilares com a Superliga à Base de Níquel Inconel 625. **Soldagem e Inspeção**, São Paulo, v. 17, n. 3, p. 251-263, 2012.

SILVA, K.; MURUGAN, M. A study on the influence of PTAW process parameters on pitting corrosion resistance of nickel based overlays. **Procedia Engineering**, v. 64, p. 1147 - 1156, 2013.

SILVA, R. H. G. E. **Inovações em equipamentos e em parametrização no processo de revestimento por plasma-pó (PTA-P)**. 2010. 265 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2010.

SILVA, R. H. G. E.; DUTRA, J. C. Processo PTA-P – Uma revisão da Literatura como base para inovações. Parte 1 de 2: Elementos Construtivos. **Revista Soldagem & Inspeção**, São Paulo, v. 17, n. 1, p. 76-85, Jan/Fev 2012.

SILVA, R. H. G.; DUTRA, J. C. Processo PTA-P - Uma revisão de literatura com base para inovações. Parte 2 de 2 : Comportamento térmico e cinemático do pó, parâmetros e consumíveis do processo. **Revista Soldagem & inspeção**, São Paulo, v. 17, n. 2, p. 173-183, Abr/Jun 2012.

SIVA, K.; MURUGAN, N.; RAGHUPATHY, V. P. Modelling, analysis and optimisation of weld bead parameters of nickel based overlay deposited by plasma transferred arc surfacing. **Archives of materials science and engineering**, v. 1, p. 174-182, 2009. SPECIAL METALS CORPORATION. INCONEL Alloy 625. **Special Metals**, v. 63, Jan 2006.

SPS - SISTEMAS E PROCESSOS DE SOLDAGEM. **Manual Tartilope V2F/V2**. Disponível em: [http://www.labsolda.ufsc.br/publicacoes/manuais_equipamentos/tartilope_v2-v2f_manual_usuario_\(2012\).pdf](http://www.labsolda.ufsc.br/publicacoes/manuais_equipamentos/tartilope_v2-v2f_manual_usuario_(2012).pdf). Acesso em: 21 nov. 2018.

SUKUMARAN, A.; GUPTA, R. K.; KUMAR, V. A. Effect of Heat Treatment Parameters on the Microstructure and Properties of Inconel-625 Superalloy. **Journal of Materials Engineering and Performance**, v. 26, n. 7, p. 3048-3057, 2017.

TAKANO, E. H.; QUEIROZ, D. D.; D'OLIVEIRA, A. S. C. M. Evaluation of processing parameters on PTA hardfacing surfaces. **Welding International**, v. 24, n. 3, p. 241-248, 2010.

TANCRET, F.; BHADSHIA, H. K. D. H.; MACKAY, D. J. C. Design of a creep resistant Nickel base superalloy for power plant applications. Part 1 - Mechanical properties modeling. **Materials Science and Technology**, 2003.

THE Invention and Definition of Alloy 625. Disponível em: http://www.tms.org/superalloys/10.7449/1991/Superalloys_1991_1_14.pdf. Acesso em: 28 nov. 2018.

VERDI, D.; GARRIDO, M. A.; MÚNEZ, C. J.; POZA, P. Mechanical properties of Inconel 625 laser cladded coatings: Depth sensing indentation analysis. **Materials Science and Engineering A-structural Materials Properties Microstructure and Processing**, v. 598, p. 15-21, 2014.

VIDAL, F. A. **Análise Composicional em Revestimentos de Inconel 625**. 2014. 62 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2014.

WANG, L.; LI, H.; LIU, Q.; XU, L.; LIN, S.; ZHENG, K. Effect of sodium chloride on the electrochemical corrosion of Inconel 625 at high temperature and pressure. **Journal of Alloys and Compounds**, Beijing, Setembro 2017.