

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
PROJETO DE GRADUAÇÃO**

ARTHUR MAGNAGO GIURI

**ANÁLISE DA DILUIÇÃO DE FERRO EM REVESTIMENTOS DE
INCONEL 625 DEPOSITADOS PELO PROCESSO PTA-P**

**VITÓRIA
2013**

ARTHUR MAGNAGO GIURI

**ANÁLISE DA DILUIÇÃO DE FERRO EM REVESTIMENTOS DE
INCONEL 625 DEPOSITADOS PELO PROCESSO PTA-P**

Projeto de Graduação submetido ao
Departamento de Engenharia
Mecânica da Universidade Federal do
Espírito Santo como requisito parcial
para a obtenção do título de
Engenheiro Mecânico.

Orientador: Temístocles Luz

VITÓRIA
2013

ARTHUR MAGNAGO GIURI

**ANÁLISE DA DILUIÇÃO DE FERRO EM REVESTIMENTOS DE
INCONEL 625 DEPOSITADOS PELO PROCESSO PTA-P**

Projeto de Graduação submetido ao Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Espírito Santo como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro Mecânico.

Aprovado em

COMISSÃO EXAMINADORA:

Temístocles Luz
UFES
Orientador

[Título e Nome completo]
[UNIVERSIDADE / EMPRESA]
Examinador

[Título e Nome completo]
[UNIVERSIDADE / EMPRESA]
Examinador

“Sonhos determinam o que você quer. Ação determina o que você conquista.”

Aldo Novak.

RESUMO

Nos variados setores industriais estão presentes mecanismos de desgaste da superfície das peças. Surgem, então, solicitações mecânicas locais que levam à degradação das peças por intermédio de mecanismos de desgaste como abrasão, adesão, cavitação, os quais podem também estar combinados com fenômenos químicos, como corrosão. A proteção prévia por revestimento das áreas solicitadas leva ao aumento da vida útil das peças, ao mesmo tempo em que promove redução de custos. Neste caso, o reparo deve prover alta qualidade, de modo a aumentar a vida útil da peça. Da mesma maneira, é desejável que o processo de revestimento possua satisfatória produtividade em sua aplicação.

Dentre os processos de revestimento se encontram diversas opções de tecnologias, cada qual com suas aplicações e peculiaridades técnicas. Uma opção a ser considerada é o processo PTA-P (Plasma Transferred Arc - Pó) em operações de revestimento por soldagem. Este processo, devido a algumas de suas características funcionais, permite melhores resultados em relação a outros processos de soldagem atualmente aplicados em revestimentos, em relação, por exemplo, à baixa diluição e alta qualidade superficial.

A soldagem de revestimento com ligas à base de níquel constitui uma interessante opção para a construção e o reparo de equipamentos para aplicações em ambiente de corrosão severa, permitindo alcançar as características desejadas. No presente trabalho, o objetivo foi avaliar o comportamento metalúrgico de revestimento com Inconel 625 depositados pelo processo PTA-P, com foco na diluição de ferro no revestimento através de Espectroscopia de Raio-X Dispersivo em Energia (EDS). As soldagens foram realizadas em simples deposição variando diversos parâmetros operacionais. Os resultados mostraram que o processo PTA-P demonstrou ser uma opção interessante para a soldagem de revestimentos de ligas de níquel, podendo depositar em apenas uma camada revestimentos que alcançam bons níveis de diluição favoráveis para garantir boas propriedades aos revestimentos.

Palavras-Chave: Soldagem, Revestimento, Comportamento metalúrgico, Diluição.

ABSTRACT

In varied industrial sectors are present mechanisms of surface wear of parts. Arise, so that local mechanical stresses lead to degradation of parts through wear mechanisms such as abrasion , adhesion , cavitation , which may also be combined with chemical phenomena, such as corrosion. The protective coating of prior requested areas leads to increased life of parts at the same time promoting cost reduction. In this case, the repair should provide high quality in order to increase the life of the part. Likewise, it is desirable that the coating process has satisfactory productivity application.

Among the coating processes are various technology options, each with their applications and technical peculiarities. One option being considered is the process PTA-P (Plasma Arc Transferred) in coating operations by welding. This process, due to some of its functional characteristics, allows better results compared to other welding processes currently applied in coatings, in relation, for example, the low dilution and high surface quality.

The welding coating with nickel based alloys will constitute an interesting option for the construction and repair of equipment for applications in severe corrosion environment, allowing you to reach the desired characteristics. In this study, we evaluated the metallurgical behavior of Inconel 625 coating deposited by PTA - P process, focusing on the dilution of iron in the coating by Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy (EDS). The welds were carried out in simple deposition varying several operating parameters. The results showed that the P - PTA process has proved to be interesting options for welding nickel alloy coatings, which may deposit in a single layer coating that, achieve good levels of dilution to ensure good favorable properties to the coatings.

Keywords: Welding, Coating, Behavior metallurgical, Dilution.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Comparação dos processos Plasma de Arco Transferido Alimentado com Pó (PTA-P) e Plasma de Arco Transferido Alimentado com arame (PTA-A)...	17
Figura 2.2: Esquema de uma tocha PTA-P genérica em corte associando sua.....	18
Figura 2.3: Comparação qualitativa de desempenho entre PTA-P e TIG.....	21
Figura 2.4: Exemplo de trinca de solidificação de solda entre Inconel Filler Metal 52M (ERNiCrFe) e (a) aço carbono A36 e (b) aço inox Tipo 304L.	23
Figura 2.5: Trinca induzida por hidrogênio em metal de solda inoxidável.	25
Figura 2.6: Desenho esquemático das características geométricas e diluição para um cordão de solda.	26
Figura 3.1 Equipamento de corte por abrasão Labotom-3 da Struers.....	33
Figura 3.2: Lixadeira Rotativa.	34
Figura 3.3: Equipamento de limpeza por ultrassom.....	34
Figura 3.4: Imagem gerada pelo MEV usando o método de análise EDS LineScan (Varredura Linear).	35
Figura 4.1: Resultados da análise EDS para avaliar a % em peso (wt %) de ferro e níquel no revestimento de Inconel 625.	40
Figura 4.2: Amostra 7 – Imagem da análise EDS por Varredura Linear no MEV. ...	40
Figura 4.3: Imagem obtida no MEV da amostra T5 demonstrando a região 1 analisada por EDS.....	42

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Propriedades físicas e mecânicas do Níquel e do Ferro.....	14
Tabela 2.2: Comparação da diluição média para diferentes processos de soldagem.	19
Tabela 3.1: Composição metal de adição.....	29
Tabela 3.2: Composição metal base.	29
Tabela 3.3: Parâmetros e os respectivos valores mantidos constantes.	31
Tabela 3.4: Parâmetros usados na soldagem das peças definitivas.	31
Tabela 4.1: Resultados das soldagens pelo processo PTA-P.	37
Tabela 4.2: Resultados da análise química por EDS de Varredura por área.	41

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	8
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	12
2.1 SUPERLIGAS	12
2.2 SUPERLIGAS DE NÍQUEL	12
2.2.1 Inconel 625.....	15
2.3 PROCESSO DE SOLDAGEM: PLASMA DE ARCO TRANSFERIDO ALIMENTADO COM PÓ	16
2.3.1 Vantagens e parâmetros do processo PTA-P	20
2.3.2 Comparação direta com outro processo.....	21
2.4 SOLDABILIDADE	21
2.4.1 Solidificação	22
2.4.2 Soldagem de materiais dissimilares.....	24
2.5 SOLDAGEM DE REVESTIMENTO.....	25
2.5.1 Diluição	26
2.6 EDS - ESPECTROSCOPIA DE RAIO-X DISPERSIVO EM ENERGIA	27
3 MATERIAIS E METODOLOGIA	29
3.1 MATERIAIS	29
3.2 EQUIPAMENTOS	30
3.3 METODOLOGIA.....	30
3.3.1 Preparação das amostras definitivas	32
3.3.2 Microscopia Eletrônica	34
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	36
4.1 AVALIAÇÃO DO TEOR DE FERRO NO REVESTIMENTO.....	38

1 INTRODUÇÃO

Quando tratamos de recursos naturais, o petróleo surge como um dos principais nomes no mercado como matéria-prima da sociedade moderna. Responsável por ser a principal fonte de energia no mundo, o petróleo e o gás natural juntos correspondem a quase 60% da matriz energética mundial. Esta posição de destaque reflete na economia mundial, do qual movimentam valores da ordem de trilhões de dólares.

Neste contexto, a Petrobras tem se destacado como a maior produtora de petróleo em águas profundas do mundo com cerca de 70% da área de seus blocos exploratórios offshore a profundidades de lâmina d'água de mais de 400 m. Em 2006, a empresa alcançou a auto-suficiência, sendo que quase 70% da sua produção é proveniente de águas profundas e ultra profundas. Em 2010, a produção de óleo pesado em ambiente offshore estimada será de cerca de 20% da produção total de óleo da Petrobras. Os volumes de óleo pesado e viscosos descobertos pela Petrobras nos últimos anos ultrapassam 15 bilhões de barris. A maior parte deste óleo encontra-se em lâmina d'água acima de 1.000 m, o que exige o emprego de tecnologias sofisticadas e de elevado custo para a sua extração.

No ano de 2008 foi divulgada a descobertas de reservatórios gigantes numa região denominada de camada pré-sal, cuja localização compreende as bacias de Santos (SP), Campos (RJ) e Espírito Santo. Apesar de não se ter ainda informações completas sobre o volume de petróleo total desta região, estimativas da Petrobras apontam para reservas que totalizam 12 bilhões de barris de petróleo e gás nas bacias de Santos e Campos. No Espírito Santo existe ainda outra reserva com mais 2 bilhões de barris. Tais descobertas podem dobrar as reservas de petróleo e gás do Brasil e elevar o patamar do Brasil frente aos demais países produtores de petróleo. Embora os petróleos encontrados sejam de boa qualidade, a Petrobras conta ainda com inúmeros reservatórios contendo petróleo pesado com elevados teores de impureza. Estes petróleos ricos em impurezas (compostos oxigenados, nitrogenados, organometálicos, sais minerais, água, dentre outros agentes) tomam o meio extremamente agressivo aos materiais dos dutos e equipamentos de

processos utilizados nas unidades produtoras e de refino da Petrobras. Dentre os problemas enfrentados por estas unidades, destaca-se a degradação dos materiais devido a processos de corrosão.

Esta degradação é atribuída a alguns fatores. O primeiro deve-se ao fato de que muitas destas unidades não foram inicialmente projetadas para trabalhar com petróleos pesados ricos em impurezas. O segundo foi o esgotamento de jazidas de petróleo leve e a redução das importações deste tipo de petróleo. Por fim, a descoberta de grandes jazidas com petróleo pesado, e a atratividade econômica de produção destes poços com petróleos de baixa qualidade fizeram com que as unidades de produção e refino passassem a processar petróleos pesados com alto índice de acidez.

Frente a todos estes problemas e a estas novas descobertas, grandes investimentos em pesquisa e desenvolvimento de novos materiais e tecnologias tornam-se necessários para atenderem aos desafios crescentes de extração e transporte de petróleos produzidos em águas profundas e ultra-profundas, e ainda o aumento da confiabilidade operacional de unidades de refino que processam óleos pesados. Investimentos estes que devem contemplar o desenvolvimento de processos de soldagem e a aplicação de novos materiais utilizados como revestimentos, bem como sua soldabilidade, em especial para algumas aplicações particulares como revestimentos internos e/ou externos de dutos e equipamentos de produção off-shore e o revestimento de equipamentos de unidades de refino que sofrem com problemas associados à corrosão naftênica.

É clara a importância de um estudo sistemático voltado para o desenvolvimento e otimização de processos de soldagem que visem aplicações de revestimento, bem como a avaliação da compatibilidade metalúrgica e do desempenho dos revestimentos depositados. Neste contexto, o Laboratório de Soldagem da Universidade Federal do Espírito Santo vem desenvolvendo procedimentos para a soldagem de revestimentos com materiais resistentes a corrosão. Dentre os materiais resistentes à corrosão que merecem atenção especial para tal aplicação destacam-se as superligas à base de níquel, as quais apresentam resistência à

corrosão bem superior aos aços inoxidáveis, bem como boas propriedades mecânicas.

Baseado nesses aspectos citados anteriormente, a motivação é norteadada pela análise metalúrgica de revestimentos de liga de níquel depositadas pelo processo de soldagem por Plasma com Arco Transferido e Alimentação em Pó (PTA-P). Para que os revestimentos depositados alcancem as características desejadas, um rigoroso ajuste dos diversos parâmetros de soldagem deve ser realizado. Quanto aos aspectos metalúrgicos, a compreensão dos fenômenos físico-químicos e metalúrgicos relacionados à soldagem de ligas à base de níquel endurecidas por solução sólida e com alta resistência à corrosão é de fundamental importância para garantir a qualidade dos revestimentos e sua boa performance em serviço. É interessante destacar que existem vários tipos de ligas e dentro de uma mesma classe, como por exemplo a Ni-Cr-Mo, a diferença de preço entre as ligas pode variar substancialmente. No entanto, informações comparativas de soldabilidade e características de resistência à corrosão entre estas ligas, notadamente para aplicações no setor de petróleo e gás, ainda são escassas. Outro aspecto importante, é que algumas destas ligas à base de níquel ainda carecem de estudos que avaliem as suas características microestruturais, visto que muitas destas são susceptíveis à precipitação de fases associadas a problemas de trincas de solidificação ou que afetem as suas propriedades, especialmente resistência à corrosão.

Por fim, destaca-se que para a soldagem de revestimentos resistentes à corrosão, em geral, são depositadas duas ou três camadas para que ao final, a última camada depositada apresente um teor máximo de Fe inferior a 5%, ou entre 5 e 10% para aplicações nas quais as exigências de resistência à corrosão são menores. Esta deposição de inúmeras camadas demanda um longo tempo de operação e um elevado consumo de material nobre, encarecendo demasiadamente o processo de revestimento. Baseado nestes aspectos, o desenvolvimento de processos e o aprimoramento de técnicas que permitam depositar revestimentos resistentes à corrosão com ligas à base de níquel que alcancem baixos níveis de diluição e teores de ferro inferiores a 5% com a deposição de apenas uma camada têm se tornado um desafio no âmbito da engenharia de soldagem. Assim, um aspecto motivacional

ao desenvolvimento do presente trabalho foi aliar os aspectos operacionais e metalúrgicos de forma a resultar na obtenção de revestimentos com boa qualidade depositados em uma única camada, de forma a maximizar a produtividade e reduzir custos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 SUPERLIGAS

As superligas são projetadas para prover elevada resistência mecânica e elevada resistência à corrosão/oxidação em altas temperaturas. Elas combinam boa resistência à fadiga e à fluência, bem como ductilidade e rigidez. Em geral, existem três principais classes de superligas: de níquel, de ferro e de cobalto [2].

Em temperaturas mais baixas, dependendo da resistência mecânica requerida e da aplicação, as superligas de ferro são mais indicadas do que as de níquel e de cobalto, pois o custo das superligas de ferro é inferior. As superligas de cobalto são as que possuem a capacidade de trabalhar em temperaturas mais elevadas, mas a sua utilização é mais restrita, pois são significativamente mais caras que as superligas de ferro e de níquel. As superligas de níquel são as mais utilizadas [3].

2.2 SUPERLIGAS DE NÍQUEL

A razão primordial para a existência das superligas de níquel com diferentes composições químicas é a sua excelente resistência mecânica num amplo intervalo de temperaturas. A estrutura cristalina cúbica de face centrada (CFC) da matriz austenítica das superligas de níquel apresenta grande capacidade de manter resistência à tração, à ruptura e boas propriedades de fluência em temperaturas homólogas muito mais altas do que as ligas de matriz cúbica de corpo centrado (CCC) por causa de vários fatores, incluindo o excelente módulo de elasticidade e a alta difusividade que os elementos secundários possuem nesse tipo de matriz [1]. É de grande importância a grande solubilidade de muitos elementos de liga na matriz austenítica e a capacidade de controle da precipitação de fases intermetálicas que conferem alta resistência mecânica. O endurecimento também pode ser aumentado pela formação de carbeto e também pela dissolução de alguns elementos na matriz (endurecimento por solução sólida). Essa capacidade de endurecimento dessas ligas austeníticas de níquel, de cobalto e de ferro as tornam adequadas para

aplicações em turbinas de jato e motores de foguetes, que exigem alta resistência mecânica em média e alta temperatura [4].

Entretanto, não apenas a resistência mecânica/dureza é importante nesse tipo de aplicações. A utilidade nas condições de serviço também é importante, e a maioria das superligas apresenta boa utilidade. As superligas em geral apresentam também boa resistência ao impacto, à fadiga de alto e de baixo ciclo e à fadiga térmica.

O níquel puro possui massa específica de $8,9 \text{ g/cm}^3$, ponto de fusão $1455 \text{ }^\circ\text{C}$, estrutura cristalina CFC (cúbica de face centrada). A massa específica da maioria das superligas de níquel fica entre $7,79$ e $9,32 \text{ g/cm}^3$. A massa específica é uma propriedade importante para as superligas de níquel, uma vez que a redução da massa específica do componente de turbina de jato leva a um aumento das tensões centrífugas, reduzindo a vida útil do componente.

A condutividade térmica do níquel puro é da ordem de $0,089 \text{ (W/mm}^2\text{)/(}^\circ\text{C/mm)}$, portanto superior à do ferro puro, que atinge somente $0,072 \text{ (W/mm}^2\text{)/(}^\circ\text{C/mm)}$. Porém a condutividade térmica das superligas é muito inferior, da ordem de 10% desse valor, devido à adição de muitos elementos de liga em elevados teores [1]. O ideal seria obter superligas com maior condutividade térmica, já que isso seria importante para dissipar calor e assim minimizar os gradientes de temperatura, reduzindo então as tensões térmicas e assim a tendência de ocorrer falha por fadiga térmica.

A expansão térmica nas superligas de níquel é menor do que nas ligas ferrosas austeníticas e isso é importante do ponto de vista da aplicação em turbinas de jatos, já que esses componentes são projetados com estreitas tolerâncias dimensionais para operar bem em serviço, além de um baixo coeficiente de expansão térmica contribuir para minimizar as tensões térmicas, minimizando assim a ocorrência de empenamento e fadiga térmica [1]. Entretanto, para aplicações industriais na forma de revestimento sobre aços, esta condição é crítica, porque pode causar um gradiente de expansão térmica, gerando elevados níveis de tensões, podendo

ocasionar problemas de fadiga térmica. Algumas propriedades do níquel e do ferro são listadas da Tabela 2.1.

Tabela 2.1: Propriedades físicas e mecânicas do Níquel e do Ferro.

Propriedades	Níquel	Ferro
Densidade (g/cm ³)	8,89	7,87
Ponto de fusão (°C)	1453	1535
Coefficiente de expansão térmica (m/m°C)	$13,3 \times 10^{-6}$	$11,8 \times 10^{-6}$
Condutividade térmica (25°C) (W/m.K)	92	
Resistividade elétrica (Ω m)	$9,7 \times 10^{-8}$	7×10^{-8}
Módulo de elasticidade(kPa)	204×10^6	211×10^6
Limite de resistência (Mpa)	462	
Limite de escoamento, 0,2% (Mpa)	148	
Alongamento em 51mm (%)	47	

Embora níquel e ferro apresentem características muito semelhantes, a estrutura cristalina das ligas de níquel é completamente diferente do ferro. Isto torna a metalurgia do níquel e de suas ligas diferente das ligas de ferro, possibilitando uma alta versatilidade na elaboração de ligas com composições químicas as mais variadas para garantir excelente resistência mecânica e elevada resistência ao desgaste, especialmente em condições de elevada temperatura, além de excelente resistência à corrosão em uma infinidade de meios agressivos [1].

O uso inicial das ligas de níquel para aplicações críticas em sistemas que operam em alta temperatura, se deve especialmente à sua alta resistência à corrosão e oxidação, a qual é baseada na adição de cromo à liga, e a sua alta resistência

mecânica à elevada temperatura, conferida pela presença de outros elementos químicos [3].

Estas ligas possuem uma matriz gama (γ) com estrutura cúbica de face centrada (CFC), e são classificadas em quatro grupos, com base no mecanismo de aumento de resistência [3]:

- Ligas endurecidas por solução sólida.
- Ligas endurecidas por precipitação.
- Ligas endurecidas por dispersão de óxido.
- Ligas fundidas

O endurecimento por solução sólida pode ser aplicado em praticamente todas as ligas a base de níquel. O segundo grupo usa como mecanismo endurecedor a formação de precipitados, como fases intermetálicas tipo Laves, além de boretos e carbonetos [5]. O terceiro grupo obtém o aumento de resistência pela dispersão de partículas muito finas de óxido refratário ao longo da matriz. O último grupo é constituído por ligas que são destinadas a aplicações de fundição e podem ter sua resistência aumentada por solução sólida ou por precipitação.

2.2.1 Inconel 625

Dentre os inúmeros representantes da família Ni-Cr-Mo, a liga Inconel 625 ocupa posição de destaque, tendo sido desenvolvida em 1964, na primeira geração das ligas à base de Ni. Inicialmente desenvolvida para operações em alta temperatura, logo teve sua aplicação estendida para várias outras aplicações devido à descoberta de sua excelente resistência à corrosão a uma grande variedade de meios corrosivos, o que possibilitou o seu emprego em diversos setores da indústria [2]. Tal comportamento se deve principalmente ao alto teor de Cr (20%) e adição de Mo (9%). Seus teores de ferro e carbono são limitados a níveis baixos para manter as propriedades de resistência à corrosão e para minimizar a precipitação nos

contornos de grão, evitando problemas de corrosão localizada, especialmente em componentes soldados [15].

Contudo, tais propriedades somente são alcançadas para materiais no estado solubilizado, o que não é o caso de metais depositados por solda [17]. De fato, inúmeros trabalhos têm reportado que em metais de solda com alta liga, como os aços inoxidáveis e as ligas à base de Ni, a resistência à corrosão pode ser afetada através de segregação de elementos como o Cr e o Mo durante solidificação [16]. Outro fator que pode afetar o comportamento destas ligas é o efeito da diluição da superliga com o ferro contido no metal de base, no caso de soldas dissimilares [16].

2.3 PROCESSO DE SOLDAGEM: PLASMA DE ARCO TRANSFERIDO ALIMENTADO COM PÓ

O Processo de Soldagem Plasma de Arco Transferido Alimentado com Pó (PTA-P) pode ser considerado uma derivação do Processo de Soldagem Plasma de Arco Transferido Alimentado com Arame (PTA-A). Diverge deste pela natureza do material de aporte, uma vez que utiliza pó em vez de arame, e pela necessidade de um terceiro gás para o transporte do pó. Abaixo, Figura 2.1, uma esquematização para simples comparação.

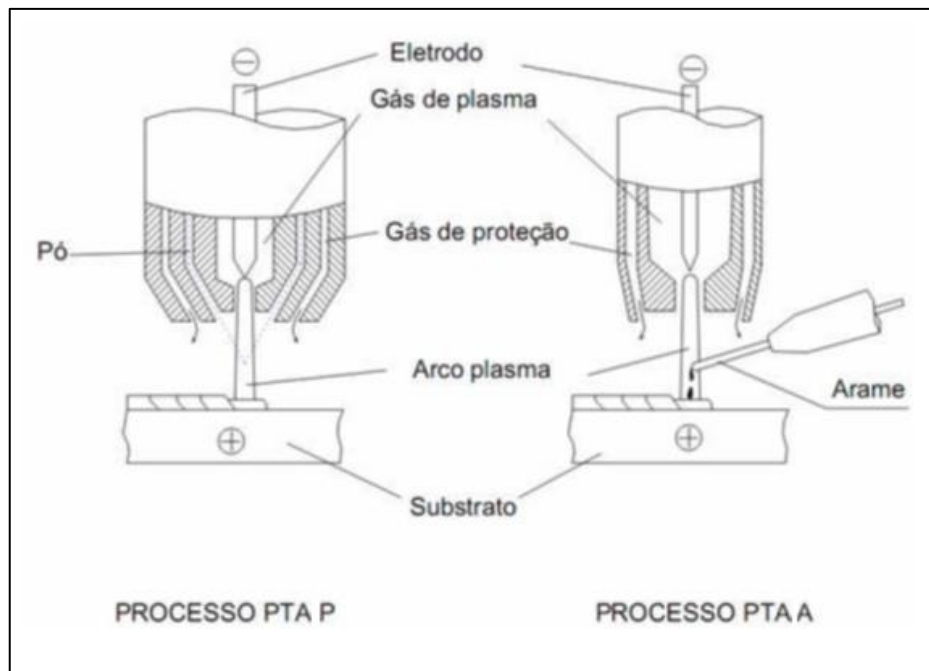


Figura 2.1: Comparação dos processos Plasma de Arco Transferido Alimentado com Pó (PTA-P) e Plasma de Arco Transferido Alimentado com arame (PTA-A).

Os processos de soldagem por plasma com arco transferido (PTA) utilizam como fonte calorífica um arco elétrico (plasma) produzido a partir de um eletrodo não consumível de tungstênio em uma atmosfera de gás inerte. No processo PTA é utilizado um bocal de constrição do arco que constrixe a passagem do gás de plasma e aumenta a densidade do arco. Além do gás de plasma que passa pelo interior do bocal de constrição (Figura 2.2), existe um fluxo de gás que passa por um bocal externo, do qual tem como finalidade a proteção do arco.

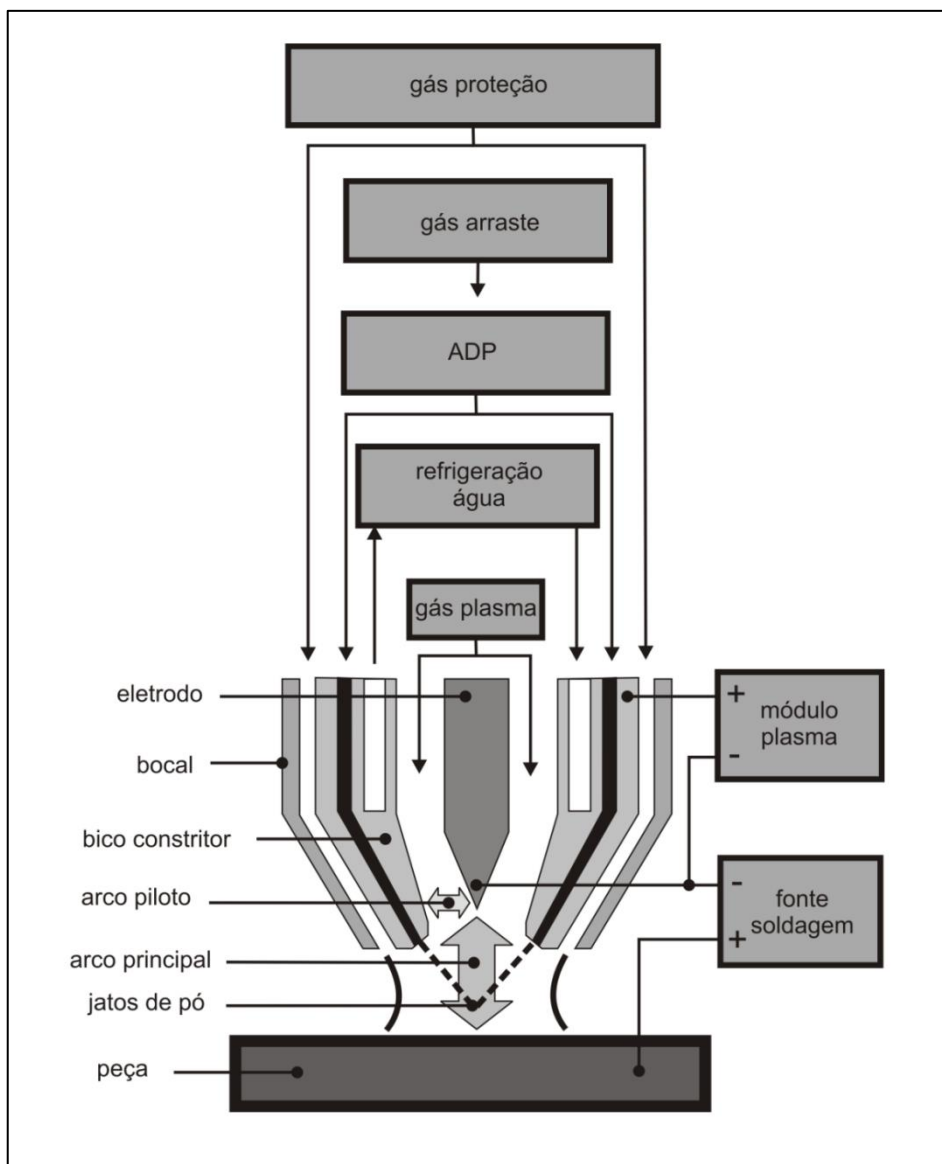


Figura 2.2: Esquema de uma tocha PTA-P genérica em corte associando sua

Como não é possível abertura direta do arco através do curto-circuito entre o eletrodo e a peça, utiliza-se uma fonte de alta-frequência para abrir um arco não transferido, chamado de arco piloto, que é estabelecido entre o eletrodo de tungstênio (W) e o bocal refrigerado de cobre. Este arco piloto é mantido aceso por uma fonte com baixas correntes (15 A), e tem o objetivo de formar um caminho de gás ionizado, o qual possibilita a abertura do arco principal quando a fonte de soldagem principal é habilitada. Para isto, existe a necessidade de um equipamento específico, além da fonte de soldagem principal, que controle a abertura e mantenha o arco piloto aceso.

No processo PTA-P, a tocha de soldagem se diferencia de uma tocha PTA convencional por possuir canais por onde o material em forma de pó é alimentado para o interior do arco. O material a ser depositado fica armazenado em um alimentador de pó (ADP) o qual tem a função de definir a taxa de alimentação do pó. O pó é transportado até a tocha com o auxílio de um terceiro fluxo de gás, denominado gás de arraste, normalmente argônio puro.

A diluição para o PTA-P pode ser reduzida à ordem de 5% [6] em vantagem sobre outros métodos. A Tabela 2.2, mostra uma comparação da diluição média para diferentes processos de soldagem a arco, mesma composição do material de adição e mesmo material de base [7]. Com baixa diluição, é possível conseguir a resistência almejada em um ou poucos passes de soldagem, reduzindo custo de materiais, o que também é proporcionado pela possibilidade de se utilizar, para o corpo da peça, materiais não ligados de menor preço [8].

Tabela 2.2: Comparação da diluição média para diferentes processos de soldagem.

Forma do material de adição	Processo de soldagem	Diluição média
Vareta	TIG	20%
Eletrodo revestido	ER	25%
Pó	PTA-P	3%

De acordo com Bewley [7], a menor diluição propiciada pelo PTA-P se deve 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.

2.3.1 Vantagens e parâmetros do processo PTA-P

O processo PTA-P tem sido alvo de estudos do Laboratório de Soldagem da UFES nos últimos anos. As principais vantagens desse processo são [9]:

- Pode ser conseguida uma diluição da ordem de 5%, muito inferior aos valores típicos de 20-25% obtidos com processos MIG, TIG e PTAA.
- Os depósitos se caracterizam por uma microestrutura refinada em relação àquelas obtidas pelos processos MIG e PTAA.
- Num único passe é possível conseguir depósitos com reforço que varia de 0,6 a 6,0 mm e largura de 3 a 10 mm.
- Maior facilidade para a produção de ligas experimentais para diferentes finalidades, mediante a mistura de diferentes pós.
- O processo PTAP oferece uma taxa de deposição elevada quando é comparada com os processos TIG, laser e plasma spraying.

Os itens seguintes mostram os principais parâmetros do processo PTAP, acompanhado de uma breve descrição da influência prática de cada parâmetro:

- Corrente de soldagem: É a variável que define a energia do processo de soldagem.
- Sendo assim, influencia decisivamente na diluição e na taxa de fusão obtida.
- Distância do recuo do eletrodo em relação ao orifício do bocal de constrição:
- Modifica a rigidez do arco. Quanto maior o recuo, mais o arco tende ao formato cilíndrico. Quanto menor o recuo, o arco tende ao formato de um arco TIG (formato de sino). Com a variação no formato do arco também altera a penetração.
- Vazão do gás de plasma: Altera a estabilidade do arco e afeta a penetração.
- Diâmetro do orifício do bocal constritor: Modifica a geometria do arco, alterando penetração e largura do cordão.
- Taxa de alimentação do pó: Define a quantidade de pó que está sendo depositada.
- Ângulo de alimentação do pó: É uma variável importante, já que define a posição que o pó é injetado no meio do arco.

2.3.2 Comparação direta com outro processo

Alguns trabalhos realizaram comparações diretas entre o processo PTA-P e outros, especificamente para operações de revestimento, sob diferentes critérios e condições. HUANG et al. apresentou o gráfico em rede da Figura 2.3, comparando qualitativamente o desempenho do PTA-P com o do TIG em relação a diferentes aspectos [10].

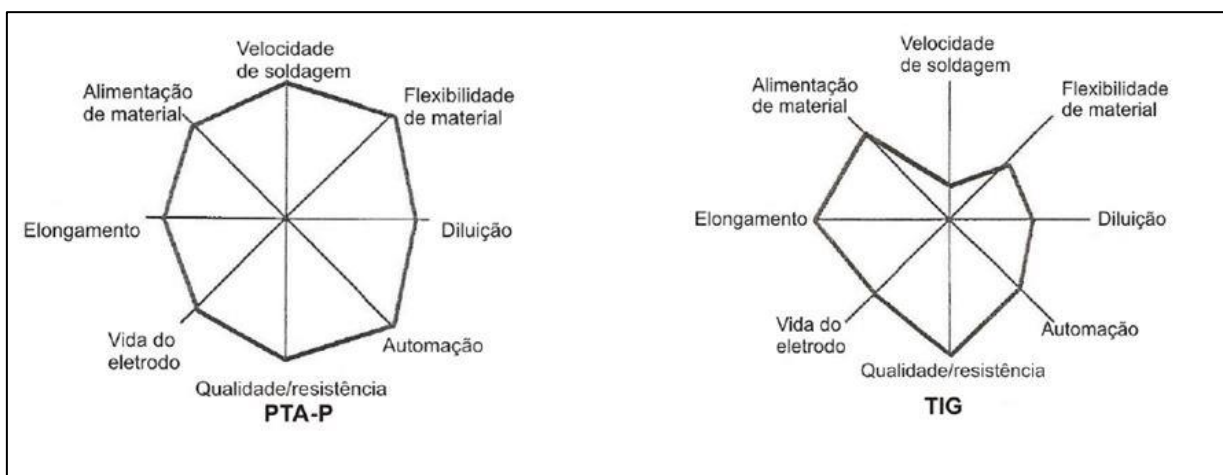


Figura 2.3: Comparação qualitativa de desempenho entre PTA-P e TIG.

2.4 SOLDABILIDADE

A soldagem é sem dúvida um dos principais processos de fabricação de componentes e estruturas, sendo de fundamental importância tecnológica para uma gama de setores industriais como aeroespacial, aeronáutico, automobilístico, nuclear, químico, petroquímico, de petróleo e gás, metal-mecânico, dentre outros. Tal entendimento fez com que ao longo dos anos uma importante característica tenha sido introduzida junto às propriedades inerentes à avaliação de um material, a sua soldabilidade.

Podemos definir soldabilidade como a capacidade de um material ser unido sob determinadas condições de fabricação e/ou reparo, mantendo ou adquirindo propriedades que os tornem adequados para o serviço. Para avaliar a soldabilidade de uma liga, diversas características processuais e metalúrgicas devem ser consideradas, incluindo dentre outras, a facilidade de execução do processo de união ou deposição, garantia de boas propriedades físicas e mecânicas, tendência à formação de trincas durante ou após a soldagem, bem como a sua durabilidade e resistência à corrosão em condições de serviço [14].

Em ligas de níquel, algumas de suas propriedades como resistência mecânica em temperaturas elevadas e resistência à corrosão podem sofrer alterações drásticas devido aos efeitos de solidificação e dos ciclos térmicos de soldagem, os quais podem causar além de mudanças microestruturais como precipitação de eutéticos com baixo ponto de fusão, fases TCPs e carbonetos, o surgimento de tensões residuais que somadas às tensões de serviço podem culminar com a ruptura/falha do componente ou estrutura. Estes fatores tornam imprescindível a compreensão dos principais problemas relacionados à soldagem das ligas de níquel. A seguir serão comentados alguns conceitos básicos de metalurgia da soldagem para fundamentar alguns dos principais problemas relacionados à soldagem de ligas de níquel.

2.4.1 Solidificação

A solidificação das superligas é governada, assim como a de todos os metais, pelas leis termodinâmicas observadas nos diagramas de fase. No entanto, a cinética do processo de solidificação determina de fato qual será a microestrutura resultante. O processo de solidificação se inicia com a nucleação (fase base da liga) e posterior crescimento, geralmente por solidificação dendrítica, na direção do gradiente térmico e composicional [14].

As grandes quantidades de soluto presentes nas superligas resultam em maior dificuldade de controle na solidificação destas ligas quando comparada a ligas

comuns como cobre, alumínio e aço. Assim, para a maior parte das superligas, é necessário que a solidificação ocorra sob condições controladas. Quando as taxas de solidificação são muito baixas, o soluto rejeitado proveniente das primeiras dendritas formada pode promover a formação de canais contínuos com grandes quantidades de soluto. Quando estes canais solidificam, eles estão com concentrações muito altas de soluto para ser dissolvido num posterior tratamento térmico, resultando assim em defeitos contínuos no material. Fases Laves e carbonetos são partículas duras, que se formam nestas regiões ricas em soluto e são extremamente detriminentais para as propriedades mecânicas principalmente para a resistência à fadiga [14].

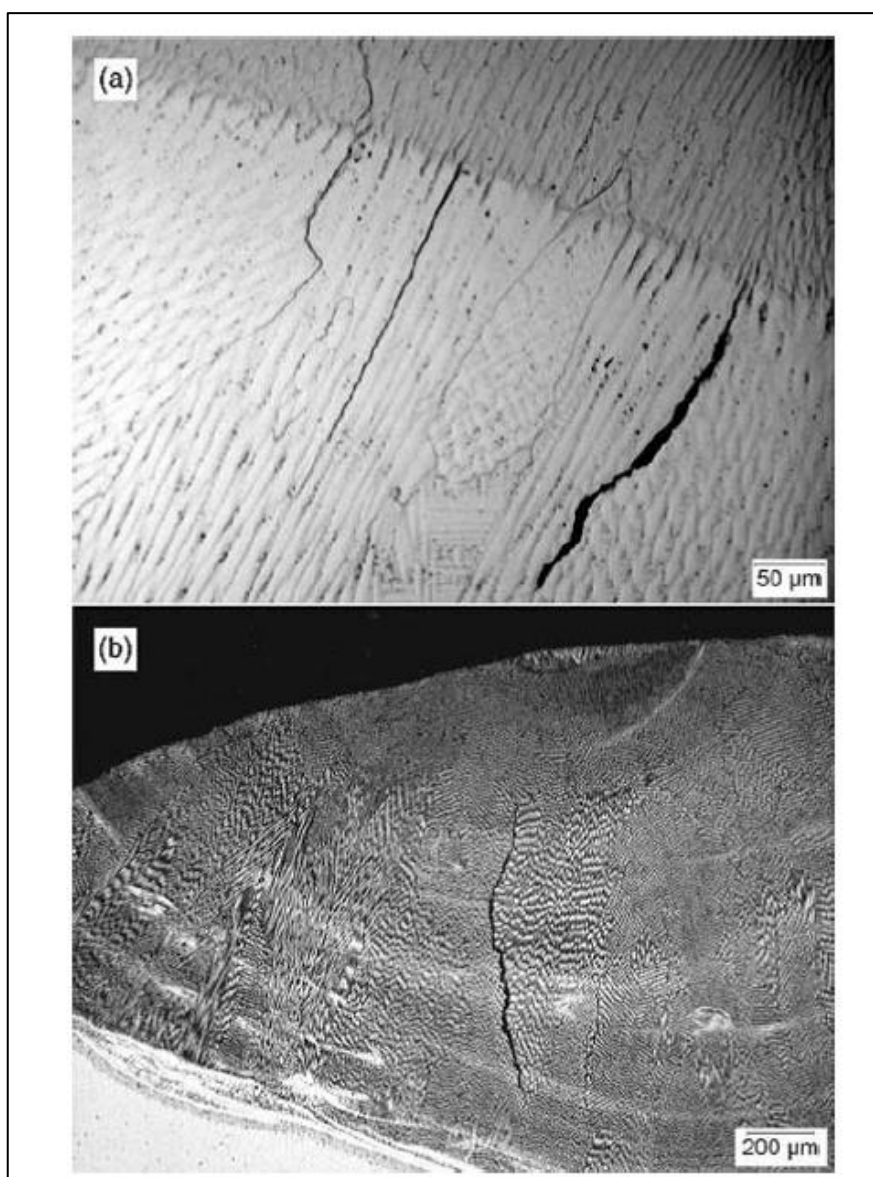


Figura 2.4: Exemplo de trinca de solidificação de solda entre Inconel Filler Metal 52M (ERNiCrFe) e (a) aço carbono A36 e (b) aço inox Tipo 304L.

2.4.2 Soldagem de materiais dissimilares

A soldagem de materiais dissimilares tem conquistado um importante espaço dentro das atividades de construção e reparo de equipamentos para as indústrias nucleares e de petróleo e gás natural. As características intrínsecas de algumas classes de matérias, como aços inoxidáveis e ligas de Ni, que possuem excelente resistência mecânica e à corrosão em alta temperatura, têm motivado o seu uso crescente. Entretanto, seu alto custo inviabiliza sua aplicação na forma de componentes maciços. Isto posto, torna-se de grande aplicação o revestimento de equipamentos de forma a minimizar a quantidade de material aplicado e consequentemente o custo.

Na indústria, os equipamentos são comumente construídos em aço C-Mn ou baixa liga e revestidos internamente com chapas cladeadas, chapas soldadas (linning) ou mesmo pela deposição de diversos cordões de solda formando uma camada (weld overlay) [12]. Em geral, os materiais aplicados nestes revestimentos são aços inoxidáveis austeníticos e ferríticos. Contudo, o crescente aumento da corrosividade dos petróleos produzidos tem justificado o uso de materiais mais resistentes à corrosão, como ligas de Ni.

Um dos problemas encontrados na soldagem dissimilar entre ligas de Ni e aços C-Mn e baixa liga é a formação de uma região com alta dureza, localizada preferencialmente na interface revestimento/substrato, cuja microestrutura é geralmente martensítica [11]. Assim, estas regiões podem constituir um ponto crítico para a nucleação e crescimento de trincas. ROWE et al (1999) citam que estas regiões podem tornar-se sensíveis ao acúmulo de hidrogênio na interface, promovendo o fenômeno de trincas induzidas por hidrogênio (Figura 2.5) [13].

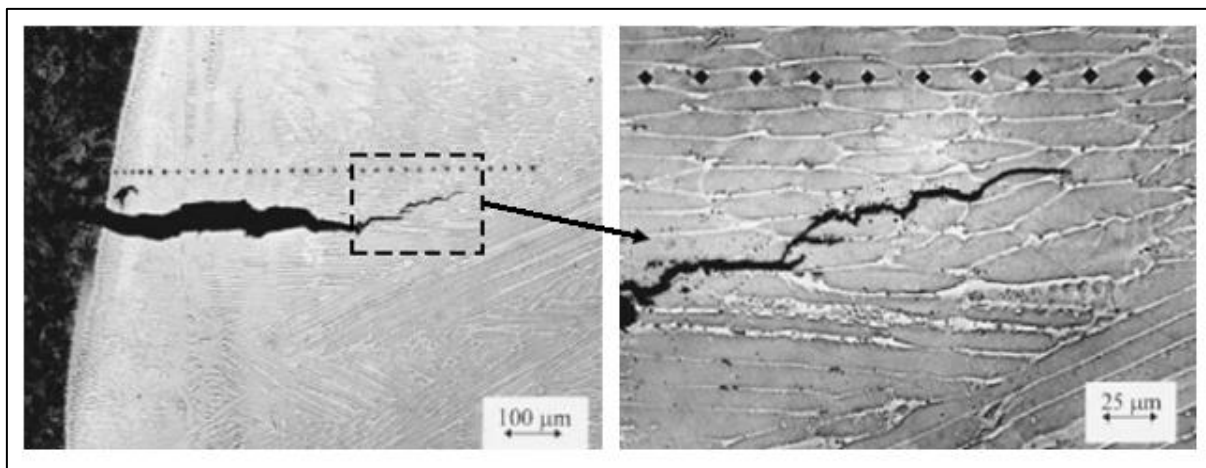


Figura 2.5: Trinca induzida por hidrogênio em metal de solda inoxidável.

2.5 SOLDAGEM DE REVESTIMENTO

A obtenção de revestimento através da deposição de múltiplos cordões de solda dispostos lado a lado de forma a produzir uma ou mais camadas de metal com características específicas sobre um substrato para proporcionar propriedades desejadas à superfície que não são inerentes ao metal de base (ou restaurar a dimensão original de uma peça ou componente) constitui uma grande aplicação dos processos de soldagem a arco voltaico. Inúmeros processos de soldagem têm sido aplicados para tal finalidade, dentre eles destacam-se o eletrodo revestido, arco submerso, MIG/MAG, arame tubular, TIG com alimentação de arame, plasma com arco transferido e alimentação de pó, dentre outros [5].

A soldagem de revestimento, definida internacionalmente como weld overlay pode ser classificada de acordo com o objetivo específico do revestimento a ser depositado. Revestimentos do tipo weld cladding correspondem a deposição de uma ou mais camadas de material resistente a corrosão, em geral, com espessura mínima de 3 mm. Quando o recobrimento da superfície é realizado com um material duro e resistente ao desgaste com o objetivo de reduzir a perda de material por abrasão, erosão, escamação, cavitação ou outro mecanismo de desgaste, o termo aplicado é o hardfacing. O termo usado para denotar a deposição de um metal de solda sobre a superfície de um metal de base para restaurar seus requerimentos

dimensionais é buildup. Já o termo buttering refere-se a deposição de uma ou mais camadas de metal de solda sobre as faces de uma junta com o propósito de assegurar alguns aspectos metalúrgicos antes do preenchimento da junta, sendo esta uma prática comum na união de materiais dissimilares [1].

2.5.1 Diluição

A grande diferença entre os processos de união e de revestimento de materiais está na importância dada ao controle da diluição, a qual pode ser definida como o grau de mistura entre o metal de base e o metal de solda ou a contribuição do metal base ou substrato para a formação da zona fundida (Figura 2.6).

Na soldagem de juntas, emprega-se uma combinação de parâmetros de soldagem que resulte em boa penetração sem qualquer preocupação com o nível de diluição. Diferentemente do que se busca na união de materiais, a soldagem de revestimento tem como preocupação primordial a deposição de cordões com geometria favorável, ou seja, baixa penetração, alto reforço e largura, resultando num cordão com baixa diluição. O controle da diluição é primordial para a garantia das propriedades do revestimento, especialmente resistência à corrosão.

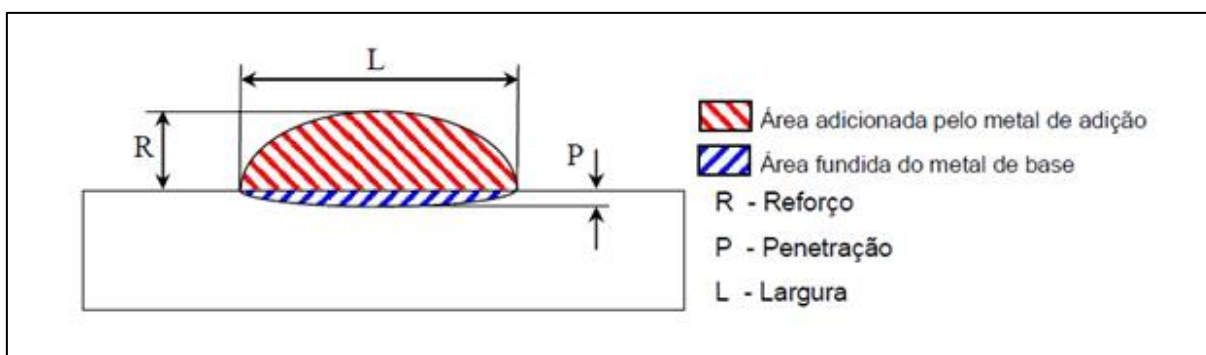


Figura 2.6: Desenho esquemático das características geométricas e diluição para um cordão de solda.

GITTOS & GOOCH (1996) estudaram a resistência à corrosão por pites de revestimentos de uma liga de Ni depositadas sobre aço C-Mn pelos processos eletrodo revestido, MIG/MAG e TIG com adição de arame quente variando os parâmetros para obter vários níveis de diluição. Os autores verificaram que a resistência à corrosão por pites foi reduzida com o aumento da diluição. Os resultados conduziram a uma recomendação geral de que o teor de ferro na solda deve estar abaixo de 5% para garantir uma ótima performance [16].

Neste mesmo contexto, Normas Internacionais para construção de equipamentos voltados para o setor petróleo e gás especificam os teores máximos de ferro em revestimentos depositados por solda. Segundo a norma ISO 10423 (2003), os teores de ferro podem ser enquadrados em duas categorias: FE 5, para teores de ferro (% em massa) igual ou inferiores a 5%; FE 10, para revestimentos que apresentam teores de ferro igual ou inferior a 10% e superior à 5%. Estas considerações são referentes a revestimentos com a liga Inconel 625, medidos a 3 mm da superfície original do metal de base.

Quanto à espessura, a Norma Petrobras N1707 que regulamenta o projeto e a construção de equipamentos com revestimento metálico interno de aços inoxidáveis, níquel e ligas de níquel, tanto para chapas cladeadas quanto para tiras soldadas (lining) e deposição de soldas (weld overlay), recomenda uma espessura mínima de 3 mm para revestimentos depositados por soldagem. A norma exige ainda que a deposição seja realizada em mais de uma camada para evitar a contaminação por ferro.

2.6 EDS - ESPECTROSCOPIA DE RAIOS-X DISPERSIVO EM ENERGIA

O EDS é um acessório essencial no estudo de caracterização microscópica de materiais. Quando o feixe de elétrons incide sobre um mineral, os elétrons mais externos dos átomos e os íons constituintes são excitados, mudando de níveis energéticos. Ao retornarem para sua posição inicial, liberam a energia adquirida a qual é emitida em comprimento de onda no espectro de raios-x. Um detector

instalado na câmara de vácuo do MEV mede a energia associada a esse elétron. Como os elétrons de um determinado átomo possuem energias distintas, é possível, no ponto de incidência do feixe, determinar quais os elementos químicos estão presentes naquele local e assim identificar em instantes que mineral está sendo observado. O diâmetro reduzido do feixe permite a determinação da composição mineral em amostras de tamanhos muito reduzidos (menor que 5 microns), permitindo uma análise quase que pontual.

O uso em conjunto do EDS com o MEV é de grande importância na caracterização metalográfica de materiais. Enquanto o MEV proporciona nítidas imagens (ainda que virtuais, pois o que se vê no monitor do computador é a transcodificação da energia emitida pelas partículas, ao invés da radiação emitida pela luz, ao qual estamos habitualmente acostumados), o EDS permite sua imediata identificação. Além da identificação mineral, o equipamento ainda permite o mapeamento da distribuição de elementos químicos por minerais, gerando mapas composicionais de elementos desejado.

3 MATERIAIS E METODOLOGIA

3.1 MATERIAIS

Para a realização deste trabalho foi empregados materiais denominados de metal de adição, metal de base e gás de proteção. O metal de adição de liga de Níquel constituiu o objeto principal de estudo deste trabalho. A liga foi adquirida na forma de pó.

O metal de base utilizado como substrato para a deposição da liga de Ni foram barras de aço ASTM A36 usado tanto nos testes preliminares quanto na etapa do ensaio definitivo de soldagem do cordão isolado. Como gás proteção, o Argônio puro - composição de 99.99%.

Tabela 3.1: Composição metal de adição.

Item	Composição (peso %)							
INCONEL 625	Ni	C	Cr	Mo	W	Fe	Al	Ti
	64,43	0,011	22,2	9,13	-	0,19	0,09	0,23
	Nb	Mn	Si	Cu	Co	V	P	S
	3,53	0,01	0,05	0,01	0,03	-	0,002	0,002

Tabela 3.2: Composição metal base.

Item	Composição (peso %)							
ASTM A36	Ni	C	Cr	Mo	Fe	Al	Mn	Si
	0,02	0,23	0,02	-	Bal.	0,03	0,67	0,09

3.2 EQUIPAMENTOS

A seguir estão listados os equipamentos utilizados para preparação dos corpos de prova para análise:

- Equipamento para corte metalográfico Struers - Labotom-3.
- Fresadora CNC.
- Lixadeira rotativa Struers
- Soprador térmico.
- Limpador Ultrassom.
- Paquímetro digital.
- Régua metálica.
- Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) Karl Zeiss EVO 40.

3.3 METODOLOGIA

No presente trabalho foi utilizado o processo de soldagem Plasma Pó. A metodologia empregada consistiu em uma etapa preliminar para determinar quais os melhores parâmetros de soldagem com a finalidade de obter resultados satisfatórios para a deposição de revestimentos de ligas de níquel sobre aço, estabelecendo como critério de aceitação a ausência de defeitos no cordão de solda, as menores razões reforço/largura, e os menores níveis de diluição, preferencialmente abaixo de 5%, mas considerando-se aceitáveis níveis de diluição menores ou igual a 10 %.

Após os ensaios preliminares, foram definidas as condições de soldagem para a realização dos ensaios definitivos. Para a realização desta etapa, alguns parâmetros foram mantidos constantes (tabela 3.3). O metal de adição utilizado foi o Inconel 625 em pó depositado sobre uma barra de aço ASTM A36 e gás de proteção Argônio puro.

Tabela 3.3: Parâmetros e os respectivos valores mantidos constantes.

Parâmetros	
Plasma (l/min)	2,5
Frequência (Hz)	0,6
Arraste (l/min)	2,7
Eletrodo 2% tório	30°
Velocidade transversal (cm/min)	142
Gás de proteção (l/min)	12
Tempo (s)	110
Comprimento corpos de provas (mm)	220
Largura (mm)	100

Tabela 3.4: Parâmetros usados na soldagem das peças definitivas.

Amostra	Corrente (A)	Taxa aliment. (Kg/h)	DBCP (mm)	Recuo (mm)
T1	168	3,79	18	2,0
T2	168	3,79	18	2,7
T3	168	3,79	21	2,0
T4	168	3,79	21	2,7
T5	168	4,61	18	2,0
T6	168	4,61	18	2,7
T7	168	4,61	21	2,0
T8	168	4,61	21	2,7
T9	183	3,79	18	2,0
T10	183	3,79	18	2,7
T11	183	3,79	21	2,0
T12	183	3,79	21	2,7
T13	183	4,61	18	2,0
T14	183	4,61	18	2,7
T15	183	4,61	21	2,0

3.3.1 Preparação das amostras definitivas

A partir dos resultados obtidos do ensaio definitivo de cordão isolado, fora disponibilizado para o estudo desse trabalho amostras para serem preparadas, mostradas na Figura 3.1 e Figura 3.2. Utilizando equipamento de corte por abrasão Labotom-3 da Struers (Figura 3.3) com o disco de abrasão AROTEC AA-4, obteve-se, por cortes transversais, as amostras com dimensão aproximada de 20mm x 20mm.



Figura 3.1: Imagem da amostra definitiva T5 da seção transversal (esquerda) e da vista superior (direita).

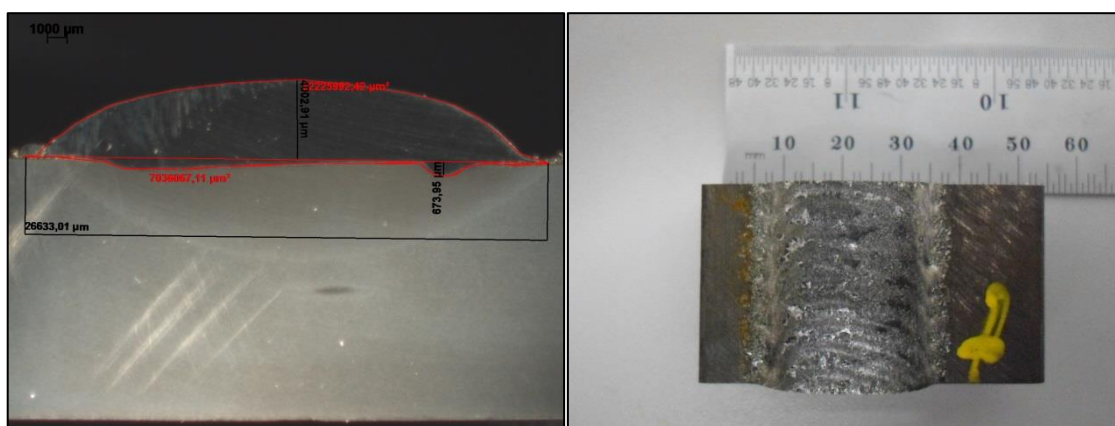


Figura 3.2: Imagem da amostra definitiva T7 da seção transversal (esquerda) e da vista superior (direita).

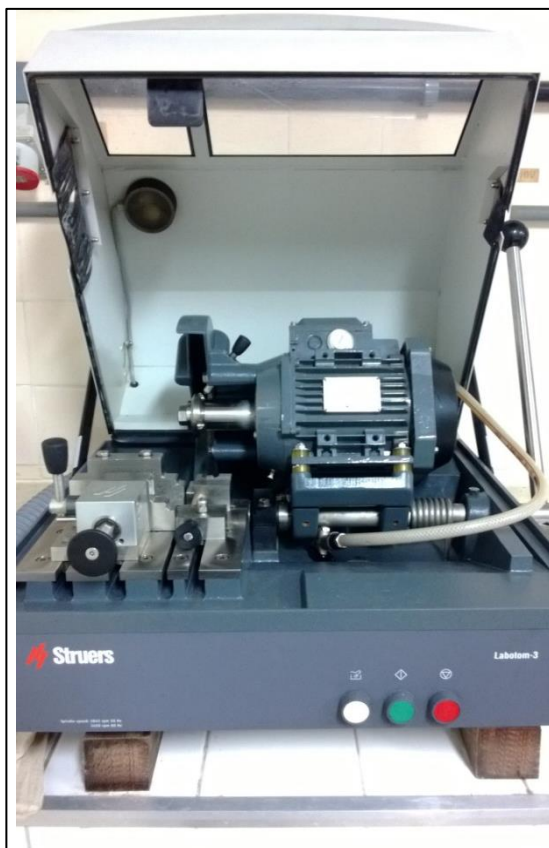


Figura 3.3: Equipamento de corte por abrasão Labotom-3 da Struers.

A etapa seguinte consistiu em utilizar o laboratório de Usinagem da UFES para fazer a fresagem de topo com a finalidade de deixar as amostras com o revestimento de no mínimo 3mm e todas as amostras com a mesma altura total. Esta etapa se fez necessária visando trabalhos futuros onde será feita análise de cavitação no revestimento.

Com as amostras já cortadas e fresadas, a etapa posterior consistiu no lixamento utilizando uma lixadeira rotativa (Figura 3.4) e lixas com granulações de 220, 320, 400, 500, 600 e 1200, seguido de polimento com alumina 1 μ m. Fora utilizado a limpeza por ultrassom (Figura 3.5) para retirada completa de alumina remanescente.



Figura 3.4: Lixadeira Rotativa.



Figura 3.5: Equipamento de limpeza por ultrassom.

3.3.2 Microscopia Eletrônica

A análise por microscopia eletrônica de varredura (MEV) utilizou o equipamento Karl Zeiss EVO 40 do Laboratório de Caracterização de Superfícies de Materiais (LCSM) para análise EDS, da qual fora realizada para determinar qualitativamente o comportamento da diluição do elemento Fe no revestimento de Inconel 625.

O processo da análise consistiu inicialmente na limpeza das amostras no ultrassom a fim de eliminar impurezas remanescentes na superfície a ser analisada. Em seguida, utilizando o software para localizar a melhor imagem, definiu-se que a análise seria feita no centro da solda, observando a separação das interfaces (revestimento e metal base). Utilizou-se a ferramenta LineScan (varredura linear) para obter o comportamento da diluição do Fe no revestimento, adotando o comprimento desta linha sendo 1mm acima da interface de separação das regiões e 100 μ m abaixo.

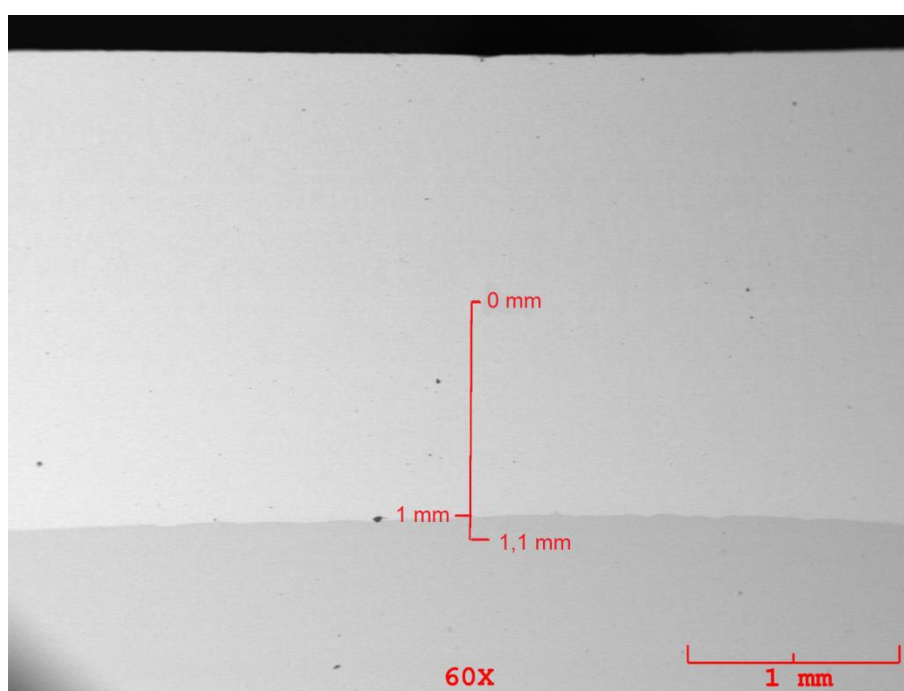


Figura 3.6: Imagem da amostra T7 gerada pelo MEV usando o método de análise EDS LineScan (Varredura Linear).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão abordados os resultados obtidos das análises feitas nas amostras dos ensaios definitivos dos quais geraram um cordão isolado. Esta análise também se baseia nos resultados obtidos no trabalho do aluno Lazaro Coutinho (Tabela 4.1) que estudou o comportamento operacional e as características geométricas da soldagem de revestimento pelo processo PTA-P, adquirindo os resultados: Largura (L), Reforço (R), Índice de convexidade, Diluição (D) e Penetração máxima. Estes resultados foram obtidos com a aquisição de imagens a partir do MEV e softwares para análise geométrica.

As condições adequadas que resultam em uma camada de revestimento com boa qualidade são aquelas que tendem a minimizar os níveis de diluição (D), menores valores da razão entre o reforço e largura (R/L), e consequentemente, baixos valores do produto entre diluição (D) e índice de convexidade (R/L) [15]. Estes três fatores aliados à análise química do revestimento são bons critérios para avaliar os resultados obtidos, visto que a diluição está diretamente relacionada a alterações na composição química do mesmo.

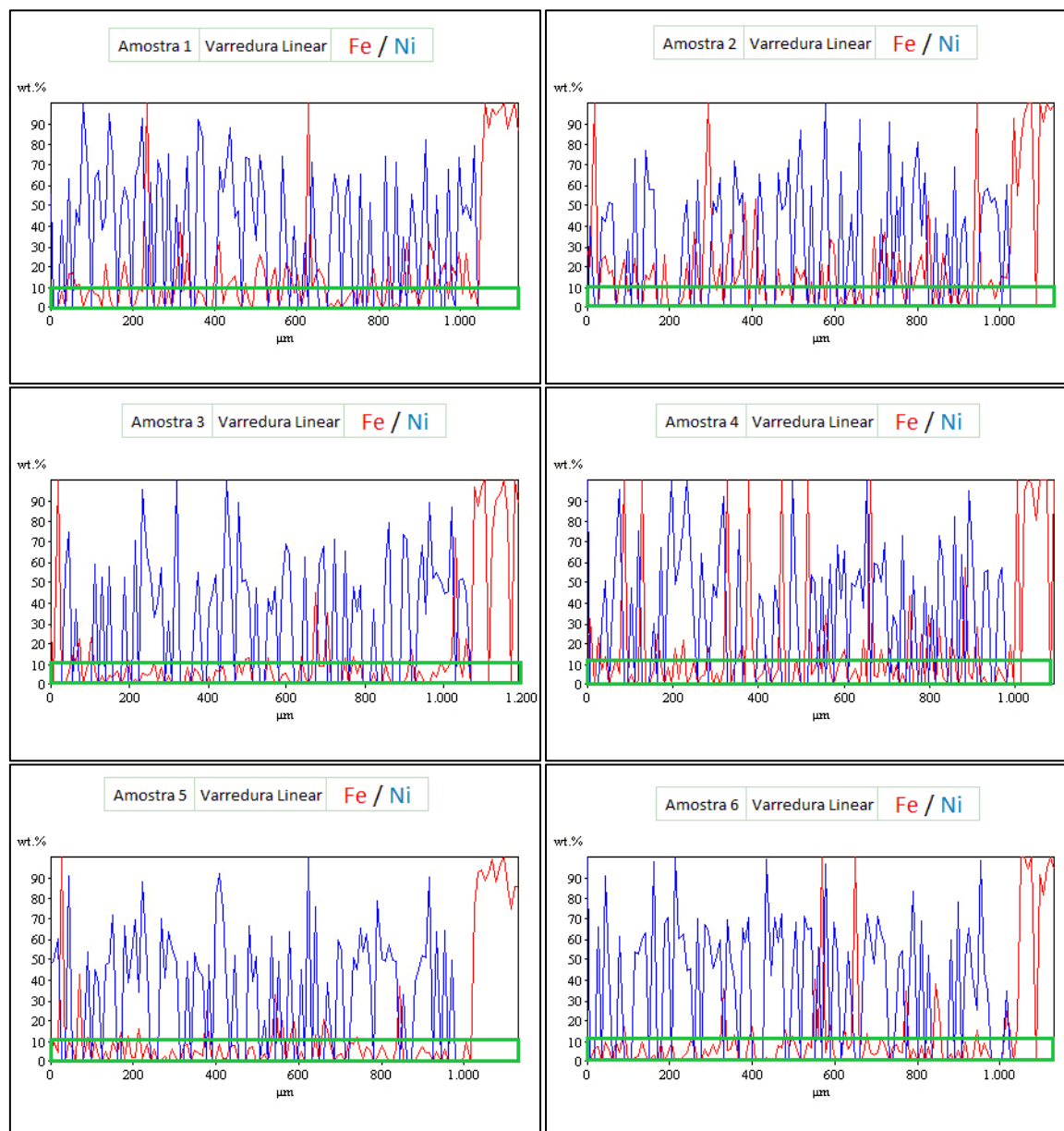
Através dos estudos de GITTOS & GOOCH (1996), a resistência à corrosão por pites em revestimentos de uma liga de Ni depositada por diversos processos de soldagem (MIG/MAG, TIG, ER) diminuía quando se constatava o aumento da diluição. Os resultados conduziram a uma recomendação de teor de Fe abaixo de 5% para garantir um ótimo desempenho do revestimento. Ainda neste contexto, assim como abordado na revisão bibliográfica, a norma ISO 10423 (2003), do qual é voltada para o setor de petróleo e gás, recomenda que teores de ferro não ultrapassem os 10% em peso referentes as ligas de Inconel 625, medidos a 3mm da superfície original do metal base.

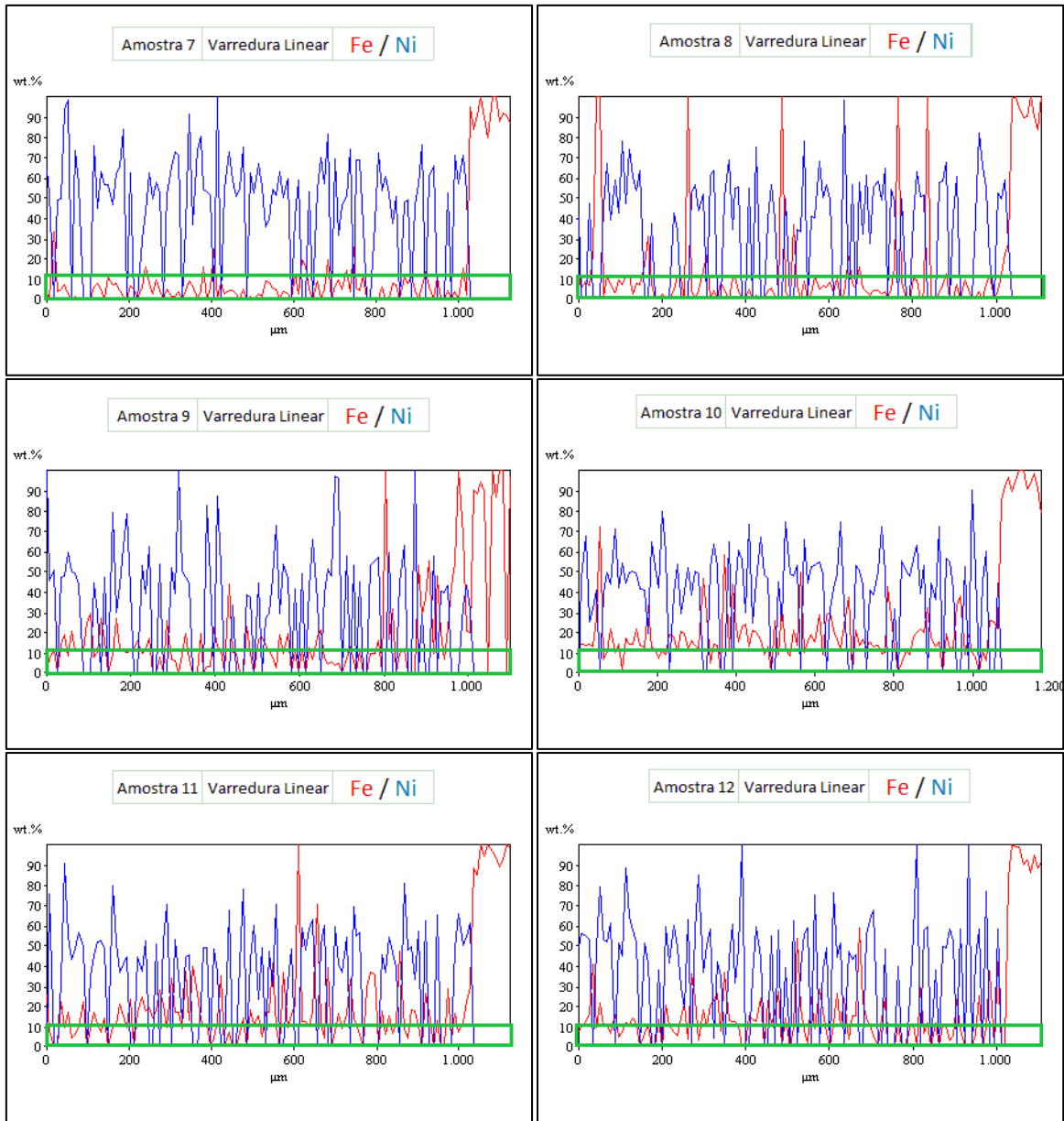
Tabela 4.1: Resultados das soldagens pelo processo PTA-P.

	Corrente (A)	Taxa de alimen. (Kg/h)	DBCP (mm)	Recuo (mm)	Dep. (g)	Rend (%)	Largura (mm)	Reforço (mm)	R/L	Diluição (%)	D x R/L	Penet. Máxima (mm)
T1	168	3,79	18	2,0	87,1	76,88	21,33	3,64	0,17	3,28%	0,56	0,373
T2	168	3,79	18	2,7	100,1	82,86	22,58	3,81	0,17	9,66%	1,63	0,843
T3	168	3,79	21	2,0	101,3	86,80	22,86	3,8	0,17	9,51%	1,58	0,768
T4	168	3,79	21	2,7	99	91,33	23,34	3,63	0,16	5,20%	0,81	0,768
T5	168	4,61	18	2,0	120,4	83,67	23,8	4,25	0,18	2,55%	0,45	0,5
T6	168	4,61	18	2,7	124,2	86,85	23,21	4,52	0,19	4,07%	0,79	0,576
T7	168	4,61	21	2,0	124,7	88,50	23,96	4,38	0,18	3,70%	0,68	0,346
T8	168	4,61	21	2,7	128	90,91	23,51	4,47	0,19	6,50%	1,23	0,864
T9	183	3,79	18	2,0	95,5	75,14	21,88	3,63	0,17	9,92%	1,65	0,826
T10	183	3,79	18	2,7	105,9	93,55	22,88	3,77	0,16	13,89%	2,29	0,999
T11	183	3,79	21	2,0	105,5	88,80	23,48	3,85	0,16	14,84%	2,43	1,018
T12	183	3,79	21	2,7	106,4	92,60	23,13	3,91	0,17	16,42%	2,78	1,325
T13	183	4,61	18	2,0	117,1	84,86	22,5	4,25	0,19	7,95%	1,5	0,837
T14	183	4,61	18	2,7	119,3	88,44	23,72	4,44	0,19	13,27%	2,48	1,471
T15	183	4,61	21	2,0	130,5	90,81	24,24	4,61	0,19	12,35%	2,35	1,189

4.1 AVALIAÇÃO DO TEOR DE FERRO NO REVESTIMENTO

Após a preparação das peças de acordo com a metodologia apresentada neste trabalho, utilizou-se a técnica EDS por Varredura Linear para avaliar o teor presente no revestimento. Os resultados obtidos estão apresentados na Figura 4.1.





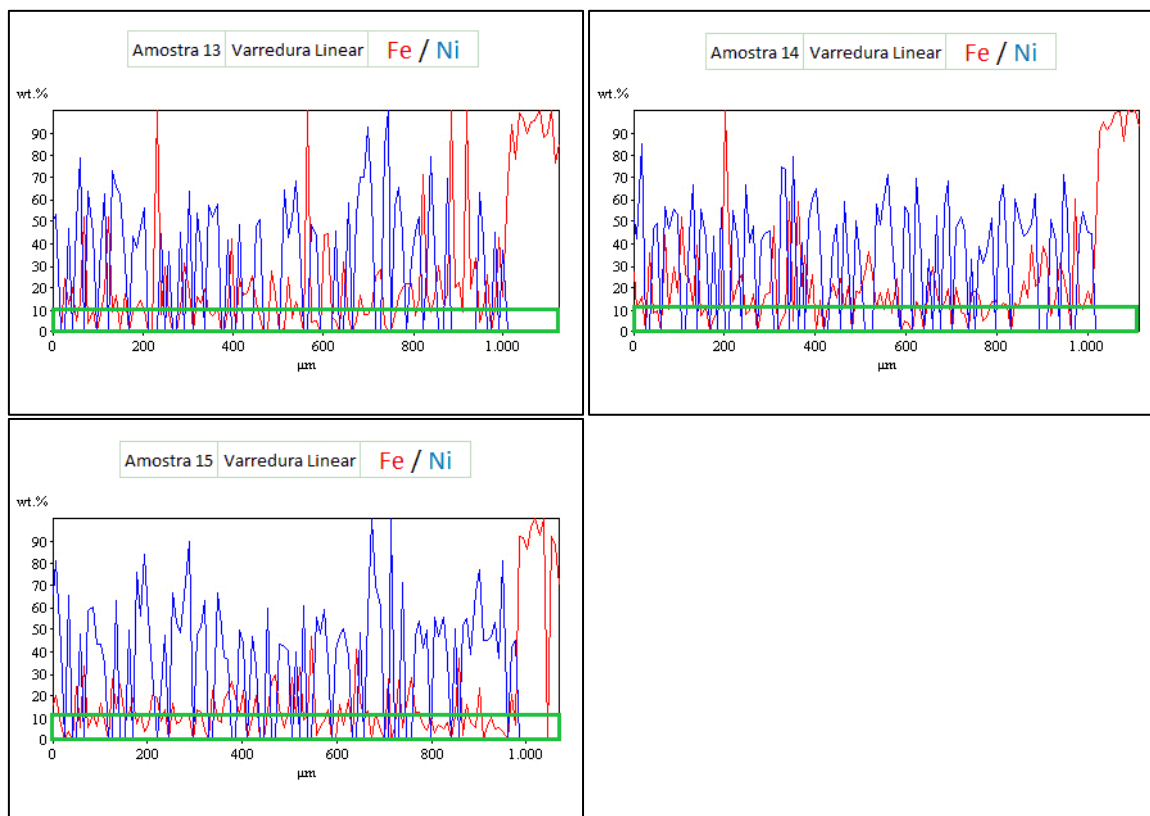


Figura 4.1: Resultados da análise EDS para avaliar a % em peso (wt %) de ferro e níquel no revestimento de Inconel 625.

A Figura 4.2 demonstra os pontos iniciais e finais da análise EDS por Varredura linear, começando a 1mm acima da interface revestimento/substrato e terminando 0,1mm abaixo desta mesma interface.

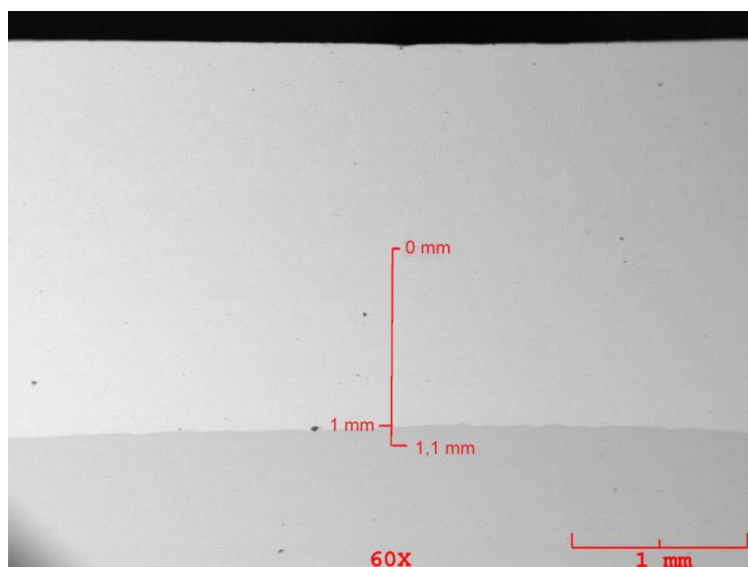


Figura 4.2: Amostra T7 – Imagem da análise EDS por Varredura Linear no MEV.

Nos gráficos gerados pelo software usado na análise EDS, foi destacada a região de 0% a 10% em peso, que pela norma é uma região aceitável de teor de Fe no revestimento. Como a técnica de varredura linear não se mostrou muito precisa em demonstrar o valor exato da % em peso de Fe, a análise baseou-se em verificar as amostras que possuem o teor de Fe, e a sua variação gráfica, dentro da margem especificada.

Com foco nos resultados que apresentem a variação do teor de ferro compreendido na faixa estipulada como aceitável, observa-se que as amostras T3, T5, T6, T7 e T8 se enquadram ou se aproximaram bastante deste requisito. É importante notar que estas amostras também possuem baixa diluição (abaixo de 10%), apresentados na Tabela 4.1, o que comprova que a diluição está relacionada com o teor de Fe presente no revestimento. Por outro lado, nota-se que mesmo possuindo uma baixa diluição, as amostras T1(3,3%), T4 (5,2%), T13 (7,9%) possuem teores de Fe acima de 10% aceitos pela norma.

Partindo da análise feita baseada nos gráficos gerados, as amostras T3, T5, T6, T7 e T8 mostraram os melhores resultados. Com isso, uma análise mais precisa foi feita novamente no MEV para estas amostras, porém agora usando a técnica EDS de Varredura por área. Essa análise foi feita seguindo o padrão anterior, ou seja, uma área a uma distancia de 1mm da interface revestimento/substrato. Os resultados obtidos estão demonstrados na Tabela 4.2. A Figura 4.3 demonstra a região analisada no revestimento.

Tabela 4.2: Resultados da análise química por EDS de Varredura por área.

Amostra	Revestimento de Inconel 625 (% em peso)				
	Fe	Ni	Cr	Mo	Nb
T3	5,7%	53,2%	18,9%	12,6%	6,4%
T5	2,7%	56,4%	20,2%	13,6%	6,4%
T6	3,3%	56,2%	19,9%	13,5%	6,1%
T7	2,5%	57,8%	20,4%	13,2%	5,6%
T8	4,4%	55,7%	19,8%	13,2%	6,5%

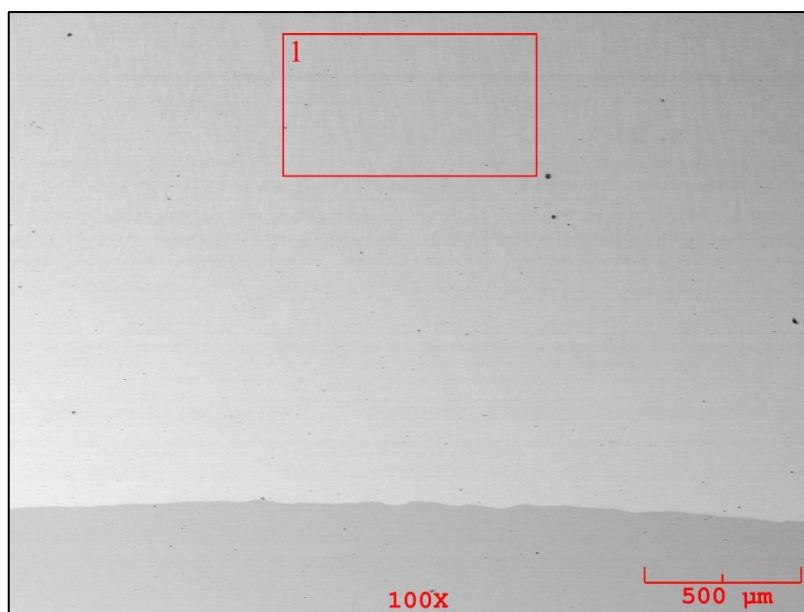


Figura 4.3: Imagem obtida no MEV da amostra T5 demonstrando a região 1, localizada no revestimento, analisada por EDS.

Estes resultados indicam que é possível depositar revestimentos a base de Ni em uma única camada a alcançar níveis de diluição e teores de Fe dentro das faixas estabelecidas pelas normas internacionais. Isso mostra que o processo PTA-P é uma boa opção para soldagens destinadas a aplicações de revestimentos.

GITTOS & GOOCH (1996) avaliaram o efeito da diluição e, conseqüentemente, do teor de Fe na soldagem de revestimentos dissimilares entre a liga Inconel 625 e um substrato de aço C-Mn. As análises consistiram de ensaios de imersão em solução aquosa de FeCl_3 variando a temperatura para determinação da temperatura crítica de pite, segundo a norma ASTM G-48. Os resultados mostraram haver uma correlação entre a diluição e a resistência à corrosão por pites, sendo recomendado que o teor de Fe seja limitado ao máximo de 5%.

5 CONCLUSÃO

No presente trabalho, demonstraram-se alguns aspectos que fazem com que o processo de soldagem PTA-P seja uma boa opção para soldagem de revestimento com liga de Ni como metal de adição, especialmente para a indústria petrolífera, da qual grande parte do custo de manutenção é devido a problemas provenientes da corrosão. Esse processo se torna uma viável escolha, do ponto de vista operacional, devido ao fato de resultar em revestimentos com baixa diluição - valores em torno de 5% - com deposição de apenas uma camada.

Destaca-se que com níveis de diluição em torno de 5%, constatou-se também que é possível alcançar baixos teores de Fe presentes no revestimento. Tal fato se torna importante, pois cumpre as exigências das normas quanto ao teor máximo de Fe (ISO 10423, 2009).

Outra constatação foi a espessura do revestimento, que também cumpre com a norma da Petrobras N-1707, da qual diz que os revestimentos depositados por soldagem devem possuir espessura mínima de 3mm. Sendo assim, não há a necessidade de haver sobreposição de cordões de solda. Com apenas uma camada já se cumpre com os itens das normas para este tipo de operação, além de contribuir para a diminuição do uso do metal de adição e consequentemente a redução dos custos.

REFERÊNCIAS

- [1] ASM. *Asm Specialty Handbook: Nickel, Cobalt, and Their Alloys*. New York, USA: ASM International, First Edition, 2000.
- [2] SIMS, C. T.; HAGEL, W. C. *The Superalloys*. New York, USA: John Wiley and Sons
- [3] BROOKS, C. R. *Heat Treatment, Structure and Properties of Nonferrous Alloys*. Ohio: ASM, Metals Park, 1982.
- [4] CALLISTER, W. D. *Ciência e Engenharia de Materiais*. LTC, 5ed.
- [5] ASM. *ASM Nickel and nickel alloys: Properties and selection of nonferrous alloys and special-purpose materials*. ASM International, Metals Park, Ohio, 1990.
- [6] HONGYING, W. e. a. *Investigation on the deposition rate and the dilution ratio of plasma surface welding*. China Welding, 2012.
- [7] BEWLEY, J. *Plasma-transferred-arc wearfacing*. 1980.
- [8] SHUBERT, G. *Wearsurfacing with PTA: Tips for the First-time User. Tooling and Production*, nov, 1984.
- [9] WAHL, W.; KRAUSKOPF, F. *Plasma-arc Powder Surfacing of Ferrous Materials. Welding and Cutting*, fev,1993.
- [10] HONGYING, W. et al. *Investigation on the deposition rate and the dilution ratio of Plasma surface welding*. China Welding, 2002.

- [11] KEJELIN, N. Z. *Influência dos parâmetros de soldagem sobre a formação das zonas parcialmente diluídas em solda de materiais dissimilares*. Dissertação (mestrado em engenharia) PPGCM, Universidade Federal de Santa Catarina, 2005.
- [12] SILVA CC, RAMOS JR, ALMEIDA NETO, SANT'ANA HB, FARIAS JP, *Corrosion resistance evaluation of the stainless steels used as petroleum distillation column coating*. Petro&Quimica, 2006.
- [13] ROWE, M. D., NELSON, T. W., LIPPOLD, J. C. *Hydrogen-induced cracking along the fusion boundary of dissimilar metal welds*. Welding Journal. 1999.
- [14] [6] DUPONT.J.N.; LIPPOLD.J.C.; KISER.S.D., *Welding metallurgy and weldability of nickel-base alloys*, 2009.
- [15] SILVA, Cleiton C. *Tese de Doutorado: Revestimentos de Ligas de Níquel Depositados pelo Processo TIG com Alimentação de Arame Frio – Aspectos Operacionais e Metalúrgicos*. Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2010, 355p.
- [16] GITTOS, M. F., GOOCH, T. G. Effect of iron dilution on corrosion resistance of Ni-Cr Alloy cladding. Welding Journal. P.461-472. 1996
- [17] HAYES, J.R., GRAY, J.J., SZMODIS, A.W., ORME, C.A. *Influence of Chromium and Molybdenum on the Corrosion of Nickel-Based Alloys*. Corrosion, USA, v. 62, n. 6, p. 491-500, jun. 2006.