

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

RICARDO TELES NALIN

AVALIAÇÃO DA MISTURA DE Ni E Al UTILIZADA COMO REVESTIMENTO
DEPOSITADO POR SOLDAGEM TIG COM DISPOSITIVO ADAPTADO PARA
DEPOSIÇÃO DE PÓ METÁLICO

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO 2

Cornélio Procópio

2014

RICARDO TELES NALIN

**AVALIAÇÃO DA MISTURA DE Ni E Al UTILIZADA COMO REVESTIMENTO
DEPOSITADO POR SOLDAGEM TIG COM DISPOSITIVO ADAPTADO PARA
DEPOSIÇÃO DE PÓ METÁLICO**

Proposta de Trabalho de Conclusão de
Curso, apresentado à Coordenação de
Engenharia Mecânica (COEME), da
Universidade Tecnológica Federal do
Paraná - UTFPR.

Orientadora: Prof^a M^a Émillyn Ferreira
Trevisani Olivio

Cornélio Procópio

2014



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Cornélio Procopio
Diretoria de Graduação e Educação Profissional
Coordenação do Curso de Engenharia Mecânica
Curso Superior de Engenharia Mecânica



TERMO DE APROVAÇÃO

AVALIAÇÃO DA MISTURA DE Ni E Al UTILIZADA COMO REVESTIMENTO
DEPOSITADO POR SOLDAGEM TIG COM DISPOSITIVO ADAPTADO PARA
DEPOSIÇÃO DE PÓ METÁLICO

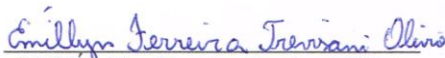
Por

RICARDO TELES NALIN

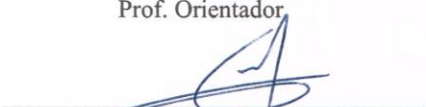
Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado às 14 h do dia 14 de fevereiro de 2014 como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica, pelo Programa de Graduação em Engenharia Mecânica, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho


aprovado

(aprovado, aprovado com restrições ou reprovado)



Profª Mª Emillyn Ferreira Trevisani Olivio
Prof. Orientador


Prof. Dr. Paulo Cezar Moselli
Membro titular


Prof. Esp. Carlos De Nardi
Membro titular

- O Termo de Aprovação assinado encontra-se na Coordenação do Curso -

DEDICATÓRIA

A minha família, amigos,
professores e a minha namorada
que sempre estiveram
do meu lado apoiando
minhas escolhas

AGRADECIMENTOS

A minha orientadora Prof^a M^a Émillyn Ferreira Trevisani Olivio, pelo incentivo e me ajudar no desenvolvimento deste trabalho.

A minha família, meus pais, Rafael e Doralice, minha irmã Caroline, meus avós, Divina e Alice, que me apoiam em minhas escolhas, sempre acreditando e ajudando a realização dos meus sonhos, por fazerem parte da minha vida.

Aos meus amigos de batalha Jonathas, Renan, Andrew, Rômulo, André, Victor e aos vários amigos que tenho mas não me lembro agora, por estarem durante cinco anos ao meu lado partilhando de todos os momentos e conquistas.

A minha namorada Paloma, por estar sempre ao meu lado durante cinco anos, me ajudando e apoiando, convivendo momentos inesquecíveis, me trazendo alegria, carinho e amor a minha vida.

Ao professor Dr Paulo Cezar Moselli por disponibilizar seu protótipo e orientar para a execução das deposições.

A Universidade Tecnológica Federal do Paraná *campus* Cornélio Procópio e à Universidade Federal do Paraná por disponibilizar os laboratórios da Engenharia Mecânica, e por me ajudar disponibilizando os equipamentos para realização das deposições.

*“O tempo é rei, a vida uma lição.
Um dia a gente cresce e conhece a nossa essência
e ganha experiência...
e aprende o que é raiz e então cria consciência”.*

Chorão

NALIN, Ricardo Teles. **AVALIAÇÃO DA MISTURA DE Ni E Al UTILIZADA COMO REVESTIMENTO DEPOSITADO POR SOLDAGEM TIG COM DISPOSITIVO ADAPTADO PARA DEPOSIÇÃO DE PÓ METÁLICO**. Cornélio Procópio. Trabalho de Conclusão de Curso. Engenharia Mecânica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2014.

RESUMO

Neste trabalho foi estudada a deposição, através do processo de soldagem a TIG com dispositivo adaptado para deposição de pó metálico denominado (GTAW – P), utilizando a liga de Ni e Al depositado no substratos de aço carbono 1020. Os corpos de prova foram submetidos a ensaios de microdureza Vickers, que atingiu um valor considerável acima dos encontrados na literatura podendo ser comparado ao revestimento obtido por PTA - P, análise de microscopia ótica e difratometria de raio-x, que indicaram a presença de intermetálicos Ni_3Al e $NiAl$, onde mostrou possível utilização deste processo de TIG com dispositivo adaptado para deposição de pó metálico para obtenção de revestimentos com resistência mecânica a elevadas temperatura. Tornando a (GTAW – P) uma alternativa na obtenção desse tipo de revestimento.

Palavras-chave: (GTAW – P). Revestimento.

NALIN, Ricardo Teles. **EVALUATION OF THE MIXTURE OF NI AND AL USED AS JACKET DEPOSITED BY WELDING TIG WITH DEVICE ADAPTED FOR DEPOSITION OF METAL POWDER.** Cornélio Procópio. Trabalho de Conclusão de Curso. Engenharia Mecânica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2014

ABSTRACT

In this work it was studied the deposition, by the GTAW process with a device adapted for the deposition of metallic powder called (GTAW – P), using a Ni-Al alloy deposited in 1020 carbon steel substrates. The specimens were subjected to Vickers microhardness test (and they reached a value considerably above those found in the literature, which can be compared to coating obtained by PTA-P). Optical Microscopy analysis, and X-ray difratometry, which pointed the presence of Ni₃Al and NiAl intermetallics, pointing a possible use of the GTAW process with the device adapted for the deposition of metallic powder for obtaining coatings with high temperature strength, making (GTAW - P) an alternative to obtain this type of coating.

Keywords: (GTAW – P). Coating.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- (a) Esquema da seção transversal de uma tocha de aspersão por FS utilizando pó; (b) Pistola a chama por gravidade.....	15
Figura 2– Esquema da seção transversal de uma tocha de aspersão por FS utilizando arame; (b) Modelo de pistola a chama arame tipo E14.....	16
Figura 3 – Desenho esquemático do PTA- P	17
Figura 4 - Região do arco na soldagem GTAW.....	18
Figura 5 – Processo de soldagem GTAW.....	19
Figura 6 - a) Representação esquemática de um conjunto bocal/bico de alimentação de pó de uma tocha GTAW-P; b) Foto da vista inferior do protótipo; c) Desenho em corte total do dispositivo, juntamente, com o protótipo; d) Foto do alimentador de pó ADP 2	20
Figura 7 - Diagrama NiAl.....	21
Figura 8 - Estrutura cristalina dos compostos intermetálicos	22
Figura 9 - Corpos de prova com superfície lixada	26
Figura 10 – Foto do alimentador de pó ADP 2.....	27
Figura 11 - Esquema das deposições.....	28
Figura 12 – Cortadora metalográfica AROTEC COR-40.....	30
Figura 13 – Embutidora automática Tempopress2.....	30
Figura 14 – Corpo de prova embutido sem lixamento e polimento.....	31
Figura 15 – Identações verticais e horizontais no corpo de prova.....	32
Figura 16 – Microscópio Ótico.....	33
Figura 17 – Microestruturas formadas na soldagem através de um único passe.....	34
Figura 18 – Gráfico de microdureza.....	37
Figura 19 – Imagem da microscopia.....	38
Figura 20 – Amostra ataca com Vilela.....	39
Figura 21 – Região A, ampliação de 10x.....	40
Figura 22 – Região B, ampliação de 10x.....	41
Figura 23 – Difratoograma do revestimento depositado.....	42

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Atribuições e temperatura máxima de uso para aluminetos de níquel.....	22
Tabela 2 – Parâmetros utilizados na deposição.....	29
Tabela 3 - Média e desvio padrão do ensaio de Microdureza.....	36

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANP	Agencia Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
ASTM	American Society for Testing and Materials
AT	Aspersão Térmica
AWS	American Welding Society
CFC	Estrutura Cúbica de Face Centrada
CCC	Estrutura Cúbica de Corpo Centrado
ER	Eletrodo Revestido
FS	Flame Spray
GTAW	Gas Tungsten Arc Welding
HRC	Hardness Rockwell na escala C
HV	Hardness Vickers
LABAST	Laboratório de Aspersão Térmica e Soldagem Especiais
LAMAST	Laboratório de Materiais e Superfícies
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
MIG/MAG	Metal Inert Gas / Metal Active Gas
MO	Microscopia Óptica
NBR	Norma Brasileira
PAT-P	Plasma de Arco Transferido alimentado por Pó
PTA	Plasma Transferred Arc
PTA-P	Plasma Transferred Arc – Powder
SAP	Soldagem ao Arco Plasma
SATG	Soldagem ao Arco Tungstênio com Atmosfera Gasosa
SMAW	Shielded Metal Arc Welding
TIG	Tungsten Inert Gas
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	12
1.1	OBJETIVO.....	13
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	14
2.1	PROCESSOS DE ASPERSÃO TÉRMICA	14
2.1.1	Processo de Aspersão Térmica a Chama a Pó (FS).....	14
2.1.2	Processo de Aspersão Térmica a Chama Arame.....	15
2.2	SOLDAGEM POR PLASMA DE ARCO TRANSFERIDO (PTA).....	16
2.3	SOLDAGEM POR TIG.....	17
2.4	SOLDAGEM POR GTAW COM DISPOSITIVO ADAPTADO PARA DEPOSIÇÃO DE PÓ METÁLICO.....	19
2.5	LIGA DE NÍQUEL – ALUMÍNIO	21
2.6	NÍQUEL E ALUMÍNIO UTILIZADOS COMO REVESTIMENTO.....	23
3.	MATERIAIS E MÉTODOS.....	25
3.1	SUBSTRATO.....	25
3.2	COMPOSIÇÃO DO PÓ.....	26
3.3	TIG COM DISPOSITIVO ADAPTADO PARA DEPOSIÇÃO DE PÓ METÁLICO.....	26
3.4	CARACTERIZAÇÃO.....	29
3.4.1	Microdureza.....	31
3.4.2	Microscopia Ótica	32
3.4.3	Difratometria de raio-X (DRX).....	35
4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	36
4.1	CARACTERIZAÇÃO.....	36
4.1.1	Microdureza.....	36
4.1.2	Análise por microscopia ótica.....	38
4.1.3	Análise da formação de fases observada via difratometria de raio X.....	42
5.	CONCLUSÃO.....	43
	REFERÊNCIAS.....	44

1 INTRODUÇÃO

A fabricação ou recuperação de componentes mecânicos sujeitos ao desgaste tem sido estudada e aprimorada ao longo dos anos. Este tipo de atividade tem encontrado um grande campo de aplicação na indústria petrolífera, na qual os componentes e equipamentos experimentam condições severas de desgaste em combinação com altas temperaturas e ambientes corrosivos, demandando processos de deposição e materiais que possibilitem uma maior vida útil, aliada com uma melhora no desempenho.

Com o desenvolvimento tecnológico, materiais altamente resistentes à oxidação em altas temperaturas e com melhores propriedades estão sendo desenvolvidos. Intermetálicos formados a partir da liga Ni e Al, que têm propriedades atrativas de resistência mecânica, resistência a oxidação e corrosão em altas temperaturas, tem sido de grande interesse para aplicação como revestimento superficial de peças. (OLIVIO, 2012)

A liga níquel-alumínio tem a possibilidade de formar cinco compostos intermetálicos, de acordo com o diagrama de fases: NiAl_3 , Ni_2Al_3 , NiAl , Ni_5Al_3 e Ni_3Al . Para realização deste trabalho busca-se a formação dos intermetálicos Ni_3Al e NiAl , que são dois compostos estáveis e ricos em níquel, possuem propriedades de resistência ao desgaste, corrosão e oxidação. Nestes intermetálicos existe a possibilidade da formação de Al_2O_3 , um óxido que é o principal responsável pela resistência a oxidação nesta liga. (PENG e WANG, 2011 e TREVISANI, 2011)

Os revestimentos podem ser obtidos através da deposição de ligas pelos processos de soldagens GTAW, MIG, ER, PTA-P e entre outros.

Segundo Menezes, 2007, a elevada vida útil dos revestimentos, o desenvolvimento de grandes variedades de materiais para usar nas mais diversas áreas de aplicação, a possibilidade de reparos em áreas danificadas e utilização imediata após a aplicação, são fatores que estão contribuindo para o sucesso da pesquisa. E com isso as técnicas de aplicação dos revestimentos estão em constantes avanços tecnológicos, otimizando o processo.

1.1 OBJETIVO

Este trabalho tem como objetivo produzir e estudar ligas *in situ* (durante o processo de deposição) para as deposições da liga de Ni-Al como revestimentos pelo processo de TIG com dispositivo adaptado para deposição de pó. Buscam-se revestimentos estáveis a altas temperaturas e comparando com a PTA – P e FS.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 PROCESSO DE ASPERSÃO TÉRMICA

Segundo PAREDES, 2009, a aspersão térmica consiste em um grupo de processos por meio dos quais se deposita, sobre uma superfície previamente preparada, camadas de materiais metálicos ou não metálicos. Os materiais depositados são levados a um estado fundido ou semi fundido através de uma fonte de calor gerado no bico de uma pistola apropriada. E logo após a fusão, o material na fase de solidificação (na forma de partículas) é acelerado por gases sob pressão contra o substrato que será revestido. Na colisão contra a superfície, as partículas deformam-se e aderem ao material base e na sequencia sobre as partículas já depositadas formando camadas. E estas camadas são constituídas por pequenas partículas deformadas na forma de panquecas em direção paralela ao substrato formando lamelas. (AWS, 1985, PAREDES, 2009).

2.1.1 Processo de Aspersão térmica a chama a pó (Flame Spray)

Para o processo de FS utiliza-se o material de aporte na forma de pó e tem-se a alimentação de gás de forma axial. A alimentação do pó para a pistola é geralmente por gravidade, na qual as partículas têm a mínima velocidade no momento do encontro com a chama. Neste instante ocorre a fusão e um jato de ar comprimido as projeta contra o substrato(PAREDES, 2009). Um esquema deste bocal é mostrado na Figura 1.

Esse processo tem menor resistência adesiva e resistência coesiva e maior porosidade em geral, isto devido a menores velocidades alcançadas pelas partículas. O pó de alimentação pode ser um metal puro, uma liga, um composto, uma cerâmica, um carboneto ou qualquer combinação destes, com uma taxa de alimentação que pode variar de 50 a 100 g/min e com taxa de fluxo de gás de transporte entre 3 a 5 l/min (PAREDES, 2009).

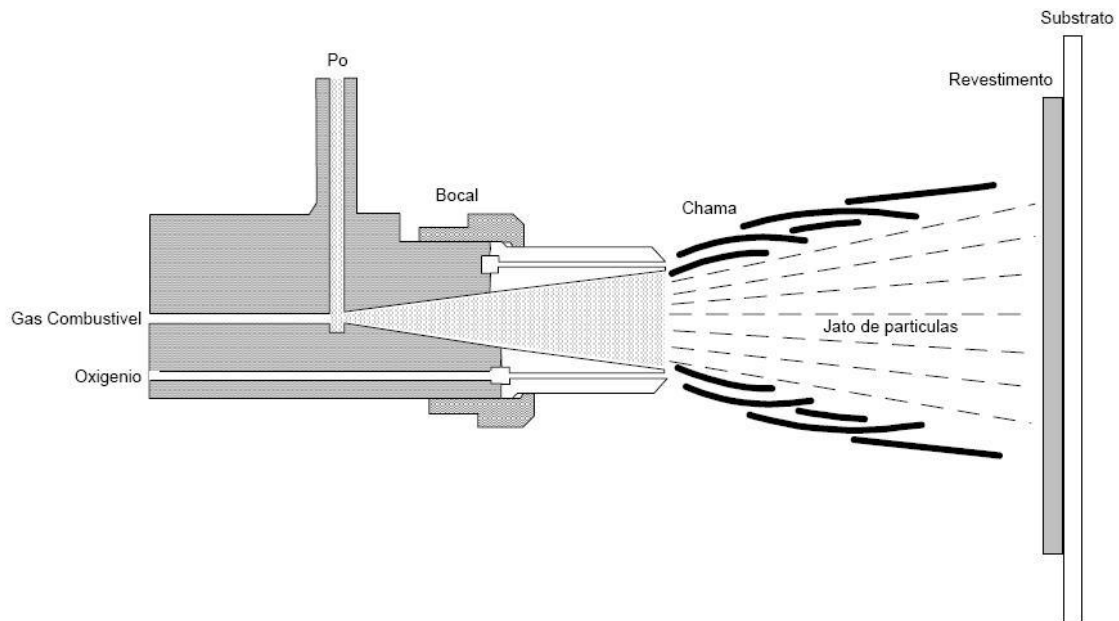


Figura 1 – Esquema da seção transversal de uma tocha de aspersão por FS utilizando pó
Fonte: MARQUES (2003)

2.1.2 Processo de Aspersão térmica a chama arame

Esse processo utiliza material na forma de vareta ou arame. O equipamento deve possuir um sistema de alimentação que pode ser através de roletes que são tracionados por motor elétrico, motor pneumático ou por uma turbina de ar. O material é alimentado até a tocha que para utilização de arame tem configuração conforme a Figura 2 (PAREDES, 2009).

O arame alimentado, de forma contínua e concêntrica, é fundido no bocal por uma chama de gás combustível que só tem esta finalidade. E para aspergir o material é utilizado ar comprimido e devido à configuração do bocal, o fluxo de ar lançado sobre as partículas fundidas faz com que haja a pulverização com maior velocidade (energia cinética) até o substrato. Esta energia é aumentada pelo ar comprimido de duas maneiras (PAREDES, 2009):

- Distribuição de gases combustíveis ao redor do arame para uma fusão uniforme,
- Assegurar o tempo suficiente de permanência do arame na chama para uma fusão eficiente, mesmo utilizando-se velocidades do ar comprimido elevadas.

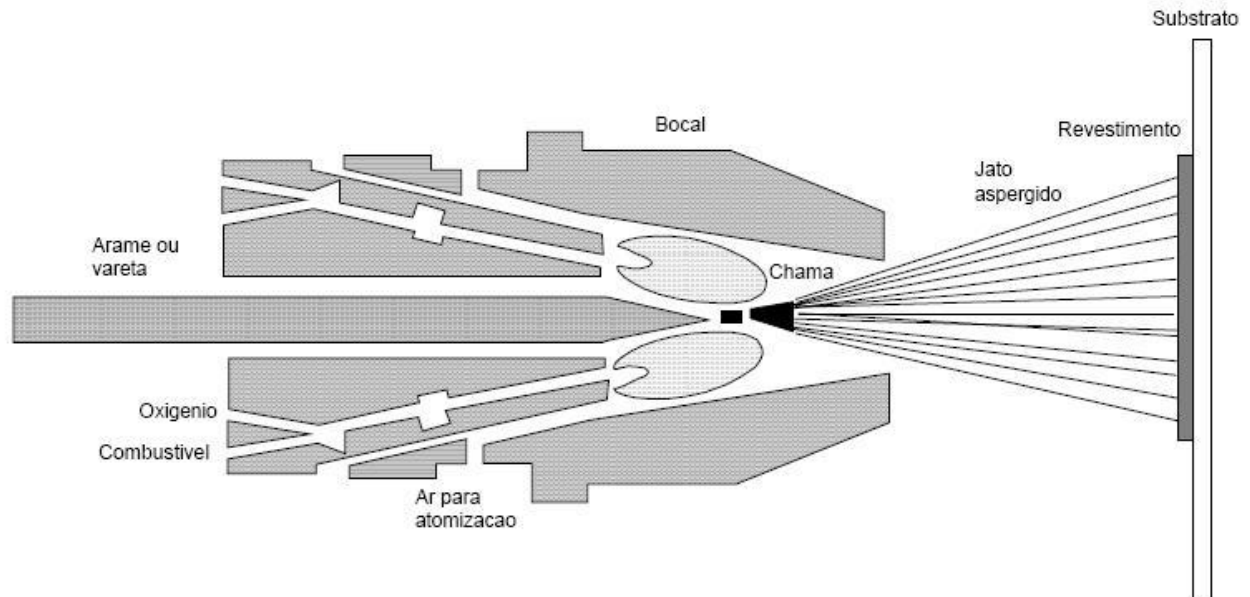


Figura 2 – Esquema da seção transversal de uma tocha de aspersão por FS utilizando arame
Fonte: MARQUES (2003)

2.2 SOLDAGEM POR PLASMA DE ARCO TRANSFERIDO (PTA)

O processo de deposição a Plasma por Arco Transferido (PTA) pode ser considerado uma modificação do processo de soldagem TIG (Tungsten Inert Gas), pois ambos os processos produzem uma união por fusão das partes a serem unidas através de um arco elétrico estabelecido entre um eletrodo de tungstênio. Neste caso a coluna de arco elétrico PTA sofre uma constrição, resultante da passagem do arco através de orifício de diâmetro reduzido, normalmente de cobre refrigerado a água como se observa na (Figura 3) (DAVIS, 1993). O processo PTA-P utiliza pó como material de adição, e existe uma grande variedade de materiais que se pode depositar como

revestimento, entre os mais importantes podemos destacar as superligas a base de níquel e a base de cobalto. Os substratos mais comuns são aços de baixo carbono ou médio carbono e os aços inoxidáveis, (DAVIS, 1993; WU, 1996). As superligas a base de níquel são conhecidas pela excelente resistência a corrosão em elevadas temperaturas (DELORO STELLITE, 2007).

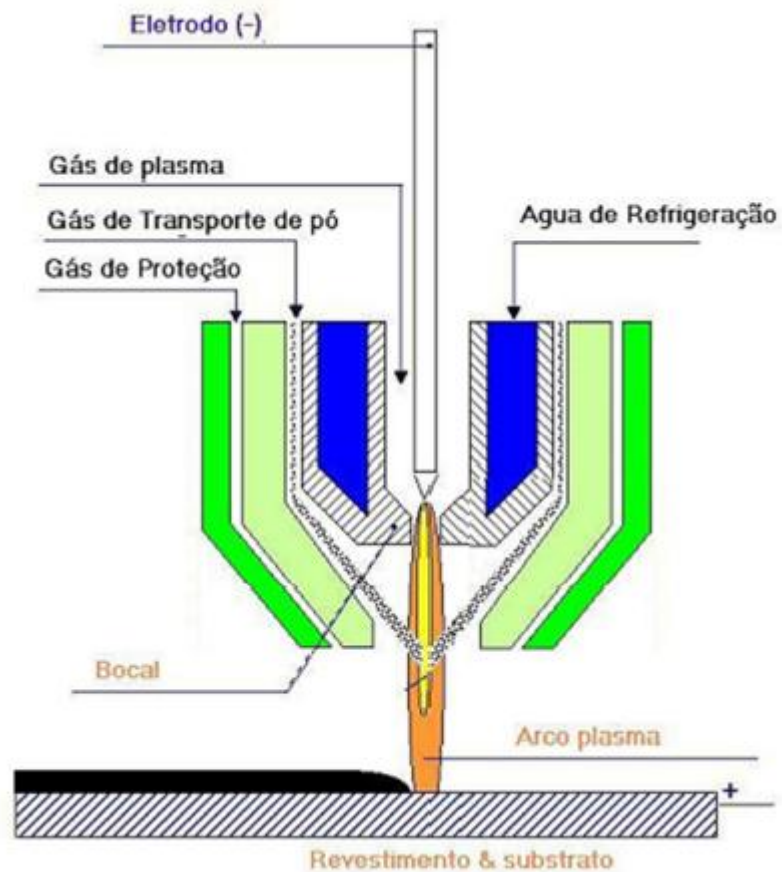


Figura 3. Desenho esquemático do PTA- P
Fonte: (MOSELLI, 2013, apud DIAZ, 2005)

2.3 SOLDAGEM POR TIG

O processo de soldagem TIG ou Gas Tungsten Arc Welding (GTAW), como é mais conhecido atualmente, é um processo de soldagem a arco elétrico que utiliza um arco entre um eletrodo não consumível de tungstênio e a poça de soldagem. Conforme se pode notar pela figura abaixo (Figura 4) a poça de soldagem, o eletrodo e parte do

cordão são protegidos através do gás de proteção que é soprado pelo bocal da tocha. No processo, pode-se utilizar material de adição ou não (solda autógena), e seu grande desenvolvimento deveu-se à necessidade de disponibilidade de processos eficientes de soldagem para materiais difíceis, como o alumínio e magnésio, notadamente na indústria da aviação no começo da Segunda grande guerra mundial. Assim, com o seu aperfeiçoamento, surgiu um processo de alta qualidade e relativo baixo custo, de uso em aplicações diversas (FONSECA, 2004).

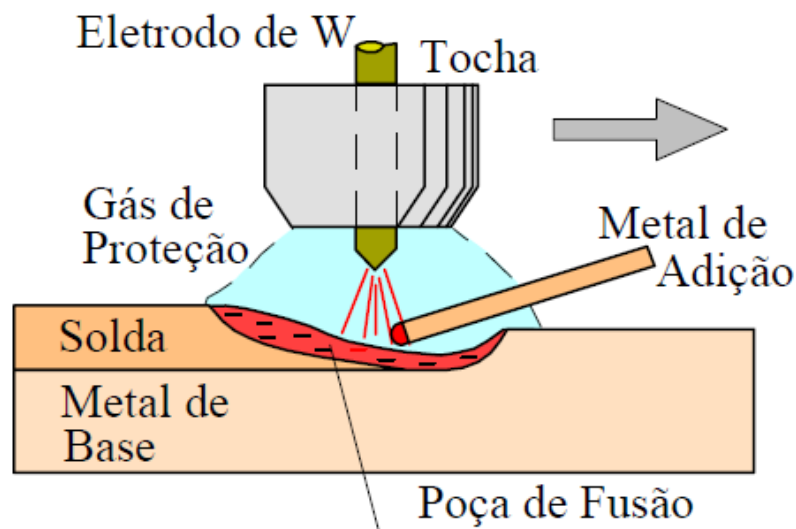


Figura 4 - Região do arco na soldagem GTAW

Fonte: MARQUES (2003)

O processo TIG na maior parte de sua aplicação é um processo essencialmente manual de soldagem. Aplicado principalmente na soldagem de chapas finas (0,2 a 3,0mm) de aços ao carbono, aços inoxidáveis, alumínio e suas ligas, cobre e suas ligas, titânio etc..., e onde os requisitos de propriedades mecânicas ou acabamento exigem este tipo de processo de soldagem (FONSECA, 2004).

O GTAW (Figura 5) funciona através do eletrodo de tungstênio (ou liga de tungstênio) preso a uma tocha. Por essa mesma tocha é alimentado o gás que irá proteger a soldagem contra a contaminação da atmosfera. O arco elétrico é criado pela passagem de corrente elétrica pelo gás de proteção ionizado, estabelecendo-se o arco entre a ponta do eletrodo e a peça (MARQUES, 2003).

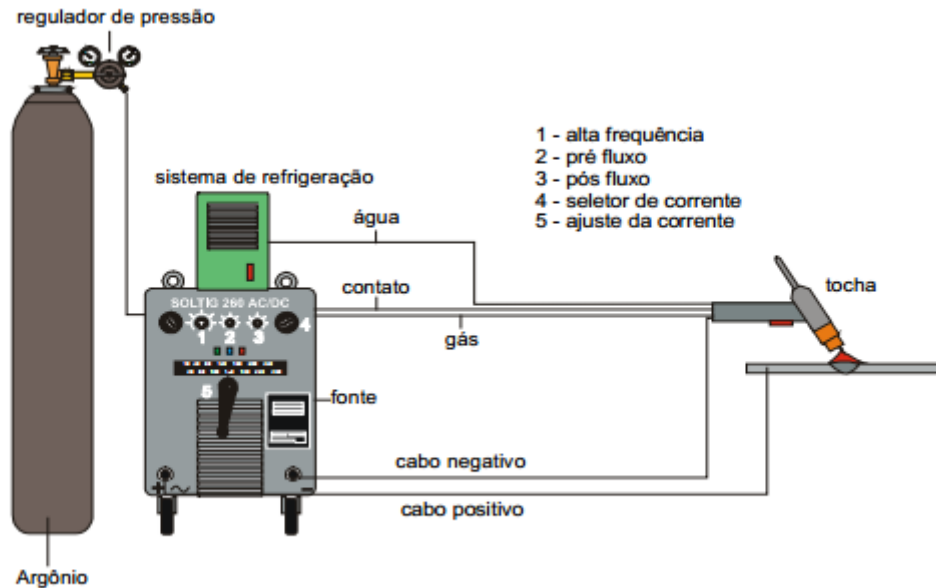


Figura 5 – Processo de soldagem GTAW

Fonte: FONSECA (2004)

A fonte de soldagem fornece corrente (amperagem) constante podendo ser contínua ou alternada. Com corrente contínua deve-se utilizar a polaridade direta, isto é, o eletrodo conectado no polo negativo e a peça no polo positivo. O valor e tipo da corrente dependem da espessura e tipo de metal base a ser soldado (MARQUES, 2003).

2.4 SOLDAGEM POR GTAW COM DISPOSITIVO ADAPTADO PARA DEPOSIÇÃO DE PÓ METÁLICO (GTAW – P)

MOSELLI, 2013, em sua tese desenvolveu um dispositivo, Figura 6, adaptado à tocha GTAW. O dispositivo é capaz de produzir revestimentos duros, com deposição da liga, em forma de pó metálico, diretamente na poça de fusão. As propriedades mecânicas e metalúrgicas dos revestimentos de teste com deposição de liga STELLITE 6, mostraram que a dureza encontra-se nos mesmos patamares dos valores encontrados na literatura e compatíveis com o processo PTA-P. A resistência ao

desgaste do processo GTAW – P semiautomático apresenta valores bem próximos aos do PTA-P. Concluiu que o aumento da taxa de deposição no GTAW – P causou a diminuição dos valores da diluição, aproximando-os do processo PTA-P. A diminuição da diluição aumentou os valores de dureza ocasionando a redução do desgaste. As microestruturas resultantes do processo GTAW– P foram similares às obtidas pelo processo PTA-P. O dispositivo GTAW – P é de baixo custo de fabricação e de fácil adaptação à tocha de soldagem e de fácil operação pelo soldador.

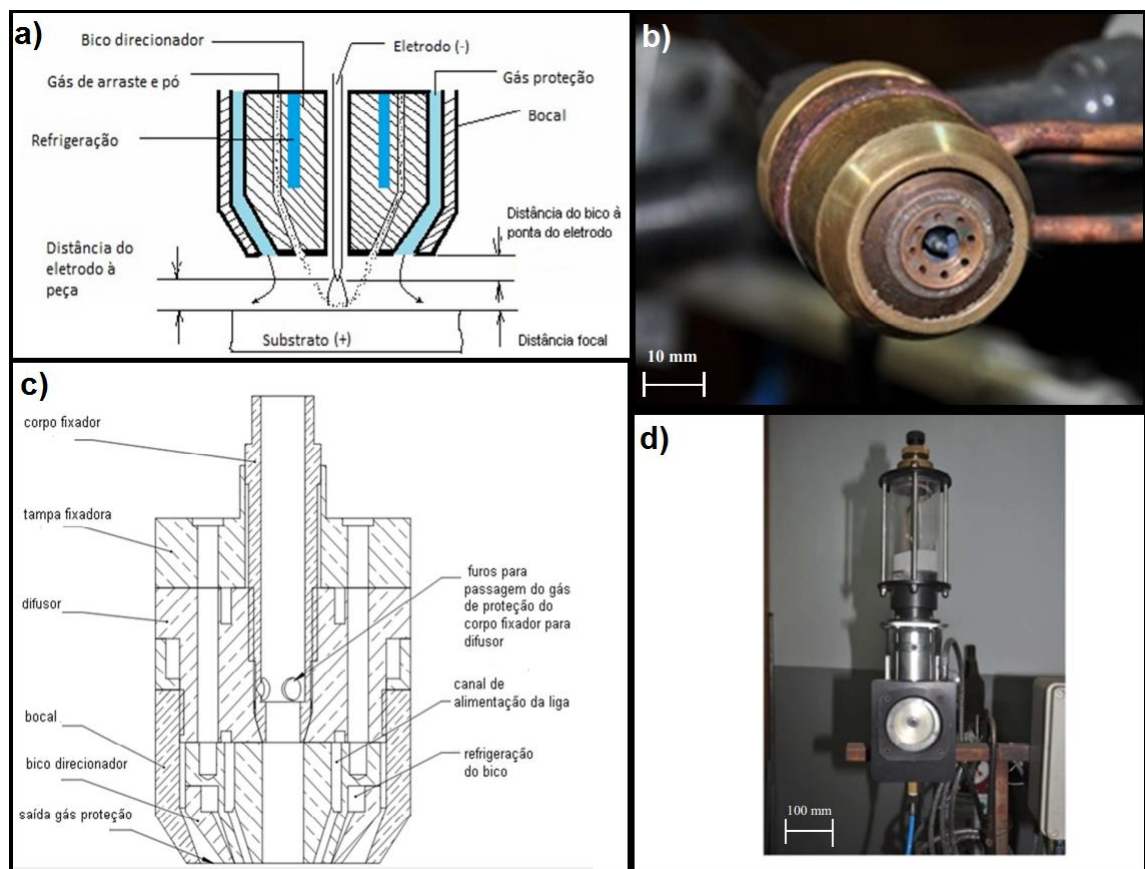


Figura 6 – a) Representação esquemática de um conjunto bocal/bico de alimentação de pó de uma tocha GTAW-P; b) Foto da vista inferior do protótipo; c) Desenho em corte total do dispositivo, juntamente, com o protótipo; d) Foto do alimentador de pó ADP 2
Fonte: MOSELLI (2013)

Para o dispositivo de MOSELLI, 2013, o material de adição pode ser utilizado na forma de pós-elementares e suas misturas; pós-comerciais atomizados, os quais são fornecidos em uma faixa de granulometria; pós-comerciais atomizados com apenas um

tipo de granulometria ou até mesmo uma mistura do pó comercial com o mesmo material de granulometria entre 45 e 200 μm .

2.5 LIGAS DE NÍQUEL – ALUMÍNIO

O diagrama de fase do níquel-alumínio, Figura 7, mostra dois compostos intermetálicos estáveis, Ni_3Al e NiAl , formados na extremidade rica em níquel. O composto Ni_3Al tem uma estrutura cristalina L12, um derivado da estrutura cúbica de face centrada (CFC) o; NiAl possui uma estrutura B2, um derivado da estrutura de corpo centrado (CCC). Por causa das diferentes estruturas cristalinas, os dois aluminetos níquel têm muitas propriedades físicas e mecânicas distintas (ASM HANDBOOK, 1992).

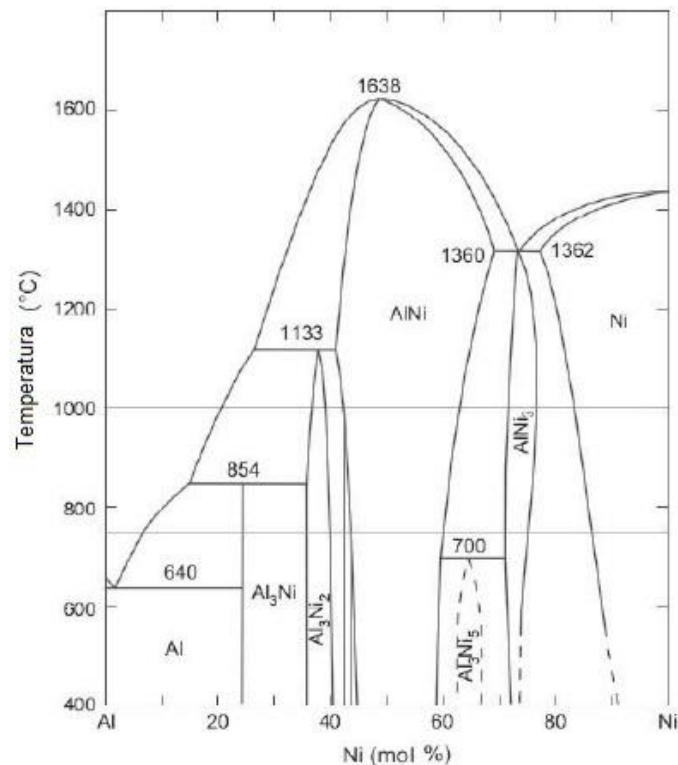


Figura 7 - Diagrama NiAl

Fonte: ASM HANDBOOK (1992)

Dentre esses intermetálicos formados a partir do Ni-Al, os dois de maior interesse são os Ni₃Al e NiAl devido as suas propriedades, sendo o Ni₃Al obtido com 12 a 14% em peso de alumínio em níquel, e o NiAl com 24 a 36% em peso de alumínio. (ALMEIDA, 2003).

Os dois aluminetos de níquel apresentam propriedades mecânicas e físicas diferenciadas, Tabela 1, por o Ni₃Al ter uma estrutura cristalina L1₂, derivada da estrutura cúbica de face centrada (CFC), e o NiAl ter um estrutura B₂, derivada de uma estrutura de corpo centrado (CCC), Figura 8. (ASTM C-633, 1994)

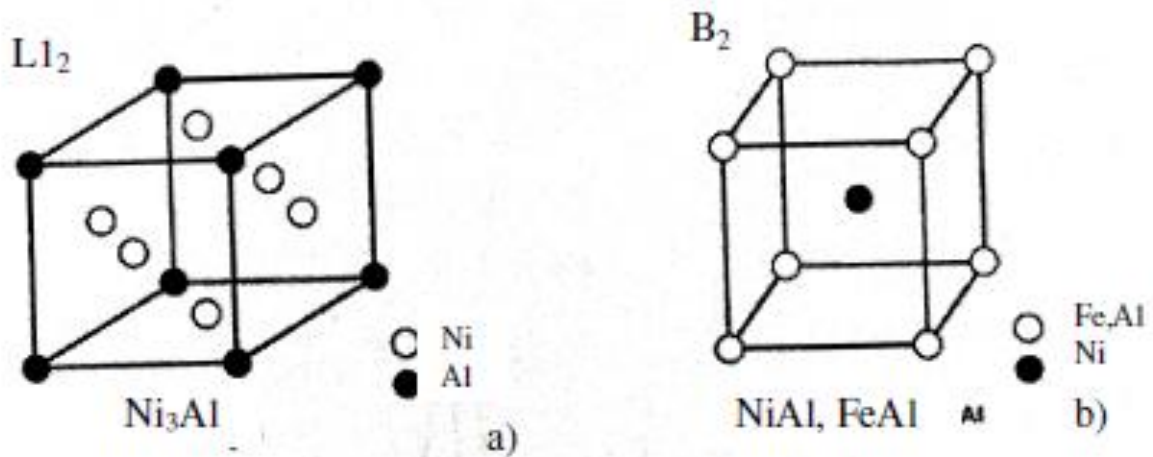


Figura 8 – Estrutura cristalina dos compostos intermetálicos: a) Ni₃Al e b) NiAl.

Fonte: ASTM C-633 (1994)

Tabela 1. Atribuições e temperatura máxima de uso para aluminetos de níquel

Intermetálicos	Propriedade	Temperatura máxima de uso (°C)	
		Limite de resistência (MPa)	Limite de Corrosão
Ni ₃ Al	Resistência a oxidação, carburização e nitridação; resistência a altas temperaturas.	1100	1150
NiAl	Alto ponto de fusão; alta condutividade térmica; resistência a oxidação, carburização e nitridação	1200	1400

Fonte: DEEVI *et. al* (1997)

O Ni₃Al desenvolve uma tensão de escoamento que aumenta com a elevação da temperatura, e este fator faz com o que torne mais resistente que muitas ligas sólidas em altas temperaturas, apresentam boas propriedades de resistência ao desgaste. (GONG *et al.*, 2011 e PADILHA, 2011)

Para aplicações em alta temperaturas o NiAl possui um melhor desempenho que o Ni₃Al. Possui um ponto de fusão 1638°C contra 1456°C, uma densidade menor (5,86 g/cm³ para o NiAl contra 7,50 g/cm³ para o Ni₃Al) e um maior módulo de Young (294 GPa contra 179 GPa). (OZDEMIR *et al.*, 2008 e PADILHA, 2011)

2.6 NÍQUEL E ALUMÍNIO UTILIZADOS COMO REVESTIMENTO

Revestimentos de Ni-Al vêm sendo aplicados por diversos procedimentos. Para o intuito de comparação com este trabalho destacam-se alguns deles:

ALMEIDA, 2003, estudou a obtenção in-situ de intermetálicos Ni-Al, pelo processo PTA, onde avaliou os efeitos da quantidade de alumínio adicionada à liga comercial de níquel (níquel-cromo-molibdênio), misturando o alumínio nas proporções 5, 12,4 e 23%. Estudou também a modificação de dois parâmetros de deposição (intensidade de corrente e velocidade de deposição) avaliando, em termos de alterações na formação de ligas “in situ”. Concluiu que é possível modificar in-situ ligas comerciais utilizando a técnica de deposição de Plasma PTA. Aumentando a quantidade de Al, resulta em um aumento de dureza e formação de novas fases. A difração de raios-X do revestimento com 23%Al apresenta picos de NiAl e intermetálico Al_x (Fe,Ni,Cr,Mo). A variação dos parâmetros de processamento não teve influência na morfologia dos revestimentos processados com 5 e 12,4%Al. Para misturas com 23%Al ocorreu a formação de intermetálicos NiAl para todas as 28 condições de processamento. A estabilidade dos revestimentos obtidos com variação dos parâmetros de processamento é melhor para a mistura com 23%Al, observando uma queda de dureza na temperatura de 1000°C, indicando uma estabilidade “precária” das fases formadas.

OLIVIO, 2012, avaliou ligas "in situ" para o desenvolvimento de revestimentos de Ni-Al, com diferentes proporções e condições, através do processo de Aspersão Térmica a chama a pó. Concluindo que a mistura 73%Ni27%Al, foi a que obteve melhor resultado no ensaio de aderência, seguida da mistura com 87%Ni13%Al. O pior resultado desse ensaio foi o da mistura com 95%Ni5%Al. Todas as ligas tiveram porcentagem de poros, abaixo das encontradas na literatura e comparáveis com os processos de Plasma e HVOF. Por meio das análises de DRX, pode-se confirmar que todas as Ligas formaram o óxido NiO e os intermetálicos NiAl e Ni₃Al. Enquanto na Liga comercial Diamalloy 95%Ni5%Al, formou um óxido composto de NiAl₂O₄, as misturas apresentaram um pico de Al. Mesmo depois da exposição a 750°C e 850°C, todas as Ligas se mantiveram estáveis.

FAMBRINI, 2013, fez a avaliação do arame de Ni e Al utilizado como revestimento depositado por aspersão térmica à chama arame. Os resultados obtidos no ensaio de microdureza Vickers demonstraram que o revestimento possui uma boa resistência mecânica, atingindo um valor considerável e assim podendo ser comparado com os revestimentos obtidos pela técnica de aspersão térmica a plasma. Por meio da análise obtida pelo DRX, pode-se confirmar a formação do óxido NiO e Al₂O₃ e dos intermetálicos NiAl e Ni₃Al.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para alcançar os objetivos do trabalho, foram utilizados os seguintes materiais e métodos:

- Composição da liga Ni-Al, misturados na proporção de 87%Ni e 13%Al, em forma de pó, com granulometria de 45 a 108 μm ;
- Substrato – Aço ABNT 1020;
- Soldagem por TIG com dispositivo adaptado para deposição de pó metálico (UTFPR – CP).
- Dispositivo de deslocamento automático da tocha denominada Tartilope, modelo V2 (UTFPR – CP).
- Caracterização:
 - Microdureza (UTFPR – CP);
 - Microscopia Ótica (UFPR);
 - Difratometria de raio-x (UFPR);.

3.1 SUBSTRATO

Foram utilizadas chapas de aço carbono 1020, nas dimensões 100x25,4x12,7mm (Figura 9), para deposição dos revestimentos. Os substratos foram previamente preparados passando pelo o processo de lixamento, deixando-a em níveis necessários para à aderência, e limpeza superficial.

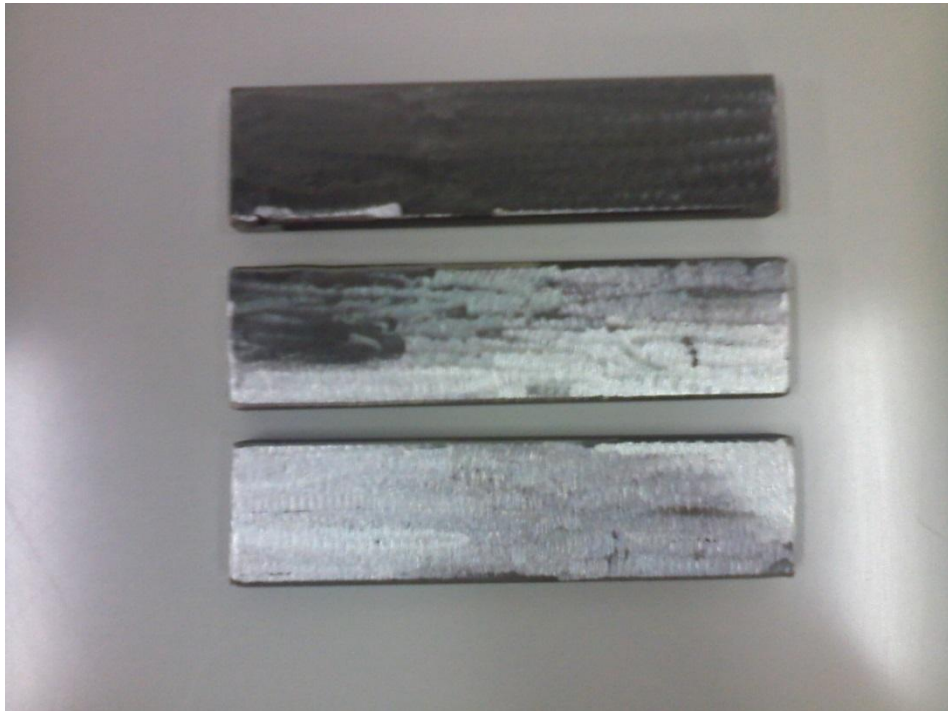


Figura 9 – Corpos de prova com superfície lixada

Fonte: Aatoria própria

3.2 COMPOSIÇÃO DO PÓ

Observando o diagrama na Figura 7 (Página 22), foram escolhidas uma composições de misturas para a tentativa de formar NiAl e Ni_3Al , que são os intermetálicos de interesse neste trabalho. Primeiro foram peneirados separadamente em um peneirador automático marca VIBROTECH CT-025 para chegar à granulometria de 45 a 108 μm , depois misturados na proporção de 87%Ni e 13%Al, em forma de pó, e em seguida misturados em um misturador metálico tipo Y rotacionado em um torno mecânico a 50 RPM, por 2 horas.

3.3 TIG COM DISPOSITIVO ADAPTADO PARA DEPOSIÇÃO DE PÓ METÁLICO (GTAW – P)

As deposições foram realizadas no Laboratório de Soldagens do Departamento de Engenharia Mecânica (DEMEC) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná *campus* Cornélio Procópio (UTFPR-CP).

Para a deposição do pó metálico, foi utilizado um sistema de alimentação automático, do tipo ADP-2 (Figura 10), fabricado pela IMC Soldagem de Santa Catarina, sendo as deposições controladas pela regulagem das rotações de uma roda dentada que, direciona o pó até uma câmara, de onde é conduzido ao duto de alimentação, auxiliado pelo gás de arraste.



Figura 10 - Foto do alimentador de pó ADP 2
Fonte: MOSELLI (2013)

Os cordões de solda foram realizados por uma central de soldagem, denominada Inversal 450, também de fabricação da IMC Soldagem, equipamento este que possibilita a execução de todos os processos de soldagem a arco.

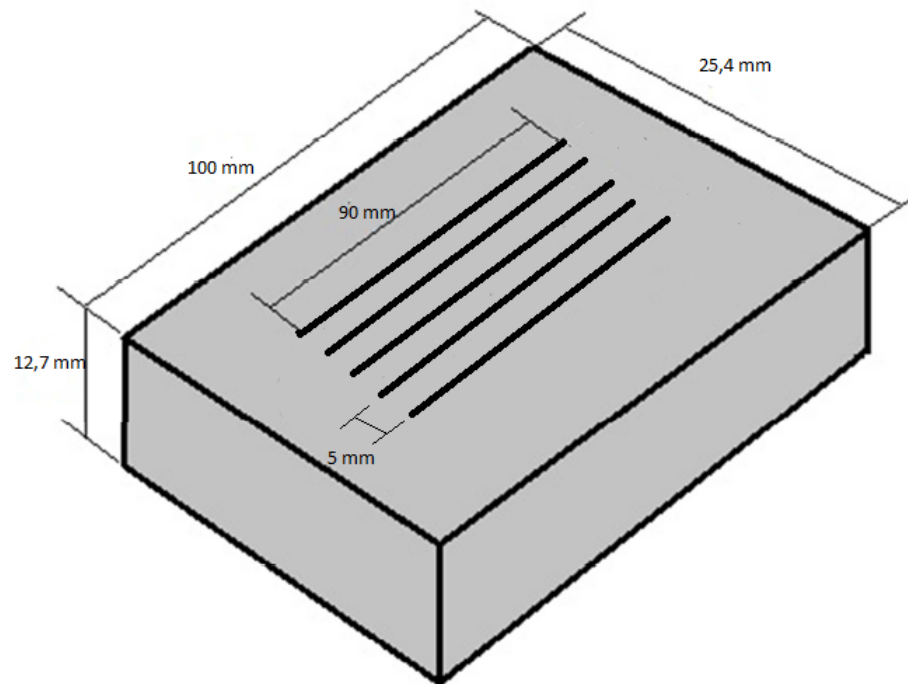


Figura 11 – Esquema das deposições

Fonte: Autoria própria

Antes da deposição dos corpos de provas estudados, foram feitos teste preliminares para determinação dos valores adequados dos parâmetros de deposição visualmente, variando os valores de fluxo dos gases e velocidade de soldagem, até a obtenção do revestimento esperado. Os valores utilizados encontram-se na Tabela 2.

Tabela 2 - Parâmetros utilizados na deposição

Parâmetros	Valores Utilizados
Corrente	150 A
Distância entre passes	5 mm
Vazão gás de proteção	10 l/min
Vazão do gás de arraste	1,5 l/min
Velocidade de soldagem	12 cm/min
Distância do eletrodo à peça	10 mm
Diâmetro do eletrodo	3,2 mm
Afiação da ponta do eletrodo	30 °
Distância do bico à peça	13 mm

Fonte: Autoria própria

3.4 CARACTERIZAÇÃO

Após a deposição, um corpo de prova foi cortado em 6 partes iguais utilizando um disco de corte na cortadora metalográfica, marca AROTEC modelo COR-40, Figura 12. Dessas 6 partes, uma foi embutida com baquelite verde em uma prensa embutidora automática, marca Struers modelo Termopress 2, por 15 minutos mantendo uma pressão de 20 bar, Figura 13. A parte embutida, Figura 14, foi lixada em politriz automática, com lixas de granulométrica de 200 a 1200. Depois polidas com um pano de polimento com pasta de diamante. Esses procedimentos para caracterização foram efetuados na Universidade Tecnológica Federal do Paraná, *campus* Cornélio Procópio.



Figura 12 – Cortadora metalográfica AROTEC COR-40, UTFPR-CP
Fonte: Fambrini, 2013



Figura 13 – Embutidora automática Tempopress2, UTFPR-CP
Fonte: Fambrini, 2013



**Figura 14 – Corpo de prova embutido sem lixamento e sem polimento.
Fonte: Autoria própria**

3.4.1 Microdureza

O ensaio de microdureza Vickers analisa a resistência que o material tem a penetração de um diamante na forma piramidal, sob uma determinada carga. Foram feitas 13 indentações, sem espaçamento pré-definido, sendo 6 em um linha horizontal para a média do cordão e 7 em um linha vertical para verificar o comportamento do cordão, Figura 14. Foi utilizado uma carga de 300gf por 15 segundo, o equipamento utilizado foi o Microdurometro HV – 1000B.

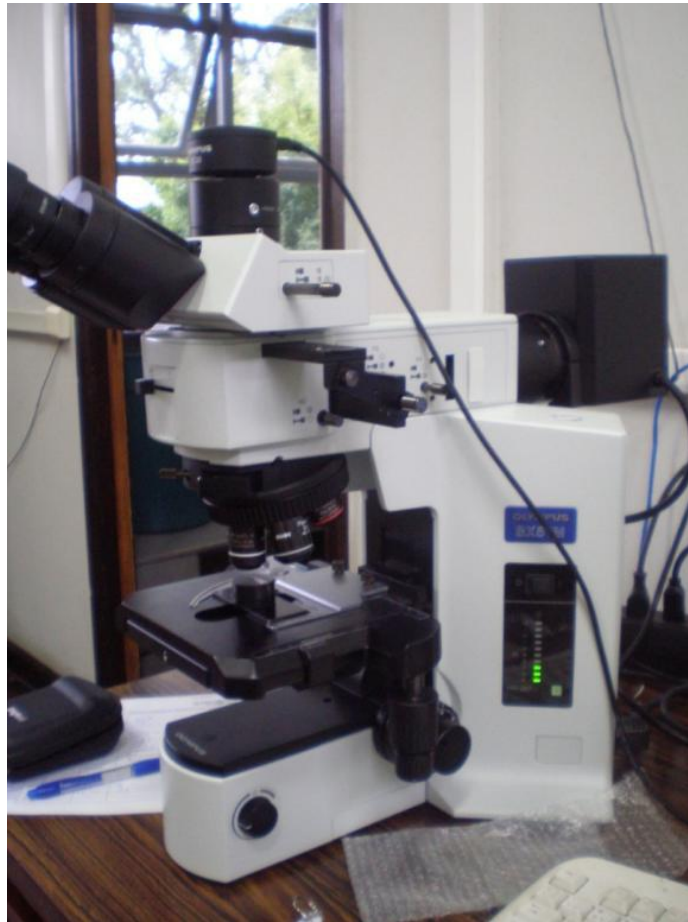


Figura 16 – Microscópio Ótico, UFPR

Fonte: Olivio, 2012

Através desse equipamento é possível capturar imagens de 200x a 1000x de ampliação, fazer medição de espessura do revestimento, quantificar poros e analisar a microestrutura formada no cordão de solda, conforme mostra a Figura 17.

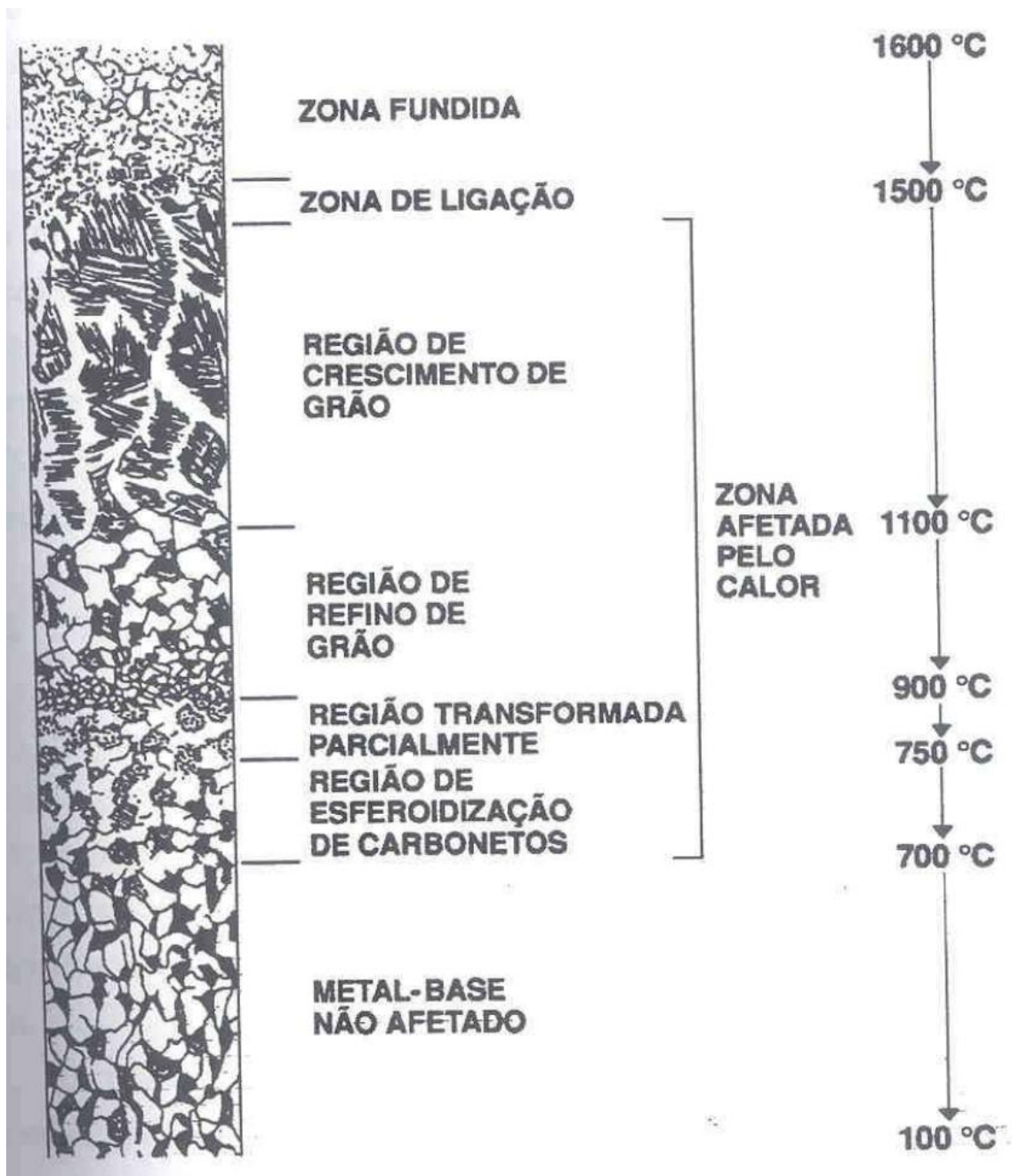


Figura 17 - Microestruturas formadas na soldagem através de um único passe

Fonte: Novick, 2002, (apud EASTERLING, 1983).

3.4.3 Difractometria de Raio-X (DRX)

Foi utilizado o equipamento Shimadzu D7000, com varredura de 0° a 90° , escala de 2θ e velocidade de $1^\circ/\text{min}$, para realização do ensaio DRX, que se localiza no laboratório de Física da Universidade Federal do Paraná.

Com a análise por DRX verificam-se os compostos cristalinos presentes nos corpos de provas, identificando-os com uma comparação com o banco de dados, que contem informações cristalográficas básicas e algumas propriedades físicas.

Com isso, poderá ser constatada a presença dos intermetálicos NiAl_3 , Ni_2Al_3 , NiAl , Ni_5Al_3 e Ni_3Al ou não.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 CARACTERIZAÇÃO

4.1.1 Microdureza

Foram realizadas 6 medições de dureza, na secção transversal do revestimentos. Para realização das medições a amostra foi cortada e embutida em baquelite verde. A média das 6 medições juntamente com o desvio padrão se encontram na Tabela 3 e na Figura 18.

Tabela 3 – Média e desvio padrão do ensaio de Microdureza

Ponto	Microdureza HV _{0,3}
1	457,7
2	457,5
3	460,7
4	457,4
5	481,2
6	481,2
Média	465,9
Desvio Padrão	11,88
Aço 1020	213,8

Fonte: Autoria própria

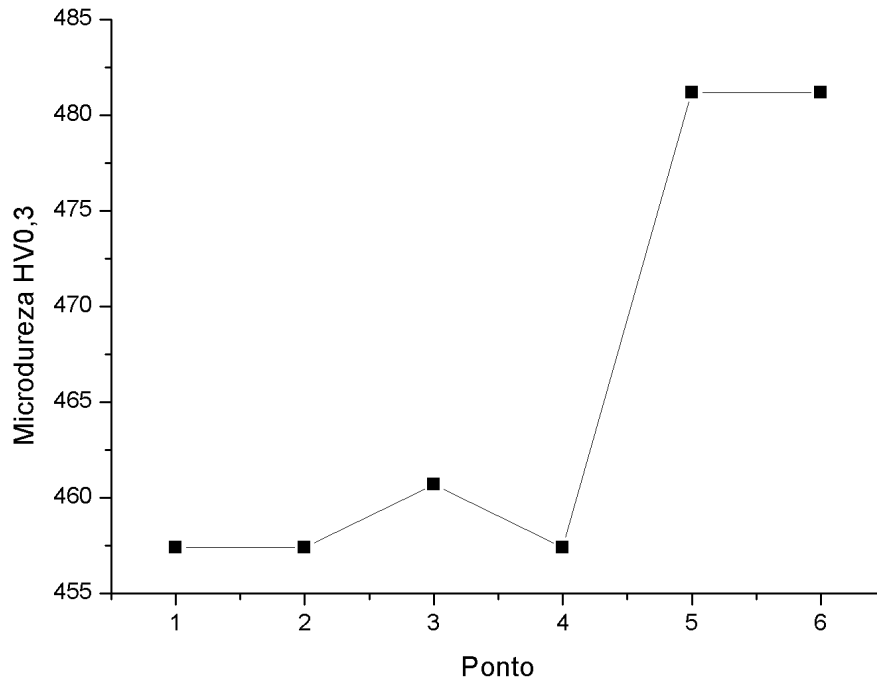


Figura 18 - Gráfico de microdureza

Fonte: Autoria própria

Os valores de microdureza são superiores aos encontrados na literatura de FAMBRINI, 2013; OLIVIO, 2012; PADILHA, 2011, ALMEIDA, 2003. O desvio padrão é consideravelmente baixo, isso ocorre, pois o revestimento é totalmente homogêneo com fusão total do material depositado.

Todas as medições tiveram valores acima de 450 HV, o que confirma a existência de intermetálicos NiAl e Ni₃Al que possuem uma microdureza mais elevada. Estes resultados demonstram formação de revestimentos com boa resistência mecânica.

4.1.2 Análise por Microscopia Ótica

Na Figura 19 observam-se trincas, óxidos e poucos poros no cordão de solda. Os parâmetros escolhidos não foram os corretos para o revestimento, assim ocasionando trincas no mesmo. Os óxidos estão apenas no substrato, pois o mesmo é um aço carbono 1020 que oxida a temperatura ambiente. A baixa presença de poros no revestimento foi devida a total fusão da mistura.

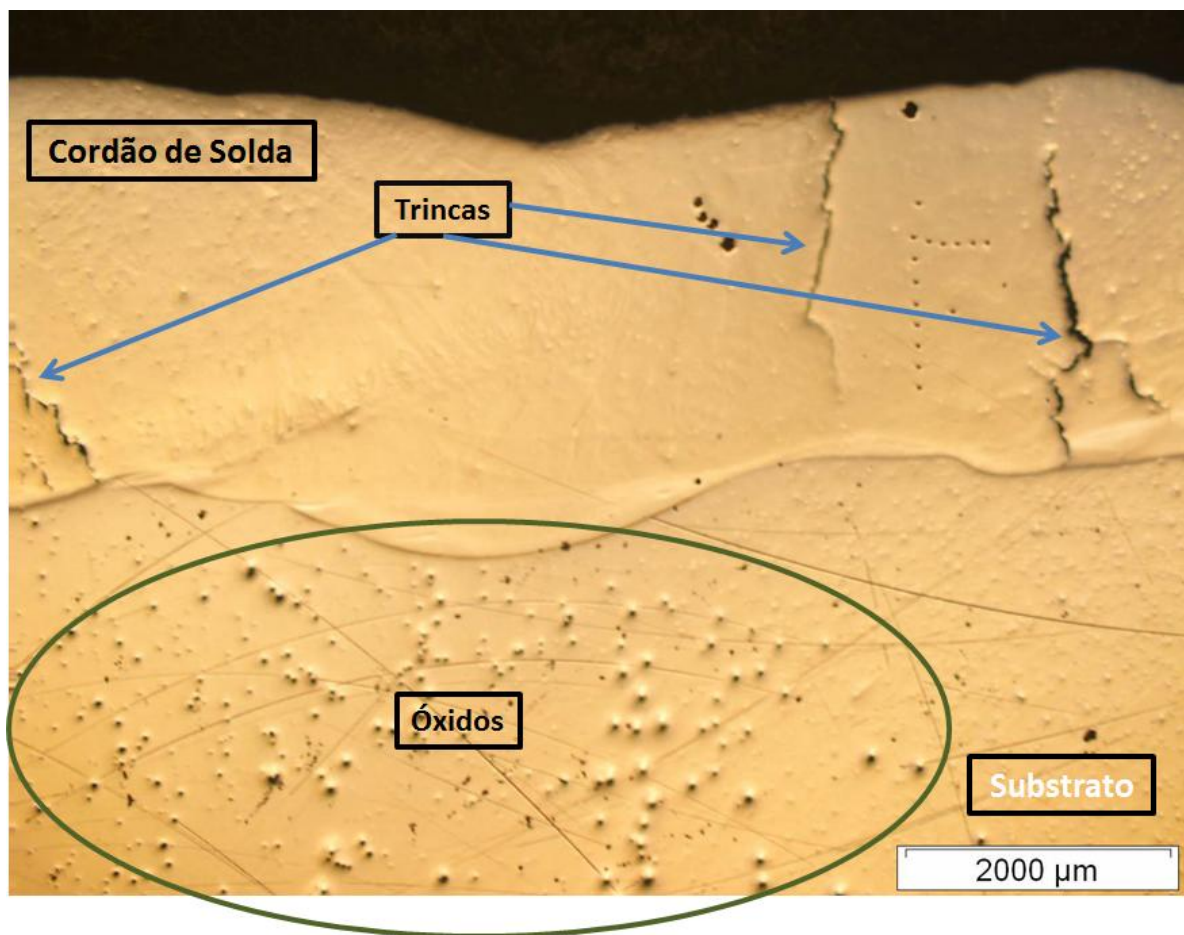


Figura 19 – Imagem da microscopia ótica

Fonte: Autoria própria

A Figura 20 mostra o cordão de solda revelado pelo ataque químico VILELA

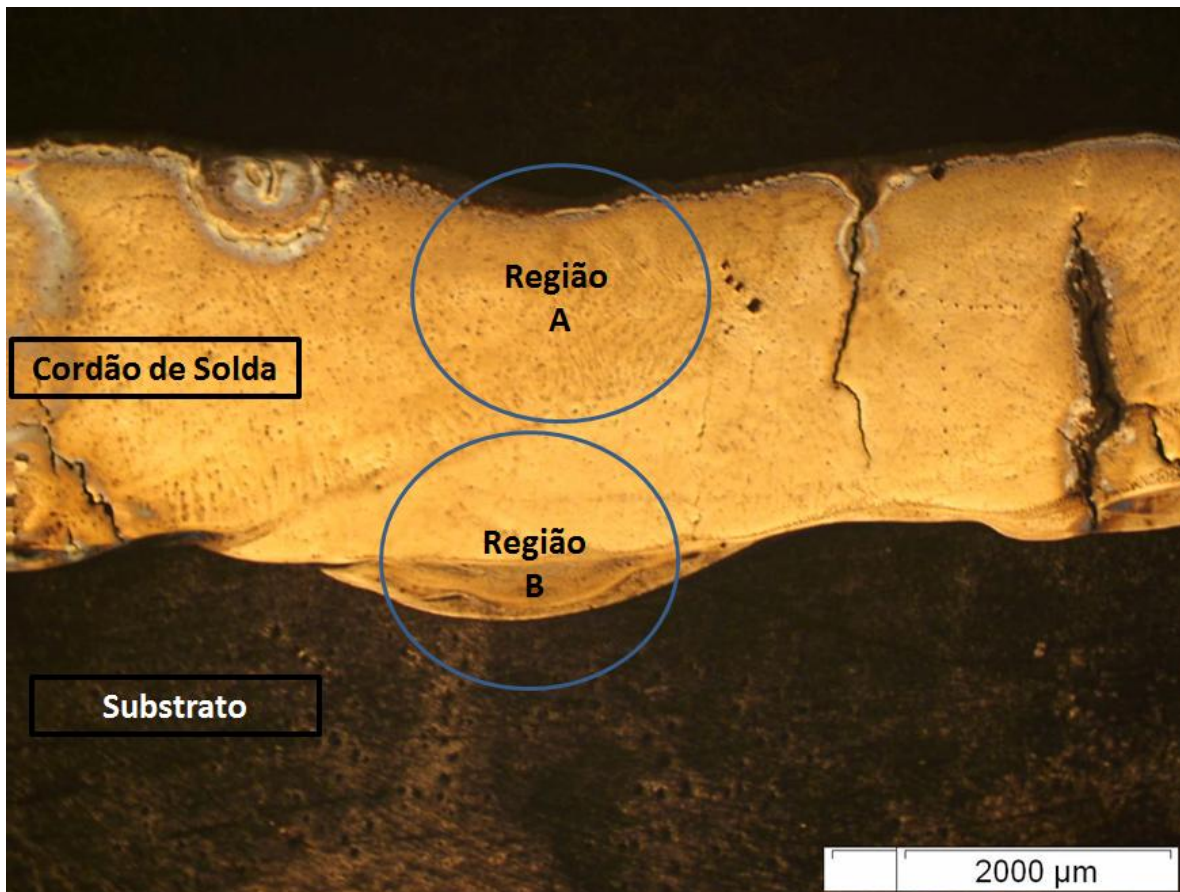


Figura 20– amostra ataca com Vilela

Fonte: Autoria própria

A Figura 21 mostra a região A da Figura 20, nela observa-se, segundo NOVICKI, 2002, a zona fundida e a zona de ligação entre os cordões.

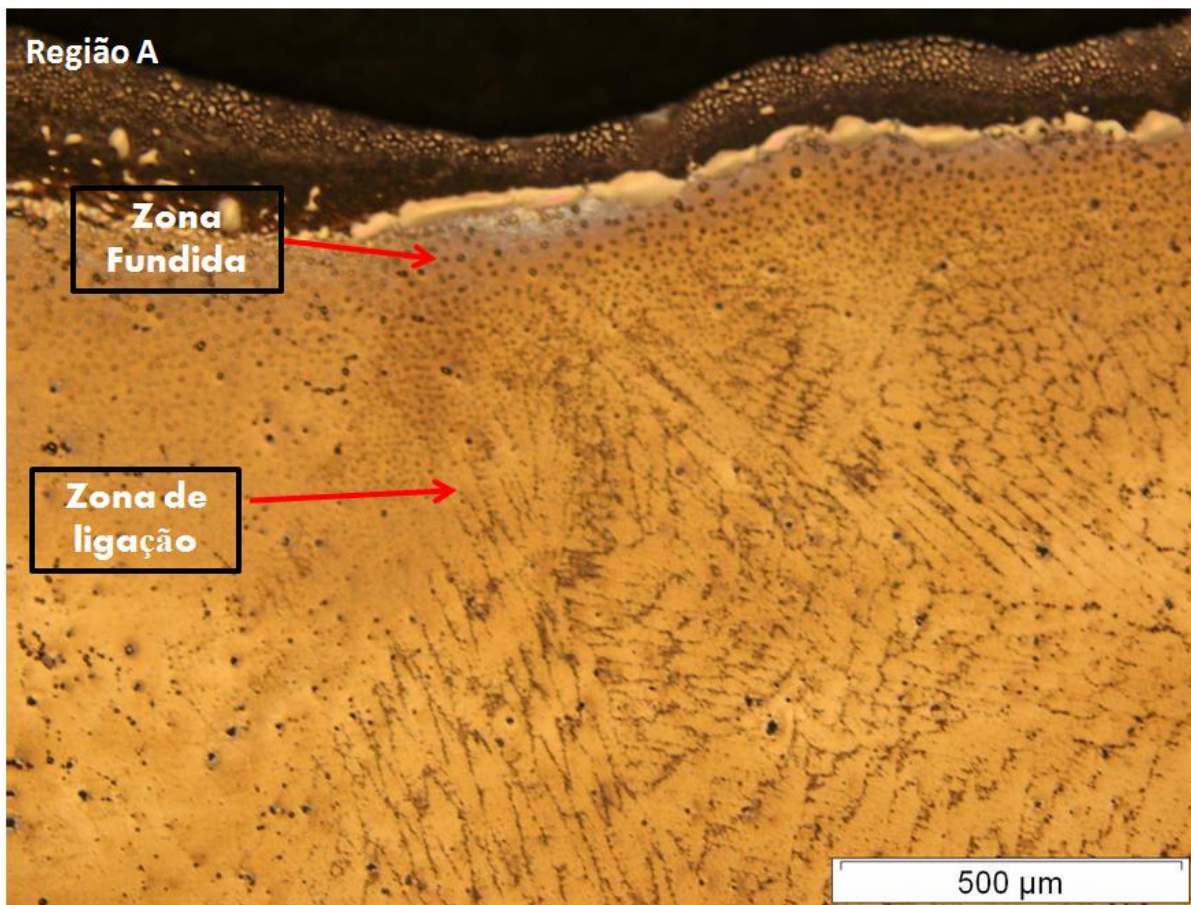


Figura 21 – Região A

Fonte: Autoria própria

A Figura 22 mostra a região B da Figura 20, segundo NOVICKI 2002, é a zona de ligação, entre os cordões e a zona fundida.

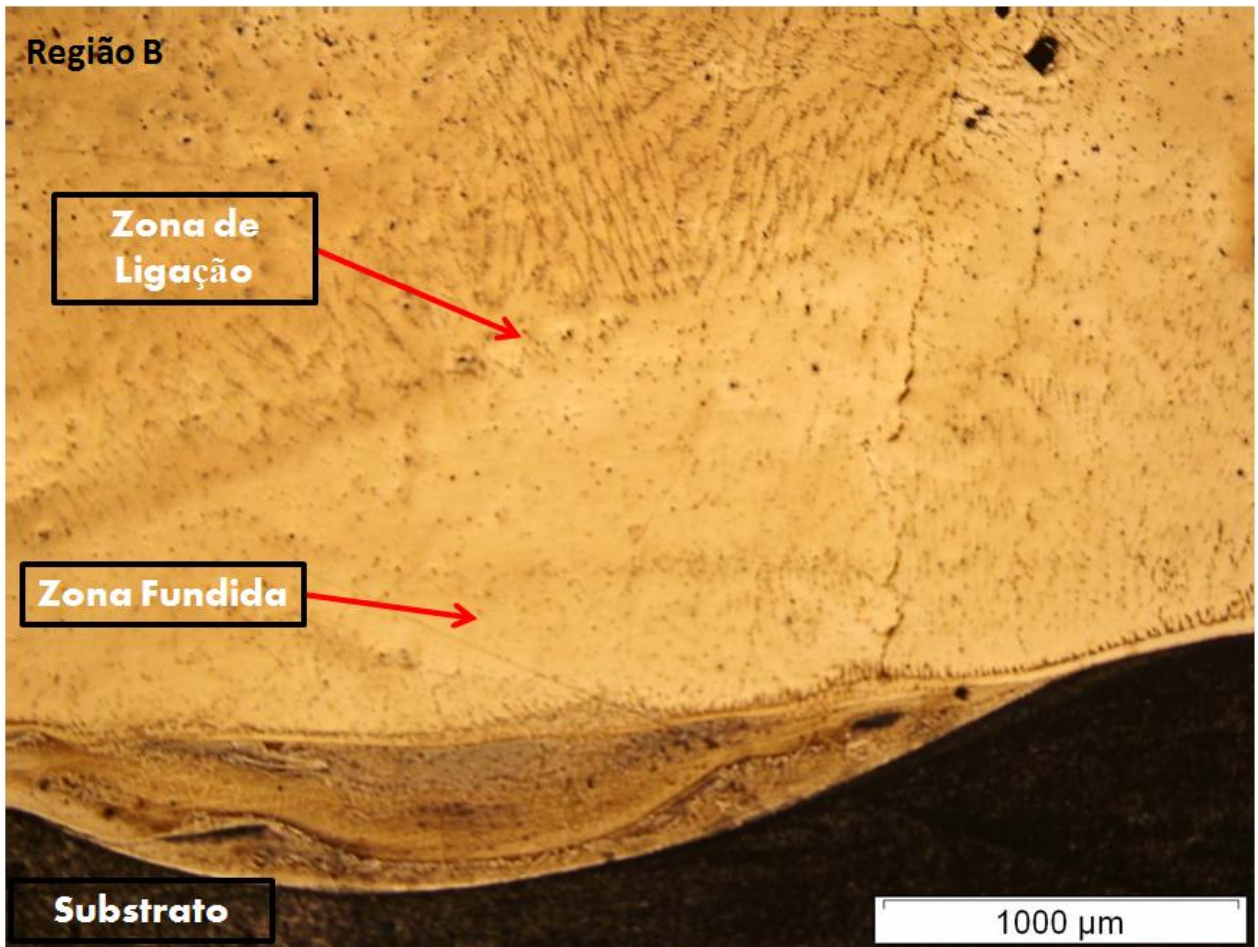


Figura 22 – Região B

Fonte: Autoria própria

Pelas análise de microscopia ótica pode – se observar um revestimento uniforme com poucos poros, porém com algumas trincas.

4.1.3 Análise da formação de fases observada via Difratometria de Raio X

A Figura 22 mostra as fases obtidas por DRX

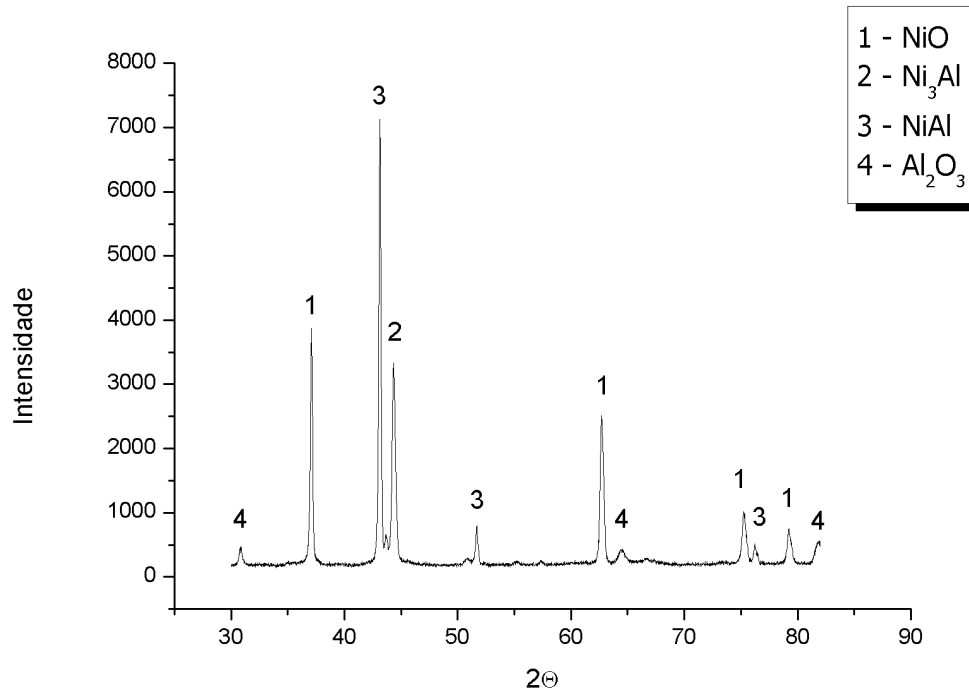


Figura 23 – Difratograma do revestimento depositado

Fonte: Autoria própria

Analisando a difratograma (Figura 23) da amostra, ressalta-se a formação dos intermetálicos NiAl e Ni₃Al, intermetálicos de grande importância pelo sua capacidade de resistência a oxidação a altas temperaturas. Nota-se também a formação do óxido de Níquel NiO e do óxido de alumínio Al₂O₃, que é um óxido estável a alta temperatura.

5 CONCLUSÃO

Após a análise dos resultados obtidos e comparando-se com os resultados encontrados na literatura, através dos ensaios de microdureza Vickers e análises de microscopia ótica e difratometria de raio x, pode-se concluir que:

Os resultados obtidos no ensaio de microdureza Vickers demonstraram que o revestimento possui uma boa resistência mecânica, atingindo um valor considerável e sendo superior que os revestimentos obtidos pela técnica de processo PAT-P.

Pela microscopia ótica, pode se confirmar que ocorreu trincas devido os parâmetros do processo. Além disso, pode se observar o cordão totalmente uniforme com poucos poros.

Por meio da análise obtida pelo DRX, pode-se confirmar a formação do óxido NiO e Al₂O₃ e dos intermetálicos NiAl e Ni₃Al. Conforme a literatura indicava e após a análise de microdureza, onde obteve picos de dureza.

Portanto, conclui-se que o objetivo do trabalho foi alcançado, formando revestimentos, contendo intermetálicos NiAl e Ni₃Al, que são estáveis a altas temperaturas, produzidos pelo o processo de TIG com dispositivo adaptado para deposição de pó.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, V. A. B.; **Obtenção in-situ de intermetálicos Ni/Al**. Curitiba. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Paraná, 2003.

ASM SPECIALTY HANDBOOK: **Nickel, Cobalt, And Their Alloys**.414p.,2000.

ASTM, ASTM E8M – 04. **Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials**. American Society for Testing and Materials, 2004.

ASTM C-633. **Standard Test Method for Adhesion or Cohesive Strength of Flame-Sprayed Coatings**. ASTM, 1994.

AWS, American Welding Society, Inc. **Thermal Spraying. Practice, Theory, and Applications**. 1985.

BIRKS, N.; MEIER, G.H.; PETTIT, F.S.; **Introduction To The High-Temperature Oxidation Of Metals**. Cambridge University Press. 2nd, 352p, 2006.

CHEN, W.; WANG, Y.; **Microstructures, properties and high-temperature carburization resistances of HVOF thermal sprayed NiAl intermetallic-based alloy coatings**. Surface and Coatings Technology. Vol. 183, P. 18-28, 2004.

DAVIS, J.R.; **Hardfacing, weld cladding, and dissimilar metal joining**: Welding, Brazing and Soldering, Metals Handbook, 10^a ed. Ohio: ASM International, Metals Park, v.6, 1993.

DEEVI, S.C, SIKKA, V.K., LIU, C.T.; **Processing, Properties and Applications of Nickel and Iron Aluminides**. Progress in Materials Science, Vol. 42, pp.177-192. 1997.

DELORO STELLITE. Apresenta as características de seus produtos. Disponível em: <http://www.stellite.co.uk/Products/PTALaserPowder/tabid/66/Default.aspx>. Acesso em: 28 novembro 2007.

DONG, H.X.; JIANG, Y.; HE, Y.H.; ZOU, J.; XU, N.P.; HUANG; B.Y.; LIU, C.T.; LIAW, P.K.; **Oxidation Behavior Of Porous Nial Prepared Through Reactive Synthesis**. Materials Chemistry and Physics. Vol 122, p.417–423, 2010.

ESTERLING, K.; **Introduction to the physical metallurgy of welding**. British Library Cataloguing in Publication Data. London, 1983.

FAMBRINI, L. R. S.; **Avaliação do Arame De Ni e Al Utilizado Como Revestimento Depositado por Aspersão Térmica à Chama Arame**. Cornélio Procópio. Trabalho de Conclusão de Curso. Engenharia Industrial Mecânica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2013.

FONSECA, A. S. da; **SOLDAGEM TIG**. Senai. Disponível em: <http://pt.scribd.com/doc/25220699/Soldagem-Tecnologia-de-Solda-%E2%80%93-Processo-TIG-e-Eletrodo-Revestido>> Acesso em 20 janeiro. 2014.

GONG, K, ZHOUB, Z, SHUMB, P.W., LUOC, H, TIANC, Z, LI, C. **Tribological evaluation on Ni₃Al-based alloy and its composites under unlubricated wear condition**, *Wear*. Vol. 270, p.195–203, 2011.

LIMA, C.R.C; GUILMANY, J.M.; **Adhesion improvements of Thermal Barrier Coatings with HVOF thermally sprayed bond coats**. *Surface & Coatings Technology*, Vol. 201, p.4694–4701, 2007.

MARQUES P.V.; **Aspersão Térmica**, Infosolda, 2003.

MOSELLI, P. C. (2013). **Desenvolvimento de dispositivo, adaptado à tocha SATG, para a realização de revestimento duro, utilizando ligas, em forma de pó.** 142 f Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2013.

NOVICKI, N.; **Caracterização da Tenacidade à Fratura do Aço Inoxidável Martensítico Macio CA6NM Temperado e Revenido e em Juntas Soldadas sem TTPS.** Curitiba. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Paraná, 2002

OLIVIO, E. F. T.; **Avaliação de Ligas de Ni-Al Utilizadas como Revestimento Estáveis a Altas Temperaturas Depositadas por Aspensão Térmica à Chama Pó.** Curitiba. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Paraná, 2011

PADILHA, H.; **Desenvolvimento “In Situ” de Intermetálicos Ni-Al em Superfícies de Aço Inoxidável Aisi 304 Através da Aplicação por Aspensão Térmica de Mistura de Pós de Níquel e Alumínio.** Curitiba. Tese de Doutorado. Universidade federal do Paraná, 2011.

PAREDES, R.S.C.; AMICO, S.C.; D'OLIVEIRA A.S.; **The Effect Of Roughness And Pre-Heating Of The Substrate On The Morphology Of Aluminium Coatings Deposited By Thermal Spraying.** Surface & Coatings Technology, Vol.200, p.3049–3055, 2006.

PAWLOWSKI, L.; **The Science and Engineering of Thermal Spray Coatings: Second Edition** Lech, 2008.

PENG, X.; WANG, M.; LI, F.; **A Novel UltraÙne-Grained Ni₃Al With Increased Cyclic Oxidation Resistance.** Corrosion Science. Vol. 53, p.1616–1620, 2011.

PLASMA TEAM. Apresenta informações sobre a empresa. Disponível em: <http://www.plasmateam.com/Products>. Acesso em 05 setembro 2007.

REIS, R.P., SCOTTI, A. **Fundamentos e prática da soldagem a plasma**. São Paulo: Artliber Editora, 2007.

SANTOS, A.O.; **Estudo da resistência à corrosão em aço e revestimentos visando à aplicação em hastes de bombeio de petróleo**. Dissertação de Mestrado. Aracaju: Universidade Tiradentes, 2008.

SANTOS, R. **Formação dos aluminetos de níquel a partir de pós metálicos**. *C.Tecn. Mat.*, vol.22, no.1-2, p.65-76. ISSN 0870-8312, jun 2010.

SULZER, **Thermal Spray Materials Guide-Metals, Alloys, Composites and Blends /Nickel Base**, p. 50-51, 2010.

TAMARIN, Y.; **Protective Coatings For Turbine Blades**. ASM International, 1nd., 231p, 2002.

TREVISANI, E. F., PAREDES, R. S. C., AGUIAR, L. A., SUCHARSKI, G. B., PADILHA, H., CARDOZO, M. C., CAPRA, A. R., 2011. **Evaluation of NiAl Alloys Used as Resistant Coating Deposited by Powder Flame Spraying**. 21st Brazilian Congress of Mechanical Engineerin. Natal-RN, Brazil.